

BIOFERTILIZANTE NA MITIGAÇÃO DE ESTRESSE OXIDATIVO EM PLANTAS DE CAFÉ

BIOFERTILIZER IN THE MITIGATION OF OXIDATIVE STRESS IN COFFE PLANTS

BIOFERTILIZANTE EM LA MITIGACIÓN DEL ESTRÉS OXIDATIVO EN PLANTAS DE CAFÉ

 <https://doi.org/10.56238/arev7n11-231>

Data de submissão: 18/10/2025

Data de publicação: 18/11/2025

Warley Gomes Camacho

Bacharel em Agronomia

Instituição: Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM)

Endereço: Minas Gerais, Brasil

E-mail: warleygomes@unipam.edu.br

Wellington Ferrari da Silva

Doutor em Ciências Técnicas Nucleares

Instituição: Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM)

Endereço: Minas Gerais, Brasil

E-mail: wellingtonferrari@unipam.edu.br

Daniela Silva Souza

Mestre em Produção Vegetal

Instituição: Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM)

Endereço: Minas Gerais, Brasil

E-mail: danielass@unipam.edu.br

RESUMO

Aqui fica o resumo. Exemplo de texto: O Lorem Ipsum é um texto modelo da indústria tipográfica e O estresse oxidativo em cafeeiros (*Coffea arabica L.*) compromete o crescimento e a produtividade, sendo agravado por condições ambientais adversas como altas temperaturas e déficit hídrico. Neste contexto, biofertilizantes surgem como alternativa promissora para mitigar os danos fisiológicos e oxidativos. O presente estudo teve como objetivo avaliar a eficiência do biofertilizante IP18 na mitigação do estresse oxidativo em cafeeiros sob condições de campo. O experimento foi conduzido em lavoura comercial de café Tupi IAC, em Patos de Minas (MG), em delineamento de blocos ao acaso com seis tratamentos (0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 e 3,0% do volume de calda) e seis repetições. Foram avaliados número de gemas reprodutivas, índice SPAD, área foliar, escaldadura, e as atividades das enzimas antioxidantes superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX), além de proteínas solúveis totais. Os resultados demonstraram aumento da atividade enzimática e da concentração de proteínas, além de maior vigor vegetativo e redução da escaldadura nas plantas tratadas. Conclui-se que o biofertilizante IP18 contribui significativamente para a mitigação do estresse oxidativo e melhoria do desempenho fisiológico do cafeeiro.

Palavras-chave: *Coffea Arábica*. Enzimas Antioxidantes. Proteínas Solúveis. Fisiologia Vegetal. Biofertilizante.

ABSTRACT

Oxidative stress in coffee plants (*Coffea arabica L.*) compromises growth and productivity, being aggravated by environmental adversities such as high temperatures and water deficit. In this context, biofertilizers emerge as a promising alternative to mitigate physiological and oxidative damages. This study aimed to evaluate the efficiency of the biofertilizer IP18 in mitigating oxidative stress in coffee plants under field conditions. The experiment was conducted in a commercial coffee plantation (Tupi IAC cultivar) in Patos de Minas, Minas Gerais, Brazil, in a randomized block design with six treatments (0; 0.5; 1.0; 1.5; 2.0; and 3.0% spray volume) and six replications. The variables evaluated were reproductive buds, SPAD index, leaf area, scald, and the activity of antioxidant enzymes: superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), and ascorbate peroxidase (APX), as well as total soluble proteins. Results showed an increase in enzyme activity and protein concentration, greater vegetative vigor, and reduced leaf scalding in treated plants. Therefore, the IP18 biofertilizer significantly contributes to mitigating oxidative stress and improving the physiological performance of coffee plants.

Keywords: Coffea Arabica. Antioxidant Enzymes. Soluble Proteins. Plant Physiology. Biofertilizer.

RESUMEN

El estrés oxidativo en cafetos (*Coffea arabica L.*) compromete el crecimiento y la productividad, agravado por condiciones ambientales adversas como altas temperaturas y déficit hídrico. En este contexto, los biofertilizantes surgen como una alternativa prometedora para mitigar los daños fisiológicos y oxidativos. Este estudio tuvo como objetivo evaluar la eficiencia del biofertilizante IP18 en la mitigación del estrés oxidativo en cafetos bajo condiciones de campo. El experimento se realizó en una plantación comercial de café (cultivar Tupi IAC) en Patos de Minas, Minas Gerais, Brasil, en diseño de bloques al azar con seis tratamientos (0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; y 3,0% del volumen de pulverización) y seis repeticiones. Se evaluaron las variables: número de yemas reproductivas, índice SPAD, área foliar, escaldadura y la actividad de las enzimas antioxidantes: superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT) y ascorbato peroxidasa (APX), además de las proteínas solubles totales. Los resultados mostraron un aumento en la actividad enzimática y la concentración de proteínas, mayor vigor vegetativo y reducción de la escaldadura en las plantas tratadas. Se concluye que el biofertilizante IP18 contribuye significativamente a la mitigación del estrés oxidativo y a la mejora del desempeño fisiológico del cafeto.

Palabras clave: Coffea Arábica. Enzimas Antioxidantes. Proteínas Solubles. Fisiología Vegetal. Biofertilizante.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil mantém-se como o maior produtor e exportador mundial de café, desempenhando papel central na economia agrícola global. De acordo com o 3º Levantamento da Safra 2025, divulgado pela Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), o país deve colher 55,2 milhões de sacas beneficiadas de 60 kg, representando um aumento de 1,8% em relação à safra de 2024, mesmo sendo um ano de baixa bienalidade (Conab, 2025).

A produção de *Coffea arabica* está estimada em 35,2 milhões de sacas, redução de 11,2% em relação à safra anterior, reflexo do ciclo de baixa bienalidade e do prolongado período de seca nos meses que antecederam a floração. Minas Gerais, principal estado produtor e responsável por cerca de 75,2% da área nacional de arábica, deve colher 24,7 milhões de sacas em 2025. O estado concentra a maior área plantada, com 1,38 milhão de hectares, destacando-se a região do Cerrado Mineiro, que inclui o Alto Paranaíba, o Triângulo e o Noroeste de Minas, como um dos principais polos de cafeicultura tecnificada do país (Conab, 2025).

A cultura do café, de natureza perene e com ciclo produtivo que pode ultrapassar 25 anos, está sujeita a diversos fatores estressantes que causam danos fisiológicos e reduzem seu potencial produtivo. As mudanças climáticas intensificam esses estresses, sendo apontadas como uma das principais causas da variabilidade de produtividade em sistemas agrícolas tropicais (Koutouleas et al., 2022). Temperaturas acima de 30 °C podem causar escaldadura foliar e aborto de gemas reprodutivas, enquanto períodos prolongados de seca reduzem a absorção de nutrientes e limitam o crescimento vegetativo (Bhattacharya, 2022).

Portanto, torna-se necessário o desenvolvimento de estratégias de mitigação de estresse oxidativo, visando minimizar os efeitos adversos das condições ambientais sobre o cafeeiro. Biofertilizantes, definidos pela Instrução Normativa nº 61, de 08 de julho de 2020, como produtos contendo princípios ativos ou agentes orgânicos de origem biológica, sem agroquímicos, têm se mostrado alternativas promissoras. Eles atuam de forma direta ou indireta sobre as plantas, promovendo resiliência fisiológica, equilíbrio nutricional e ativação de mecanismos antioxidantes (Chaudhary et al., 2022). Diante do exposto esta pesquisa teve por objetivo avaliar o uso de um biofertilizante na mitigação de estresse oxidativo em plantas de cafeeiro.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O estresse oxidativo é uma das principais consequências fisiológicas enfrentadas pelas plantas quando submetidas a condições ambientais adversas. Define-se como o desequilíbrio entre a geração de espécies reativas de oxigênio (EROs) como o radical superóxido (O_2^-), o peróxido de hidrogênio

(H₂O₂) e o radical hidroxila (OH⁻) e a capacidade antioxidantcelular em neutralizá-las (Mareri et al., 2022). Em níveis moderados, as EROs participam de processos regulatórios, mas, sob estresses abióticos severos, como seca, salinidade, temperaturas extremas e alta irradiância, ocorre a acumulação excessiva desses radicais, promovendo oxidação de lipídios, degradação de clorofila e inibição da fotossíntese (Sachdev et al., 2021).

Entre os fatores de estresse mais relevantes para o cafeiro, destacam-se a deficiência hídrica e a amplitude térmica, que interferem diretamente nos processos fotossintéticos, respiratórios e no balanço osmótico (Borgo et al., 2024). O fechamento estomático é uma das primeiras respostas da planta à escassez hídrica, reduzindo a perda de água por transpiração, mas limitando a entrada de CO₂ e a fixação de carbono (Gahir et al., 2021). A exposição prolongada ao estresse leva à diminuição do crescimento, à senescência precoce e à queda de produtividade, podendo comprometer até 60 % do potencial produtivo (Zhao et al., 2022).

Para mitigar esses efeitos, as plantas desenvolveram um sofisticado sistema antioxidant, composto por enzimas como superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX), além de compostos não enzimáticos (ácido ascórbico, glutationa e fenóis) que atuam na neutralização das EROs (Fujita et al., 2022). O aumento da atividade dessas enzimas está associado à maior resiliência ao estresse oxidativo, mantendo a integridade das membranas e a estabilidade dos pigmentos fotossintéticos (Kerchev et al., 2022).

Nos últimos anos, a aplicação de biofertilizantes tem emergido como alternativa sustentável para fortalecer as defesas antioxidantas e fisiológicas das plantas (Yasmin et al., 2021). Esses produtos são definidos pela Instrução Normativa nº 61/2020 como formulações que contêm agentes orgânicos ou princípios ativos biológicos capazes de atuar direta ou indiretamente sobre o crescimento vegetal, sem conter agroquímicos. Os biofertilizantes podem estimular a síntese de enzimas antioxidantas, aumentar a disponibilidade de nutrientes, ativar rotas de sinalização hormonal e reduzir o impacto das EROs (Najafi et al., 2021). Ensaios recentes com compostos microbianos e extratos orgânicos demonstram incremento de condutância estomática, estabilidade da clorofila e maior acúmulo de proteínas solúveis em cafeeiros submetidos ao déficit hídrico (Surianni et al., 2025; Khawula et al., 2025).

A adoção de bioinsumos está alinhada à nova agenda da cafeicultura brasileira, que busca reduzir custos, aumentar a sustentabilidade e atenuar riscos climáticos. Segundo Figiel et al. (2025), o manejo fisiológico por biofertilizantes favorece o equilíbrio redox celular e potencializa o metabolismo do nitrogênio, refletindo em maior vigor vegetativo e estabilidade produtiva em lavouras de café arábica. Essa abordagem biotecnológica complementa práticas de manejo como sombreamento,

irrigação e adubação orgânica, ampliando a eficiência do sistema antioxidante e o aproveitamento fotossintético.

O *Coffea arabica L.*, espécie predominante no Brasil, é considerada mais sensível ao estresse abiótico em comparação ao *Coffea canephora*, devido à menor tolerância a altas temperaturas e déficits hídricos (Partelli et al., 2024). Apesar disso, o arábica é responsável por cerca de 64 % da produção mundial e 75 % da área cultivada em Minas Gerais, principal estado produtor do país (Conab, 2025). A qualidade dos grãos é fortemente influenciada pelas condições climáticas e fisiológicas das plantas, sendo que temperaturas moderadas (18–23 °C) e altitudes superiores a 800 m favorecem o desenvolvimento de compostos aromáticos e ácidos orgânicos que definem cafés de qualidade superior (Kath et al., 2021).

Contudo, a intensificação das mudanças climáticas e a ocorrência de eventos extremos, como secas prolongadas e ondas de calor, têm imposto desafios crescentes à cafeicultura. O uso de biofertilizantes, associado a práticas conservacionistas, representa uma ferramenta promissora para reduzir danos fisiológicos, aumentar a tolerância a estresses e preservar o potencial produtivo e qualitativo dos grãos (Ikan et al., 2024).

3 METODOLOGIA

O experimento foi realizado em uma lavoura comercial de café Tupi IAC 1669-13 (*Coffea arabica L.*), com onze anos de idade, localizada na Fazenda Canavial, no município de Patos de Minas, na região do alto Paranaíba em Minas Gerais. A região é caracterizada por um verão quente e chuvoso, seguido de inverno seco e frio, conforme descrito por Fernandes et al. (2012). A lavoura foi implantada em sistema de cultivo sequeiro com espaçamento de 0,5 metros entre plantas e 2,7 metros entre linhas em Latossolo Vermelho Eutroférreco de textura argilosa, de acordo com as diretrizes da EMBRAPA (2006).

O experimento foi iniciado em março de 2023 e finalizado em setembro de 2023. O delineamento utilizado foi o de blocos ao acaso, com seis tratamentos dispostos em seis repetições. Os blocos foram colocados ao longo da linha de plantio, contendo dez plantas por unidade experimental. Os tratamentos foram impostos com base na concentração do volume de calda de aplicação, seguindo a Tabela 1. O tratamento 5 corresponde a dose recomendada pelo fabricante do produto.

Para a pulverização, utilizou-se o adjuvante Helper Perenes em associação, na dose de 0,03% do volume de calda. Para a aplicação dos produtos via foliar foi utilizado um pulverizador bomba costal agrícola 20 litros Xp20 Jactoclean.

Tabela 1. Descrição das dosagens de biofertilizante IP18 utilizadas na cultura do café no experimento “Biofertilizante na mitigação de estresse oxidativo em plantas de café”. Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM). Patos de Minas, MG, 2023.

Tratamento	Dose (% L calda)	Época de aplicação
1	0	Controle
2	0,5	Março 2023
3	1,0	Março 2023
4	1,5	Março 2023
5	2,0	Março 2023
6	3,0	Março 2023

Fonte: Dados da Pesquisa (2023)

Durante o ano agrícola, foram realizados tratos culturais, incluindo a calagem, o manejo de herbicidas, roçadeiras ou trincha, manejo fitossanitário em toda a área experimental, seguindo o mesmo padrão. Todas as avaliações foram realizadas no terço médio dos cafeeiros, em ambos os lados das plantas. As variáveis avaliadas foram:

1. Determinação mensal do número de gemas reprodutivas no cafeeiro durante a diferenciação: a contagem do número de gemas reprodutivas foi realizada no ramo selecionado e demarcado no dia da aplicação do produto, no terço médio do cafeeiro.

2. Inferiu-se o percentual de escaldadura aos 140 dias após aplicação: foi inferido o percentual de folhas afetadas, realizando a contagem e determinando o seu percentual.

3. Índice SPAD: foi realizado a análise do teor de clorofila utilizando o aparelho clorofilômetro, com o método do índice SPAD: essa análise possibilita a identificação não só do teor de clorofila, mas também a disponibilidade de nitrogênio na folha, o que pode permitir um melhor ajuste na adubação nitrogenada.

4. Área foliar estimada do 2 par de folhas aos 50 dias após aplicação: a estimativa da área foliar foi realizada segundo a metodologia de Barros et al. (1973). A equação é $AF = 0,667 * C * L$, em que AF é a área foliar; C é o maior comprimento da folha e L é a maior largura da folha. As medições foram realizadas com o auxílio de uma régua. Fez-se a estimativa de área foliar de cinco plantas, em seguida, calculou-se a média dos valores obtidos. O resultado foi expresso em cm^2 .

Análises metabólicas: Aos 60 dias após a aplicação foram realizadas as análises de proteína total solúvel e enzimas antioxidantes sendo que as folhas do terceiro e/ou quarto par foram coletadas e levadas para laboratório e maceradas em nitrogênio líquido.

Após a pulverização do material foi quantificada as proteínas totais solúveis (BRADFORD, 1976), além da atividade de três importantes enzimas antioxidantes: superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX). Para a extração das proteínas solúveis foram pesados

aproximadamente 100 mg de tecido vegetal, o qual foi macerado em nitrogênio líquido e em seguida, com 1,5 mL de tampão Tris-HCl. O material macerado foi centrifugado durante 10 minutos a 6000 g. Foi tomada uma alíquota de 100 μ L do sobrenadante e acrescentado 3 mL do reativo de Bradford, o qual é agitado e deixado em repouso por 15 minutos. A leitura colorimétrica da reação foi realizada em espectrofotômetro a 595 nm, utilizando-se de uma cubeta de vidro. A concentração de proteína solúvel foi calculada a partir da curva padrão construída com albumina soro bovina (BSA). Os resultados foram expressos em miligramas de proteínas totais solúveis por grama de matéria fresca (mg PTS g⁻¹ MF) (Bradford, 1976).

Para a determinação das enzimas, foi procedida a preparação do extrato enzimático bruto, a partir do qual foram realizadas as análises enzimáticas. Para o preparo deste, foram pesadas 200 mg de matéria fresca, tomando o cuidado de se anotar os valores para a efetuação de cálculos posteriores. O material vegetal fresco foi pulverizado com N líquido, contendo PVPP (10% 0,04g), no qual foi adicionado 1500 μ L do meio de extração. Este último foi preparado tomando-se 750 μ L de tampão fosfato de potássio 200 mM e pH 7,8, ainda 15 μ L de EDTA 10 mM acrescido de 150 μ L de ácido ascórbico 200 mM e 585 μ L de água Milli-Q. Este mix foi acomodado no gelo durante todo o processo de pulverização do material. Ademais, a alíquota do tampão de extração, foi dividida em duas de 750 μ L objetivando facilitar a maceração. Logo em seguida, a amostra foi vertida em *eppendorf* de 2 mL e centrifugada a 12 000 g por um período de 20 minutos a 4 °C. Após, foi coletado o sobrenadante e armazenado em gelo até o momento das leituras.

A atividade da SOD foi determinada pela adição de 100 μ L de extrato enzimático, a 1880 μ L de uma solução contendo 2000 μ L de tampão fosfato de potássio 100 mM pH 7,8, 800 μ L de metionina 70 mM, 40 μ L de EDTA 10 μ M, 300 μ L de NBT 1 mM e 620 μ L de H₂O Milli-Q. Foram preparados dois brancos, um recoberto em papel alumínio utilizado para zerar o espectrofotômetro e um submetido à luz e quantificado. Estes brancos foram preparados utilizando-se 1880 μ L do mix preparado para a SOD, 100 μ L de água Milli-Q e 20 μ L de riboflavina. A preparação do branco no escuro tem por objetivo subtrair da amostra que foi iluminada o processo de redução do NBT enquanto, o branco mantido na luz juntamente às amostras é quantificado com o objetivo de definir uma unidade de SOD relativa à quantidade de enzima necessária para inibir 50% a máxima fotorredução do NBT. A reação se dará em uma câmara, sob iluminação de lâmpadas fluorescente de 15W, com exposição de 10 minutos. A atividade da enzima foi mensurada pela diferença no aumento da absorbância das amostras em comprimento de onda de 560 nm. Uma unidade da enzima foi definida como a quantidade de enzima necessária para inibir, em 50%, a fotorredução do NBT (Beauchamp & Fridovich 1971; Gianggiopolitis & Reis 1977).

Para determinação da CAT, uma alíquota de 12,5 μ L do extrato enzimático foi adicionado a 500 μ L de tampão fosfato de potássio 200 mM, pH 7,0 e 400 μ L de H₂O Milli-Q incubados à 27 °C durante 10 minutos e ainda, 50 μ L de H₂O₂ 250 mM e 37,5 μ L de H₂O Milli-Q. Onde a atividade da enzima foi determinada pela mensuração da redução na absorbância das amostras a 240 nm, em decorrência do consumo do H₂O₂ (Havir & Mchale 1987; Anderson et al. 1995). Então, foi procedida uma leitura cinética com duração de 60 segundos com intervalos de 10 em 10 segundos, sendo observado o decréscimo na absorbância. As leituras foram realizadas de forma rápida e precisa, pois, o H₂O₂ desencadeia o processo de redução pela enzima ao entrar em contato com a amostra.

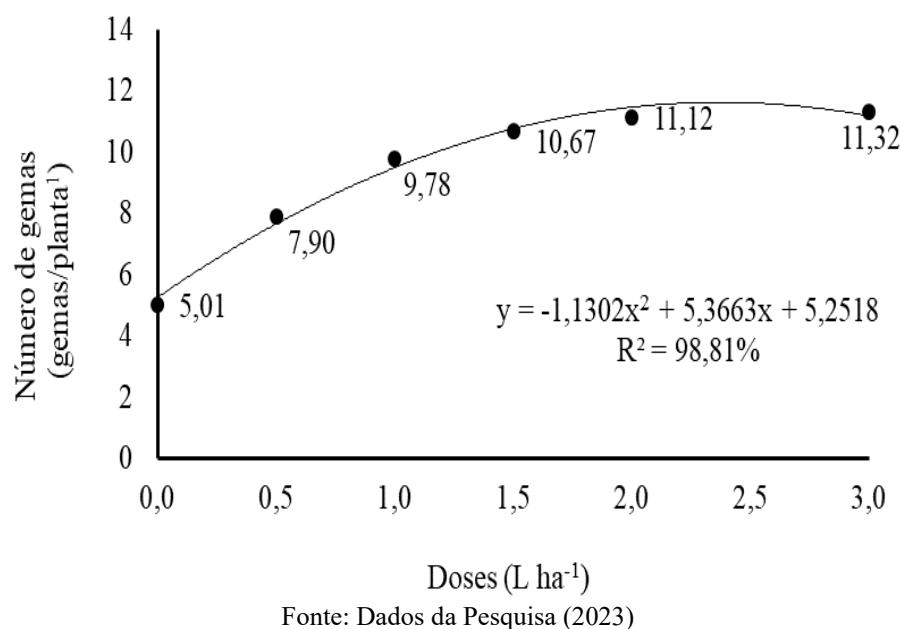
Já a atividade da APX, foi realizada tomando-se uma alíquota de 12,5 μ L do extrato enzimático, a qual foi acrescentada a 500 μ L de tampão fosfato de potássio 200 mM pH 7, 50 μ L de ácido ascórbico 10 mM e 350 μ L de H₂O Milli-Q incubados à 27 °C durante 5 minutos, e ainda, 50 μ L de H₂O₂ (2mM) e 37,5 μ L de H₂O Milli-Q. A atividade enzimática foi calculada utilizando-se o coeficiente de extinção molar de 2,8 mM⁻¹ cm⁻¹ (Nakano & Asada 1981). A leitura assim como para CAT, também foi realizada de forma rápida e precisa evitando ao máximo o processo de redução pela enzima ao entrar em contato com a amostra. Para todas as enzimas e proteína total solúvel, a leitura foi realizada em espectrofotômetro UV-Vis Evolution 300 da Thermo Scientific.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A aplicação do biofertilizante IP18 influenciou significativamente o número de gemas reprodutivas, apresentando tendência quadrática com aumento progressivo até a dose de 2,0 L ha⁻¹, seguida de estabilização (Figura 1). A resposta positiva nas doses intermediárias indica que o produto estimulou o metabolismo reprodutivo, possivelmente por meio do suprimento de nutrientes e compostos bioativos que favorecem a diferenciação floral. Esse comportamento está relacionado ao incremento da assimilação de cálcio, magnésio e fósforo, nutrientes essenciais à formação de estruturas reprodutivas e à sinalização celular (Oliveira, 2012; Partelli et al., 2024).

Resultados semelhantes foram relatados por Suriani et al. (2025), ao observar que biofertilizantes microbianos estimularam a formação de gemas florais em culturas submetidas a estresse térmico, mediante aumento da atividade antioxidante e manutenção do balanço hormonal. Assim, o biofertilizante IP18 mostrou potencial para modular processos fisiológicos relacionados à floração e ao vigor reprodutivo, elementos críticos na produtividade do cafeeiro (Da Matta et al., 2007).

Figura 1: Resultado do número de gemas reprodutivas contadas após a aplicação do biofertilizante IP18 no experimento: “Biofertilizante na mitigação de estresse oxidativo na cultura do café”. Fazenda Canavial. Patos de Minas-MG.

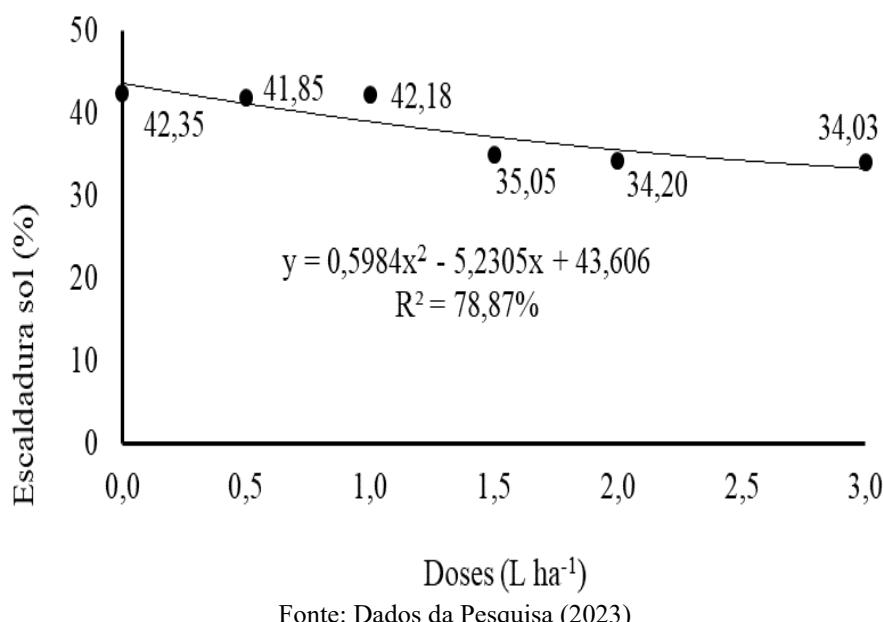


Fonte: Dados da Pesquisa (2023)

A taxa de escaldadura foliar apresentou redução expressiva com o aumento das doses de biofertilizante, atingindo os menores valores nas doses entre 1,5 e 3,0 L ha⁻¹ (Figura 2). Esse decréscimo indica o fortalecimento dos mecanismos de defesa antioxidante e estrutural da planta, mitigando os danos fotooxidativos associados à alta irradiância e temperaturas elevadas.

Segundo Ramírez-Builes et al. (2024), a ativação de enzimas antioxidantes e a manutenção do potencial hídrico são essenciais para reduzir o estresse térmico e a desnaturalização de proteínas fotossintéticas. A suplementação biofertilizante também contribui para o aumento do teor de clorofila e de compostos fenólicos, que atuam como filtros de radiação e antioxidantes secundários (Sharma et al., 2024). Dessa forma, o IP18 pode ter induzido mecanismos similares, resultando em menor necrose e escaldadura do limbo foliar.

Figura 2: Resultado da % de taxa de escaldadura 140 dias após a aplicação do biofertilizante IP18 no experimento: “Biofertilizante na mitigação de estresse oxidativo na cultura do café”. Fazenda Canavial. Patos de Minas-MG.

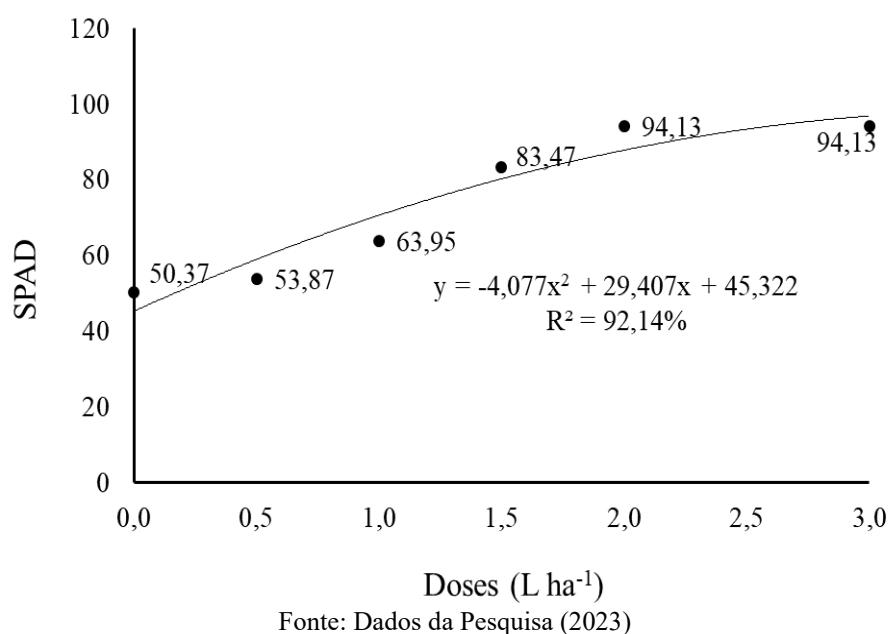


Fonte: Dados da Pesquisa (2023)

O índice SPAD aumentou de forma quadrática em resposta às doses crescentes de IP18, alcançando valores máximos a partir de 2,0 L ha⁻¹ (Figura 3). A elevação do SPAD reflete o aumento do teor de clorofila e da capacidade fotossintética, indicando melhora no estado nutricional e na eficiência metabólica das plantas tratadas.

De acordo com Gratão et al. (2005) a integridade dos pigmentos fotossintéticos está diretamente associada à ação de enzimas antioxidantes que evitam a peroxidação lipídica e a degradação da clorofila sob estresse oxidativo. Além disso, biofertilizantes podem estimular rotas de sinalização que envolvem citocininas e ácido abscísico, promovendo equilíbrio entre crescimento vegetativo e resposta ao estresse (Suriani et al., 2025). Assim, o aumento do índice SPAD observado demonstra que o IP18 contribuiu para a manutenção da fotossíntese e da estabilidade fisiológica das folhas.

Figura 3: Resultado índice SPAD, após a aplicação do biofertilizante IP18 no experimento: “Biofertilizante na mitigação de estresse oxidativo na cultura do café”. Fazenda Canavial. Patos de Minas-MG.

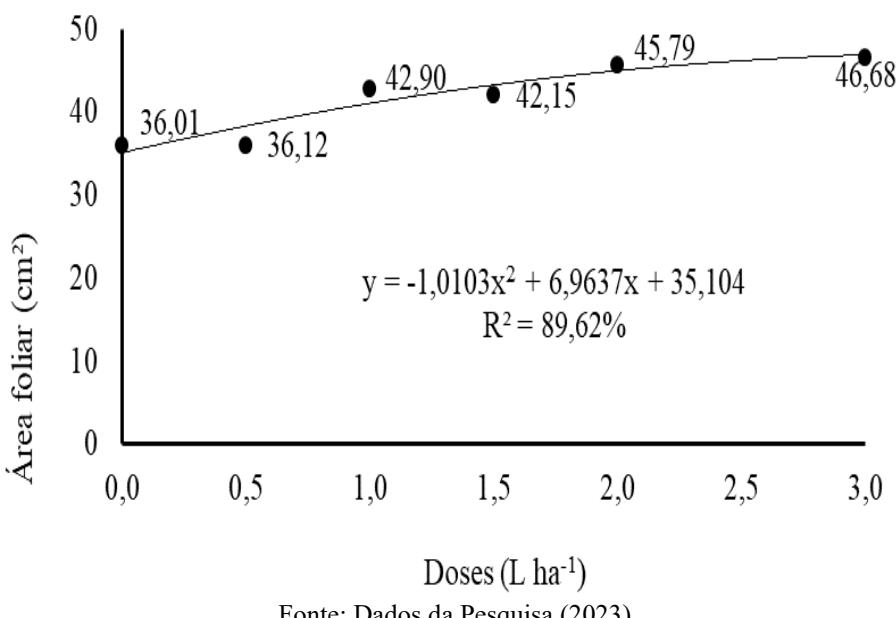


Fonte: Dados da Pesquisa (2023)

A área foliar apresentou incremento progressivo até a dose de 2,5 L ha⁻¹, com $R^2 = 89,62\%$ (Figura 4). O aumento da área foliar está associado ao maior alongamento celular e à expansão dos tecidos fotossintéticos, favorecendo a interceptação de luz e a assimilação de carbono. Souza et al. (2006) destacam que biofertilizantes ricos em micronutrientes e compostos orgânicos promovem expansão foliar e formação de raízes mais vigorosas, resultando em maior área fotossintética efetiva.

A melhoria da área foliar observada neste estudo pode estar relacionada à ativação do metabolismo do nitrogênio e à maior disponibilidade de fósforo, elementos que participam da biossíntese de clorofila e do crescimento meristemático (Partelli et al., 2024). Dessa forma, o IP18 potencializou a capacidade de absorção e assimilação de nutrientes, refletindo em crescimento vegetativo mais eficiente.

Figura 4: Resultado da avaliação de área foliar do segundo par de folha após a aplicação do biofertilizante IP18 no experimento: “Biofertilizante na mitigação de estresse oxidativo na cultura do café”. Fazenda Canavial. Patos de Minas-MG.

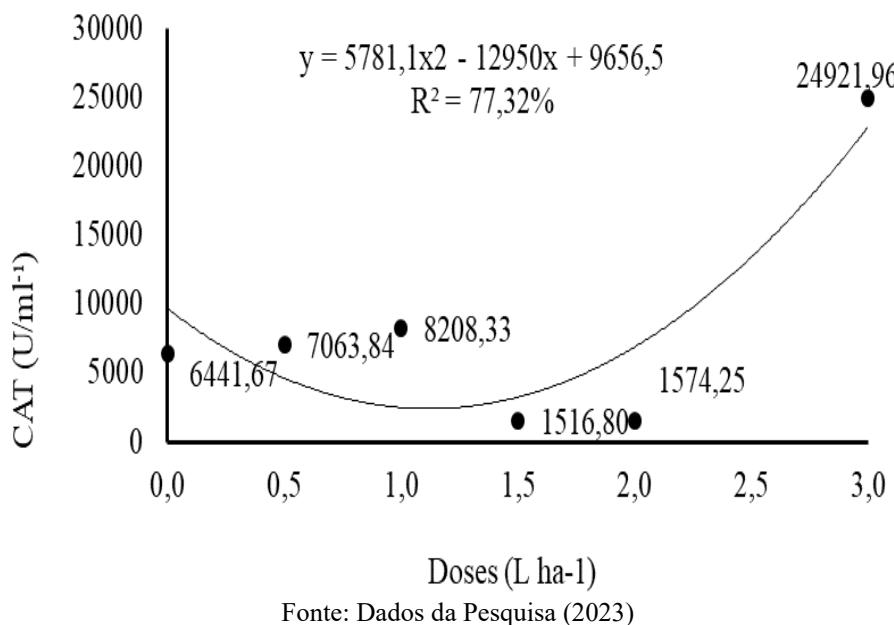


Fonte: Dados da Pesquisa (2023)

A atividade da enzima catalase (CAT) apresentou comportamento quadrático, com aumento expressivo nas doses mais elevadas, atingindo o máximo em 3,0 L ha⁻¹ (Figura 5). Esse resultado evidencia a ativação do sistema antioxidante enzimático em resposta à aplicação do biofertilizante, sugerindo que o IP18 promoveu a detoxificação do peróxido de hidrogênio (H₂O₂), reduzindo o estresse oxidativo nas células foliares.

Cakmak e Marschner (1992) e Silva et al. (2014) relatam que o aumento da CAT é uma resposta fisiológica fundamental para manter o equilíbrio redox sob déficit hídrico e alta radiação. Estudos recentes corroboram que biofertilizantes à base de microrganismos e extratos orgânicos aumentam a atividade da CAT e da peroxidase em cafeeiros e outras culturas tropicais (Sharma et al., 2024; Khawula et al., 2025). Portanto, o comportamento observado indica que o biofertilizante contribuiu para o fortalecimento da defesa enzimática, protegendo os tecidos contra o acúmulo de radicais livres.

Figura 5: Atividade da enzima Catalase (CAT) em função da aplicação do biofertilizante IP18 no experimento: “Biofertilizante na mitigação de estresse oxidativo na cultura do café”. Fazenda Canavial. Patos de Minas-MG.



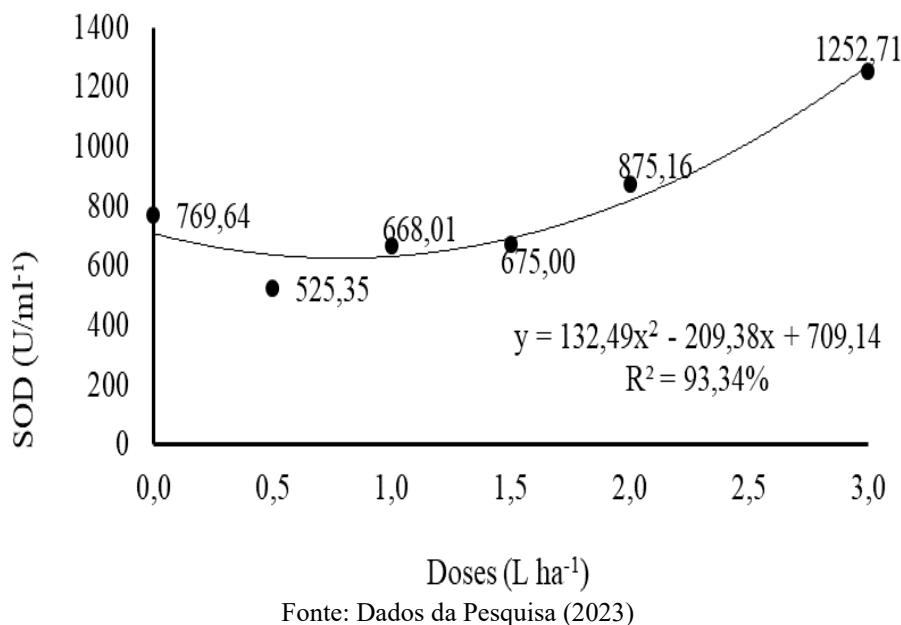
Fonte: Dados da Pesquisa (2023)

A atividade da enzima dismutase do superóxido (SOD) apresentou comportamento quadrático, com aumento acentuado a partir das doses de 2,0 L ha⁻¹, atingindo o pico máximo de 1 252,71 U mL⁻¹ na dose de 3,0 L ha⁻¹ (Figura 6). Essa tendência demonstra que o biofertilizante IP18 estimulou o sistema antioxidante enzimático, conferindo maior capacidade de desintoxicação do radical superóxido (O₂⁻), uma das espécies reativas de oxigênio mais agressivas ao metabolismo celular.

A SOD atua como primeira linha de defesa antioxidante, catalisando a dismutação do radical superóxido em peróxido de hidrogênio (H₂O₂) e oxigênio molecular (O₂), evitando a oxidação de lipídios e proteínas (Gratão et al., 2005). Esse H₂O₂ gerado é posteriormente metabolizado por outras enzimas do ciclo redox, como a catalase (CAT) e a ascorbato peroxidase (APX), que convertem o peróxido de hidrogênio em água e oxigênio (Taiz & Zeiger, 1997).

O aumento expressivo da SOD observado nas maiores doses do IP18 sugere que o produto intensificou o metabolismo antioxidante das plantas, reforçando sua tolerância às condições de estresse oxidativo típicas de ambientes com alta irradiância e déficit hídrico. Resultados semelhantes foram relatados por Suriani et al. (2025), que observaram incremento das enzimas SOD e CAT em plantas tratadas com biofertilizantes microbianos. Da mesma forma, Khawula et al. (2025) destacaram que bioinsumos contendo microrganismos promotores de crescimento vegetal (PGPR) elevam a atividade da SOD e reduzem o acúmulo de espécies reativas de oxigênio em tecidos foliares sob estresse térmico.

Figura 6: Atividade da Dismutase do superóxido (SOD) em função da aplicação do biofertilizante IP18 no experimento: “Biofertilizante na mitigação de estresse oxidativo na cultura do café”. Fazenda Canavial. Patos de Minas-MG.



Fonte: Dados da Pesquisa (2023)

Gratão et al. (2005), observaram maiores atividades das enzimas SOD, CAT e APX em cafeeiros com deficiência de nutrientes como Mg quando comparadas àquelas com suprimento adequado deste nutriente. A atuação das enzimas do complexo antioxidante da planta, antes do aparecimento do sintoma visual das deficiências nutricionais, retarda os danos fotooxidativos causados pelas EROs e a inativação de enzimas fotossintéticas, fazendo com que a atividade fotossintética seja reduzida somente nas fases mais avançadas da deficiência (KAISER, 1976).

Como foi mostrado anteriormente, as atividades da CAT e da SOD foram maiores nas doses mais altas de biofertilizante. De acordo com Cakmak e Marschner (1992) elevados níveis de componentes do metabolismo antioxidante constituem em uma resposta fisiológica das plantas aos afeitos das deficiências nutricionais. De acordo com Silva et al. (2014), é provável que a ativação do metabolismo antioxidante, em condições de deficiência, ocorra nos cloroplastos, pois é onde há a redução do O_2^- e do H_2O_2 , como resultado do restrito consumo de potencial redutor na fixação de CO_2 .

Diversos estudos têm demonstrado o papel dos mecanismos antioxidantes enzimáticos na proteção contra o estresse oxidativo induzido por intempéries climáticas. De acordo com Silva et al. (2014), é provável que a ativação do metabolismo antioxidante, em condições de estresse, ocorra nos cloroplastos, pois é onde há a redução do O_2^- e do H_2O_2 , como resultado do restrito consumo de potencial redutor na fixação de CO_2^- .

A atividade das enzimas antioxidantes geralmente aumenta quando a planta está sob estresse oxidativo, um mecanismo vital para proteger as células contra danos. Esse fenômeno é observado em

várias situações, incluindo condições de estresse ambiental, exposição a toxinas ou patógenos (DOS SANTOS SOARES et al., 2007). No entanto, um exemplo notável de aumento na atividade das enzimas antioxidantes, mesmo em condições não estressantes, ocorre durante o processo de maturação das frutas (CARNEIRO et al., 2011).

À medida que os frutos amadurecem, há um aumento natural na produção de radicais livres devido ao metabolismo ativo das células. Esse aumento na atividade das enzimas antioxidantes, como superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX), não é uma resposta ao estresse direto, mas sim um mecanismo inerente de defesa da planta. Essas enzimas protegem as células contra o dano oxidativo durante o amadurecimento, garantindo a integridade dos tecidos do fruto e mantendo sua qualidade. Esse fenômeno ilustra a sofisticada regulação do sistema antioxidante das plantas, adaptando-se tanto a condições de estresse quanto aos processos metabólicos normais, demonstrando a complexidade e a eficácia dos mecanismos de defesa das plantas contra o dano oxidativo (FAVARETTO, 2009).

Embora a variável ascorbato peroxidase (APX) não tenha se enquadrado adequadamente a um modelo de regressão, a análise de variância indicou diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). As menores porcentagens de folhas danificadas foram observadas nas doses intermediárias, especialmente entre 0,5% e 2,0%, sugerindo que o biofertilizante IP18 exerceu efeito positivo na atividade enzimática da APX.

Essa resposta confirma a ativação parcial do sistema antioxidante, mesmo sem ajuste polinomial. A APX é uma enzima fundamental do ciclo do ascorbato-glutathione, catalisando a conversão do H_2O_2 em água e oxigênio a partir do uso de ascorbato como doador de elétrons. Segundo Gratão et al. (2005) a indução da APX sob estresse oxidativo é essencial para manter a homeostase redox e evitar a oxidação de pigmentos e lipídios.

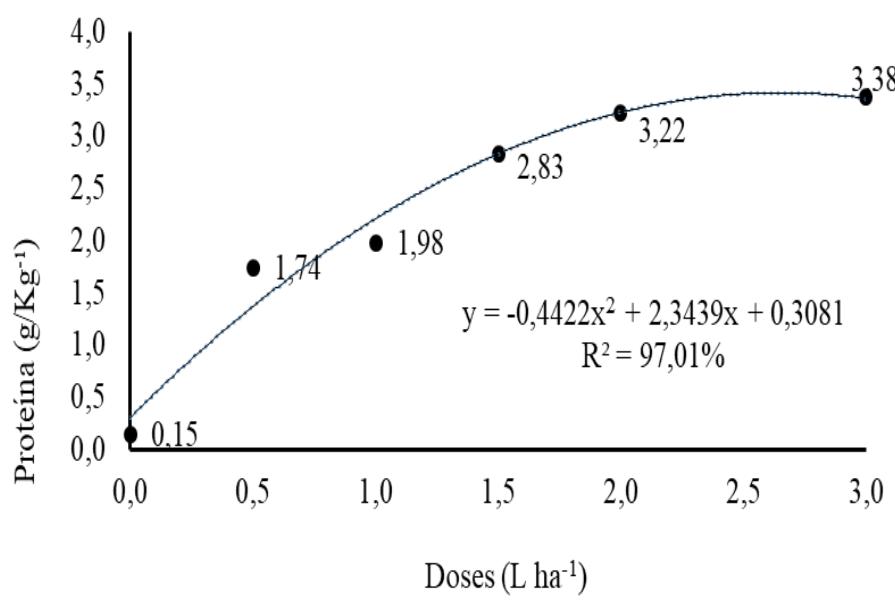
De modo semelhante, Suriani et al. (2025) observaram que biofertilizantes microbianos elevam a atividade da APX em cafeeiros sob condições de alta irradiação, contribuindo para a proteção das membranas e retardar a senescência foliar. Portanto, mesmo sem ajuste matemático, a significância estatística verificada para a APX reforça que o biofertilizante IP18 desempenhou papel ativo na ativação enzimática antioxidante e na redução do estresse oxidativo nas folhas de café.

A concentração de proteínas solúveis aumentou progressivamente com as doses de IP18, alcançando o valor máximo ($3,38 \text{ g kg}^{-1}$) na dose de $3,0 \text{ L ha}^{-1}$ (Figura 11). O incremento proteico reflete a intensificação da síntese de enzimas e proteínas estruturais envolvidas na resposta antioxidante e no metabolismo primário. Estudos de Suriani et al. (2025) demonstram que

biofertilizantes microbianos elevam o conteúdo de proteínas foliares em plantas sob estresse térmico, promovendo maior eficiência metabólica.

De acordo com Teixeira et al. (2017), as proteínas desempenham papel essencial na fotossíntese, no transporte de nutrientes e na regulação enzimática de processos de defesa. O aumento do teor de proteínas indica que o biofertilizante IP18 estimulou a expressão gênica associada à síntese enzimática, reforçando a capacidade adaptativa das plantas diante de condições ambientais adversas.

Figura 7: Quantificação de proteína em função da aplicação do biofertilizante IP18 no experimento: “Biofertilizante na mitigação de estresse oxidativo na cultura do café”. Fazenda Canavial. Patos de Minas-MG.



Fonte: Dados da Pesquisa (2023)

5 CONCLUSÃO

Os resultados evidenciam que o biofertilizante IP18 exerceu efeitos fisiológicos e bioquímicos positivos, favorecendo o desempenho reprodutivo, o crescimento vegetativo e a ativação do sistema antioxidante. Esses efeitos refletem uma sinergia entre nutrição equilibrada e indução de mecanismos de defesa, características essenciais de biofertilizantes de alta eficiência. A combinação entre aumento da atividade enzimática (SOD, CAT, APX) e elevação de proteínas solúveis indica que o IP18 não atua apenas como fonte nutricional, mas também como indutor fisiológico de resistência ao estresse oxidativo. Assim, a utilização desse produto representa uma estratégia promissora para mitigar danos ambientais e otimizar a produtividade e qualidade do cafeiro em sistemas de cultivo sustentáveis.

REFERÊNCIAS

BARROS, R.S.; MAESTRI, M.; VIEIRA, M.; BRAGA- FILHO, L.J. **Determinação de área de folhas do café (Coffea arabica L. cv. 'Bourbon Amarelo')**. Revista Ceres, Viçosa, v.20, n.107, p.44-52, 1973.

BHATTACHARYA, A. **Effect of low-temperature stress on germination, growth, and phenology of plants: A review**. Physiological processes in plants under low temperature stress, p. 1-106, 2022.

BORGO, L.; RABÊLO, F. H. S.; MARCHIORI, P. E. R.; GUILHERME, L. R. G.; GUERRA-GUIMARÃES, L.; RESENDE, M. L. V. D. **Impact of drought, heat, excess light, and salinity on coffee production: strategies for mitigating stress through plant breeding and nutrition**. Agriculture, v. 15, n. 1, p. 9, 2024.

BRADFORD, Marion M. **A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding**. Analytical biochemistry, v. 72, n. 1-2, p. 248-254, 1976.

CAKMAK, Ismail; MARSCHNER, Horst. **Magnesium deficiency and high light intensity enhance activities of superoxide dismutase, ascorbate peroxidase, and glutathione reductase in bean leaves**. Plant physiology, v. 98, n. 4, p. 1222-1227, 1992.

CARNEIRO, Marília Lima Carvalho et al. **Atividade antioxidante e viabilidade de sementes de girassol após estresse hídrico e salino**. Revista brasileira de sementes, v. 33, p. 752-761, 2011.

CARVALHO, M. A. S. et al. **Desenvolvimento vegetativo de cafeeiros canéfora submetidos ao estresse hídrico**. SBICafé, 2024.

CHAUDHARY, P.; SINGH, S.; CHAUDHARY, A.; SHARMA, A.; KUMAR, G. **Overview of biofertilizers in crop production and stress management for sustainable agriculture**. Frontiers in Plant Science, v. 13, p. 930340, 2022

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Conab pegs Brazil's coffee production for CY 2024/25 at 54.2 million bags**. Comunicaffe International, 21 out. 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Conab predicts coffee crop of 54.36 million bags**. Revista Cultivar, 2024.

CZAPP. **Brazil leads changes in biofertilizantes com prêmio conquistado por pesquisadora**. CZapp, jun. 2025.

DA MATTA, F. M.; RONCHI, C. P.; MASTRORILLI, M.; BARROS, R. S. **Ecophysiology of coffee growth and production**. Brazilian Journal of Plant Physiology, v. 19, n. 4, p. 485-510, 2007.

DOS SANTOS SOARES, Alexandra Martins; MACHADO, Olga Lima Tavares. **Defesa de plantas: sinalização química e espécies reativas de oxigênio**. Revista Trópica-Ciências Agrárias e Biológicas, v. 1, n. 1, p. 10, 2007.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Efeito de biofertilizantes, produtos químicos e biológicos no manejo de *Meloidogyne exigua* e na produtividade de café arábica. Brasília, 2023.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2006) **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** Rio de Janeiro, Embrapa. 412p.

FAVARETTO, Viviane de Fátima et al. **Estudo comparativo dos mecanismos de defesa contra radicais livres em espécies arbóreas pioneiras e não pioneiras de Mata Mesófila Semidecidual.** 2009.

FERNANDES, A.L.T.; PARTELLI, F.L.; BONOMO, R.; GOLYNSKI, A. **A moderna cafeicultura dos cerrados brasileiros.** Pesquisa Agropecuária Tropical, v.42, p.231-240, 2012.

FUJITA, Masayuki; HASANUZZAMAN, Mirza. **Approaches to enhancing antioxidant defense in plants.** *Antioxidants*, v. 11, n. 5, p. 925, 2022.

GAHIR, Shashibhushan; BHARATH, Pulimamidi; RAGHAVENDRA, Agepati S. **Stomatal closure sets in motion long-term strategies of plant defense against microbial pathogens.** *Frontiers in Plant Science*, v. 12, p. 761952, 2021.

GRATÃO, Priscila L. et al. **Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier.** *Functional plant biology*, v. 32, n. 6, p. 481-494, 2005.

IKAN, C.; SOUSSANI, F. E.; OUHADDOU, R.; ECH-CHATIR, L.; ERROUH, F.; BOUTASKNIT, A.; MEDDICH, A. **Use of biofertilizers as an effective management strategy to improve the photosynthetic apparatus, yield, and tolerance to drought stress of drip-irrigated wheat in semi-arid environments.** *Agronomy*, v. 14, n. 6, p. 1316, 2024.

KAISER, W. **The effect of hydrogen peroxide on CO₂ fixation of isolated intact chloroplasts.** *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics*, v. 440, n. 3, p. 476-482, 1976.

KHAWULA, S.; ZUMA, N.; MHLONGO, M. I.; DLAMINI, S. A.; NGOBESI, N. Z. **Optimizing plant resilience with growth-promoting rhizobacteria (PGPRs): metabolic and physiological perspectives.** *Plant Stress*, v. 14, 100512, 2025.

KERCHEV, Pavel I.; VAN BREUSEGEM, Frank. **Improving oxidative stress resilience in plants.** *The Plant Journal*, v. 109, n. 2, p. 359-372, 2022.

KOUTOULEAS, A.; SARZYNSKI, T.; BORDEAUX, M.; BOSSELMANN, A. S.; CAMPA, C.; ETIENNE, H.; RÆBILD, A. **Shaded-coffee: A nature-based strategy for coffee production under climate change? A review.** *Frontiers in Sustainable Food Systems*, v. 6, p. 877476, 2022.

MARERI, Lavinia; PARROTTA, Luigi; CAI, Giampiero. **Environmental stress and plants.** *International Journal of Molecular Sciences*, v. 23, n. 10, p. 5416, 2022.

OLIVEIRA, J. S.; MOURA, W. de M.; RIBEIRO, N. M.; ALVES, J. D. **Café especial: agregação de valor ao tradicional café.** *Revista Eletrônica de Comunicação, Informação e Inovação em Saúde*, v. 3, n. 1, p. 34-42, 2012.

PARTELLI, F. L.; RAMALHO, J. C.; MARTINS, M. Q.; CAVATTE, P. C.; LIMA, F. F. de; SILVA, L. M. da. **Coffee breeding and stress biology.** Plants, v. 13, n. 14, e1920, 2024.

RAMÍREZ-BUILES, V. H.; CAVATTE, P. C.; MARTINS, M. Q.; RAMALHO, J. C.; PARTELLI, F. L.; DA MATTA, F. M. **Physiological and agronomical response of coffee to abiotic stresses.** Plants, v. 13, n. 10, e1387, 2024.

RESEARCHGATE. **Biofertilizantes: uma revisão sobre as potencialidades de aplicação.** ResearchGate, maio 2023.

SACHDEV, S.; ANSARI, S. A.; ANSARI, M. I.; FUJITA, M.; HASANUZZAMAN, M. **Abiotic stress and reactive oxygen species: Generation, signaling, and defense mechanisms.** Antioxidants, v. 10, n. 2, p. 277, 2021.

SHARMA, P.; KUMAR, V.; KOUR, D.; SINGH, R.; YADAV, A. N. **Biofertilizer and biocontrol properties of Stenotrophomonas spp. in crops.** Frontiers in Microbiology, v. 15, e1320983, 2024.

SILVA, Saura R. et al. **The complete chloroplast genome sequence of the leafy bladderwort, Utricularia foliosa L.(Lentibulariaceae).** Conservation Genetics Resources, v. 9, p. 213-216, 2014.

SOUZA, Alexandre Lima de et al. **Casca de café em dietas para novilhas leiteiras: consumo, digestibilidade e desempenho.** Revista Brasileira de Zootecnia, v. 35, p. 921-927, 2006.

SURIANI, N. L.; LESTARI, N. P.; SARI, D. A.; NINGSIH, R. P.; PRIHATIN, E. **Rhizobacteria consortium improves growth, yield, and antioxidant response in plants.** Frontiers in Plant Science, v. 16, e1509982, 2025.

VERDE.AG. **Estresse hídrico e altas temperaturas em áreas produtoras de café: como reduzir os riscos do clima no café?** Blog Verde, 2024.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia vegetal. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. TAKAHAMA, U.; ONIKI, T. **A peroxide/phenolics/ascorbate system can scavenge hydrogen peroxide in plant cells.** Physiologia Plantarum, Copenhagen, v. 101, n. 4, p. 845-852, Dec. 1997.

TEIXEIRA, Tarcisio. **Comercio Eletrônico-Conforme o Marco Civil Da Internet e a regulamentação do e-commerce no Brasil.** Saraiva Educação SA, 2017.

YASMIN, H.; MAZHER, J.; AZMAT, A.; NOSHEEN, A.; NAZ, R.; HASSAN, M. N.; AHMAD, P. **Combined application of zinc oxide nanoparticles and biofertilizer to induce salt resistance in safflower by regulating ion homeostasis and antioxidant defence responses.** Ecotoxicology and Environmental Safety, v. 218, p. 112262, 2021.