



UNIVERSIDAD TECNICA DE BABAHOYO
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
ESCUELA DE AGRICULTURA, SILVICULTURA PESCA Y
VETERINARIA



CARRERA DE AGRONOMÍA

TRABAJO DE TITULACION

Componente práctico del examen de carácter Complexivo,
presentado al H. Consejo Directivo de la Facultad, como
requisito previo para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO

TEMA:

Mecanismos de respuesta frente a la deficiencia de nutrientes en el
cultivo de Cacao en la costa ecuatoriana.

AUTOR:

Gean Carlos Rodríguez Castillo

TUTOR:

Ing. Agr. Eduardo Colina Navarrete, Mg.Sc.

Babahoyo - Los Ríos - Ecuador

2024

RESUMEN

El cacao es uno de los cultivos de mayor importancia no solo para el Ecuador, sino también a nivel mundial. Las deficiencias nutricionales en el cultivo, en general los desórdenes nutricionales inhiben o disminuyen el crecimiento y la producción de cacao. Cuando la planta no logra asimilar estos elementos químicos la obligan a entrar en condiciones de estrés, estas condiciones son cambiantes dependiendo la especie vegetal y su edad fenológica. Sin embargo, los procesos de fotosíntesis y transpiración son seriamente afectados, pero estas acciones también pueden producir mecanismos de respuesta que ajustan su homeostasis mediante la expresión de diferentes procesos bioquímicos, responsables del transporte y asimilación de nutrientes. Estas sustancias producen la formación de elicitores que aún siguen en estudio, debido a que sus funciones no son conocidas completamente. Bajo este contexto el trabajo de investigación recopiló información sobre los diversos mecanismos vegetales, que las plantas utilizan como respuesta a la deficiencia de nutrientes. Los resultados indican que las plantas como alternativa utilizan varias rutas químicas y fisiológicas, esto con el fin de evitar desgaste energético. Entre las principales respuestas fisiológicas, tenemos: la regulación de estomas, disminución del área foliar, incrementando en la captura de fotones, menores tasas de respiración, menor cantidad de pigmentos fotoprotectores, fotoinhibición, mejora absorción de nutrientes en conjunto con simbiontes. Con relación a las respuestas químicas tenemos: epoxidación de las xantofilas, mejores tasas de carboxilación de la ribulosa, aumento de la actividad fotoquímica del PSII por citocromo, aumento de niveles de salicilato en hoja y aumento del contenido de alcaloides/polifenoles. En este concepto la planta desarrolla una capacidad única para sobrellevar, en el tiempo, la deficiencia de nutrientes, evitando en lo mínimo el consumo energético y pérdida en el rendimiento de grano.

Palabras clave: Cacao, Fotosíntesis, Nutrición Vegetal, Respuestas fisiológicas, Sistemas Adquirido de Resistencia.

SUMMARY

Cocoa is one of the most important crops not only for Ecuador, but also worldwide. Nutritional deficiencies in the crop, in general nutritional disorders, inhibit or decrease the growth and production of cocoa. When the plant fails to assimilate these chemical elements, it is forced to enter stress conditions. These conditions change depending on the plant species and its phenological age. However, the processes of photosynthesis and transpiration are seriously affected, but these actions can also produce response mechanisms that adjust their homeostasis through the expression of different biochemical processes, responsible for the transport and assimilation of nutrients. These substances produce the formation of elicitors that are still being studied, because their functions are not completely known. Under this context, the research work compiled information on the various plant mechanisms that plants use in response to nutrient deficiency. The results indicate that plants, as an alternative, use several chemical and physiological routes, to avoid energy waste. Among the main physiological responses, we have: the regulation of stomata, decrease in leaf area, increase in photon capture, lower respiration rates, lower amount of photoprotective pigments, photoinhibition, improved nutrient absorption in conjunction with symbionts. In relation to the chemical responses, we have epoxidation of xanthophylls, better carboxylation rates of ribulose, increase in the photochemical activity of PSII by cytochrome, increase in salicylate levels in the leaf and increase in the content of alkaloids/polyphenols. In this concept, the plant developed a unique capacity to cope, over time, with nutrient deficiency, avoiding energy consumption and loss in grain yield to a minimum.

Keywords: Cocoa, photosynthesis, Plant Nutrition, physiological response, Acquired Resistance Systems.

INDICE DE CONTENIDO

| | |
|---|-----|
| RESUMEN..... | II |
| SUMMARY | III |
| 1.CONTEXTUALIZACIÓN..... | 1 |
| 1.1. Introducción | 1 |
| 1.2. Planteamiento del problema..... | 3 |
| 1.3. Justificación | 4 |
| 1.4. Objetivos | 5 |
| 1.4.1. Objetivo general | 5 |
| 1.4.2. Objetivos específicos | 5 |
| 1.5. Líneas de investigación..... | 6 |
| 2. DESARROLLO | 7 |
| 2.1 Marco conceptual | 7 |
| 2.1.1. Cultivo de cacao en Ecuador..... | 7 |
| 2.1.2. Deficiencias nutricionales en el cultivo de cacao..... | 7 |
| 2.1.3. Mecanismos de defensas vegetales presentes en el cacao | 9 |
| 2.1.4. Evidencia de investigaciones en respuestas fisiológicas a la falta de nutrientes..... | 11 |
| 2.2. Marco metodológico | 13 |
| 2.3. Resultados..... | 13 |
| 2.4 Discusión de resultados..... | 14 |
| 3.CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 15 |
| 3.1. Conclusiones | 15 |
| 3.2. Recomendaciones | 16 |
| 4.REFERENCIAS Y ANEXOS | 17 |
| 4.1. Referencias bibliográficas..... | 17 |
| 4.2. Anexos..... | 22 |

1.CONTEXTUALIZACIÓN

1.1. Introducción

El cacao es hoy uno de los cultivos de mayor importancia no solo para el Ecuador, sino también a nivel mundial. Su comercio, manejado por transnacionales, es sin duda uno de los más atractivos y difíciles en el contexto productivo agropecuario. Es debido a esta importancia que en la actualidad muchos países centran sus recursos en la innovación y producción sostenible del cultivo.

El cacao es uno de los cultivos con mayor importancia a nivel mundial, se cultiva principalmente en África del Oeste, América Central, Sudamérica y Asia. Según la producción anual, los ocho mayores países productores del mundo son (en orden descendente) Costa de Marfil (38%), Ghana (19%), Indonesia (13%), Nigeria (5%), Brasil (5%), Camerún (5%), Ecuador (4%) y Malasia (1%). Estos países representan el 90% de la producción mundial, siendo el Ecuador es país líder en la producción de cacao de excelencia, el cacao fino de aroma, con un volumen de cerca de 200,000 t/año (CEFA 2024).

En Ecuador, los cultivos de cacao se concentran un 80% en las provincias de Guayas, Los Ríos, Manabí, Esmeraldas, El Oro y Santa Elena, mientras que el resto se distribuye en las provincias de Chimborazo, Bolívar, Cotopaxi, Pichincha, Azuay, Sucumbíos, Orellana, Napo y Zamora Chinchipe (Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAGAP 2017). El cacao en Ecuador se produce en 16 de las 24 provincias, en las cuales está dividido Ecuador para un total de 590579 ha plantadas y 527327 ha cosechadas. Cabe resaltar que, las provincias de Los Ríos, Manabí Guayas suman el 74 % de la superficie total plantada (García et al. 2021).

De acuerdo con Araujo *et al.* (2022:1357), “las cosechas generan mayor volumen en los meses de abril, mayo y junio, donde las principales provincias productoras de cacao son: Los Ríos 35 %, Guayas 25 %, Manabí 14 %, Esmeralda 8 %, El Oro 5 %, Bolívar y Cotopaxi con el 3 %, y finalmente Pichincha 4 %”.

Según Engormix (2019), “La cantidad exacta de nutrientes removidos por un cultivo en particular depende del estado nutricional de la plantación, pero, en

promedio, 1000 kg de semilla de cacao extraen 30 kg de N, 8 kg P_2O_5 , 40 kg de K_2O , 13 Kg de CaO y 10 kg de MgO”.

Las deficiencias nutricionales son comunes verlas por lo general en las hojas del cacao, aunque también se pueden presentar en frutos, flores y mazorcas. Esta condición visual nos refleja los requerimientos que necesita el cultivo para su óptimo desarrollo, crecimiento y producción. Si no se hace la debida corrección de estas deficiencias oportunamente, el cultivo se verá afectado reflejándose en disminución de producción, pérdidas de flores o frutos, susceptibilidad a plagas y enfermedades, porte bajo del árbol, entre otras, afectando así los rendimientos y la productividad (Compañía Nacional de Chocolates 2021).

De acuerdo con el Instituto Colombiano Agropecuario (2012:17), “los desórdenes nutricionales que inhiben o disminuyen el crecimiento y la producción de cacao no son apreciables mediante síntomas visibles, solo hasta cuando se trata de una deficiencia aguda. Los principales nutrientes que presentan deficiencias en los suelos cacaoteros son: Nitrógeno, Potasio, Magnesio y Boro”.

Las plantas como todo organismo vivo necesita nutrirse para realizar sus acciones biológicas, estos nutrientes por lo general proceden de la aplicación de fertilizantes y elementos presente en el suelo. A través de la fotosíntesis estos elementos son transformados en sustancias orgánicas, que la planta, utiliza en las reacciones bioquímicas que realiza para la elaboración de compuestos más complejos.

Cuando la planta no logra asimilar estos elementos químicos o aquellos no están disponible en el medio de la rizosfera, se producen desequilibrios químicos que obligan a la planta a entrar en condiciones de estrés. Estas condiciones son cambiantes dependiendo la especie vegetal y su edad fenológica. Sin embargo, los procesos de fotosíntesis y transpiración son seriamente afectados, pero estas acciones también pueden producir mecanismos de respuesta que favorecen la resistencia de los organismos vegetales.

En este contexto para afrontar la deficiencia de los diferentes nutrientes en la planta, estas ajustan su homeostasis mediante la expresión de diferentes procesos bioquímicos, responsables del transporte y asimilación de estos, entre ellos los transportadores de energía y lipoproteínas de conducción. Estas sustancias

producen la formación de cationes y han sido identificadas como potenciales inductores de resistencia a condiciones abióticas en las plantas, sin embargo, sus funciones no son conocidas completamente.

1.2. Planteamiento del problema

La planta de cacao requiere de 16 elementos esenciales para cumplir con sus funciones de crecimiento, floración y fructificación. Se denominan esenciales porque la ausencia de cualquiera de ellos no permite que la planta complete sus fases vegetativa o reproductiva (Brenes y Santos 2021).

Las plantas requieren de todos los nutrientes esenciales en proporciones equilibradas para un óptimo crecimiento. La deficiencia de nutrientes ocurre cuando la concentración y disponibilidad es insuficiente para satisfacer los requerimientos de una planta en crecimiento. En este sentido la deficiencia de nutrientes en el cultivo de cacao puede tener un impacto significativo en su crecimiento y producción, especialmente en la costa ecuatoriana, donde las condiciones climáticas y del suelo pueden variar (Colina *et al.* 2022).

Dentro de los nutrientes más absorbidos por el cacao durante su vida útil tenemos el potasio (K), nitrógeno (N) y fósforo (P), así como elementos secundarios como el calcio (Ca), azufre (S) y magnesio (Mg), los cuales intervienen en el metabolismo de la planta. Un correcto manejo de nutrientes puede aumentar la producción de cacao en un 30% o más, además de mejorar la calidad del grano, y controlar su tamaño y forma. Mejora la tolerancia al estrés hídrico y la resistencia a las enfermedades.

El cultivo de cacao en campo pasa por un sinnúmero de problemas en el campo de nutrición de cultivo, esto se da por la falta de aplicación de fertilizantes edáficos o foliares en las plantas, así como, por el bajo o inexistente uso de fitohormonas en la producción de grano. Es importante mencionar que las fitohormonas son sustancias que estimulan respuestas de resistencia en las plantas, en especial a factores externos que afectan la producción al generar entre otras cosas, una inducción fitogénica.

A lo largo de su evolución las plantas han desarrollado distintos mecanismos de defensa para resistir los déficit o pérdidas de nutrientes, los cuales consisten en reconocer el nutriente que falta y activar variadas estrategias, tanto en el sitio de intervención como en otros tejidos mediante vías sistémicas, permitiéndole prepararse para futuros problemas. Los mecanismos de defensa consumen energía, es por ello por lo que el estado nutricional de la planta juega un papel fundamental (Intagri 2024).

Existen avances recientes en la descripción de los mecanismos que vinculan los fotorreceptores con el crecimiento y la inmunidad. Comprender estos mecanismos es importante para generar marcos de conocimiento que pueden utilizarse en programas de mejoramiento destinados a incrementar la productividad y la tolerancia al estrés en las especies cultivadas (Ballaré 2023).

En función de lo antes descrito es de suma importancia identificar cuáles son los mecanismos de respuesta que presentan los organismos vegetales como el cacao frente a la deficiencia de nutrientes, con lo que se tendría información relevante que ayudaría a los productores, con técnicas agronómicas en la reducción de esta problemática que generaría mayores incrementos de rendimiento de grano.

1.3. Justificación

Estudios recientes destacan los avances significativos en la comprensión de las respuestas del cacao (*Theobroma cacao*) ante la falta de nutriente en el suelo, ello involucra desde la convergencia con microorganismos como las micorrizas, hasta la generación de respuestas fisiológicas de defensa tales como: Sistema de resistencia adquirida (SAR), Sistema de resistencia inducida (SIR) y Resistencia Inducida por Herida (WAR).

Dentro del mismo contexto se han identificado varias vías para la generación de respuestas de la planta de cacao, ante la deficiencia de nutrientes. Uno de los más destacados es la identificación de la vía de biosíntesis de fenilpropanoides, conocida por su rol en la defensa de las plantas, y que se conserva en todas las poblaciones analizadas, indicando su importancia crucial en la respuesta de defensa del cacao.

Con un creciente aumento de la población mundial y sobre todo con los cambios en la agricultura moderna, es crucial desde todo punto de vista la búsqueda de información sobre los diversos mecanismos con que cuentan las plantas, en especial el cacao, sobre los problemas de deficiencia nutricional y como las plantas logran en mayor o menor medida tolerar estos efectos y generar cosechas sin problemas.

El trabajo aportara información sobre estos cambios y mecanismos que hoy en día están siendo estudiados, con el fin de garantizar la sostenibilidad cacaotera en las zonas de cultivo.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Determinar los mecanismos de respuesta presentes en las plantas de cacao frente a la deficiencia de nutrientes en el cultivo.

1.4.2. Objetivos específicos

- Identificar los mecanismos de respuesta vegetal presentes en déficit nutricional en el cultivo de cacao.
- Definir las sustancias químicas presentes en los mecanismos de respuesta en déficit nutricional en cacao.
- Describir los efectos que causan las sustancias producidas por las plantas de cacao bajo déficit nutricional.

1.5. Líneas de investigación

La presente investigación está enfocada dentro de los dominios de la Universidad Técnica de Babahoyo de Recursos agropecuarios, ambiente, biodiversidad y biotecnología. El enfoque principal de este estudio se centra en el: “Mecanismos de respuesta frente a la deficiencia de nutrientes en el cultivo de cacao en la costa ecuatoriana”. En este contexto, específicamente se aborda el Desarrollo agropecuario, agroindustrial sostenible y sustentable, en la Sublínea de Agricultura Fisiología y nutrición vegetal.

2. DESARROLLO

2.1 Marco conceptual

2.1.1. Cultivo de cacao en Ecuador

La producción de cacao en el Ecuador está localizada en 23 de sus 24 provincias y se produce como “cultivo solo” o cultivo asociado con otras especies. La mayor concentración del cultivo del cacao se encuentra en las provincias del litoral, en las estribaciones de la Cordillera Occidental y en las provincias del nororiente (CEPAL 2020).

La producción de cacao se concentra principalmente en las provincias de Los Ríos, Guayas, Manabí y Sucumbíos. En el país se cultivan dos tipos de cacao: el Cacao CCN-51 y el denominado Cacao Nacional. Es un Cacao Fino de Aroma conocido como 'Arriba', desde la época colonial. Ecuador es el país con la mayor participación en este segmento del mercado mundial con un 63% (Guerrero 2014).

La producción de cacao se concentra principalmente en la región Litoral, siendo Guayas la de mayor importancia. Se cultivan alrededor de 650.000 hectáreas de cacao, 77% del bosque se plantó en la Costa, 13% en las provincias de la Sierra y 10% en la región amazónica (Del Monte 2024).

Así mismo se indica que el cultivo de cacao tiene un papel importante en la preservación de la biodiversidad ya que se lleva a cabo generalmente en sistemas agroforestales. Esto no solo ayuda a proteger la biodiversidad de la región, sino que también mejora la calidad del suelo y reduce la erosión.

2.1.2. Deficiencias nutricionales en el cultivo de cacao

La extracción de nutrientes del cacao se incrementa rápidamente durante los primeros cinco años después de la siembra y luego de establecerse manteniendo esa tasa de absorción por el resto de vida útil de la plantación. En general, el potasio

(K) es el nutriente más absorbido, seguido por el nitrógeno (N), calcio (Ca) y magnesio (Mg) (Sánchez *et al.* 2005).

En promedio una cosecha de una tonelada de semillas de cacao extrae 35 Kg de N, 10 kg de P₂O₅, 50 Kg de K₂O, 13 Kg de CaO y 150 Kg de MgO. Además, también se remueven nutrientes en la cáscara de la mazorca que es rica en K. Por otro lado, también se requieren nutrientes para construir el cuerpo del árbol (López *et al.* 2015).

La formación y acumulación de biomasa del árbol está definida por el nivel de disponibilidad de nutrimentos, su absorción y su distribución en la planta, su carencia afecta el crecimiento y en consecuencia el rendimiento del cultivo (Ribeiro *et al.* 2008).

La mayoría de los suelos cacaoteros presentan bajos niveles de MO, N, S, Zn y B, lo que unido a una fertilización insuficiente y a la falta de riego dificulta el incremento del rendimiento y la rentabilidad del cultivo (Pérez 2019).

Dado que los nutrientes son necesarios para los procesos de fotosíntesis, respiración y síntesis de fitohormonas que intervienen en el crecimiento, desarrollo y producción de los cultivos, la privación de nutrientes provoca problemas fisiológicos que repercuten en la productividad. Además, se ha descubierto que una dieta equilibrada ayuda a fortalecer las defensas naturales de las plantas contra las enfermedades (Nadeem *et al.* 2019).

La deficiencia de nutrientes conlleva a desórdenes fisiológicos que afecta la producción, dado que estos cumplen funciones fisiológicas específicas en los procesos de fotosíntesis, respiración y síntesis de fitohormonas implicadas en el crecimiento, desarrollo y producción de cultivos (De Bang *et al.* 2021).

De acuerdo con Motato y Pincay (2015), “los suelos cacaoteros son deficientes en elementos claves para la producción de cacao como nitrógeno, azufre, zinc y boro. Además, la mayoría de los suelos presentan desequilibrios de bases, altos niveles de calcio y fósforo que pueden interactuar negativamente entre sí y especialmente con los micronutrientes. En este sentido, es bien conocido que niveles altos y excesivos de Ca en el suelo pueden disminuir la absorción de B y

Zn por las plantas, limitando significativamente la producción de los cultivos afectando la tasa de transpiración.

2.1.3. Mecanismos de defensas vegetales presentes en el cacao

Los flavonoides y algunas hormonas que afectan diferencialmente el crecimiento de la planta una vez que el mecanismo de respuesta ha sido identificado, son importantes en la fase inicial, pero la strigolactona ha mostrado ser una señal de fundamental importancia en el desarrollo de la simbiosis, ya que el estímulo de esta hormona es necesario para la producción y activación de las enzimas. Cabe indicar que los mecanismos de defensa consumen energía, es por ello por lo que el estado nutricional de la planta juega un papel fundamental.

Procesos como la fotosíntesis y la respiración, así como la regulación de producción de ROS (Reactive oxygen species) con propósitos de defensa, han sido descritos como mecanismos esenciales para la adaptación de plantas a ecosistemas terrestres, debido a la liberación de oxígeno, impactando los procesos bioquímicos de estas en su medio. Los mecanismos de defensa son complejos y se retroalimentan, la eficiencia en la regulación de la respuesta depende del tipo específico agente biótico o abiótico que este limitando la respuesta (Colina *et al.* 2022).

En este contexto las plantas de cacao presentan dentro de su fisiología una serie de respuesta a la falta de determinados elementos químicos en sus procesos productivo. Estos cambios han originado mecanismos bioquímicos diferentes en cada acción que la planta ejerce, lo que ha logrado que, pese a diferentes particularidades del manejo de cultivo, este no pierda productividad y sirva de alternativa de producción para el agricultor.

Las plantas detectan y responden a la proximidad de competidores utilizando señales de luz percibidas por proteínas fotorreceptoras. Las bajas relaciones aumentan la síntesis de hormonas relacionadas con el crecimiento, incluidas las auxinas y las giberelinas, con moduladores importante de las vías hormonales que regulan la inmunidad de las plantas contra procesos bióticos y abióticos, incluida la vía de señalización del ácido jasmónico (Ballaré 2023).

“Se observó que varias enzimas actúan de manera redundante, mostrando una alta sensibilidad a la deficiencia de varios elementos en la planta en especial microelementos. Además, se produce una baja producción de biomasa, sobre expresión de transportadores de microelementos, baja adquisición de macroelementos, y aumento en la translocación de varios elementos. Como conclusión se indica que los genes transportadores de microelementos actúan de manera complementaria en una acción concertada para controlarla homeostasis en la planta” (Ochoa 2023).

El nivel de luz que llega a las hojas del cultivo del cacao tiene un alto efecto en la producción y en la demanda de fertilizantes. Con un bajo nivel de luz y cobertura abundante de sombra, el rendimiento del cultivo disminuye. Con un alto nivel de luz, con poca o ninguna sombra, los rendimientos son mucho más altos. En este último caso existe una respuesta substancial en rendimiento a la aplicación de fertilizantes (CPBA 2012).

Sobre la función que desempeñan los alcaloides en los tejidos vegetales (hojas, frutos, almendras), existen diferentes teorías. La más sólida, argumenta que su acumulación implica un rol biológico como químicos de defensa; esto, al igual que lo ocurre con los polifenoles. También se ha propuesto que su presencia en los tejidos responde a productos de desecho o almacenamiento del nitrógeno sobrante, o bien como reguladores del crecimiento (Evans 2000).

Los principales compuestos fenólicos presentes en cacao se localizan en tres grupos: catequinas, antocianinas y proantocianidinas. Los compuestos fenólicos o polifenoles pertenecen a un amplio grupo de sustancias químicas, considerados no esenciales para la supervivencia de las plantas (metabolitos secundarios), pero que poseen gran cantidad de actividades. Un grupo muy importante y sobre el que se ha estudiado ampliamente son los flavonoides, los cuales tienen diversas funciones en la bioquímica y fisiología, estos contribuyen a la tolerancia al estrés biótico y abiótico, y defensa contra radiación UV (Winkel 2006).

“Las metil xantinas son un grupo muy importantes de compuesto de origen vegetal presente en el cacao, son compuestos importantes para el metabolismo energético y como elementos esenciales para la biosíntesis de ácidos nucleicos. Se sintetizan en las plantas tanto por la vía de novo como por la vía de salvamento de purinas, a partir de la ruta del ácido shikimico generada por el ácido salicílico” (Sugiura y Takeda 2000).

2.1.4. Evidencia de investigaciones en respuestas fisiológicas a la falta de nutrientes

Las plantas de Cacao tienden a liberar polifenoles y alcaloides como sustancia que actúan bloqueando procesos fisiológicos involucrados en los aspectos genéticos y ambientales, por lo que el conocimiento en su biosíntesis puede impactar en el diseño a nivel biotecnológico, modificando las condiciones que afectan esas rutas de biosíntesis (Vásquez *et al.* 2016).

La disminución del número de centros de reacción funcionales a causa de falta de nutrientes se relaciona con la integridad de la maquinaria fotosintética, lo que podría estar asociada con la “fotoinhibición crónica”. Se ha estudiado que la maquinaria implicada en el transporte de electrones es escasamente afectada, al menos a estreses moderados, considerándose que el aparato fotosintético es relativamente resistente a ciertos tipos de estrés (Almeida 2012).

Las respuestas de las plantas de cacao a la interacción de todos los factores se ven reflejadas en las etapas fenológicas, cabe indicar que el cultivo tiene un desorden fisiológico conocido como Cherelle wilt. Este desorden por abortamiento de frutos pequeños es provocado por déficit de nutrientes (Dubón 2015).

La concentración de clorofila total en el clon EETP-800, a los 180 días después de la aplicación de tratamientos, no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos. Pese a que no existieron diferencias significativas, la interacción fitohormonas – nutrición, se observaron diferencias aritméticas, con valores más altos de concentración de clorofila expresados en mL/g, en donde observamos que el tratamiento T3 tuvo un mayor contenido de clorofila, seguido del T1 y T4, y un menor contenido de clorofila lo presentó el T2. La densidad de estomas mm^{-2} , a los 180 DDT, no presentó diferencias significativas entre los tratamientos, sin embargo, fue mayor en el tratamiento de Fertilización 0%

y sombra 80% (T3) y el tratamiento que presento un menor contenido de estomas fue el T1, que es el tratamiento control (Cordero 2022).

En plantas, la expresión de genes de defensa se activa ante estrés ambiental como lo es estrés nutricional. Estos genes se activan con el fin de aminorar el efecto. Esto sugiere que la respuesta a cualquier tipo de estrés en plantas comparte rutas o componentes de señalización (Jambunathan *et al.* 2003).

Las plantas se defienden de la falta de nutrientes mediante un sistema complejo que tiene diferentes niveles que actúan de forma sincronizada y casi simultáneamente han desarrollado mecanismos químicos que educen la posibilidad de pérdida (Glazebrook 2005).

Adicionalmente, en las plantas se producen otro tipo de mecanismos que inducen la respuesta ante falta de nutrientes, es un mecanismo activo de defensa, que involucra cambios claros en el metabolismo provocados por la expresión diferencial de genes. Por lo tanto, para que ocurra la inducción de la defensa, es necesaria la mediación de sistemas de reconocimiento específico, mediante los cuales la planta reconoce la ausencia del nutriente. Una es la vía de señalización dependiente del ácido salicílico (SA) que permite la expresión de algunas proteínas relacionadas con el estrés (Collinge *et al.* 2014).

“Se evidenció una activación diferencial de genes de las vías de señalización relacionadas con las fitohormonas ácido salicílico (SA), etileno (ET) y ácido jasmónico (JA), mediante la cuantificación de la expresión de genes usando RT-qPCR. La vía del ácido salicílico se encontró activa a las 48 horas post limitante en el genotipo CCN-51, mientras que las vías del JA y ET estuvieron activas en el genotipo a las 24 hpi. De esta manera, se observó que la respuesta en cacao de las vías del JA y ET son antagonistas a la vía del SA y que los genes relacionados en éstas se manifiestan en distintas etapas durante la pérdida de nutrientes” (Delgadillo 2018).

2.2. Marco metodológico

En la elaboración del presente documento se recopiló información actualizada como lo son artículos científicos, sitios web y bibliotecas virtuales que aporten opiniones e ideas de autores que permitirán estudiar el proceso de la presente investigación. Se especificó la temática relevante sobre los mecanismos de respuesta frente a la deficiencia de nutrientes en el cultivo de cacao. El presente trabajo se desarrolló como una investigación no experimental de carácter bibliográfico, mediante el uso de síntesis, análisis, y resumen de la información que se recopiló.

2.3. Resultados

Las plantas tienen mecanismos sofisticados para responder a la falta de nutrientes, que son esenciales para su crecimiento y desarrollo. Estas ajustan su metabolismo para utilizar los nutrientes de manera más eficiente. Por ejemplo, pueden reducir la síntesis de compuestos que requieren grandes cantidades de nutrientes y aumentar la eficiencia en el uso de los nutrientes disponibles. Por otro lado, las plantas pueden ajustar su crecimiento en respuesta a la deficiencia de nutrientes. Por ejemplo, pueden reducir el crecimiento aéreo (hacia arriba) y enfocar los recursos en el desarrollo de las raíces para explorar un mayor volumen de suelo en busca de nutrientes.

Las plantas producen señales químicas, como las fitohormonas (ej. auxinas, citoquininas, ácido salicílico) y compuestos relacionados con el estrés, que regulan la respuesta a la deficiencia de nutrientes. Estas señales pueden inducir cambios en la expresión genética y en la fisiología de la planta. En situaciones de deficiencia extrema, las plantas pueden reducir la biomasa de partes menos críticas para conservar los nutrientes. Esto puede incluir la pérdida de hojas o la reducción del tamaño de las flores y frutos. Las plantas pueden movilizar nutrientes desde las partes más viejas y menos vitales (como hojas maduras) hacia las partes jóvenes y en desarrollo (como brotes y hojas nuevas) para maximizar su uso.

Las raíces pueden modificar su estructura y funcionalidad para aumentar la absorción de nutrientes. Esto incluye la proliferación de raíces laterales, la

formación de pelos radicales y la exudación de compuestos que solubilizan nutrientes en el suelo. En respuesta a la falta de nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo, las plantas pueden desarrollar sistemas radicales más extensos o densos para maximizar la absorción.

2.4 Discusión de resultados

Es importante indicar que los organismos vegetales como parte de sus sistemas de defensa ante factores externos abióticos, producen señales químicas, como las fitohormonas y compuestos relacionados con el estrés, que regulan la respuesta a la deficiencia de nutrientes, estas señales pueden inducir cambios en la expresión genética y en la fisiología de la planta, esto concuerda por lo descrito por Delgadillo (2018) quien indica que, hay evidencia de activación diferencial de genes de las vías de señalización relacionadas con las fitohormonas ácido salicílico (SA), etileno (ET) y ácido jasmónico (JA), en plantas de clones de cacao en distintas etapas durante la pérdida de nutrientes.

El déficit de nutrientes dependiendo cual sea, causa un estrés abiótico, que en la mayoría de los casos afecta el normal desenvolvimiento del cultivo, sin embargo, esto hace que la planta estimule respuestas, que en muchos casos son diferentes unas de otras. Esto está relacionado con lo encontrado por Vásquez *et al.* (2016) quienes indican que las plantas de Cacao tienden a liberar polifenoles y alcaloides como sustancia que actúan bloqueando procesos fisiológicos involucrados en los aspectos genéticos y ambientales.

Entre otros campos las plantas pueden reducir su actividad fotosintética ante la falta de nutrientes como nitrógeno y magnesio, sin embargo, esta disminución de actividad se ve compensada con la eficiencia en el uso de las cantidades presentes en el tejido foliar. Esto lo corrobora Colina *et al.* (2022) quienes indican que procesos como la fotosíntesis y la respiración, así como la regulación de producción de ROS (Reactive oxygen species) con propósitos de defensa. Los mecanismos de defensa son complejos y se retroalimentan, la eficiencia en la regulación de la respuesta depende del tipo específico agente abiótico que este limitando la respuesta.

En función de lo encontrado es evidente que los organismos vegetales a través de los años han evolucionado y creado sistemas de defensa para el déficit de

nutrientes en el suelo. Esto lo ratifica CPBA (2012) quien indica que en este último caso existe una respuesta substancial en rendimiento a la aplicación de fertilizantes.

3.CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1. Conclusiones

Se han identificado diferentes mecanismos de respuesta vegetal ante la falta de nutrientes en cacao, dichos mecanismo activan principalmente rutas metabólicas que controlan la respiración y transpiración de las plantas, entre las principales respuestas fisiológicas se tienen: regulación de estomas, disminución del área foliar, incrementando en la captura de fotones, menores tasas de respiración, menor cantidad de pigmentos fotoprotectores, fotoinhibición, mejora absorción de nutrientes en conjunto con simbiosis.

En las respuestas químicas estas están centradas principalmente en epoxidación de las xantofilas, mejores tasas de carboxilación de la ribulosa, aumento de la actividad fotoquímica del PSII por citocromo, aumento de niveles de salicilato en hoja y aumento del contenido de alcaloides/polifenoles. Entre las sustancias que mayor presencia tienen ante la respuesta en déficit nutricional en cacao se tienen: fitohormonas (ácido salicílico, etileno y ácido jasmónico), flavonoides, estrigolactonas, polifenoles y alcaloides.

Los efectos ocasionados por las sustancias producidas durante un régimen de déficit nutricional son diversos en las plantas de cacao, sin embargo, es recurrente el aumento de la síntesis de hormonas (auxinas y giberelinas), mayor actividad simbiótica con hongos de suelo, mayor sensibilidad a la deficiencia de microelementos, baja producción de biomasa, baja adquisición de macroelementos y fotoinhibición.

3.2. Recomendaciones

En función de lo encontrado se recomienda:

En lo posible establecer programas de nutrición vegetal que eviten el déficit de nutrientes en las plantas de cacao, estos deben estar relacionados con balance edáfico y foliar,

De presentarse déficit nutricional en el cultivo por eventualidades, estimular a las plantas de cacao, para que puedan establecer mecanismos de defensa que eviten la pérdida de producción o muerte del cultivo.

Implementar investigaciones que ayuden a determinar nuevas rutas metabólicas de respuesta o a su vez entender de mejor manera las ya conocidas.

4. REFERENCIAS Y ANEXOS

4.1. Referencias bibliográficas

- Almeida, J. 2012. Respuestas eco fisiológicas de cacao (*Theobroma cacao* L.) a diferentes intensidades lumínicas. Tesis Licenciada en Biología, Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela. 69p.
- Araujo, M; Colina, E; Gutiérrez, X; Goyes, M; Rojas, N. 2022. Estudo situacional da produção e comercialização de grãos de cacau na área de Urdaneta, Los Ríos. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research* 5(1):1353–1372. <https://doi.org/10.34188/bjaerv5n1-105>
- Ballaré, C. 2023. Fotorreceptores y respuestas en las plantas. Regulación del crecimiento y de los mecanismos de defensa. *Archivos Académicos USFQ* 43(1):33. ISBNe: 978-9978-68-246-3
- Brenes, J; Santos, J. 2021. Guía para la identificación y manejo de las deficiencias de nutrientes en el cultivo cacao (*Theobroma cacao* L). PROGRESA CARIBE/CRS. San José, Costa Rica. 20p.
- CPBA (Red de Productores de Cacao de la región Caribe colombiana). 2012. Guía técnica para el establecimiento y manejo del cultivo de cacao. Bogotá, Colombia. 54p.
- CEFA. 2024. Cadena de valor del Cacao (en línea). Consultado 24 may. 2024. Disponible en <https://cefaecuador.org/productos/cacao/#:~:text=Ecuador%20es%20pa%C3%ADs%20l%C3%ADder%20en,de%20cerca%20120%2C000%20t%20%2F%20a%C3%B1o.>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe – CEPAL. 2020. Diagnóstico de la cadena productiva del Cacao en el Ecuador. Unidad de Desarrollo Agrícola. Quito, Ecuador. 10p.
- Colina, E; Gonzales, M; Dueñas, D; Castro, C. 2022. Efectos de protohormonas sobre la incidencia de marchitamiento prematuro en cacao en la zona de

- Babahoyo. In Memorias de II Congreso Internacional de Investigación, Innovación y Gestión del conocimiento. 2(1):76-81. isbn: 978-9942-606-10-5
- Collinge, B; Gregersen, P; Thordal-Christensen, H. 2014. The induction of gene expression in response to pathogenic microbes. In Mechanisms of plant growth and improved productivity, Modern approaches. Basra,AS. Ed.New York, Marcel Dekker.p.391-433.
- Compañía Nacional de Chocolates S.A.S. 2021. Modelo productivo para el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) nutrición y fertilización. Boletín NUTRESA 04-2021. ISBN Digital: 978-958-52485-8-8. Consultado 23 may. 2024. Disponible en <https://chocolates.com.co/wp-content/uploads/2024/02/>
- Cordero, M. 2022. Crecimiento vegetal y parámetros fisiológicos del cultivo de cacao clon EETP 800 en respuesta a la variación de la radiación solar y la fertilización en el sector del PADMI, Zamora Chinchipe. Tesis Ingeniero Agrónomo, Universidad Nacional de Loja. Loja, Ecuador. 93p.
- Delgadillo, L. 2018. Estudio de la respuesta de defensa de la especie *Theobroma cacao* L. a la infección de *Phytophthora palmivora* (Butler). Tesis Magister en Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia 87p.
- De Bang, T; Husted, S; Laursen, K; Persson, D; Schjoerring, J. 2021. The molecular-physiological functions of mineral macronutrients and their consequences for deficiency symptoms in plants. *New Phytol*, 229(5):2446-2469. <https://doi.org/10.1111/nph.17074>
- Del Monte. 2024. Producción de cacao en Ecuador y su impacto económico. Consultado 23 jul. 2024. Disponible en <https://delmonteag.com.ec/produccion-de-cacao-en-ecuador-y-su-impacto-economico/>
- Del Monte. 2017. Importancia de la fertilización en el cultivo de cacao en Ecuador. Consultado 23 may. 2024. Disponible en <https://delmonteag.com.ec/importancia-de-la-fertilizacion-en-el-cultivo-de-cacao-en-ecuador/>
- Dubón, A. 2016 El ambiente y su efecto en el comportamiento de la planta de cacao. *Infocacao*, 5(1):1-4.

- Engormix. 2019. Deficiencias nutricionales y fertilización del cacao (en línea). El Productor, Guayaquil, Ecuador; 23 abr. Consultado 24 may. 2024. Disponible en <https://elproductor.com/2019/04/deficiencias-nutricionales-y-fertilizacion-del-cacao/>
- Evans W. 2000. Trease and Evans - Pharmacognosy. 15th ed. Edinburgh: Saunders. 256p.
- García, A; Pico, B; Jaimez, R. 2021. La cadena de producción del Cacao en Ecuador: Resiliencia en los diferentes actores de la producción. Revista Digital Novasinergia 4(2):152-172. <https://doi.org/10.37135/ns.01.08.10>
- Glazebrook, J. 2005. Contrasting mechanisms of defense against biotrophic and necrotrophic pathogens. Annual Review of Phytopathology, 43, 205-227. DOI: 10.1146/annurev.phyto.43.0 b40204.135923.
- Guerrero, G. 2014. El Cacao ecuatoriano su historia empezó antes del siglo XV. Revista Digital Lideres. 2014(06):14-16.
- ICA (Instituto Colombiano Agropecuario). 2012. Manejo fitosanitario del cultivo del cacao (*Theobroma cacao* L.): Medidas para la temporada inverna. Boletín Código: 00.09.39.12C. Consultado 24 may. 2024. Disponible en <https://www.ica.gov.co/getattachment/c01fa43b-cf48-497a-aa7f-51e6da3f7e96/->
- Intagri. 2024. El rol de los nutrientes en la resistencia a enfermedades de las Plantas. Consultado 24 jul. 2024. Disponible en <https://www.intagri.com/articulos/fitosanidad/rol-de-los-nutrientes-en-la-resistencia-a-enfermedades>
- Jambunathan, N; McNellis, T; Shallenberger, E; Smotkin, T. 2003. Regulation of Arabidopsis COPINE 1 gene expression in response to pathogens and abiotic stimuli. Plant Physiol, 132(3):1370-81. doi: 10.1104/pp.103.022970.
- López, O; Ramírez, S; Espinoza, S; Moreno, J; Ruiz, C; Villareal, J; Ruiz, J. 2015 Manejo agroecológico de la nutrición en el cultivo del cacao. Primera edición Universidad Autónoma de Chiapas. 123p. ISBN: 978-607-8363-67-4

- MAGAP (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca). 2017. Producción de cacao apunta a romper récord este año. Consultado 24 may. 2024. Disponible en <https://www.agricultura.gob.ec/produccion-de-cacao-apunta-a-romper-record-este-ano/#:~:text=En%20Ecuador%2C%20los%20cultivos%20de,Orellana%2C%20Napo%20y%20Zamora%20Chinchipe>.
- Motato, N; Pincay, J. 2019. Calidad de los suelos y aguas para riego en áreas cacaoteras de Manabí. *Revista La Técnica* 14: 6 - 23.
- Nadeem, F; Farooq, M; Usman M; Rehman H; Wahid A; Basra S; Siddique K. 2019. Seed priming in field crops: potential benefits, adoption and challenges. *Crop and Pasture Science* 70, 731-771. <https://doi.org/10.1071/CP18604>
- Ochoa, C. 2023. Mecanismos de respuesta frente a la deficiencia de Zn. *Archivos Académicos USFQ* 43(1):31. ISBNe: 978-9978-68-246-3
- Pérez, G. 2013. Plan de negocios para la exportación de cacao producido en la región 7 (Loja, Zamora y El Oro) hacia Holanda. Tesis de grado. Obtenido de <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/339/1/TESIS.pdf>. Consultado 24 jul. 2024
- Ribeiro; M; Da Silva, J; Aitken, W; Machado, R; Baligar, V. 2008. Nitrogen use efficiency in cacao genotypes. *Journal Plant Nutrition* 31:239-249.
- Sánchez, F; Parra, D; Gamboa, E; Rincón, J. 2005. Rendimiento de una plantación comercial de cacao ante diferentes dosis de fertilización con NPK en el sureste del estado Táchira, Venezuela. *Bioagro* 17(2): 119-122.
- Sugiura, M; Takeda Y. 2000. Nucleic acids. In: *Biochemistry and Molecular Biology of Plants*. Buchanan BB, Gruissen W, Jones RL (eds). Rockville, Am Soc Plant Physiol. pp. 260-310.
- Solorzano, J; García, G; Mejía, A; Colina, E. 2023. Efecto del Ethephon sobre el comportamiento agronómico del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) en Babahoyo. *Archivos Académicos USFQ* 43(1):49. ISBNe: 978-9978-68-246-3.
- Vázquez-Ovando, A; Ovando-Medina, I; Adriano-Anaya, L; Betancur-Ancona, D; Salvador-Figueroa, M. 2016. Alcaloides y polifenoles del cacao, mecanismos

que regulan su biosíntesis y sus implicaciones en agricultura. Archivos Latinoamericanos de Nutrición, 66(3):56-66.

Winkel-Shirley B. 2006. Flavonoid biosynthesis. A colorful model for genetics, biochemistry, cell biology and biotechnology. Plant Physiol. 126(2): 485-493.

4.2. Anexos

Fuente, dosis por planta (onzas/planta) y momento de aplicación del fertilizante en cacao

| | | Meses | | | |
|---|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Fertilizante | Dosis/planta | Abril | Junio | Septiembre | Noviembre |
| 20-3-20-3(CaO)-2.5(S)-0.75(Zn)-0.7(B)-0.22(TMC) | 17 oz/planta | | 9 oz/planta | 4 oz/planta | 4 oz/planta |
| Enmienda | 6 oz/planta | 6 oz/planta | | | |

Anexo 1: Tabla de manejo de fertilizantes en cacao por etapas.

Fuente: <https://progresacaribe.info/>



Anexo 2: Planta con problemas nutricionales en cacao.

Fuente: <https://es.slideshare.net/>



Anexo 3: Planta tratada con fertilizantes y programas de fitohormonas SAR.

Fuente: Colina (2022).

Tabla 2. Guía de recomendaciones de fertilización para el cultivo del cacao con 1400 plantas por ha.

| Edad años | N | P ₂ O ₅ | K ₂ O g/planta | MgO | S |
|------------------------------------|-----|-------------------------------|---------------------------|-----|----|
| Disponibilidad baja de nutrientes | | | | | |
| 0-1 | 40 | 17 | 31 | 9 | 14 |
| 1-2 | 60 | 26 | 62 | 17 | 29 |
| 2-3 | 80 | 34 | 94 | 26 | 43 |
| 3-4 | 100 | 43 | 126 | 34 | 57 |
| > 4 | 120 | 51 | 154 | 43 | 71 |
| Disponibilidad media de nutrientes | | | | | |
| 0-1 | 23 | 9 | 14 | 6 | 7 |
| 1-2 | 40 | 11 | 29 | 9 | 14 |
| 2-3 | 57 | 17 | 43 | 14 | 21 |
| 3-4 | 71 | 23 | 57 | 18 | 27 |
| > 4 | 86 | 29 | 71 | 23 | 34 |
| Disponibilidad alta de nutrientes | | | | | |
| 0-1 | 11 | 7 | 14 | 6 | 7 |
| 1-2 | 23 | 7 | 23 | 6 | 7 |
| 2-3 | 34 | 10 | 31 | 9 | 9 |
| 3-4 | 46 | 14 | 40 | 10 | 17 |
| > 4 | 57 | 17 | 49 | 11 | 23 |

Anexo 4: Programa de fertilización estándar para producción de cacao. Fuente:

<https://elproductor.com/>



Anexo 5: Efectos de SAR-SIR en floración de Cacao. Fuente: Colina, 2022.



Anexo 6: Efectos de complejo fitohormonal en producción de cacao CCN-51.
Fuente: USFQ, 2023.