

## Interações Microbiológicas à luz da Teoria Gaia: Simbiogênese na Microbiologia Ambiental

Karin Amaral Silveira  <sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Especialista em Microbiologia: Clínica, Ambiental e Alimentos, Centro Universitário Internacional Uninter, Brasil. (\*Autor correspondente: karin.silveira11@gmail.com)

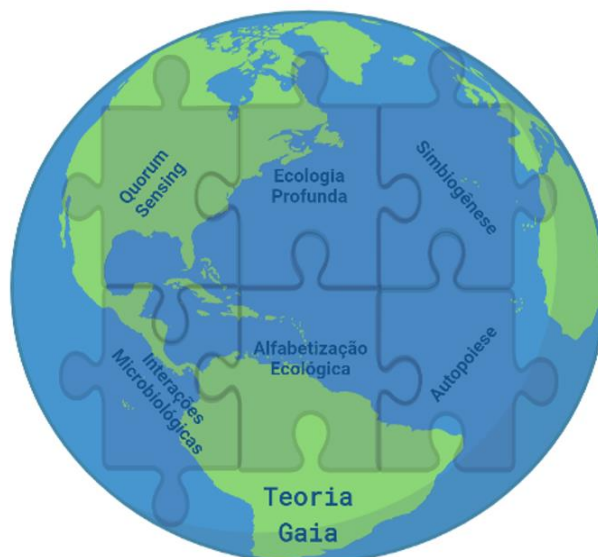
*Histórico do Artigo:* Submetido em: 23/02/2023 – Revisado em: 11/10/2023 – Aceito em: 12/03/2024

### RESUMO

Na era antropocena é evidente o conceito de superioridade do *Homo sapiens* em relação as outras espécies que coabitam o planeta, devido principalmente, ao mecanismo econômico linear predominante, que visa a exploração de recursos naturais para além de suas necessidades básicas de sobrevivência. Realizou-se neste trabalho uma revisão da literatura com o intuito de elucidar aspectos importantes em relação à quebra desse paradigma, baseando-se em teorias que podem ser previamente constatadas ao se conhecer, entender e respeitar os mecanismos circulares que originaram e ainda permanecem em relação a toda vida na Terra. A partir de conceitos como o Movimento da Ecologia Profunda; Teoria Gaia, Simbiogênese; Autopoiese; Alfabetização Ecológica, em correlação direta e indispensável às interações microbiológicas como nos ciclos biogeoquímicos; fotossíntese oxi e anoxigênica; fixação do nitrogênio e a compreensão do trabalho colaborativo entre as espécies que coabitam o planeta, além da cognição inerente de microrganismos, foi possível detectar aspectos ecológicos fundamentais que possibilitam uma mudança de comportamento do ser humano, que envolve todas as esferas mentais e práticas que compõe o próprio indivíduo, assim como em sociedade e em seus diferentes âmbitos.

**Palavras-Chaves:** Teoria Gaia; Simbiogênese; Ecologia Profunda; interações microbiológicas; *Quorum Sensing*.

### RESUMO GRÁFICO // GRAPHICAL ABSTRACT *(In portuguese)*



Silveira, K. A. (2024). Interações Microbiológicas à luz da Teoria Gaia: Simbiogênese na Microbiologia Ambiental. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, v.12, n.1, p.94-106.



Direitos do Autor. A Revista Brasileira de Meio Ambiente utiliza a licença *Creative Commons* - CC BY 4.0.

# Microbiological Interactions in light of Gaia Theory: Symbiogenesis in Environmental Microbiology

## ABSTRACT

In the anthropocene era, the concept of superiority of *Homo sapiens* in relation to other species that cohabit the planet is evident, mainly due to the predominant linear economic mechanism, which aims to exploit natural resources beyond their basic survival needs. In this work, a literature review was carried out in order to elucidate important aspects in relation to the breaking of this paradigm, based on theories that can be previously verified when knowing, understanding and respecting the circular mechanisms that originated and still remain in relation to all life on Earth. Based on concepts such as the Deep Ecology Movement; Gaia Theory, Symbiogenesis; Autopoiesis; Ecological Literacy, in direct and indispensable correlation with microbiological interactions such as in biogeochemical cycles; oxy and anoxygenic photosynthesis; nitrogen fixation and understanding the collaborative work between the species that cohabit the planet, in addition to the inherent cognition of microorganisms, it was possible to detect fundamental ecological aspects that enable a change in human behavior, which involves all the mental and practical spheres that make up the individual himself, as well as in society and in its different spheres.

**Keywords:** Gaia Theory; Symbiogenesis; Deep Ecology; microbiological interactions; Quorum Sensing.

## 1. Introdução

Neste estudo, buscará se reconhecer o meio ambiente como organismo vivo e autorregulador, a partir da análise e exemplos de interações microbiológicas e seu intrínseco processo de cognição, para sua sobrevivência e desenvolvimento, com intuito de manter o equilíbrio dinâmico da vida na Terra.

A pesquisa reúne aspectos importantes e necessários à compreensão de uma nova visão acerca do meio ambiente como um organismo vivo e autorregulador, uma visão que decorre de um novo conceito evolucionista com as pesquisas microbiológicas de Lynn Margulis e contribuições de Dorion Sagan, acerca da evolução da vida na Terra a partir da premissa da Teoria da Simbiogênese, que admite que cloroplastos e mitocôndrias se originaram a partir de uma célula procarionte.

Uma visão mais harmônica e profunda sobre o meio ambiente, de acordo com o Movimento da Ecologia Profunda descrito pelo filósofo e ecologista Arne Naess; a Teoria Gaia, que descreve o planeta como um organismo vivo e autorregulador cunhada pelo biólogo James Lovelock; a Teoria da Autopoiese dos neurobiólogos Humberto Maturana e Francisco Varela, a qual postula que organismos vivos possuem processos de cognição e capacidade de autocriação; a Alfabetização Ecológica do físico teórico Fritjof Capra, e principalmente, uma possível explicação de que o ser humano não é superior aos demais organismos vivos por ser considerado *sapiens*, e sim, mais uma espécie a coabitar esse planeta com tantos outros seres, em sua grande maioria microscópicos e fundamentais para manter o equilíbrio dinâmico na Terra.

As interações microbiológicas para elucidar a percepção simbiótica e evolutiva, são apresentadas a partir de ciclos biogeoquímicos como, os da água, carbono e nitrogênio, inteiramente realizados pela cooperação entre diversos microrganismos e diferentes espécies de seres vivos, através dos processos biológicos e bioquímicos.

Outras interações, como a fotossíntese oxigênica e anoxigênica realizadas por cianobactérias e bacterioclorofilas respectivamente; a fixação microbiológica do nitrogênio que ocorre através da simbiose de bactérias do solo como a *Rhizobium* e a *Bradyrhizobium* e vegetais, e a simbiose de zooxantelas e pólipos de corais, são indispensáveis interações que contribuem diretamente ao ciclo da vida como a conhecemos. Além da apresentação do conceito de *Quorum Sensing*, ou seja, a percepção e cognição em relação ao meio ambiente em determinados microrganismos, como a *Physarum polycephalum*, um bolor limoso que não possui sistema nervoso central, dotado de apenas uma única célula, mas é capaz de resolver problemas, movimentar-se e modificar seu comportamento de acordo com o estresse sofrido pelo meio externo, formando uma rede, uma conexão inteligente para continuar evoluindo.

Assim, os objetivos desse estudo são elucidar percepções e conceitos de ecologia, concentrando a sua

essência em aspectos importantes na abordagem de uma visão holística sobre o meio ambiente, o desenvolvimento e cooperação das espécies, através de diferentes interações microbiológicas, as quais são fundamentais para o entendimento básico da existência da vida.

## 2. Desenvolvimento

A pesquisa buscou, em um estudo descritivo, qualitativo e de natureza básica, elucidar aspectos e conceitos de ecologia que englobam a Teoria Gaia e interações microbiológicas. Para tanto, realizou-se levantamento bibliográfico, por meio de consulta eletrônica, utilizando as bases de dados Scielo, ResearchGate, SpringerLink, ScienceDirect e Semantic Scholar, além de uma extensa consulta em livros especializados no tema. Foram localizados vinte e oito artigos, entre os anos de 1971 e 2021, destes, doze atenderam ao objetivo de estudo desta pesquisa. Os critérios de inclusão determinados foram artigos que retratam o tema sobre o metabolismo das bactérias *Rhizobium*, fotossíntese oxi e anoxigênica, a simbiose de zooxantelas em recifes de corais, ciclos biogeoquímicos, pesquisas sobre o bolor limoso *Physarum polycephalum*, metabolismo de termorregulação em plantas e animais e *Quorum Sensing*.

A repercussão sobre o aquecimento global e desastres ambientais em nível mundial desencadeiam novas perspectivas nas relações entre os seres humanos e o meio ambiente. Não é novidade que nessa era antropocena, o domínio do *Homo sapiens* prevaleça em relação ao restante das espécies que coabitam o planeta, visto a modernização e desenvolvimentos tecnológicos que atuam conjuntamente para o mecanismo linear capitalista.

O cenário ambiental atual é uma realidade que afeta não somente aos interesses do próprio ser humano, mas em particular à toda vida na Terra, em suas diferentes dimensões e domínios. Segundo Fritjof Capra no seu livro intitulado *The Web of Life* (1996, p.25), a mudança de paradigmas da visão ecológica “requer uma expansão não apenas de nossas percepções e maneiras de pensar, mas também de nossos valores”, ou seja, é preciso entender e perceber a ecologia do planeta Terra de uma maneira mais profunda, não reducionista. Esse paradigma serviu como modelo existencial para toda a sociedade ocidental moderna e consequentemente, para o restante do mundo, segundo o autor:

Esse paradigma consiste em várias ideias e valores entrancheirados, entre os quais a visão do universo como um sistema mecânico composto de blocos de construção elementares, a visão do corpo com uma máquina, a visão da vida em sociedade como uma luta competitiva pela existência, a crença no progresso material ilimitado, a ser obtido por intermédio de crescimento econômico e tecnológico, e – por fim, mas não menos importante – a crença em que a sociedade na qual a mulher é, por toda parte, classificada em posição inferior à do homem é uma sociedade que segue uma lei básica da natureza. (Capra, 1996, p. 25)

A palavra ecologia deriva do grego “Okologie”, é o estudo de todas as espécies e suas inter-relações com o meio em que coabitam, palavra definida em 1866, pelo zoólogo alemão Ernst Haeckel (Capra, 1996, p. 43). Na definição de Capra (1996, p.25), o sentido da palavra “ecológico” está diretamente associada a um movimento global popular ou uma escola filosófica conhecida como “ecologia profunda”, fundada na década de 70, pelo filósofo e ecologista norueguês Arne Naess, a qual distingue “ecologia rasa” e “ecologia profunda”, entendendo a ecologia rasa como atrelada diretamente à era antropocena, essa, define os seres humanos “como situados acima ou fora da natureza, como fonte de todos os valores, e atribui apenas um valor instrumental, ou de “uso”, à natureza”, logo, o ser humano soberano perante à natureza.

## 2.1 Movimento da Ecologia profunda

Na obra *The Ecology of Wisdom* escrito por Arne Naess e editado por Alan Drengson e Bill Devall em 2008, é possível compreender conceitos básicos e aprofundados do Movimento da Ecologia Profunda, esta, abrange aspectos filosóficos e religiosos em sua definição. Segundo Naess (2008, p.105, tradução livre) para facilitar a discussão sobre o movimento da ecologia profunda é preferível utilizar o termo “plataforma comum” a fim de distinguir a ecologia profunda das características fundamentais das filosofias e religiões das quais essa plataforma deriva, formulando provisoriamente, um conjunto de normas e hipóteses ou suposições factuais.

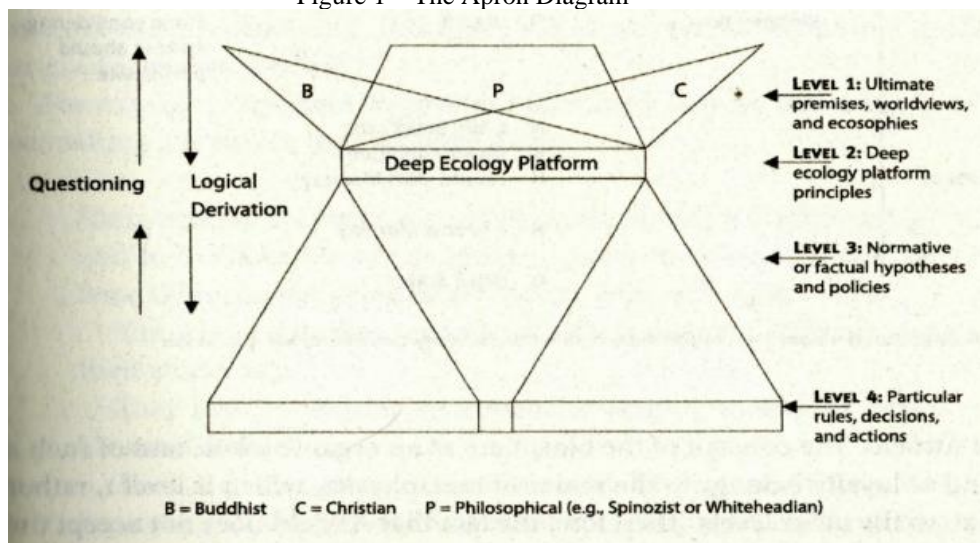
Ainda segundo o autor, a plataforma do Movimento da Ecologia Profunda pode ter definições suscetíveis a várias interpretações, sendo justificada por referência, a um conjunto definido de suposições de tipos filosóficos, religiosos ou éticos, e evitando procurar uma visão religiosa ou filosófica definitiva entre os defensores do movimento, assim, com caráter transcultural, a plataforma do Movimento da Ecologia Profunda não possui uma versão igual em todos os lugares (Naess, 2008, p. 106, tradução livre).

Para facilitar a compreensão da discussão acerca desse movimento, Naess distribui o conceito em quatro níveis:

- (1) fundamentação em visões verbalizadas tanto filosóficas, quanto religiosas;
- (2) plataforma da ecologia profunda;
- (3) consequências mais ou menos gerais que são derivadas da plataforma, como diretrizes para estilos de vida e políticas datadas de tipos diversos;
- (4) prescrições relacionadas a situações concretas, além de decisões embasadas nelas.

Esses níveis podem ser visualizados num diagrama chamado Apron, conforme Figura 1. O diagrama Apron apresenta os fundamentos do movimento como um modelo estático, com a função de demonstrar como a ação e reflexão do sujeito pode transitar de um pensamento ecológico raso para um pensamento ecológico profundo.

**Figura 1 - O Diagrama Apron**  
Figure 1 – The Apron Diagram



Fonte: Naess, 2008, p.107

Source: Naess, 2008, p.107

A interpretação do diagrama se inicia pela base, representada pelos níveis 3 e 4, os quais definem as decisões individuais e cotidianas do sujeito, movidas pela subjetividade em suas escolhas, ou seja, a base, ou as escolhas individuais do sujeito, são o princípio no aumento dos questionamentos consequentes. Os níveis 1 e 2 representam o aumento desses questionamentos, que evoluem de questionamentos individuais, para questionamentos descentralizados sobre o homem no meio, ou seja, é uma transição de escolhas baseadas no cotidiano, para escolhas no plano metafísico do sujeito (Darius & Barnabé, 2020). Ainda, o nível 1 – *ecosofia* - está diretamente relacionado a reflexões baseadas em valores filosóficos, religiosos ou éticos do sujeito e a partir dessas reflexões individuais surgem questionamentos mais profundos e consequentemente, a construção do saber ecológico (Darius & Barnabé, 2020). Na percepção de Capra:

Enquanto que o velho paradigma está baseado em valores antropocêntricos, (centralizados no ser humano), a ecologia profunda está alicerçada em valores ecocêntricos (centrados na Terra). É uma visão de mundo que reconhece o valor inerente da vida não humana. Todos os seres vivos são membros de comunidades ecológicas ligadas umas às outras numa rede de interdependências. (Capra, 1996, p. 28).

Assim sendo, o movimento da ecologia profunda busca uma mudança de paradigmas em relação ao pensamento egóico e predatório do ser humano, para um pensamento mais harmônico e profundo sobre a sua própria natureza existencial, atrelada à sua relação com o meio ambiente, o meio no qual coabita com outras espécies.

## 2.2 A Teoria Gaia

O termo *Gaia* deriva de uma divindade primigênia na mitologia grega, a Mãe-Terra, a “personificação que formou o mundo”, segundo o poeta Hesíodo. No livro desenvolvido em parceria com diversos cientistas de áreas multidisciplinares, intitulado “Gaia Uma teoria do Conhecimento” e organizado por Willian Irwin Thompson, (2014) “Gaia – um modelo para dinâmica planetária e celular”, o capítulo elaborado pelo biólogo James Lovelock, elucida aspectos de uma nova visão sobre a Terra, não mais com um produto a gerar meios de sobrevivência e exploração, subsídios, mas como um organismo vivo e autorregulador que busca a homeostase dinâmica, mantendo o seu funcionamento, se adaptando em cooperativismo e evoluindo constantemente.

Lovelock foi convidado a conduzir um estudo pela NASA, no Laboratório de Propulsão à Jato e, segundo o autor à época, o intuito era buscar vida terrestre, “em um planeta nada semelhante à Terra” (Lovelock, 2014, p. 81). A ideia principal do projeto era buscar vida em Marte, de acordo com padrões atmosféricos terrestres, a partir de alterações em sua composição química,

O argumento é o seguinte: temos uma abundância de oxigênio, 21% da atmosfera, e um vestígio de metano 1,5 parte por milhão [...] não há reações conhecidas em química que possam produzir essas enormes quantidades de metano e oxigênio, partindo das matérias-primas disponíveis, água e dióxido de carbono, e com a utilização de energia solar. Portanto, deve haver algum processo na superfície da Terra, capaz de agregar, de uma forma programada, a sequência de intermediários instáveis e reativos, para alcançar esse objetivo. Provavelmente esse processo seja a vida. (Lovelock, 2014, p. 83).

A partir dessas implicações, Lovelock deduziu que Marte era destituída de vida, notícia desacreditada pela NASA e a qual, acarretou seu afastamento do estudo. A partir desse acontecimento, James Lovelock, buscou entender como a atmosfera terrestre possui gases tão reativos entre si e consegue manter constante sua composição. A Teoria Gaia surge dessa dúvida, que “talvez o ar não fosse apenas um meio ambiente para a vida, mas também uma parte da própria vida”.

Com a contribuição da microbióloga Lynn Margulis no desenvolvimento da ainda hipótese de Gaia,

foram categorizadas duas premissas. A primeira é a evidência termodinâmica - coexistência de oxigênio e metano na composição atmosférica -, na qual é possível diferenciar a composição química do solo, oceanos e ar, do estado de equilíbrio. Ainda segundo os autores, “a diferença é a medida da redução da entropia” - grau de desordem de partículas em um sistema físico - “em consequência da presença de vida” (Lovelock, 2014, p. 84). Para esclarecer, os autores consideraram a composição atmosférica de diferentes planetas: Vênus, Marte, Terra e Júpiter, com a intenção de saber, não sobre a quantidade de gases que as compõe, mas sim, a quantidade de gases que está fluindo através dessas atmosferas, segundo Lovelock:

Há três classes importantes de gases presentes nas atmosferas planetárias: gases oxidantes, tais como o oxigênio e o dióxido de carbono; gases neutros, como nitrogênio e monóxido de carbono; e aqueles que os químicos chamam de gases redutores, como o metano, hidrogênio e amoníaco. Em geral, os gases oxidantes e redutores dispõem-se a reagir entre si e, frequentemente, de forma bastante ativa (Lovelock, 2014, p. 85).

Logo, o objetivo principal dessa apresentação foi demonstrar que as atmosferas de planetas considerados terrestres, como Vênus e Marte possuem em sua composição somente gases oxidantes e neutros, enquanto Júpiter possui somente gases redutores. Ou seja, a Terra com vida foi considerada anômala, pois possui em sua composição atmosférica gases oxidantes, redutores e neutros, portanto, a Terra é uma construção biológica. “Todas as camadas da superfície da Terra são mantidas em condição estável, bem distantes das expectativas da química, através do dispêndio de energia da biosfera” (Lovelock, 2014, p. 85).

A segunda premissa expõe a Teoria Gaia através da cibernética. O termo cunhado pelo matemático Norbert Wiener em 1948 é um sistema baseado na comunicação, no controle e na cognição, um processo de realimentação. Segundo Capra (1996, p. 61), “Wiener e seus colegas também reconheceram a realimentação como mecanismo essencial da homeostase, a autoregulação que permite aos organismos vivos se manterem num estado de equilíbrio dinâmico”.

Pesquisadores como o geoquímico Robert Garrels e Michael Whitefield, abordaram essa visão cibernética em suas pesquisas. Garrels, a partir de estudos sobre os ciclos dos principais elementos químicos que podem fluir através das superfícies terrestres entre os oceanos, a atmosfera e a própria crosta terrestre, concluiu que existe uma dinâmica de realimentação dessas superfícies, como uma espécie de mecanismo que mantém protegido esse sistema de possíveis perturbações. Assim como o estudo de Whitefield, sobre os ciclos desses principais elementos nos oceanos. Whitefield concluiu que a rede de seres vivos que coabitam esse espaço desempenham “o papel mais importante na distribuição e abundância dos vários elementos dispersos no mar” (Lovelock, 2014, p. 86). Segundo o autor:

Quando nos referimos à vida ou à biosfera, nossa tendência é esquecer que os procariontes, uma simples bactéria, mantiveram uma biosfera bem-sucedida e representaram a vida na Terra por cerca de duas eras (dois milhares de milhões de anos). Atualmente, ainda são responsáveis por grande parte da condução do sistema existente (Lovelock, 2014, p.91).

Sendo assim, a visão da Terra/Gaia como um organismo vivo e autorregulador pode ser evidenciado também, através de estudos sobre a cooperação de microrganismos que desempenham papel fundamental em toda a evolução da vida na Terra. Essa junção de pesquisas científicas busca viabilizar e alcançar um patamar mais reflexivo numa possível mudança do pensamento ecológico planetário.

### 2.3 Teoria da Simbiogênese

A primeira edição, em 1986, da obra *Microcosmos For Billion Years of Microbial Evolution*, desenvolvida pela microbióloga Lynn Margulis em cooperação com seu filho Dorion Sagan, evidencia

aspectos de extrema relevância em relação à evolução das espécies de microrganismos que habitaram o planeta Terra há cerca de 3,5 bilhões de anos atrás e apresenta no capítulo 6, intitulado *The oxigen Holocaust* a transição entre uma atmosfera primitiva, que nos primórdios existenciais, cerca de 4,5 bilhões de anos atrás era coberto por gases tóxicos como metano, dióxido de carbono, nitrogênio e outros gases nocivos à vida, para uma atmosfera oxigenada (Margulis & Sagan, 1986, p. 99).

De acordo com Margulis, (2014, p. 99), em seu capítulo, Os primórdios da Vida, presente no livro “Gaia uma Teoria do Conhecimento” (2014), a microbióloga indaga sobre como a atmosfera terrestre comportou tanto oxigênio em sua composição e, ainda assim, promoveu a vida terrestre,

Para responder a estas questões, temos que observar os organismos que sucederam a bactéria fotossintética mais primitiva. Esses sucessores foram algas verde-azuis, um grupo equivocadamente chamado de fotossintetizador que não eram algas, e nem sempre de cor verde-azul. Hoje, em reconhecimento à afinidade essencial desses micróbios com outras bactérias, os biólogos empregam o termo bactéria verde-azul ou cianobactéria. Estas cianobactérias foram, provavelmente, os primeiros organismos a desprender oxigênio como produto residual de sua fotossíntese” (Margulis, 2014 p.99 – 100, tradução livre).

A partir dos produtos residuais provenientes da metabolização fotossintética das cianobactérias e algas púrpuras ancestrais foi possível, de acordo com Margulis e Sagan (1986), o começo da oxigenação na Terra. Esse “holocausto” obrigou os micróbios a inventarem vários mecanismos intracelulares para explorar e se adaptar ao perigoso gás oxigênio. De acordo com os autores, a demanda por hidrogênio iniciou a crise cerca de 2.000 milhões de anos atrás, e a necessidade de sobrevivência com compostos de carbono e hidrogênio, já havia praticamente esgotado o dióxido de carbono presente na atmosfera, e foi através da abundância de água (H<sub>2</sub>O) que esses microrganismos conseguiram sobreviver e se perpetuar,

O hidrogênio foi rapidamente agarrado e adicionado ao dióxido de carbono do ar para produzir produtos químicos de alimentos orgânicos, como os açúcares. Em uma inovação evolutiva sem precedentes, até onde sabemos, no universo, os alquimistas azul-esverdeados, usando a luz como energia, extraíram hidrogênio de um dos recursos mais ricos do planeta, a própria água (Margulis & Sagan, 1986, p. 101, tradução livre).

Essa única mudança metabólica de minúsculos microrganismos teve grandes implicações para a futura história de toda a vida na Terra e, a partir dessa oxigenação, essas vidas procariontes conseguiram colonizar toda a superfície terrestre, buscando lugares onde podiam encontrar a luz do sol, dióxido de carbono e água (Margulis & Sagan, 1986, p. 101, tradução livre).

Conforme o aumento da concentração de oxigênio na atmosfera terrestre, as células de microrganismos não fotossintéticos desenvolveram a capacidade de utilizar o próprio oxigênio metabolizado para gerar energia, e consequentemente aumentar o seu tamanho, gerando “funções mais sofisticadas”, os primeiros seres aeróbios (Margulis, 2014, p.100). Ainda segundo os autores, o início da era geológica Cambriana é um marco da evolução de “formas animais de maior porte e de vida ligada a fotossíntese”. (Margulis, 2014, p. 101).

A partir dessa perspectiva, é possível entender que a superfície do planeta resultou em alterações sofridas pela origem, evolução e desenvolvimento das espécies que coabitavam a Terra, alterando também a estrutura, e diversidade de espécies que se desenvolveram conjuntamente, e em sua grande maioria, em um processo simbiótico (Margulis, 2014, p.101).

A simbiose é definida como uma junção de um ou mais organismos, denominados simbiontes, que coexistem mutuamente, ou seja, compartilham uma vida íntima, interagem e vivem juntos, seja de maneira mutualista, comensalista ou parasitista. De acordo com Margulis, (2014, p. 97), a teoria simbiótica da origem de células eucariontes aponta os microrganismos existindo independentemente de outros organismos, agregando-se a outros seres, “primeiro por acaso, como células separadas – numa ligação hospedeiro e hóspede

– e depois, por necessidade. Afinal, as células hóspedes tornaram-se organelas de um novo tipo de célula”. A teoria da simbiogênese, segundo Capra:

[...]implica uma mudança radical de percepção no pensamento evolutivo. Enquanto a teoria convencional concebe o desdobramento da vida como um processo no qual as espécies apenas divergem umas das outras, Lynn Margulis alega que a formação de novas entidades compostas por meio da simbiose [...] reconhece a cooperação contínua e a dependência mútua entre todas as formas de vida como aspectos centrais da evolução (Capra, 1996, p. 185).

É possível encontrar essas formas de vida simbióticas em diversos organismos e microrganismos ao redor do planeta, exemplos que serão abordados sequencialmente nessa pesquisa.

## 2.4 Teoria da Autopoiese

Cambiando numa perspectiva mais reflexiva acerca da origem e definição dos seres vivos, os neurobiólogos Humberto Maturana e Francisco Varela definem o meio ambiente como um nicho ecológico, “um âmbito relacional no qual o organismo vive”, não como um espaço ocupado pelo organismo, mas sim, segundo Maturana. “os organismos deslizam no seu viver, na conservação de sua coerência, num nicho ecológico que vai se transformando com eles”. Logo, os nichos ecológicos não são fixos, estão em constante transformação, assim como a própria unidade de um organismo, o qual Maturana chama de unidade ecológica organismo-nicho, este nicho “é a forma de viver dos seres vivos, porque é a unidade operacional em que se realiza sua autopoiese molecular” (Maturana, 2017, *Origen de la vida em La Tierra*, tradução livre). “Os seres vivos existem em unidades ecológicas organismo-nicho que constituem na sua reprodução sistêmica. Linhagens de distintas formas de existir se entrelaçam de maneira harmônica em uma biosfera” (Maturana, 2017, *Origen de la vida em La Tierra*, tradução livre), ou seja, todos os organismos vivos pertencem a uma mesma história, uma unidade ecológica em constante transformação na diversidade, uma rede contínua de interações dinamicamente relacionadas, uma organização autopoietica.

A definição de autopoiese segundo Maturana e Varela (2021, p. 54) é entendida a partir da *organização*, que são “as relações que devem ocorrer entre componentes de algo, para que seja possível reconhecê-lo como membro de uma classe específica”, e a *estrutura*, “componentes e relações que constituem concretamente uma unidade particular e configuram organização”, logo, os seres vivos são unidades autônomas, e para compreender essa autonomia é necessário, antes de tudo, compreender que a organização que o define como unidade é a sua organização autopoietica. Portanto, é concebível analisar a autopoiese através do metabolismo “e estrutura celular em sua interdependência”,

Como toda organização, a autopoietica pode ser obtida por meio de muitas espécies diversas de componentes. No entanto, devemos tomar consciência de que no âmbito molecular de origem dos seres vivos terrestres, apenas algumas espécies moleculares devem ter tido as características que permitiram a constituição de unidades autopoieticas, dando início a história estrutural à qual nós próprios pertencemos. Por exemplo, foi necessário contar moléculas capazes de formar membranas suficientemente estáveis e plásticas para serem, por sua vez, barreiras eficazes e de propriedades mutantes que permitissem a difusão de moléculas e íons por longos períodos, em relação às velocidades moleculares (Maturana & Varela, 2021, p. 56).

Ou seja, os fenômenos autopoieticos dependem de como a organização molecular se realiza, e não dependem somente dos componentes físicos que pertencem à essa organização, mas sim, através das suas intra e interrelações. Segundo Capra, 1996, p. 89 “Trata-se de uma rede de processos de produção, nos quais, a função de cada componente consiste em participar da produção ou da transformação de outros componentes



da rede”. Assim, a rede produz sua própria organização fechada, “mas aberta aos fluxos de energia e recursos” (Capra, 1996, p. 231).

## 2.5 Alfabetização Ecológica

Para finalizar a estruturação teórica é importante destacar a concepção de Alfabetização Ecológica que, segundo Capra e a teoria dos sistemas vivos, em seu epílogo do livro *The web of Life* de 1996, significa:

Reconectar-se com a teia da vida significa construir, nutrir e educar comunidades sustentáveis, nas quais podemos satisfazer nossas aspirações e nossas necessidades sem diminuir as chances das gerações futuras. Para realizar essa tarefa, podemos aprender valiosas lições extraídas do estudo de ecossistemas, que são comunidades sustentáveis de plantas, de animais e de microrganismos. Para compreender essas lições, precisamos aprender o princípio básico da ecologia. Precisamos nos tornar, por assim dizer, ecologicamente alfabetizados [...] precisamos revitalizar nossas comunidades – inclusive nossas comunidades educativas, comerciais e políticas – de modo que os princípios da ecologia se manifestem nelas como princípios de educação, administração e de política (Capra, 1996, p. 231).

Portanto, esses são princípios ecológicos básicos, a partir de princípios organizacionais e direcionais para a construção de comunidades humanas sustentáveis, como a interdependência - processo mútuo de relações vitais aos organismos -, logo, o processo do ser humano ao compreender relações e como se transformam. Também, o fluxo cíclico de recursos - compreensão do processo ecológico cíclico, com laços de realimentação não lineares e ciclagem contínua de nutrientes - além da cooperação e parceria nas comunidades humanas, ou, segundo Capra (1996, p.234) “coevolução”, são princípios fundamentais para uma mudança ecológica de postura social evidenciado pela visão econômica linear e extrativista nesta era antropocena, princípios baseados na “interdependência, parceria, flexibilidade, diversidade e, como consequência de todos estes, sustentabilidade” (Capra, 1996, p. 235). Essa revitalização de conexão com a vida em seus diferentes domínios, pode proporcionar uma mudança de paradigma atual, para um pensamento ecológico inteligente e harmonioso em todas as perspectivas e esferas sociais.

## 2.6 Interações Microbiológicas

Corroborando com os preceitos reflexivos da origem da vida e sua constante evolução e permanência, é importante destacar conceitos básicos e de conhecimento geral de biologia, a fim de entender como as interações microbiológicas e bioquímicas proporcionam um verdadeiro espetáculo natural e cíclico na concepção de trabalho em cooperação para a sobrevivência de todas as espécies no planeta. A partir da análise de microrganismos, muitas vezes invisíveis aos olhos humanos, é possível compreender a busca pelo equilíbrio dinâmico e a perfeita harmonia da cooperação entre espécies tão diversas.

A exemplo na presente pesquisa, os ciclos biogeoquímicos, como os da água, carbono e nitrogênio, participam ativamente e indispensavelmente na construção e evolução da vida no planeta, fluindo – como proposto pela Teoria Gaia de Lovelock e Margulis - em todas as superfícies, reciclando elementos mantenedores. Assim como as fotossínteses oxi e anoxigênicas imprescindíveis para a concepção da vida terrestre; a simbiogenese de mixobactérias e zooxantelas, e a cognição inerente nesses “micro-seres” no exercício contínuo de autoregulação e sobrevivência adaptativa.

A água é um elemento químico essencial e um dos elementos mais importantes para a manutenção e evolução da biosfera, corresponde cerca de 70% sobre a crosta terrestre, segundo Aduan, Vilela e Reis (2004). O ciclo da água é subdividido em duas etapas conhecidas como curta e longa, nessa - ocorre sem a participação de seres vivos - a evaporação do meio hidrográfico para a atmosfera, passando pela condensação até sua

precipitação pluvial, ou resfriada, em forma de granizo ou neve. Já na etapa longa, assim que haja precipitação e em contato com a superfície terrestre, a água consumida pelos seres vivos, seja, ou absorvida pelos organismos através das raízes da vegetação, ou consumida diretamente pelos animais, retorna à atmosfera terrestre pelo processo de transpiração, seguindo os mesmos processos do ciclo curto, ou seja, no ciclo longo da água ocorre tanto o processo de evaporação, quanto de transpiração, conhecido como evapotranspiração (Embrapa, 2014).

A fisiologia da transpiração animal, de maneira sucinta, é um processo de termorregulação do corpo, ou seja, permite, além da eliminação de subprodutos em excesso e não absorvidos pelo organismo – como a água - manter o calor corporal ao do ambiente através da autorregulação, no intuito de alcançar o equilíbrio dinâmico de si mesmo com o meio (Rezende & Bacigalupe, 2015). Na fisiologia vegetal, o processo se dá em decorrência da absorção do elemento, através da epiderme das raízes no solo, em um processo de osmose, até a dispensação pelas cutículas e estômatos das folhas das plantas, sendo o produto dispensado, água em estado líquido retornando para a atmosfera, para condensação e posterior precipitação (Watling et al., 2008). É notavelmente evidenciado que as interações bióticas que envolvem o ciclo da água estão atreladas aos outros ciclos de maior complexidade, e estão intimamente conectados entre si, como os ciclos do carbono e nitrogênio

O carbono é um elemento essencial na composição da matéria orgânica e também de matéria inorgânica. Cerca de 19% das moléculas que compõe o ser humano, são constituídas por esse elemento. Na atmosfera terrestre, encontra-se na forma de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e de acordo com Aduan, Vilela e Reis (2004), este elemento movimenta-se de maneira natural na biosfera, através da fotossíntese, com a contribuição de organismo autotróficos terrestres e plânctons nos oceanos; respiração de todos os seres vivos; pela decomposição da matéria orgânica e pela sua dissolução nos oceanos, ou seja, um processo cíclico que engloba toda a biosfera.

De acordo com Rosa et al. (2003), o carbono pode retornar ao ambiente também, através da queima de combustíveis fósseis, muito utilizados em maquinários industriais, além da queima de florestas e desmatamento, assunto muito discutido atualmente, devido ao aquecimento global e emissões de gases de efeito estufa (GEE), o qual gera discussões nas áreas científicas, políticas e sociais, em relação a mudança climática no planeta e suas drásticas consequências.

No ciclo do nitrogênio, o elemento em sua forma gasosa ( $\text{N}_2$ ) é um dos gases mais abundantes da atmosfera, seguido de outros gases, como o dióxido de carbono (Vieira, 2017). O gás nitrogênio não é processado pelos organismos terrestres através da respiração ou fotossíntese. Para iniciar seu ciclo é necessário que esse gás seja fixado no solo, de uma forma não gasosa, ou seja, a fixação do nitrogênio no solo ocorre através da simbiose de bactérias fixadoras que podem se encontrar livres no solo ou em simbiose com as raízes de leguminosas (Vieira, 2017). A exemplo as bactérias *Rizhobium* e *Bradyrhizobium*.

Sequencialmente à fixação, ocorre a formação da amônia, que por sua vez, é processada através da nitratação e nitratação, ou seja, a transformação da amônia em nitrito e, posteriormente, em nitrato, pela ação de bactérias nitrificantes, como as *Nitrosomonas*, em um processo conhecido como nitrificação, e sendo o nitrato resultante, absorvido pelas raízes das plantas leguminosas (Vieira, 2017).

Os animais contribuem significativamente para a realização do ciclo do nitrogênio através do consumo dessas plantas, e através de excretos nitrogenados ou matéria orgânica em decomposição. Passam pelo processo conhecido como amonificação e liberam amônia no solo novamente, assim o nitrogênio retorna à atmosfera ao sofrer o processo de desnitrificação, também, pela ação de bactérias desnitrificantes, como as *Pseudomonas* (Vieira, 2017).

Corroborando com a explanação de Lynn Margulis e sua Teoria da Simbiogênese, as bactérias *Rizhobium* e *Bradyrhizobium* são exemplos indispensáveis de interação microbiológica. Os rizóbios geralmente se ligam aos pêlos das raízes das leguminosas formando nódulos e são responsáveis pela assimilação de uma proporção substancial do nitrogênio na biosfera, é uma troca altamente regulada de carbono e nitrogênio, a planta recebe um suprimento de nitrogênio fixo, enquanto a bactéria recebe carbono, e

mutuamente se regulam (Poole & Allaway, 2000).

Seguindo a fundamentação do ciclo do nitrogênio e bactérias fixadoras de nitrogênio, a fotossíntese bacteriana, assim como a fotossíntese realizada por plantas e algas é fundamental para a oxigenação do planeta. A fotossíntese oxigênica bacteriana é caracterizada pela atuação de microrganismos fotoautotróficos, ou seja, bactérias que utilizam a energia eletromagnética da luz solar para sintetizar carboidratos e outros constituintes celulares a partir de uma fonte de dióxido de carbono e água (Buchanan, 1992).

As cianobactérias são exemplos clássicos de microrganismos que utilizam o pigmento azul que mascara a clorofila, para sintetizar oxigênio. De acordo com Franceschini et al. (2010 p.24 - 25), as cianobactérias não possuem células flageladas e suas paredes celulares são constituídas de mureína, recobertas por uma membrana constituída de lipopolissacarídeos, são amplamente difundidas em todos os meios, dulcícolas, marinhos, terrestres e possuem uma enorme capacidade de simbiose com inúmeros organismos vegetais como folhas de plantas e raízes, e as mais comuns são os líquens e, assim como os rizóbios, são capazes também de metabolizar o nitrogênio gasoso da atmosfera, principalmente nos oceanos. Eles estão entre os primeiros seres vivos que se originaram no planeta, cerca de 2,7 bilhões de anos, tendo algumas espécies aparecido cerca de 3,5 bilhões de anos atrás (Franceschini et al., 2010).

Já a fotossíntese anoxigênica, apesar da semelhança com a fotossíntese oxigênica bacteriana – também utilizam luz solar para seu metabolismo – são caracterizadas pela presença de bactérias chamadas de bacterioclorofilas, e ao invés de produzirem oxigênio, produzem hidrogênio, metabolizando o enxofre ao invés do dióxido de carbono e água.

Ainda, seguindo a premissa da simbiose entre os organismos é prudente destacar o papel importantíssimo dos recifes de corais biogênicos e um dos mais “espetaculares ecossistemas marinhos”, segundo Vilaça (2015), e suas respectivas bioconstruções. Os recifes biológicos são formados em regiões tropicais rasas, nos quais carbonato de cálcio são depositados por organismos de diferentes espécies e abrigam também inúmeras espécies, contribuindo diretamente na ciclagem de nutrientes e no ciclo do carbono. Segundo Vilaça (2015) “para cada cálcio capturado, uma molécula de dióxido de carbono é depositada e metade do cálcio que entra no mar é capturado para a construção do recife”. Dentre as várias espécies que ocupam um lugar cativo em meio aos recifes de corais estão as zooxantelas, uma espécie de alga dinoflagelada que ao realizar fotossíntese elevam a taxa de calcificação dos recifes e são encontradas em todos os recifes de corais ao redor do planeta (Buchsbaum & Muscatine, 1971). Portanto, é possível assumir que essas espécies trabalham mutua e conjuntamente para o seu desenvolvimento e evolução.

## 2.7 Quorum Sensing

O *Quorum Sensing* é caracterizado como uma espécie de controle que sincroniza a transcrição e expressão genética em resposta à densidade da massa celular bacteriana, são produções e detecções de baixa massa molecular, ou seja, os microrganismos possuem a capacidade de sintetizar moléculas de baixa massa molecular e de maneira passiva são liberadas ou secretadas para o meio extracelular (Bueris, 2020).

Conforme a população de microrganismos se desenvolve, automaticamente, suas moléculas também aumentam, e ao atingir o número necessário para sua detecção, se ligam a receptores membranosos ou citoplasmáticos específicos, disparando sinalizações, originando alterações na transcrição e expressão gênicas alvo entre as populações. Se comunicam de maneira intraespecífica – moléculas sinalizadoras que são reconhecidas pela própria espécie de microrganismos –, interespecífica – moléculas sinalizadoras que são reconhecidas por espécies diferentes de microrganismos –, e podem se comunicar também, através de inter-reinos, logo, são reconhecidas por espécies de microrganismos de reinos diferentes. Essas moléculas são conhecidas como autoindutoras (Bueris, 2020).

A exemplo, o bolor limoso *Physarum polycephalum*. Segundo Oettmeier, Brix e Dobereiner (2017), a *P. polycephalum* é um protista unicelular, porém multinucleado e foi descrito pela primeira vez por Von

Schweinitz em 1822. Vem sendo pesquisado e estudado, principalmente por questões fundamentais sobre o funcionamento dos organismos vivos. Essas espécies possuem inteligência sem mesmo possuir um sistema nervoso central, conseguem resolver labirintos, quebra-cabeças geométricos, além de reconhecerem os caminhos que já percorram em busca de alimento (Oettmeier, Brix & Dobereiner, 2017). De acordo com um experimento realizado pelo cientista japonês Toshiyuki Nakagaki em 2001, o *P. polycephalum* ao ser realocado dentro de um extenso labirinto com flocos de aveia na entrada e saída deste, conseguiu, de maneira ágil e inteligente, rearranjar seu caminho em direção aos flocos de aveia, colonizando e marcando os caminhos até a fonte de alimento. Posteriormente, o experimento elevou a pesquisa para um sistema mais sofisticado, Nakagaki e colaboradores ampliaram o labirinto para uma recriação da cidade de Tóquio e a partir da cognição da *P. polycephalum*, conseguiram mapear a cidade de Tóquio e cidades subjacentes, com a autorganização e colonização do bolor limoso (Nakagaki, Yamada & Tóth, 2001).

A autorganização da *P. polycephalum*, evidencia que microrganismos possuem uma capacidade inerente de cognição, além da comunicação entre si e outras espécies, sem mesmo possuírem um sistema nervoso como outros organismos vivos, o que, definitivamente nos faz refletir sobre a nossa própria existência e consciência diante de um universo que não se pode enxergar e está em pleno desenvolvimento e evolução, conjuntamente à todas as espécies que habitam o planeta Terra.

### 3. Conclusões

A repercussão sobre o aquecimento global e desastres ambientais em nível mundial desencadeiam novas perspectivas nas relações entre os seres humanos e o meio ambiente. Não é novidade que nessa era antropocena, o domínio do *Homo sapiens* prevaleça em relação ao restante das espécies que coabitam o planeta, visto a modernização e desenvolvimentos tecnológicos que atuam conjuntamente para o mecanismo linear capitalista. O cenário ambiental atual é uma realidade que afeta não somente aos interesses do próprio ser humano, mas em particular à toda vida na Terra, em suas diferentes dimensões e domínios. As diferentes percepções e pesquisas em multidisciplinaridade como o Movimento da Ecologia Profunda, a Teoria Gaia, Simbiogênese, Autopoiese e Alfabetização Ecológica evidenciam uma nova maneira de reorganizar e perceber o meio ambiente como um organismo vivo e autorregulador, que trabalha incessantemente e cooperativamente como apresentado nas interações biológicas e microbiológicas dos ciclos biogeoquímicos, assim como nas fotossínteses oxi e anoxigênicas e a capacidade de cognição de microrganismos, que possuem inteligência e agilidade na busca por sobrevivência e desenvolvimento, como visto o bolor limoso *Physarum polycephalum*.

É necessário enxergar o meio ambiente de maneira holística, entendendo o funcionamento e cooperação de todos os organismos vivos que coabitam o planeta, é preciso uma mudança drástica no pensamento do ser humano em relação à sua casa e entender a ecologia como um sistema vivo que independe das ambições humanas, é preciso integração entre as espécies e essa nova mudança de paradigma necessita partir de nós, que somos considerados seres pensantes e conscientes de nossos atos e responsabilidades.

### 4. Agradecimentos

Ao Centro Universitário Internacional Uninter – Setor de Pós Graduação, pelo suporte acadêmico.

### 5. Referências

- Aduan, R. E; Vilela, M. F; Reis, F.B. Os Grandes Ciclos Biogeoquímicos do Planeta. **Embrapa**. Planaltina, DF, 2004.
- Buchanan, B. B. Carbon dioxide assimilation in oxygenic and anoxygenic photosynthesis. Department of Biology, University of California, Berkeley, 1992.

Bueris, V. **Quorum Sensing**. USP, 2020. Disponível em: <https://eaulas.usp.br/portal/videos.action?idItem=11469>. Acesso em: 23 de novembro de 2022.

Buchsbaum, V. P.; Muscatine, L. Role of Symbiotic Algae (Zooxanthellae) in Coral Calcification. *In: Biological Bulletin*, vol. 141, n°2, 1971 pp. 350-363.

Capra, F. (1997). **The Web of Life**. (1ª ed.) São Paulo: Cultrix, 256 p.

Darius, F. A.; Barnabé, T.A. Deep Ecology: uma nova metafísica em tempos de crise ambiental. **Revista Kerygma**. Volume 15, n°2, p 50 – 63, 2020.

Franceschini, I.M; Burliga, A.L.; Reviere, B.; Prado, J. F; Rézig, S.H. (2010) **Algas: Uma abordagem filogenética, taxonômica e ecológica**. (1ª ed.). Porto Alegre: Artmed Editora S.A, 332 p.

Margulis, L; Sagan, D. (1986). **Microcosmos: Four Billion Years of Microbial Evolution**. (1ª ed.). California: University of California Press - Berkeley and Los Angeles, 304 p.

Maturana, H. R.; Varela, F.J. (2021). **A árvore do conhecimento**. (12ª ed.). São Paulo: Palas Athena Editora, 286 p.

Naess, A. (2010). **The Ecology of Wisdom**. (1ª ed.). New York, NY: Counterpoint LLC, 352 p.

Nakagati, T.; Yamada, H.; Tóth, Á. **Path finding by tube morphogenesis in a amoeboid organism**. *In book: Biophysical Chemistry*. Editora Elsevier, v.92, p. 47-52, 2001.

Oettmeier, C.; Brix, K.; Dobereiner, H. G. Physarum Polycephalum – a new take on a classic model system. Institute for Biophysics, University of Bremen, Otto-Hahn-Allee, German, 2017.

Poole, P.; Alaway, D. Carbon and Nitrogen Metabolism in Rhizobium. Division of Microbiology, School of Animal and Microbial Sciences, University of Reading, Whiteknights, UK, 2000.

Rezende, E.L.; Bacigalupe, L. D. Thermoregulation in endotherms: physiological and ecological consequences. *J. Comp Physiol B*. **Epub**, 2015.

Thompson, W.I. (2014). **Gaia: Uma teoria do conhecimento**. (4ª ed.). São Paulo: Editora Gaia, 206 p.

Vieira, F.R. Ciclo do nitrogênio em Sistemas Agrícolas. **Embrapa**. Brasília, DF, 2017.

Vilaça, R. C. Recifes Biológicos. *In book: Biologia Marinha* (pp. 399 – 420). 2ª ed. Editora: Interciência, Rio de Janeiro, 2015.

VTRchile. Humberto Maturana – Origen de la vida en La Tierra – **Charlas del Futuro**. 2017. Disponível em: [https://www.youtube.com/watch?v=P29\\_moC9nqw](https://www.youtube.com/watch?v=P29_moC9nqw). Acesso em: 23 de novembro de 2022;

Watling, J.R; Grant, N.M; Miller, R.E; Robinson, S.A. Mechanisms of thermoregulation in plants. **Plant signaling & behavior**, v.3 p. 595-597, 2008.