

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO
GRANDE DO NORTE

RAFAEL BRUNO OLEGARIO FIGUEIREDO

**ZONA HABITÁVEL GALÁCTICA: RISCOS E OPORTUNIDADES
QUE CONDICIONAM A EXISTÊNCIA DE AMBIENTES
POTENCIALMENTE HABITÁVEIS EM MUNDOS TELÚRICOS
NA VIA LÁCTEA**

MACAU 2026

**ZONA HABITÁVEL GALÁCTICA: RISCOS E OPORTUNIDADES
QUE CONDICIONAM A EXISTÊNCIA DE AMBIENTES
POTENCIALMENTE HABITÁVEIS EM MUNDOS TELÚRICOS
NA VIA LÁCTEA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso Licenciatura em
Biologia do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do Rio
Grande do Norte, em cumprimento às
exigências legais como requisito parcial à
obtenção do título de Licenciado em
Biologia.

Orientador: Dr. Matheus Rovere de Moraes

Figueiredo, Rafael Bruno Olegario.

F475z Zona habitável galáctica: riscos e oportunidades que condicionam a existência de ambientes potencialmente habitáveis em mundos telúricos na Via Láctea. / Rafael Bruno Olegario Figueiredo. – 2026.
40 f. il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Macau, 2026.

Orientador(a): Prof. Dr. Matheus Rovere de Moraes.

1. Astrobiologia. 2. Habitabilidade. 3. Via Láctea. 4. Estabilidade. 5. Planetas. I Título.

SIBi/IFRN

CDU: 524.6:574

**ZONA HABITÁVEL GALÁCTICA: RISCOS E OPORTUNIDADES
QUE CONDICIONAM A EXISTÊNCIA DE AMBIENTES
POTENCIALMENTE HABITÁVEIS EM MUNDOS TELÚRICOS
NA VIA LÁCTEA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso Licenciatura em
Biologia do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do Rio
Grande do Norte, em cumprimento às
exigências legais como requisito parcial à
obtenção do título de Licenciado em
Biologia.

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado em ____/____/____ pela seguinte
Banca Examinadora:

(Presidente) **Dr. Matheus Rovere de Moraes**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

(Examinador interno) **Me. Carlos Allan de Souza Oliveira**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

(Examinadora interna) **Ma. Maria Zelandia Rocha Silva**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Matheus Rovere de Moraes, pela disponibilidade e excelente orientação.

Aos professores participantes da banca examinadora pelas valiosas colaborações e sugestões, Sr. Carlos Allan de Souza Oliveira e Sra. Maria Zelandia Rocha Silva, e a todos aqueles que se fizeram presentes durante esta parte da minha trajetória acadêmica.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo analisar o conceito de habitabilidade galáctica na Via Láctea, com ênfase na influência da variação massiva de corpos estelares e a proximidade entre eles como fatores determinantes para a existência e manutenção de ambientes potencialmente habitáveis. O estudo se insere bibliograficamente no campo da astrobiologia, ciência interdisciplinar que investiga as condições necessárias para o surgimento da vida em diferentes escalas cósmicas. Partindo da noção de zona habitável planetária, o trabalho amplia o escopo da análise para o contexto galáctico, como densidade estelar, radiação e dinâmica orbital. Nas porções internas do disco galáctico, próximas ao núcleo, observa-se alta concentração de estrelas massivas, maior taxa de supernovas e intensa emissão de radiação gama e raios cósmicos, condições que tendem a tornar essas regiões hostis à estabilidade de sistemas planetários e à preservação de atmosferas. Por outro lado, dados comprovam que regiões mais afastadas, mas não extremamente dispersas, tendem a apresentar menos risco a estabilidade de planetas e luas. Assim, a pesquisa mostra como a distância e a densidade entre os corpos estelares tornam-se parâmetros críticos: regiões muito densas elevam o risco de perturbações gravitacionais e eventos destrutivos, enquanto regiões muito dispersas reduzem a probabilidade de formação planetária.

Palavras-chave: astrobiologia; habitabilidade; via láctea; estabilidade; planetas.

ABSTRACT

This work aims to analyze the concept of galactic habitability in the Milky Way, emphasizing the influence of the massive variation of stellar bodies and their proximity as determining factors for the existence and maintenance of potentially habitable environments. The study is bibliographically situated within the field of astrobiology, an interdisciplinary science that investigates the conditions necessary for the emergence of life at different cosmic scales. Starting from the notion of a planetary habitable zone, the work expands the scope of the analysis to the galactic context, considering factors such as stellar density, radiation, and orbital dynamics. In the inner portions of the galactic disk, close to the nucleus, a high concentration of massive stars, a higher rate of supernovae, and intense emission of gamma radiation and cosmic rays are observed conditions that tend to make these regions hostile to the stability of planetary systems and the preservation of atmospheres. On the other hand, data shows that more distant, but not extremely dispersed, regions tend to present less risk to the stability of planets and moons. Thus, the research shows how the distance and density between stellar bodies become critical parameters: very dense regions increase the risk of gravitational disturbances and destructive events, while very dispersed regions reduce the probability of planetary formation.

Keywords: astrobiology; habitability; milky way; stability; planets.

LISTA DE IMAGENS OU FIGURAS

Figura 1	Representação de fatores intergalácticos ao longo do disco da Via Láctea (1).....	26
Figura 2	Representação de fatores intergalácticos ao longo do disco da Via Láctea (2).....	27
Figura 3	Padrão teórico de variação massiva da Via láctea	28
Figura 4	Variação teórica de massa, ao longo do disco galáctico, seguindo o sentido de direção (B-N	30

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

B-N	Borda-Núcleo.
DFT	<i>Density Functional Theory</i> — Teoria do Funcional da Densidade.
DNA	Ácido desoxirribonucleico.
Kpc	Quiloparsec.
M77	Messier 77 — galáxia espiral barrada catalogada no Catálogo Messier.
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> — Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço.
UV	Ultravioleta.
VM	Variação entrópica de massa.
ZH	Zona habitável.
ZHG	Zona de Habitabilidade Galáctica.
Sa	Classificação de galáxia espiral com núcleo grande e braços bem fechados.
Sb	Classificação de galáxia espiral com núcleo e braços de características intermediárias.
Sc	Classificação de galáxia espiral com núcleo menor e braços mais abertos e longos.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	16
3. MORFOLOGIA E CARACTERÍSTICAS DE GALÁXIAS ESPIRAIS: PADRÃO DA VIA LÁCTEA	17
4. IMPLICAÇÕES DE FATORES ASTROFÍSICOS AO LONGO DO DISCO GALÁCTICO: TÉRMINO DA FASE DE SEQUÊNCIA PRINCIPAL EM ESTRELAS.....	19
4.1 Implicações das supernovas em planetas potencialmente habitáveis	19
4.1.2 Radiação de alta energia: impactos diretos sobre a atmosfera	20
4.1.3 Destruição da camada de ozônio e alterações climáticas	21
4.1.4 Alterações na composição química e efeito estufa	21
4.1.5 Efeitos a longo prazo: morte das superfícies habitáveis	22
4.1.6 A distância e a frequência de supernovas: fatores de risco	22
4.1.7 Supernovas e a evolução da vida	23
5. FATORES INTERGALÁCTICOS E ENTROPIA DE MASSA COMO VARIÁVEIS DETERMINANTES	23
6. LUAS POTENCIALMENTE HABITÁVEIS E A HABITABILIDADE GALÁCTICA	28
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33
9. GLOSSÁRIO	39

1. INTRODUÇÃO

A zona habitável pode ser definida como a região orbital ao redor de uma estrela onde os níveis de radiação e energia térmica permitem a ocorrência de formas de vida (GONZALEZ, 2005). Para Kasting, Whitmire e Reynolds (1993), a zona habitável circunstelar representa a área na qual a água se mantém em estado líquido na superfície de um planeta — condição mínima para vida baseada em carbono. Existem duas propriedades determinantes que situam uma dada região orbital como propícia à habitabilidade: a distância relativa entre o corpo planetário e a estrela e a massa estelar, que define a intensidade de sua atividade nuclear e, consequentemente, sua emissão energética (KOPPARAPU *et al.*, 2013).

A distância orbital controla a quantidade de radiação incidente sobre o planeta, influenciando diretamente sua temperatura superficial e a possibilidade de manutenção de água em estado líquido. A massa da estrela, por sua vez, determina sua luminosidade, estabilidade e tempo de vida, fatores que condicionam a extensão e a permanência da zona habitável ao longo da evolução estelar. Dessa forma, a interação entre esses dois parâmetros estabelece as condições físicas essenciais para o desenvolvimento e a manutenção de ambientes potencialmente habitáveis (SEAGER, 2013). Além disso, estudos indicam que variações na luminosidade estelar ao longo do tempo podem alterar significativamente os limites da zona habitável (GOLDEN; TARTER, 2002). Complementarmente, a interação entre atmosfera planetária e radiação estelar também desempenha papel fundamental na manutenção das condições térmicas adequadas à vida (KALTENEGGER; SASSELOV, 2011).

Todas as descrições do conceito de zona habitável são baseadas na experiência da própria realidade terrestre (LINEWEAVER *et al.*, 2004). A abundância de seres vivos conhecidos e a manutenção das condições naturais do planeta servem como parâmetro observacional. Lineweaver (2001) aponta que a Terra fornece o único exemplo comprovado de biosfera ativa, o que orienta a formulação dos modelos de habitabilidade. Até o momento, o planeta é entendido como o único corpo rochoso do sistema solar capaz de abrigar vida complexa (GONZALEZ, 2005). Nesse sentido, a análise comparativa com outros corpos planetários reforça a singularidade das condições terrestres (WARD; BROWNLEE, 2000). Ademais, a dependência de parâmetros terrestres pode limitar a compreensão de formas alternativas de vida baseadas em outras bioquímicas possíveis (BENNER; RICARDO; CARRIGAN, 2004).

Presentes no sistema solar ocorrem quatro mundos telúricos mais próximos ao Sol

(CATLING; KASTING, 2017). Embora Vênus e Marte apresentem composições químicas semelhantes à da Terra, seus ambientes divergem drasticamente em termos de habitabilidade. Como destaca Sagan (1994), Vênus apresenta um efeito estufa descontrolado, tornando sua superfície extremamente hostil. Marte, embora geologicamente parecido, possui massa muito inferior e está mais distante, condições que o tornaram um planeta frio e rarefeito (CARR, 2006). Além disso, a ausência de um campo magnético significativo em Marte contribuiu para a perda de sua atmosfera ao longo do tempo (JAKOSKY; PHILLIPS, 2001). Por outro lado, a densa atmosfera venusiana demonstra como processos climáticos extremos podem transformar completamente um planeta potencialmente habitável (TAYLOR, 2010).

Desde a pré-estruturação dos planetas rochosos, quando o sistema solar ainda era jovem, a zona habitável alterna de regiões orbitais (COCKELL, 2015). O aumento gradual da luminosidade solar, previsto pelos modelos de evolução estelar, desloca lentamente a zona habitável para regiões mais externas (BAHALLA; PINSONNEAULT, 1992). Assim, as permissibilidades biológicas do Sistema Solar mudam em escalas de centenas de milhões de anos (CATLING; KASTING, 2017). Esse deslocamento implica que planetas atualmente habitáveis podem não permanecer assim indefinidamente (RUSHBY *et al.*, 2013). Além disso, mudanças na atividade solar também influenciam diretamente a estabilidade climática dos planetas (GUILLOT *et al.*, 2014).

A procura por vida além da Terra se destaca como um dos focos da astrobiologia, um campo que une astronomia, biologia, geologia e física para entender o que é preciso para a vida existir e se manter em ambientes cósmicos (COCKELL, 2015; CATLING; KASTING, 2017). Neste contexto, a ideia de habitabilidade galáctica surge como um estudo essencial, concentrado em identificar as áreas da galáxia que oferecem condições propícias para a vida surgir e evoluir (GONZALEZ; BROWNEE; WARD, 2001). Essa visão expande o conceito de habitabilidade, normalmente ligado a planetas ou sistemas estelares, para uma escala maior, a da galáxia, levando em conta fatores como radiação, quantidade de estrelas, composição química e forças da gravidade, elementos que influenciam diretamente a possibilidade de formação e manutenção de ambientes habitáveis ao longo do tempo (LINEWEAVER; FENNER; GIBSON, 2004).

A astrobiologia defende uma perspectiva multi e interdisciplinar, fundamentada nos métodos e no rigor da ciência contemporânea, para investigar essas questões, que representam apenas os primeiros passos rumo a uma compreensão mais aprofundada do fenômeno da vida no universo (GALANTE *et al.*, 2016). Além disso, a integração entre diferentes áreas permite o desenvolvimento de modelos mais robustos sobre a origem da vida (CHYBA; HAND, 2005).

Também se destaca que a evolução química do universo é um fator essencial para a emergência de ambientes habitáveis (TINSLEY, 1980).

Um ponto muito importante para a habitabilidade galáctica é a distância entre os corpos celestes, que pode afetar diretamente os processos biológicos em locais onde a vida poderia existir (LINEWEAVER *et al.*, 2004). Em áreas cheias de estrelas, como o centro da galáxia ou aglomerados de estrelas, a proximidade entre sistemas planetários pode aumentar as chances de eventos ruins, como explosões de supernovas, que liberam alta radiação, capaz de reduzir consideravelmente a vida ou impedir que ela surja (PRANTZOS, 2008). Por outro lado, em áreas com menos estrelas, como os braços espirais ou o halo galáctico, a menor ocorrência de eventos extremos pode criar ambientes mais seguros, favoráveis à evolução da vida (GONZALEZ, 2005). Regiões com menor densidade estelar tendem a apresentar maior estabilidade orbital (GONZALEZ, 2005). Ainda, a frequência de eventos catastróficos é determinante na manutenção de biosferas ao longo do tempo (SEAGER, 2013). Além disso, a proximidade entre corpos celestes pode ajudar na transferência de material biológico entre planetas ou sistemas estelares, um processo chamado panspermia (COCKELL, 2015).

Segundo Wallis e Wickramasinghe (2004), a troca de seres minúsculos ou moléculas orgânicas por meio de impactos de cometas, asteroides ou poeira espacial pode ser uma forma importante de espalhar a vida pela galáxia. No entanto, essa transferência depende muito da distância entre os corpos e das condições que esses materiais encontram no caminho (CATLING; KASTING, 2017). Estudos sugerem que microrganismos podem sobreviver às condições extremas do espaço por longos períodos (HOUTKOOPE, 2011). Ademais, impactos de grande escala podem facilitar a ejeção de material biológico para o espaço interestelar (MILEIKOWSKY *et al.*, 2000).

Outro ponto fundamental é a influência da gravidade em sistemas estelares próximos (COCKELL, 2015). Como afirma Wetherill (1996), a interação gravitacional entre estrelas, planetas e outros objetos cósmicos pode mudar as órbitas dos planetas, afetando a estabilidade do clima e, conseqüentemente, a possibilidade de vida em um planeta. Por exemplo, mudanças gravitacionais frequentes podem causar variações grandes de temperatura ou a expulsão de planetas de seus sistemas, impedindo a existência de ecossistemas complexos (CATLING; KASTING, 2017). Além disso, perturbações gravitacionais podem desencadear períodos de instabilidade climática global (LASKAR, 1993). Também se observa que sistemas multiplanetários tendem a apresentar dinâmicas mais complexas e potencialmente instáveis (CHAMBERS, 1999;).

Esta pesquisa tem como objetivo investigar os elementos cruciais (em discussão) da

habitabilidade na galáxia Via Láctea, focando em como a distância entre objetos no espaço é capaz de afetar o processo de formação biológica (CATLING; KASTING, 2017). Ao combinar ideias da astrofísica, da biologia da evolução e do estudo dos planetas, o estudo procura ajudar a entender o que é preciso para que a vida exista por toda a galáxia e para, teoricamente, definir regiões fora do sistema solar onde a vida pode ser possível.

Nesse contexto, a habitabilidade é compreendida como um fenômeno multifatorial, dependente de variáveis físicas, químicas e biológicas interdependentes (CAROLL; OSTLIE, 2017). Fatores como a presença de elementos pesados e a dinâmica estelar são determinantes para a formação de sistemas planetários potencialmente habitáveis (PRANTZOS, 2008). Seguindo esse sentido, destaca-se que a distribuição espacial das estrelas, a frequência de eventos catastróficos e a evolução química da galáxia exercem papel fundamental na determinação das regiões mais favoráveis ao desenvolvimento de vida complexa (LINEWEAVER; FENNER; GIBSON, 2004).

O presente estudo tem como objetivo analisar os fatores que condicionam a habitabilidade em escala galáctica, investigando de que forma a distribuição espacial dos corpos celestes, a dinâmica orbital e a estrutura morfológica da Via Láctea influenciam o surgimento e a manutenção de ambientes potencialmente favoráveis ao desenvolvimento da vida. Para isso, busca-se compreender a relação entre a concentração de matéria, a ocorrência de eventos astrofísicos de alta energia, a disponibilidade de elementos químicos essenciais e a estabilidade gravitacional das diferentes regiões da galáxia. Além da revisão crítica da literatura especializada, a pesquisa propõe modelos conceituais e representações gráficas elaborados pelo próprio autor, destinados a sintetizar e ilustrar os processos discutidos ao longo do trabalho. Essas representações visam demonstrar como diferentes graus de organização ou desordem (entropia) decorrentes da proximidade ou do afastamento entre corpos celestes podem interferir na estabilidade dos ambientes galácticos. Dessa forma, pretende-se oferecer uma interpretação integrada da Habitabilidade Galáctica, relacionando aspectos físicos, químicos e dinâmicos da Via Láctea, contribuindo para uma compreensão mais abrangente dos fatores que delimitam regiões potencialmente habitáveis em nossa galáxia.

Assim, a habitabilidade galáctica não pode ser vista apenas como uma questão de localização, mas também como um equilíbrio entre fatores astronômicos e biológicos (LINEWEAVER *et al.*, 2004). A proximidade entre corpos celestes, portanto, tem um papel duplo: ao mesmo tempo que pode ser uma ameaça à estabilidade de locais onde a vida poderia existir, também pode facilitar a transferência de vida ou materiais que ajudam a formá-la, contribuindo para a variedade e resistência da vida no universo. Nicholson (2016) afirma que

as interações gravitacionais e os choques entre corpos celestes têm um duplo papel, podem destruir ecossistemas em formação, mas também disponibilizar os componentes essenciais para o aparecimento da vida (GONZALEZ, 2005). Além disso, esse equilíbrio dinâmico é fundamental para compreender a distribuição da vida na galáxia (PRANTZOS, 2008). Complementarmente, fatores físicos e químicos atuam conjuntamente na determinação da habitabilidade (COCKELL, 2015).

2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Esta pesquisa caracteriza-se como qualitativa, exploratória e fundamentada, principalmente, em levantamento bibliográfico de natureza científica. A construção do referencial teórico baseou-se na análise de livros, artigos científicos, periódicos especializados e publicações de instituições de pesquisa nas áreas de Astrofísica, Astronomia e Astrobiologia, permitindo a identificação dos principais fatores relacionados à habitabilidade galáctica. Paralelamente à revisão da literatura, foram desenvolvidos modelos conceituais, esquemas ilustrativos e projeções gráficas de autoria própria, elaborados com a finalidade de representar visualmente os fenômenos descritos pelos autores consultados e facilitar a compreensão das relações entre a morfologia da Via Láctea, a distribuição de matéria, a frequência de eventos astrofísicos e a estabilidade ambiental em diferentes regiões da galáxia.

Esses modelos não possuem caráter observacional ou experimental, mas constituem instrumentos analíticos de interpretação e integração das informações obtidas durante a pesquisa bibliográfica. Dessa forma, os procedimentos metodológicos adotados combinam a revisão sistematizada da literatura com a elaboração de representações originais, permitindo discutir, de maneira fundamentada, os limites e as possibilidades da habitabilidade em escala galáctica sob uma perspectiva interdisciplinar (LUNINE, 2017; COCKELL, 2014).

Foram examinados trabalhos sobre a influência de fenômenos astrofísicos nos processos biológicos, as condições que podem favorecer a existência de vida extraterrestre e o uso de ambientes extremos terrestres como modelos para a compreensão de possíveis ecossistemas em outros corpos celestes. A revisão fundamentou-se em literatura especializada nacional e internacional, permitindo a construção de uma base teórica consistente para a compreensão do tema investigado, conforme recomendado por Marconi e Lakatos (2017), que destacam a revisão bibliográfica como etapa fundamental para o embasamento científico de uma pesquisa.

Esta pesquisa caracteriza-se como bibliográfica, tendo como objetivo analisar, interpretar e sintetizar produções científicas relacionadas à Zona Habitável Circunstelar (ZH), Zona

Habitável Galáctica (ZHG), evolução estelar, fatores astrofísicos de risco e condições para a habitabilidade na Via Láctea. (GONZALEZ, 2005).

3. MORFOLOGIA E CARACTERÍSTICAS DE GALÁXIAS ESPIRAIS - PADRÃO DA VIA LÁCTEA.

Dentro do aglomerado de Virgem – superaglomerado local –, encontram-se aproximadamente 1300 galáxias diversificadas, com destaque para as elípticas e espirais, incluindo a própria Via Láctea (LINEWEAVER *et al.*, 2004). Estudos levantados por Binggeli, Sandage e Tammann (1985) mostram que as galáxias elípticas são mais comuns no centro do aglomerado, enquanto as espirais se espalham mais pelas bordas. Acredita-se que, por consequência, o superaglomerado local contenha um número maior de galáxias espirais, consideradas as mais frequentes na astronomia (SPARKE; GALLAGHER, 2007). Além disso, a distribuição morfológica das galáxias está diretamente relacionada às condições ambientais do aglomerado (DRESSLER, 1980). Também se observa que interações gravitacionais influenciam a evolução estrutural das galáxias ao longo do tempo (MO; VAN DEN BOSCH; WHITE, 2010).

As galáxias espirais recebem esse nome devido à sua forma quando vistas de cima (COCKELL, 2015). Essa forma é composta por um núcleo, um disco, um halo e braços espirais. Como afirmam Carroll e Ostlie (2017), apesar do formato espiral ser a característica principal, o tamanho do núcleo e a forma dos braços podem variar bastante, dependendo do tamanho, da massa e de eventos passados, como colisões com outras galáxias (CATLING; KASTING, 2017). Além disso, a presença de matéria escura influencia diretamente a estrutura e a rotação dessas galáxias (RUBIN; FORD, 1970). Também é importante considerar que processos dinâmicos internos contribuem para a formação e manutenção dos braços espirais (DOBBS; BABA, 2014).

Por conta dessas variações, elas são divididas em Sa, Sb e Sc (COCKELL, 2015). As galáxias espirais Sa têm um núcleo grande e braços espirais pequenos e bem fechados. As Sb possuem núcleos e braços de tamanho intermediário. Já as Sc têm núcleos menores e braços espirais mais abertos e longos (HUBBLE, 1926). Essa classificação morfológica permite compreender diferentes estágios evolutivos das galáxias (DE VAUCOULEURS, 1959). Estudos modernos sugerem subdivisões mais detalhadas com base em características espectrais e dinâmicas (BINNEY; TREMAINE, 2008).

As galáxias espirais podem ser classificadas como espirais normais ou espirais barradas

(CATLING; KASTING, 2017). Um exemplo famoso de espiral barrada é a NGC 1300, reconhecida nessa categoria pelas imagens do telescópio Hubble (SPARKE; GALLAGHER, 2007). A massa de uma galáxia espiral comum pode chegar a dez trilhões de vezes a massa do Sol, com um diâmetro de mais de cem mil anos-luz. A massa é distribuída de forma desigual, com algumas áreas mais densas que outras (BINNEY; MERRIFIELD, 1998). As regiões centrais dessas galáxias, onde as estrelas estão mais próximas umas das outras, concentram uma grande quantidade de estrelas, incluindo as mais velhas (CARROLL; OSTLIE, 2017). Próximo ao núcleo, sempre encontramos estrelas de nêutrons, buracos negros e outros restos de estrelas muito massivos. Além disso, a presença de barras galácticas pode influenciar o fluxo de gás em direção ao centro (KORMENDY; KENNICUTT, 2004). Também se observa que buracos negros supermassivos desempenham papel fundamental na dinâmica dessas regiões centrais (FERRARESE; MERRITT, 2000).

Os braços espirais também apresentam grandes concentrações de estrelas e planetas, formados pela intensa força gravitacional, que aos poucos molda o sistema e cria a forma espiralada (LIN; SHU, 1964). A luz emitida pelos braços é menor em comparação com o núcleo, devido à diferença na composição química das estrelas nessas áreas. Além disso, os braços espirais são regiões de intensa formação estelar (KENNICUTT, 1998). Também é comum encontrar grandes nuvens moleculares nessas regiões, que são berços de novas estrelas (MCKEE; OSTRIKER, 2007).

Há certas galáxias espirais não muito distantes que são frequentemente estudadas por se assemelharem à Via Láctea, conforme ressaltam Binney e Merrifield (1998) e COCKELL (2015). Contudo, vale ressaltar que, ao serem examinadas, a sua posição pode variar, apresentando diferentes ângulos, o que torna mais complicado reconhecer seu formato. Em contrapartida, em outros casos, a maneira como seus discos estão dispostos é bem mais fácil de visualizar (CATLING; KASTING, 2017). Técnicas observacionais modernas permitem reconstruir a estrutura tridimensional dessas galáxias (CONSELICE, 2014). Também é possível utilizar espectroscopia para inferir propriedades físicas e químicas desses sistemas (PEEBLES, 1993).

Provavelmente inúmeras galáxias espirais ainda não tenham sido categorizadas em virtude dessas disposições (GONZALEZ, 2005). Astrônomos sustentam que a formação de galáxias espirais (como a M77 – objeto espacial de estudos referenciais) é influenciada por meio do alinhamento de seus próprios campos magnéticos – fenômeno físico classificado de teoria da densidade funcional (DFT). De acordo com Silva (2010), a DFT constitui uma abordagem teórica aplicada ao estudo da estrutura eletrônica de sistemas compostos por muitos

corpos, com ênfase no estado fundamental de átomos, moléculas e sólidos. Nessa teoria, as propriedades de sistemas com múltiplos elétrons são determinadas por meio de funcionais, que correspondem a funções dependentes da densidade eletrônica (SEAGER, 2013). Em razão de sua eficiência e aplicabilidade, a DFT destaca-se como um dos métodos mais difundidos e flexíveis nas pesquisas em física do estado sólido, uma vez que permite a investigação de uma ampla variedade de propriedades estruturais, eletrônicas e espectroscópicas dos materiais com elevada viabilidade computacional (YATES, 2014). Além disso, métodos computacionais têm ampliado significativamente o estudo da estrutura galáctica (SPRINGEL, 2005). Também se observa que simulações numéricas são fundamentais para compreender a formação de galáxias (NAVARRO; FRENK; WHITE, 1997).

Através das análises continuamente executadas dos padrões nos braços espirais, em toda a distribuição de material estelar, entende-se que tal organização estrutural pode estar intimamente ligada à presença de zonas de habitabilidade galáctica (CATLING; KASTING, 2017). As zonas de habitabilidade são mais prevalentes no disco galáctico (LINEWEAVER *et al.*, 2004), onde as estrelas mais estáveis e de tipos espectrais favoráveis à vida se encontram, especialmente ao longo dos braços espirais. No entanto, também foi argumentado que a maior densidade de sistemas estelares nas regiões galácticas internas poderia resultar em uma maior janela de oportunidade para a vida emergir lá, em relação à periferia, apesar do maior risco de eventos esterilizantes (Balbi *et al.*, 2020). As regiões externas do disco galáctico, longe do centro galáctico e das zonas de alta radiação, podem ser as mais adequadas para a formação de sistemas planetários com potencial para vida (LINEWEAVER; FENNER; GIBSON, 2004). A metalicidade adequada nessas regiões favorece a formação de planetas rochosos (PRANTZOS, 2008). Também se destaca que a estabilidade orbital é um fator determinante para a manutenção de ambientes habitáveis (GONZALEZ; BROWNLEE; WARD, 2001).

4. IMPLICAÇÕES DE FATORES ASTROFÍSICOS AO LONGO DO DISCO GALÁCTICO: TÉRMINO DA FASE DE SEQUÊNCIA PRINCIPAL EM ESTRELAS

4.1. IMPLICAÇÕES DAS SUPERNOVAS EM PLANETAS POTENCIALMENTE HABITÁVEIS

Supernovas, estágios cataclísmicos que marcam o fim da fase de sequência principal em estrelas massivas, são eventos cósmicos de grande intensidade (LINEWEAVER *et al.*, 2004). Além de liberarem enormes quantidades de energia, essas explosões geram radiação de alta

energia, como raios gama e radiação ultravioleta, que podem ter consequências devastadoras para o ambiente de planetas ao redor, incluindo aqueles que são potencialmente habitáveis (THOMAS *et al.*, 2005).

Um planeta é considerado potencialmente habitável quando suas condições ambientais permitem a presença de água líquida, um fator essencial para a vida como é conhecida. A noção de habitabilidade está associada à possibilidade de manutenção de água em estado líquido, uma vez que, conforme definido na literatura clássica, um planeta habitável é aquele que se encontra em uma região onde determinadas condições planetárias permitem a presença estável de água no estado líquido sobre a superfície (KASTING; WHITMIRE; REYNOLDS, 1993). Além disso, eventos estelares extremos podem redefinir completamente as condições ambientais de sistemas planetários (ADAMS, 2010). Também se observa que a evolução estelar influencia diretamente os limites da habitabilidade ao longo do tempo (SCALO; WHEELER, 2002).

De acordo com Galante *et al.* (2016), a ocorrência conjunta desses eventos pode provocar impactos significativos sobre os organismos expostos, tanto nos ambientes continentais quanto nas regiões mais superficiais dos oceanos e de outros corpos d'água, especialmente na zona fótica. Na Terra, tal situação afetaria de maneira intensa a base da cadeia trófica global, composta principalmente por organismos fotossintetizantes. No entanto, a proximidade de uma supernova pode ser um agravante às condições favoráveis a qualquer forma de vida, dependendo de sua intensidade, distância e características do planeta (GONZALEZ, 2005). Além disso, a radiação ionizante pode afetar diretamente o DNA de organismos vivos (MELLOTT; THOMAS, 2011). Há evidências de que eventos astrofísicos podem estar associados a extinções em massa na Terra (ELLIS; SCHRAMM, 1995).

4.1.2. RADIAÇÃO DE ALTA ENERGIA: IMPACTOS DIRETOS SOBRE A ATMOSFERA

Uma das primeiras e mais imediatas consequências de uma supernova para um planeta potencialmente habitável seria a intensa radiação gerada pela explosão (CATLING; KASTING, 2017). As supernovas emitem radiação de altíssima energia, incluindo raios gama e radiação ultravioleta. Conforme destaca Gehrels *et al.* (2003), esses tipos de radiação podem ter efeitos prejudiciais diretos sobre a atmosfera de um planeta, especialmente se ele estiver relativamente próximo ao evento.

Os impactos provocados por explosões próximas variam significativamente conforme a espessura e a composição da atmosfera, bem como a quantidade de poeira e gás presentes no

meio interestelar (CARROLL; OSTLIE, 2017). Além disso, eventos de extinção em larga escala, ainda que não totais, podem influenciar o ritmo da evolução da vida complexa, podendo tanto retardá-la quanto acelerá-la. A interação da radiação com a atmosfera pode gerar reações químicas secundárias prejudiciais (THOMAS *et al.*, 2005). Também se observa que atmosferas mais densas oferecem maior proteção contra radiações externas (SCHULZE-MAKUCH; IRWIN, 2018).

A radiação gama, em particular, é capaz de ionizar os átomos presentes na atmosfera, alterando sua composição química e criando um ambiente tóxico para a vida (CATLING; KASTING, 2017). Estudos clássicos, como os de Ruderman (1974), indicam que, no caso da Terra, por exemplo, a radiação ultravioleta pode romper as moléculas de oxigênio e nitrogênio, resultando na formação de óxidos nocivos e na diminuição da camada de ozônio, que protege a vida de radiações solares prejudiciais.

Em planetas que possuem atmosferas frágeis ou pouco desenvolvidas, como alguns exoplanetas descobertos, a radiação de uma estrela moribunda pode ser suficiente para erradicar qualquer chance de vida, ao destruir a proteção atmosférica necessária para manter condições habitáveis (FRY *et al.*, 2017). A perda atmosférica pode ocorrer de forma acelerada sob intensa radiação (LAMMER *et al.*, 2009) e a composição atmosférica é determinante na resiliência planetária (MADHUSUDHAN, 2019).

4.1.3. DESTRUIÇÃO DA CAMADA DE OZÔNIO E ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

A radiação ultravioleta intensa de uma supernova pode ter consequências ainda mais graves, pois pode destruir a camada de ozônio do planeta, que serve como um filtro crucial contra radiações solares prejudiciais, como os raios UV (LINEWEAVER *et al.*, 2004). Segundo Scalo e Wheeler (2002), sem essa proteção, a superfície do planeta seria exposta a uma quantidade muito maior de radiação ultravioleta, o que poderia destruir a biota superficial e modificar drasticamente o clima e as condições de vida. A perda da camada de ozônio pode desencadear efeitos climáticos globais (THOMAS *et al.*, 2005). Há evidências de que tais eventos podem provocar alterações prolongadas no equilíbrio atmosférico.

Em um cenário em que a camada de ozônio é comprometida, o aumento da radiação UV pode reduzir a produtividade biológica, interferir no ciclo do carbono e outros elementos essenciais para a vida, e até mesmo causar o resfriamento global do planeta. De acordo com Thomas *et al.* (2005), o impacto de uma supernova, portanto, pode não apenas matar organismos diretamente, mas também alterar o ambiente de tal forma que as condições para

vida se tornem insustentáveis a longo prazo (GONZALEZ, 2005). Além disso, mudanças climáticas abruptas podem comprometer a estabilidade dos ecossistemas (LOVELOCK, 2000), pois ciclos biogeoquímicos são altamente sensíveis a perturbações externas (FALKOWSKI; RAVEN, 2007).

4.1.4. ALTERAÇÕES NA COMPOSIÇÃO QUÍMICA E EFEITO ESTUFA

Outro efeito indireto das supernovas pode ser a modificação da composição química da atmosfera de um planeta (CATLING; KASTING, 2017). Quando uma supernova ocorre, são liberadas grandes quantidades de elementos pesados, como ferro e níquel, além de isótopos radioativos. Esses elementos podem ser ejetados para o espaço e, se um planeta estiver na proximidade suficiente, podem ser incorporados à sua atmosfera ou superfícies (GEHRELS *et al.*, 2003). A chegada desses elementos pesados pode alterar drasticamente o equilíbrio químico do ambiente (CARROLL; OSTLIE, 2017).

Conforme Woosley (1990), o material expelido por uma supernova, composto por núcleos pesados e partículas energéticas, pode influenciar diretamente os ambientes planetários vizinhos, promovendo processos de enriquecimento químico ou contaminação. Além disso, o enriquecimento químico é essencial para a formação de planetas rochosos (TINSLEY, 1980). A nucleossíntese estelar é responsável pela origem dos elementos pesados no universo (MELLOTT; THOMAS, 2011). Inclusive, a radiação intensa gerada pela explosão pode ionizar grandes porções da atmosfera, criando um efeito estufa extremo. Scalo e Wheeler (2002) sugerem que este processo pode aquecer rapidamente a superfície do planeta, a ponto de transformar um ambiente previamente estável e favorável à vida em um ambiente inóspito, como o efeito estufa descontrolado que ocorre no planeta Vênus. Alterações no efeito estufa podem desencadear estados climáticos irreversíveis (GONZALEZ, 2005). Também se observa que a retroalimentação climática pode amplificar esses efeitos (PIERREHUMBERT, 2010).

4.1.5. EFEITOS A LONGO PRAZO: MORTE DAS SUPERFÍCIES HABITÁVEIS

Além dos efeitos imediatos, a radiação de uma supernova pode também ter consequências a longo prazo (CATLING; KASTING, 2017). Conforme aponta Melott e Thomas (2009), a radiação ionizante pode alterar o material genético de organismos vivos, ocasionando mutações letais ou irreversíveis. Isso pode levar à extinção de qualquer forma de vida (ELLIS; SCHRAMM, 1995). Além disso, mutações acumuladas podem comprometer a

viabilidade das populações ao longo do tempo (KIRKWOOD, 2005). Também se observa que a radiação cósmica influencia processos evolutivos (MELLOTT; THOMAS, 2011).

Nesse contexto, Lineweaver, Fenner e Gibson (2004) afirmam que explosões estelares e interações gravitacionais em ambientes densos podem modificar órbitas planetárias previamente estáveis, comprometendo a manutenção de condições favoráveis à vida (LINEWEAVER *et al.*, 2004). Em uma perspectiva mais ampla, a proximidade de uma supernova pode resultar na destruição de atmosferas inteiras, como mencionado, ou na modificação da órbita de planetas que já estão em equilíbrio estável em relação à sua estrela. Esse tipo de perturbação gravitacional poderia, em última instância, desestabilizar o clima, interrompendo ciclos climáticos essenciais para a vida, como os ciclos de água e carbono (GONZALEZ, 2005). Além disso, a estabilidade orbital é essencial para a manutenção de climas habitáveis (LASKAR, 1993). Variações orbitais podem gerar mudanças climáticas significativas (MILANKOVITCH, 1941).

4.1.6. A DISTÂNCIA E A FREQUÊNCIA DE SUPERNOVAS: FATORES DE RISCO

É importante considerar que os efeitos de uma supernova não são universais, mas dependem de vários fatores, sendo o mais relevante a distância entre o planeta e a supernova (CATLING; KASTING, 2017). Um estudo recente sugere que supernovas a menos de 25 anos-luz de distância de um planeta podem ter efeitos significativos sobre a vida nesse planeta (GEHRELS *et al.*, 2003). Para distâncias maiores, a radiação tende a se dispersar e perder intensidade.

Conforme Lineweaver *et al.*, 2017, planetas em sistemas estelares mais afastados das regiões de intensa formação estelar — onde supernovas são mais comuns — têm uma maior probabilidade de permanecerem inalterados, ou ao menos com danos menores. Além disso, a atenuação da radiação no meio interestelar reduz seus efeitos (FIELDS, 2004). Também se observa que a posição galáctica influencia diretamente o risco astrofísico (SCHULZEMAKUCH; IRWIN, 2018).

Outro fator importante é a frequência de supernovas. Em galáxias ativas, onde supernovas são relativamente comuns, a chance de um planeta ser afetado por essas explosões é mais alta. Em contrapartida, em regiões mais calmas, onde as estrelas de grande massa são menos comuns, o risco é consideravelmente reduzido (LINEWEAVER; FENNER; GIBSON, 2004). Taxas elevadas de formação estelar aumentam a ocorrência desses eventos (MADDAU; DICKINSON, 2014). Também se destaca que galáxias mais evoluídas — já passaram pela fase

ativa de formação estelar, tendem a apresentar menor frequência de supernovas (PRANTZOS, 2008).

4.1.7. SUPERNOVAS E A EVOLUÇÃO DA VIDA

Se considerar a Terra como exemplo, a vida se desenvolveu e se diversificou ao longo de bilhões de anos, com condições atmosféricas e climáticas que, em grande parte, dependeram da proteção oferecida pela atmosfera e pela estabilidade do sistema solar (LINEWEAVER *et al.*, 2004). Embora a Terra nunca tenha sido afetada diretamente por uma supernova nas escalas de tempo mais curtas da história humana, a proximidade de uma explosão estelar poderia ter um impacto decisivo na evolução da vida no planeta (MELLOTT; THOMAS, 2011). Segundo Melott e Thomas (2011), um evento como esse, no passado distante, poderia ter extinguido formas de vida antes que tivessem a chance de se diversificar, ou ao menos retardado esse processo de forma significativa (GONZALEZ, 2005), pois eventos catastróficos podem redefinir trajetórias evolutivas (GOULD, 1989). Também se observa que extinções em massa desempenham papel na diversificação biológica (RAUP; SEPKOSKI, 1982).

Em planetas potencialmente habitáveis fora do Sistema Solar, o impacto de supernovas poderia ser ainda mais consequente, pois a evolução da vida pode ser interrompida de maneira drástica por eventos cataclísmicos. De acordo com Galante *et al.* (2016), uma supernova corresponde a um fenômeno singular associado ao colapso de estrelas massivas (GONZALEZ, 2005), pois ambientes instáveis dificultam a continuidade evolutiva (WARD; BROWNLEE, 2000). É importante ressaltar que a persistência da vida depende de longos períodos de estabilidade ambiental (LINEWEAVER; DAVIS, 2002).

5. FATORES INTERGALÁCTICOS E ENTROPIA DE MASSA COMO VARIÁVEIS DETERMINANTES.

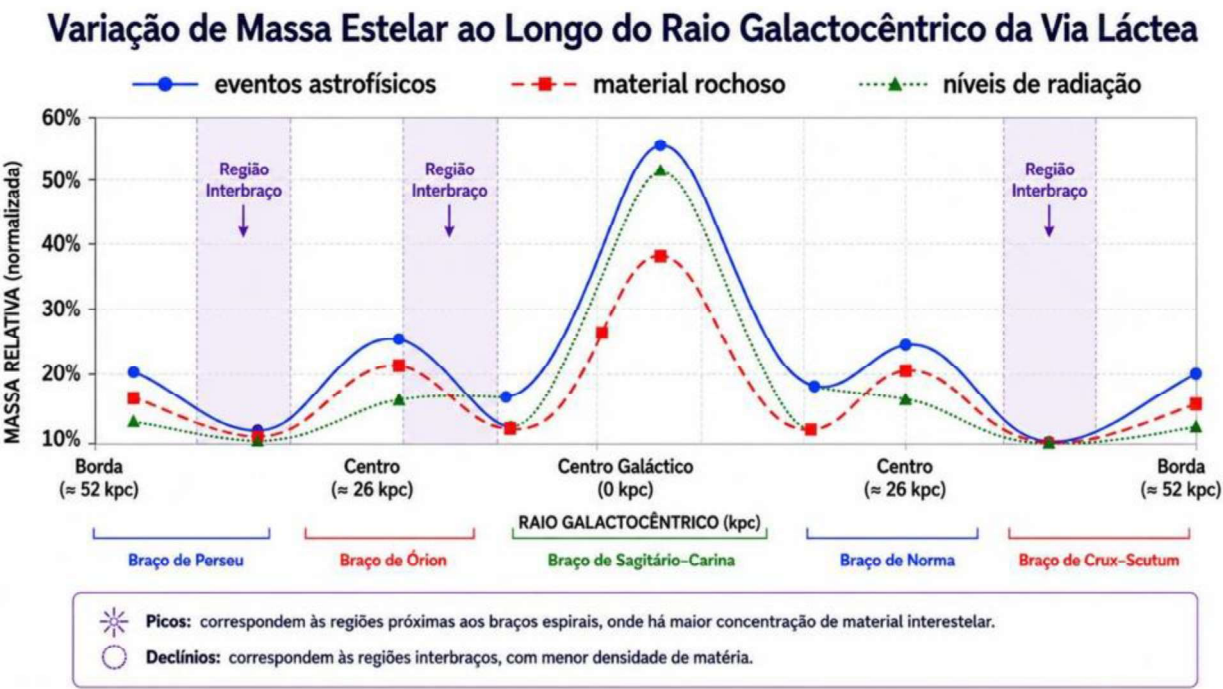
A Zona de Habitabilidade Galáctica (ZHG) é uma extensão do conceito de zona habitável circunestelar (ZH), que se refere à região ao redor de uma estrela onde a água pode existir em estado líquido na superfície de um planeta (GONZALEZ, 2005). Enquanto a ZH é focada em escalas estelares, a ZHG considera fatores em escala galáctica, como a distribuição de elementos pesados, a taxa de formação estelar, a frequência de supernovas e a exposição à radiação cósmica. Conforme Lineweaver, Fenner e Gibson (2004), a possibilidade de ambientes habitáveis em escala galáctica está condicionada à disponibilidade de metais, à

ocorrência de eventos astrofísicos potencialmente prejudiciais e à estabilidade das dinâmicas orbitais (SEAGER, 2013); além disso, a metalicidade é fundamental para a formação de planetas rochosos (PRANTZOS, 2008). Também se destaca que a evolução química da galáxia influencia diretamente a habitabilidade (KALTENEGGER, 2017).

Na Via Láctea, a ZHG é geralmente considerada como um anel entre 7 e 9 kiloparsecs do centro galáctico. Essa região combina uma metalicidade adequada, uma taxa moderada de formação estelar e uma distância segura do centro galáctico, onde a radiação e a densidade estelar são extremas. O Sistema Solar está localizado dentro dessa zona, a aproximadamente 8,5 kiloparsecs do centro galáctico (PRANTZOS; CHARBONNEL, 2006). Sendo que, dessa maneira, regiões intermediárias da galáxia oferecem maior estabilidade dinâmica (GONZALEZ; BROWNLEE; WARD, 2001). Também se observa que áreas muito próximas ao centro galáctico apresentam riscos elevados devido à radiação intensa (BLAND-HAWTHORN; GERHARD, 2016).

A proximidade de uma estrela hospedeira é crucial para a habitabilidade de um planeta. Ward e Brownlee (2000) explicam que a distância ideal de uma estrela determina se a água pode existir em estado líquido, um requisito fundamental para a vida como é conhecida. A luminosidade estelar influencia diretamente a temperatura superficial dos planetas (KASTING *et al.*, 1993). Atmosferas planetárias desempenham papel essencial na regulação térmica (BARNES, 2018).

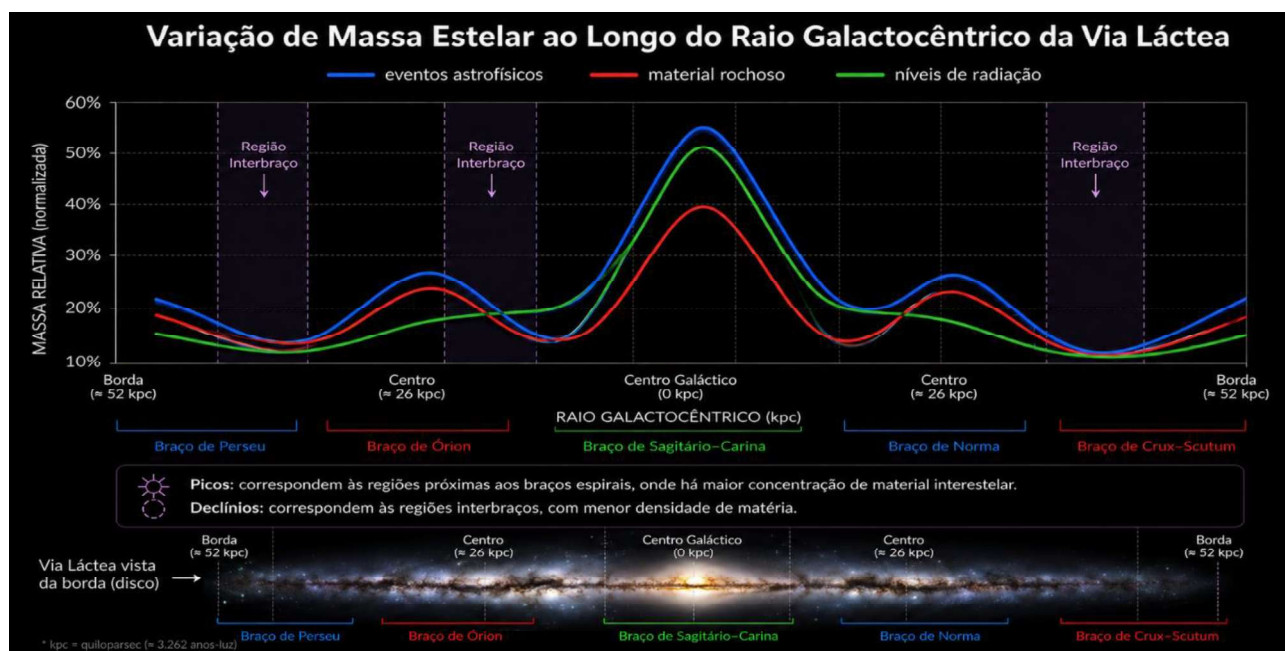
Figura 1 Representação de fatores intergalácticos ao longo do disco da Via Láctea.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Dados obtidos e divulgados por agências de exploração espacial, ele tenta representar percentualmente a distribuição de matéria e energia ao longo dos braços espirais da Via Láctea, de modo a destacar três fatores gerais: ocorrência de eventos astrofísicos, quantidade/concentração de material rochoso e níveis radioativos (em cores específicas) (KASTING *et al.*, 1993). Dada essa distribuição mostrada no gráfico, notam-se consideráveis oscilações dos fatores entre os braços espirais — onde massa e energia estão melhor concentradas, e as regiões interbraços (BINNEY; MERRIFIELD, 1998), espaços com menor dinâmica de corpos celestes e índices energéticos. Inclusive, regiões interbraços tendem a apresentar maior estabilidade orbital (SPARKE; GALLAGHER, 2007). Observa-se que a densidade de matéria influencia diretamente a formação de sistemas planetários (MO; VAN DEN BOSCH; WHITE, 2010).

Figura 2 Representação de fatores intergalácticos ao longo do disco da Via Láctea (02).



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

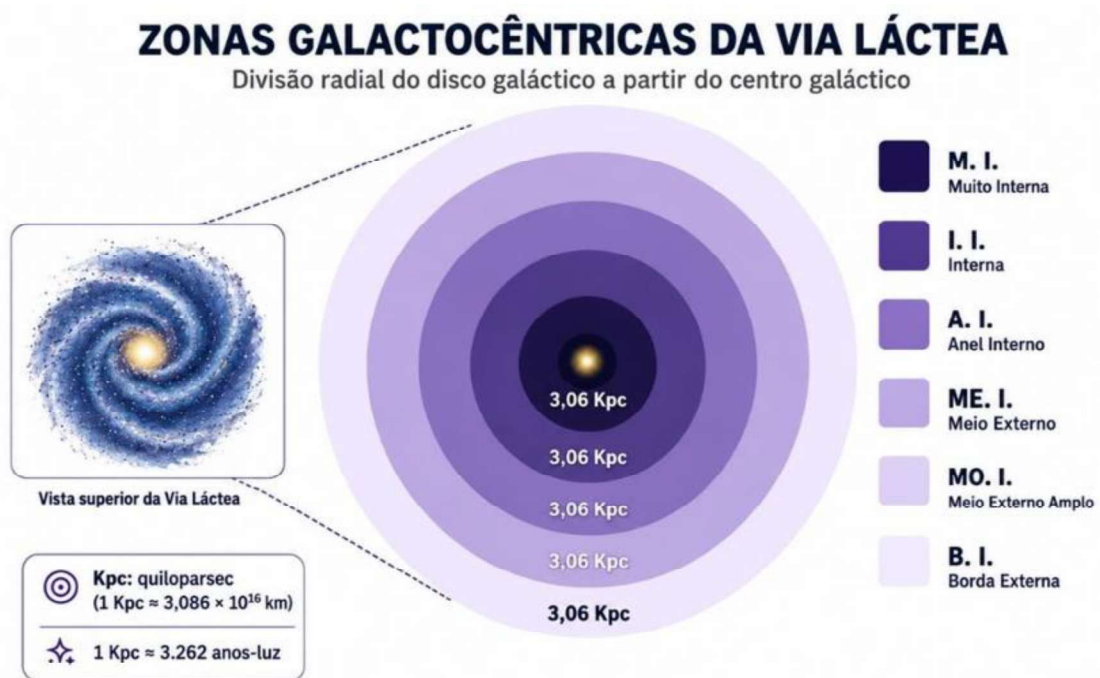
A cada alternância entre região interbraço e braço na Via Láctea há mudança crescente na atividade dos fatores, sempre no sentido da borda para o cerne galáctico (LINEWEAVER *et al.*, 2004). O fator de radiação, apesar dos interbraços, não segue um padrão oscilatório semelhante aos demais fatores (CARROLL; OSTLIE, 2017). O material rochoso apresenta equivalente dispersão na galáxia, não obstante sua acentuada elevação no núcleo (GONZALEZ, 2005); além disso, a radiação cósmica tende a ser mais intensa em regiões centrais (PRANTZOS, 2008). Também se destaca que a distribuição de massa influencia a dinâmica galáctica global (BINNEY; TREMAINE, 2008).

O cerne da Via Láctea é um local altamente frenético e energético (CATLING;

KASTING, 2017). Conforme destacam Bland-Hawthorn e Gerhard (2016), a intensa atividade gerada por objetos supermassivos, pela formação estelar e pelas interações entre estrelas cria um ambiente de alto risco e de grandes emissões de radiação. Há um aglomerado estelar denso, com estrelas muito próximas umas das outras. Essas interações podem levar a fenômenos como acréscimos de matéria, o ambiente congestionado gera colisões e efeitos dinâmicos que aumentam ainda mais a intensidade dos eventos.

Segundo Balbi *et al.* (2020), a presença de condições adequadas para a vida no bojo galáctico é limitada principalmente pelo intenso ambiente de radiação gerado por fontes transitórias e pelo buraco negro supermassivo central. Buracos negros supermassivos influenciam significativamente o ambiente ao seu redor (KORMENDY; HO, 2013). Também se observa que a densidade estelar elevada aumenta a frequência de eventos dinâmicos (MORRIS; SERABYN, 1996).

Figura 3 Padrão teórico de variação massiva da Via láctea.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

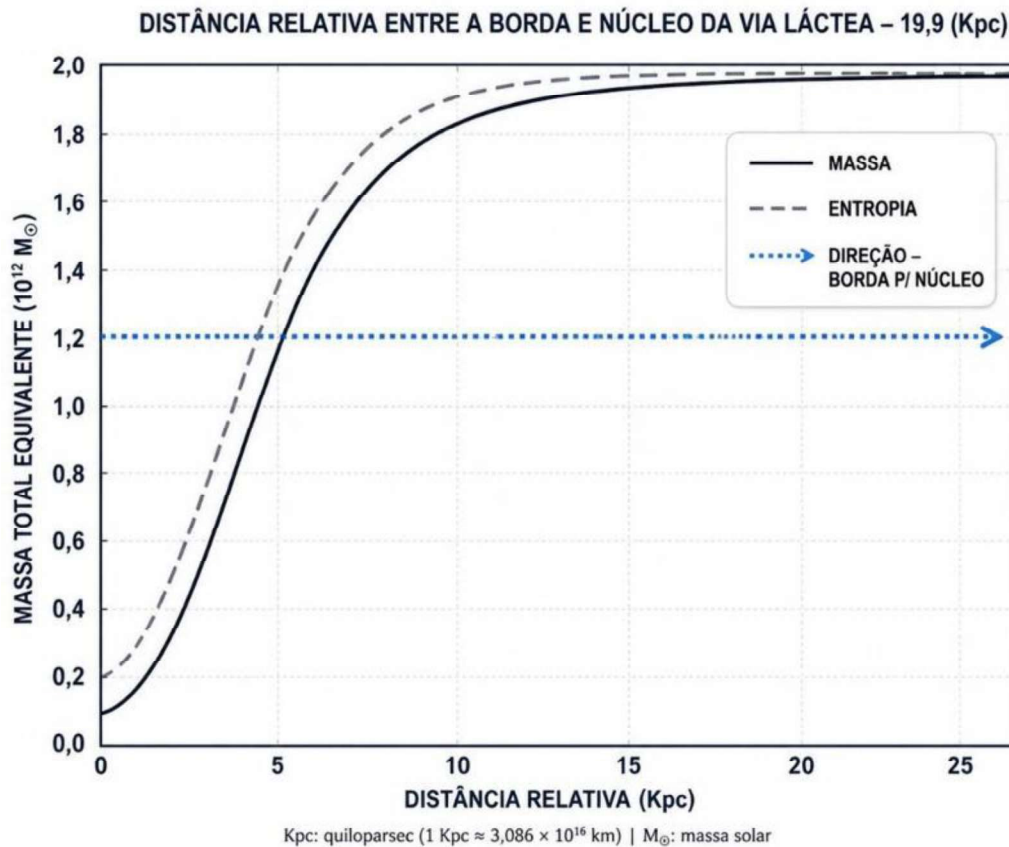
O modelo, acima, busca apresentar a variação de densidade maciça (corpos maciços) presente por toda extensão da Via Láctea (LINEWEAVER *et al.*, 2004). Cada uma das faixas, com diferentes tonalidades em cor roxa, representa uma determinada quantidade de massa orbital e estão classificadas por zonas. Conforme explicam Sparke e Gallagher (2007), a densidade de massa em galáxias espirais segue padrões estruturais marcados por uma ascensão gradual até o bojo, onde sobrevivem condições extremas de compressão e turbulência gravitacional. Zonas representadas com tons mais claros mostram regiões da galáxia com

menor presença relativa de massa, diferentemente, zonas representadas com tons mais fortes expressam a presença de maior quantidade de massa em certas regiões da galáxia (GONZALEZ, 2005). A distribuição de matéria escura também contribui para esse padrão (NAVARRO; FRENK; WHITE, 1997). A densidade também influencia a formação estelar (KENNICUTT, 1998).

O distanciamento relativo entre o limite de uma zona e outra tem aproximadamente dez mil anos-luz, o que equivale a 3.066 parsecs (3,06 Kpc) (LINEWEAVER et al., 2004). Estão distribuídas de modo a estabelecer vários níveis de instabilidade de acordo com a densidade existente. Na projeção, as zonas encontram-se ordenadas da seguinte maneira: baixa, moderada, média, alta, intensa e máxima — classificações referentes à variação entrópica de massa (VM) (GONZALEZ, 2005). Regiões de maior densidade tendem a apresentar maior instabilidade gravitacional (BINNEY; TREMAINE, 2008). Também se observa que a distribuição de massa influencia diretamente a dinâmica orbital (PEEBLES, 1993).

Lineweaver (2001) descreve que a habitabilidade galáctica depende de uma combinação de situações astrofísicas que variam no espaço e no tempo, reforçando a necessidade de pesquisas exploratórias para compreender essa complexidade. Além disso, estudos exploratórios são fundamentais quando o tema ainda apresenta lacunas teóricas significativas (SAMPIERI; COLLADO; LUCIO, 2013).

A astrobiologia é um campo que exige um trabalho colaborativo entre diferentes disciplinas científicas. Segundo Galante et al. (2016), a astrobiologia emprega recursos e metodologias científicas atuais para investigar a existência de vida extraterrestre, buscando também compreender como ela funciona, surge e evolui. Astronomia, biologia, química, geologia e física são correlacionadas para desenvolver modelos que possam explicar a origem e a evolução da vida no universo (GONZALEZ, 2005). A interdisciplinaridade amplia as possibilidades de análise científica (MORIN, 2005). Também favorece a construção de modelos mais completos e integrados (SEAGER, 2013).



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

As características morfológicas da Via Láctea, de acordo com a ordenação no modelo, demonstram que a concentração de massa cresce à medida que há aproximação para o cerne galáctico (LINEWEAVER *et al.*, 2004). Esse padrão é coerente com o que discorrem Mo *et al.* (2010), as galáxias espirais apresentam um crescimento gradual na densidade de estrelas e de matéria escura em direção ao bojo, resultando em regiões caracterizadas por condições físicas mais extremas. Dessa forma, o fator de densidade ocasionado pela disposição dos corpos aumenta no sentido de direção das bordas da galáxia para as regiões mais internas, até o centro (GONZALEZ, 2005). Esse gradiente de densidade influencia diretamente a habitabilidade galáctica. Ambientes mais extremos tendem a ser menos favoráveis à vida complexa (MEADOWS; BARNES, 2018).

Lineweaver (2001) descreve que a habitabilidade galáctica depende de uma combinação de situações astrofísicas que variam no espaço e no tempo, reforçando a necessidade de pesquisas exploratórias para compreender essa complexidade. Além disso, estudos exploratórios são fundamentais quando o tema ainda apresenta lacunas teóricas significativas (SAMPIERI; COLLADO; LUCIO, 2013). Também contribuem para a formulação de hipóteses futuras mais refinadas (GIL, 2008).

6. LUAS POTENCIALMENTE HABITÁVEIS E A HABITABILIDADE GALÁCTICA.

Um dos cenários mais promissores, na nova perspectiva, são as luas que orbitam planetas gasosos — corpos celestes que, apesar de não serem planetas em si, podem reunir condições físico-químicas adequadas ao surgimento e à manutenção da vida (CATLING; KASTING, 2017). Segundo Gonzalez (2005), a presença de vida é influenciada não apenas pelo ambiente imediato de um planeta, mas também pela vizinhança galáctica na qual o sistema planetário está situado, o que reforça a necessidade de integrar escalas.

Quando combinamos essa abordagem com o conceito mais amplo de habitabilidade galáctica — isto é, a ideia de que determinadas regiões da galáxia são mais propícias ao desenvolvimento de vida — ampliamos ainda mais o campo de possibilidades para encontrar ambientes biologicamente ativos no cosmos (LINEWEAVER; FENNER; GIBSON, 2004). A diversidade de ambientes planetários amplia o escopo da astrobiologia contemporânea (COCKELL, 2015); também se destaca que a habitabilidade depende de múltiplos fatores interdependentes (MEADOWS; BARNES, 2018).

Tradicionalmente, os critérios de habitabilidade planetária consideram principalmente a zona habitável estelar, ou zona de Goldilocks, na qual um planeta precisa estar a uma distância de sua estrela que permita a existência de água em estado líquido (CATLING; KASTING, 2017). Contudo, ao observar as luas de gigantes gasosos como Júpiter e Saturno no nosso próprio Sistema Solar, percebemos que corpos relativamente pequenos, como Europa, Encélado e Titã, apresentam características geológicas e atmosféricas que os tornam potenciais candidatos à habitabilidade (LUNINE, 2017).

De acordo com Lunine (2017), a presença de oceanos subterrâneos aquecidos por forças de maré, compostos orgânicos complexos e interações dinâmicas com os campos magnéticos dos seus planetas-mãe sugere que luas podem, sim, abrigar ecossistemas microbianos ou prebióticos, mesmo estando fora da zona habitável tradicional (CARROLL; OSTLIE, 2017). Evidências recentes indicam atividade hidrotermal em luas geladas (HANDA; CHYBA, 2007). Também se observa que ambientes subsuperficiais podem oferecer proteção contra radiação (LAMMER *et al.*, 2009).

Para Heller *et al.* (2013), a maior massa de um planeta contribui para reduzir os efeitos da erosão de maré sobre sua obliquidade, possibilitando que planetas que abrigam exoluas preservem inclinações axiais importantes por períodos mais prolongados do que planetas terrestres isolados. Essa constatação, como apresentam Kasting, Whitmire e Reynolds (1993), leva a uma redefinição do conceito de zona habitável: não mais apenas uma faixa ao redor de

uma estrela, mas um conjunto de condições que podem emergir de interações gravitacionais, químicas e geofísicas locais. Em muitos casos, os planetas gasosos e suas luas estão dentro da zona habitável estelar, como é o caso de algumas luas hipotéticas de exoplanetas já identificados (CARROLL; OSTLIE, 2017). Interações de maré podem gerar calor interno suficiente para sustentar água líquida (PEALE; CASSEN; REYNOLDS, 1979). Também se destaca que a estabilidade orbital é essencial para a manutenção dessas condições (SCHULZE-MAKUCH; IRWIN, 2018).

A presença de um planeta massivo proporciona estabilidade gravitacional às luas, promove aquecimento interno através da força de maré e, por vezes, contribui com escudos magnéticos contra radiações, especialmente se o planeta-mãe possuir um campo magnético intenso (DRISCOLL; BARNES, 2015). Pesquisas como as de Lammer *et al.* (2009) afirmam que o aquecimento de maré pode manter reservatórios de água líquida estáveis durante bilhões de anos, aumentando o potencial biológico desses satélites (GONZALEZ, 2005) e, além disso, campos magnéticos planetários podem proteger atmosferas contra erosão. Observa-se que a retenção atmosférica é um fator crítico para a habitabilidade (CATLING; KASTING, 2017).

Entretanto, essa discussão não pode ser isolada das condições mais amplas da galáxia (CATLING; KASTING, 2017). A habitabilidade galáctica, conceito desenvolvido por autores como Gonzalez *et al.* (2014) considera fatores como densidade estelar, taxa de formação de supernovas, distribuição de metais pesados e radiação cósmica para avaliar quais regiões da galáxia são mais propícias ao surgimento e persistência da vida (GONZALEZ; BROWNLEE; WARD, 2001). Segundo esses estudos, a zona habitável galáctica se localiza entre as regiões centrais e os braços espirais externos da Via Láctea — onde há matéria suficiente para formar planetas rochosos e elementos bioquímicos essenciais, mas não em excesso a ponto de haver risco elevado de eventos destrutivos, como explosões de supernovas.

Segundo Gonzalez, Brownlee e Ward (2001), a delimitação da zona habitável circunstelar não depende exclusivamente da radiação estelar (CARROLL; OSTLIE, 2017). Para que essa definição seja válida em diferentes contextos da galáxia, devem ser considerados parâmetros adicionais, entre eles a massa, a composição, a órbita e a natureza da estrela hospedeira. A posição galáctica influencia diretamente a frequência de eventos catastróficos (PRANTZOS, 2008). Também se destaca que a metalicidade é essencial para a formação de sistemas planetários complexos (SCHULZE-MAKUCH; IRWIN, 2018).

Nesse contexto, luas potencialmente habitáveis que orbitam planetas gasosos em sistemas estelares situados na ZHG teriam, teoricamente, uma probabilidade muito maior de abrigar vida (CATLING; KASTING, 2017). A densidade de matéria na ZHG permite a

formação de estrelas como o Sol e, conseqüentemente, de sistemas planetários complexos. Meadows e Barnes (2018) destacam que a habitabilidade é um estado emergente que depende de múltiplos fatores ambientais interligados, justificando a inclusão de luas nesse panorama.

A relativa estabilidade da região, aliada à presença de elementos pesados, fornece os ingredientes necessários tanto para planetas rochosos quanto para os gigantes gasosos com suas respectivas luas (CARROLL; OSTLIE, 2017). A menor frequência de radiação ionizante e colisões catastróficas nesta faixa da galáxia aumenta a chance de que formas de vida consigam evoluir de modo contínuo, sem interrupções bruscas. Ademais, a estabilidade a longo prazo é essencial para a evolução biológica complexa (WARD; BROWNLEE, 2000). Também se observa que ambientes menos hostis favorecem a continuidade dos processos evolutivos (COCKELL, 2015).

Portanto, a convergência entre a habitabilidade local (das luas) e a habitabilidade galáctica (da localização do sistema) define um novo paradigma na astrobiologia (GONZALEZ, 2005). Luas que orbitam planetas gasosos não são apenas curiosidades astronômicas: são verdadeiros laboratórios naturais onde processos bioquímicos poderiam estar em curso. E, se localizadas em regiões galácticas propícias, essas luas poderiam até superar planetas tradicionais em termos de potencial para abrigar vida (WARD; BROWNLEE, 2000). Afinal, um ambiente aquecido por forças de maré, com oceanos líquidos e proteção magnética, orbitando uma estrela estável em uma região galáctica tranquila, oferece uma combinação notável de fatores favoráveis à vida (SEAGER, 2013). Além disso, a diversidade de nichos ecológicos potenciais amplia as possibilidades de biosferas alternativas (MEADOWS; BARNES, 2018). Também se destaca que a astrobiologia moderna busca justamente identificar esses ambientes promissores.

Diante disso, como afirmam Heller e Barnes (2013), a inclusão das luas como possíveis habitats amplia significativamente as fronteiras da busca por vida extraterrestre (CATLING; KASTING, 2017). Ao integrar esse conceito com a noção de habitabilidade galáctica, passa-se a considerar não apenas a posição orbital em torno de estrelas, mas também a posição dos sistemas planetários dentro da própria galáxia, além das interações locais entre luas e planetas. Essa visão holística é fundamental para orientar as futuras missões de exploração, seja por telescópios espaciais avançados ou sondas interplanetárias (GONZALEZ, 2005). Além disso, o avanço tecnológico tem ampliado a capacidade de detecção de exoluas (KIPPING, 2014) e novas missões espaciais podem validar essas hipóteses (KALTENEGGER *et al.*, 2018).

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos em astrobiologia representam uma fronteira de conhecimento fundamental para a ciência moderna, especialmente considerando a magnitude e os desafios inerentes à busca por vida em outros planetas e luas (COCKELL, 2015). Em um contexto em que a humanidade se vê confrontada com questões globais urgentes, como as mudanças climáticas, a preservação dos ecossistemas terrestres e a sustentabilidade dos recursos naturais, a pesquisa em astrobiologia oferece uma visão única sobre a origem, a evolução e os limites da vida, tanto na Terra quanto além dela. De acordo com Schulze-Makuch e Irwin (2018), a compreensão de como a vida se desenvolveu no nosso planeta e as condições que poderiam possibilitar a existência de vida em outros lugares do universo não é apenas uma busca científica, mas também uma reflexão profunda sobre o lugar da humanidade no cosmos (CARROLL; OSTLIE, 2017). A astrobiologia contribui para a compreensão dos limites da vida em ambientes extremos (DARTNELL, 2011). Destaca-se que o estudo comparativo de planetas amplia a compreensão da habitabilidade (KALTENEGGER, 2017).

A importância dos estudos em astrobiologia vai além da mera curiosidade científica (LINEWEAVER *et al.*, 2004). A possibilidade de descobrir vida em outros corpos celestes, seja em formas microbianas ou até mesmo em organismos mais complexos, pode ter implicações revolucionárias para as ciências biológicas, a física, a química e a filosofia. A questão de saber se estamos sozinhos no universo ou se, por acaso, existiram ou existem outras formas de vida em mundos distantes, é uma das perguntas mais antigas e mais profundas da humanidade. Os avanços na tecnologia também desempenham um papel essencial nesse cenário (CATLING; KASTING, 2017).

O desenvolvimento de telescópios e sondas espaciais mais avançados, como o Telescópio Espacial James Webb, e as futuras missões de exploração em Marte e em luas de Júpiter e Saturno, como Europa e Encélado, trazem novas e empolgantes possibilidades para a detecção de sinais de vida (KALTENEGGER, 2017). A busca por biossinais em atmosferas de exoplanetas, como o oxigênio e o metano, é um dos caminhos mais promissores. Conforme destacam Schwieterman *et al.* (2018), a presença simultânea de determinados gases em estado de desequilíbrio químico pode representar um dos indícios mais consistentes da existência de atividade biológica em um planeta. O avanço tecnológico tem ampliado significativamente a capacidade de detecção de exoplanetas (SEAGER, 2013). Também se observa que novas técnicas espectroscópicas são fundamentais nesse processo (MADHUSUDHAN, 2019).

Outro aspecto de grande relevância é o impacto que os estudos astrobiológicos podem

ter na maneira como pensamos sobre o futuro da humanidade (CATLING; KASTING, 2017). A busca por vida em outros planetas também nos leva a refletir sobre nossa própria existência e sobre como nossa espécie pode ou não sobreviver a longo prazo. Nesse sentido, Schulze-Makuch e Irwin (2018) destacam que investigar ambientes extraterrestres pode auxiliar na formulação de estratégias para preservar ecossistemas vulneráveis e antecipar cenários de adaptação biológica (CARROLL; OSTLIE, 2017). Estudos comparativos contribuem para políticas de sustentabilidade (LOVELOCK, 2000). Também se observa que a ciência planetária pode orientar estratégias ambientais globais (ROCKSTRÖM *et al.*, 2009).

Se a descoberta de vida extraterrestre, mesmo que microscópica, se concretizar, ela poderia mudar de maneira radical nossa compreensão do que é necessário para sustentar a vida e, por conseguinte, levar a uma nova era de exploração espacial (LINEWEAVER *et al.*, 2004). A busca por vida fora da Terra, portanto, não se limita à simples curiosidade científica, mas se estende a um esforço maior de entender os limites e as possibilidades da vida em diferentes contextos cósmicos. Isso também poderia abrir portas para novos tipos de pesquisa aplicada, como a biotecnologia, que poderia ser influenciada por formas de vida extraterrestres que possuam mecanismos biológicos diferentes dos que conhecemos (MIX *et al.*, 2006). Novas descobertas podem impulsionar inovações tecnológicas (DAVIES, 2010) e também se destaca que a biotecnologia pode se beneficiar de estudos astrobiológicos (DARTNELL, 2011).

A colaboração interdisciplinar foi essencial para integrar dados de diferentes fontes e áreas do conhecimento, como dados pós análise de meteoritos, os dados coletados de sondas espaciais ou as pesquisas sobre vida em condições extremas na Terra (LINEWEAVER *et al.*, 2004).

A importância desses estudos pode ser vista na afirmação de Rothschild e Mancinelli (2001), segundo eles, os extremófilos constituem um importante meio para compreender os limites da vida, pois evidenciam a capacidade dos processos bioquímicos de se ajustarem a ambientes com condições extremas de temperatura, pressão, acidez, salinidade e radiação, ampliando assim as possibilidades de existência de vida em outros mundos. O estudo de extremófilos contribui diretamente para a astrobiologia comparativa (MADIGAN *et al.*, 2015). Também reforça a hipótese de que a vida pode existir em ambientes anteriormente considerados inóspitos (DARTNELL, 2011).

A pesquisa em astrobiologia envolve uma metodologia rigorosa e multifacetada que exige uma combinação de abordagens experimentais, teóricas e observacionais (LINEWEAVER *et al.*, 2004). Pesquisar sobre astrobiologia não apenas nos ajuda a entender os limites da vida no nosso planeta, mas também abre a porta para a descoberta de vida além

da Terra (DES MARAIS *et al.*, 2008). À medida que a tecnologia avança, novas possibilidades de exploração e descoberta são cada vez mais viáveis, tornando a astrobiologia um campo essencial para o futuro da ciência (GONZALEZ, 2005). Além disso, abordagens integradas são fundamentais para avanços científicos (CRESWELL, 2014). Destaca-se que a pesquisa contínua é essencial para o desenvolvimento do conhecimento (SEVERINO, 2007).

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAHCALL, J. N.; PINSONNEAULT, M. H. Standard solar models, with and without helium diffusion, and the solar neutrino problem. *Reviews of Modern Physics*, v. 64, p. 885–926, 1992.
- BALBI, A.; HAMI, M.; KOVAČEVIĆ, A. The habitability of the galactic bulge. *Life*, v. 10, n. 8, art. 132, 2020.
- BARNES, R.; O'BRIEN, D. P. Stability of satellites around close-in extrasolar giant planets. *The Astrophysical Journal*, v. 575, p. 1087–1093, 2002.
- BINGGELI, B.; SANDAGE, A.; TAMMANN, G. A. Studies of the Virgo Cluster. II. A catalog of 2096 galaxies in the Virgo Cluster area. *The Astronomical Journal*, v. 90, n. 9, p. 1681–1759, 1985.
- BINNEY, J.; MERRIFIELD, M. *Galactic astronomy*. Princeton: Princeton University Press, 1998.
- BLAND-HAWTHORN, J.; GERHARD, O. The galaxy in context: structural, kinematic, and integrated properties. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, v. 54, p. 529–596, 2016.
- CARIGI, L.; PEIMBERT, M. The galactic habitable zone in elliptical galaxies. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, v. 47, p. 139–150, 2011.
- CARR, M. H. *The surface of Mars*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- CARROLL, B. W.; OSTLIE, D. A. *An introduction to modern astrophysics*. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
- CATLING, D. C.; KASTING, J. F. *Atmospheric evolution on inhabited and lifeless worlds*. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.

COCKELL, C. S. Extraterrestrial liberty: an enquiry into the limits of liberty on Earth and beyond. New York: Springer, 2014.

COCKELL, C. S. et al. Habitability: a review. *Astrobiology*, v. 16, n. 1, p. 89–117, 2016.

CRESWELL, J. W. Research design: qualitative, quantitative, and mixed methods approaches. 4. ed. Thousand Oaks: Sage, 2014.

DARTNELL, L. Astrobiology: a very short introduction. Oxford: Oxford University Press, 2011.

DAVIES, P. The eerie silence: renewing our search for alien intelligence. Boston: Houghton Mifflin Harcourt, 2010.

DES MARAIS, D. J. et al. The NASA astrobiology roadmap. *Astrobiology*, v. 8, n. 4, p. 715–730, 2008.

DRISCOLL, P.; BARNES, R. Tidal heating of Earth-like exoplanets around M stars: thermal, magnetic, and orbital evolutions. *Astrobiology*, v. 15, n. 9, p. 739–760, 2015.

ELLIS, J.; SCHRAMM, D. N. Could a nearby supernova explosion have caused mass extinction? *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 92, n. 1, p. 235–238, 1995.

FRY, B. J.; FIELDS, B. D.; ELLIS, J. R. Astrophysical shrapnel: discriminating among near-Earth stellar explosion sources of live radioactive isotopes. *The Astrophysical Journal*, v. 800, p. 71, 2015.

GALANTE, Douglas; SILVA, Evandro Pereira da; RODRIGUES, Fabio; HORVATH, Jorge Ernesto; AVELLAR, Marcio Guilherme Bronzato. *Astrobiologia: uma ciência emergente*. São Paulo: Universidade de São Paulo – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas; LF Editorial, 2016.

GEHRELS, N. et al. Ozone depletion from nearby supernovae. *The Astrophysical Journal*, v. 585, p. 1169–1176, 2003.

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GONZALEZ, G.; BROWNLEE, D.; WARD, P. The galactic habitable zone: galactic chemical evolution. *Icarus*, v. 152, p. 185–200, 2001.

- GOWANLOCK, M. G.; PATTON, D. R.; MCCONNELL, S. M. A model of habitability within the Milky Way galaxy. *Astrobiology*, v. 11, n. 9, p. 855–873, 2011.
- HANDA, S.; CHYBA, C. Radiolysis and the origin of life. *Science*, v. 317, p. 1600–1601, 2007.
- HELLER, R.; BARNES, R. Exomoon habitability constrained by illumination and tidal heating. *Astrobiology*, v. 13, n. 1, p. 18–46, 2013.
- HUBBLE, E. P. Extragalactic nebulae. *Astrophysical Journal*, v. 64, p. 321–369, 1926.
- INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOPHÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS (IAG-USP). Núcleo de Pesquisa em Astrobiologia – NAP/Astrobio. Disponível em: <https://www.iag.usp.br/pesquisa/nap/astrobio>. Acesso em: 12/05/2026, às 13:48.
- KALTENEGGER, L. How to characterize habitable worlds and signs of life. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, v. 55, p. 433–485, 2017.
- KASTING, J. F.; WHITMIRE, D. P.; REYNOLDS, R. T. Habitable zones around main sequence stars. *Icarus*, v. 101, n. 1, p. 108–128, 1993.
- KIPPING, D. M. The hunt for exomoons with Kepler. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 440, p. 2164–2184, 2014.
- KLEIN, J. T. *Interdisciplinarity: history, theory, and practice*. Detroit: Wayne State University Press, 1990.
- KOPPARAPU, R. K. et al. Habitable zones around main-sequence stars: new estimates. *The Astrophysical Journal*, v. 765, n. 2, art. 131, 2013.
- LAMMER, H. et al. Determining the mass loss limit for close-in exoplanets. *Astronomy & Astrophysics*, v. 506, p. 399–410, 2009.
- LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. *Fundamentos de metodologia científica*. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017.
- LIN, C. C.; SHU, F. H. On the spiral structure of disk galaxies. *The Astrophysical Journal*, v. 140, p. 646–655, 1964.
- LINEWEAVER, C. H. An estimate of the age distribution of terrestrial planets. *Icarus*, v. 151, p. 307–313, 2001.

- LINEWEAVER, C. H.; FENNER, Y.; GIBSON, B. K. The galactic habitable zone. *Science*, v. 303, p. 59–62, 2004.
- LOVELOCK, J. *Gaia: a new look at life on Earth*. Oxford: Oxford University Press, 2000.
- LUNINE, J. I. Ocean worlds exploration. *Acta Astronautica*, v. 131, p. 123–130, 2017.
- MADHUSUDHAN, N. Exoplanetary atmospheres. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, v. 57, p. 617–663, 2019.
- MEADOWS, V. S.; BARNES, R. K. Factors affecting exoplanet habitability. In: DEEG, H. J.; BELMONTE, J. A. (org.). *Handbook of Exoplanets*. Cham: Springer, 2018. p. 1–24.
- MELOTT, A. L.; THOMAS, B. C. Late Ordovician extinction patterns. *Paleobiology*, v. 35, n. 3, p. 311–320, 2009.
- MINAYO, M. C. S. *O desafio do conhecimento*. 12. ed. São Paulo: Hucitec, 2012.
- MIX, A. C. et al. Eastern Pacific warm-pool paleosalinity. *Paleoceanography*, v. 21, n. 3, 2006.
- MO, H.; VAN DEN BOSCH, F.; WHITE, S. *Galaxy formation and evolution*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- MORIN, E. *Introdução ao pensamento complexo*. Porto Alegre: Sulina, 2005.
- PEALE, S. J.; CASSEN, P.; REYNOLDS, R. T. Melting of Io by tidal dissipation. *Science*, v. 203, p. 892–894, 1979.
- PRANTZOS, N. On the galactic habitable zone. *Space Science Reviews*, v. 135, p. 313–322, 2008.
- ROCKSTRÖM, J. (KALTENEGGER, 2017) et al. A safe operating space for humanity. *Nature*, v. 461, p. 472–475, 2009.
- ROTHSCHILD, L. J.; MANCINELLI, R. L. Life in extreme environments. *Nature*, v. 409, p. 1092–1101, 2001.
- RUDERMAN, M. A. Possible consequences of nearby supernova explosions. *Science*, v. 184, p. 1079–1081, 1974.
- SAGAN, C. *Bilhões e bilhões*. São Paulo: Companhia das Letras, 1997.

- SANDAGE, A. The ability of the 200-inch telescope. *The Astrophysical Journal*, v. 133, p. 355–392, 1961.
- SCALO, J.; WHEELER, J. C. Astrophysical implications of gamma-ray bursts. *The Astrophysical Journal*, v. 566, p. 723–737, 2002.
- SCHWIETERMAN, E. W. et al. Exoplanet biosignatures. *Astrobiology*, v. 18, n. 6, p. 663–708, 2018.
- SCHULZE-MAKUCH, D.; IRWIN, L. N. *Life in the universe*. 3. ed. Cham: Springer, 2018.
- SEAGER, S. Exoplanet habitability. *Science*, v. 340, p. 577–581, 2013.
- SEVERINO, A. J. *Metodologia do trabalho científico*. 23. ed. São Paulo: Cortez, 2007.
- SOUSA, O. Estudo teórico das propriedades estruturais... 2016. Dissertação (Mestrado) – UFS.
- SPARKE, L. S.; GALLAGHER, J. S. *Galaxies in the universe*. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- THOMAS, B. C. et al. Terrestrial ozone depletion due to gamma-ray burst. *The Astrophysical Journal*, v. 622, p. L153–L156, 2005.
- TURSI, V. C. C.; RIBEIRO, G. A. C. *Astrobiologia: a vida, o universo e tudo o mais*. *Caderno Intersaberes*, v. 13, n. 45, p. 333–349, 2024.
- WALLIS, M. K.; WICKRAMASINGHE, N. C. Interstellar transfer of microbiota. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 348, p. 52–61, 2004.
- WARD, P. D.; BROWNLEE, D. E. *Rare Earth*. New York: Copernicus Books, 2000.
- WETHERILL, G. W. The formation of extra-solar planets. *Icarus*, v. 119, p. 219–238, 1996.
- WOOSLEY, S. E. et al. The v-process. *The Astrophysical Journal*, v. 356, p. 272–301, 1990.
- SCHULZE-MAKUCH, D.; IRWIN, L. S. *Life in the Universe: expectations and constraints*. 3. ed. Cham: Springer, 2018.
- SEAGER, S. Exoplanet habitability. *Science*, v. 340, n. 6132, p. 577–581, 2013.

GLOSSÁRIO

Astrobiologia – Área científica interdisciplinar que investiga a origem, evolução, distribuição e possibilidade de existência da vida no Universo.

Atmosfera Planetária – Camada de gases que envolve um planeta, responsável por regular temperatura, pressão e proteção contra radiações externas.

Braço Espiral – Estrutura curva presente em galáxias espirais, caracterizada pela concentração de estrelas, gás e poeira interestelar.

Buraco Negro Supermassivo – Objeto astronômico extremamente denso, localizado geralmente no centro das galáxias, com massa equivalente a milhões ou bilhões de vezes a massa do Sol.

Disco Galáctico – Região achatada de uma galáxia espiral onde se concentram estrelas, sistemas planetários, gás e poeira.

DNA (Ácido Desoxirribonucleico) – Molécula responsável pelo armazenamento e transmissão das informações genéticas dos organismos vivos.

Entropia de Massa – Conceito utilizado no trabalho para representar a variação da distribuição de matéria ao longo do disco galáctico e suas possíveis implicações para a habitabilidade.

Exolua – Lua que orbita um exoplaneta localizado fora do Sistema Solar.

Exoplaneta – Planeta que orbita uma estrela diferente do Sol.

Habitabilidade – Capacidade de um ambiente sustentar condições favoráveis ao surgimento, desenvolvimento e manutenção da vida.

Halo Galáctico – Região esférica que envolve uma galáxia, composta por estrelas antigas, aglomerados globulares e matéria escura.

Kiloparsec (kpc) – Unidade astronômica de distância equivalente a mil parsecs, aproximadamente 3.260 anos-luz.

Matéria Escura – Forma de matéria ainda não observada diretamente, identificada por seus efeitos gravitacionais sobre estrelas e galáxias.

Metalicidade – Quantidade de elementos químicos mais pesados que hidrogênio e hélio presentes em uma estrela ou região galáctica.

Nucleossíntese Estelar – Processo de formação de elementos químicos no interior das estrelas por meio de reações nucleares.

Panspermia – Hipótese segundo a qual a vida ou seus precursores podem ser transportados entre planetas e sistemas estelares por meteoritos, cometas ou poeira cósmica.

Parsec – Unidade de distância utilizada em astronomia, equivalente a aproximadamente 3,26

anos-luz.

Planeta Telúrico – Planeta predominantemente rochoso, como Mercúrio, Vênus, Terra e Marte.

Radiação Cósmica – Fluxo de partículas altamente energéticas que se propagam pelo espaço.

Raios Gama – Forma de radiação eletromagnética de altíssima energia, frequentemente associada a eventos astrofísicos extremos.

Sequência Principal – Fase mais estável da evolução de uma estrela, durante a qual ocorre a fusão de hidrogênio em hélio em seu núcleo.

Sistema Planetário – Conjunto formado por uma estrela e os corpos celestes que orbitam ao seu redor.

Supernova – Explosão extremamente energética que marca o estágio final da evolução de determinadas estrelas.

Via Láctea – Galáxia espiral barrada que abriga o Sistema Solar.

Zona Habitável (ZH) – Região ao redor de uma estrela onde as condições permitem a existência de água líquida na superfície de um planeta.

Zona Habitável Circunstelar – Termo equivalente à Zona Habitável, relacionado especificamente à influência de uma estrela sobre seus planetas.

Zona Habitável Galáctica (ZHG) – Região da galáxia que reúne condições consideradas favoráveis ao surgimento e manutenção da vida, levando em conta fatores como metalicidade, densidade estelar e frequência de eventos astrofísicos.