

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE AGRONOMÍA



“ESTRÉS HÍDRICO Y ALTA TEMPERATURA EN CAFÉ (*Coffea arabica* L.) EN CONDICIONES DE VIVERO”

TESIS PARA OPTAR TÍTULO DE INGENIERA AGRÓNOMA

FABIOLA RUBÍ LEÓN ROJAS

LIMA – PERÚ

2022

**La UNALM es titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación (Art. 24
– Reglamento de Propiedad intelectual)**

Document Information

Analyzed document	TESIS FABIOLA LEON 090922.doc (D143862405)
Submitted	2022-09-10 18:04:00
Submitted by	Ricardo Borjas Ventura
Submitter email	rborjas@lamolina.edu.pe
Similarity	2%
Analysis address	rborjas.unalm@analysis.arkund.com

Sources included in the report

SA	Universidad Nacional Agraria La Molina / TesisDeynaValderrama.pdf Document TesisDeynaValderrama.pdf (D142340661) Submitted by: ajo@lamolina.edu.pe Receiver: ajo.unalm@analysis.arkund.com		3
SA	TRABAJO FINAL COMPLEXIVO corregido.docx Document TRABAJO FINAL COMPLEXIVO corregido.docx (D50436751)		3
SA	Libro_Coleccion_Colombiana_de_Cafe_JCAriS_Rev_2021.docx Document Libro_Coleccion_Colombiana_de_Cafe_JCAriS_Rev_2021.docx (D121802093)		4
SA	Luis Plaza Avellán INIAP 21.11.18.docx Document Luis Plaza Avellán INIAP 21.11.18.docx (D44359396)		1
SA	TFG 03-07-2022 (noche).pdf Document TFG 03-07-2022 (noche).pdf (D141652813)		1
W	URL: https://inta.gob.ar/sites/default/files/tesina_veronica_ergo.pdf Fetched: 2020-08-01 16:31:59		1
SA	Universidad Nacional Agraria La Molina / Artículo N16. Endocarpio. Tibhy Acosta et al.docx Document Artículo N16. Endocarpio. Tibhy Acosta et al.docx (D132356712) Submitted by: isabel.molina@lamolina.edu.pe Receiver: isabel.molina.unalm@analysis.arkund.com		1

Entire Document

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA FACULTAD DE AGRONOMÍA
"ESTRÉS HÍDRICO Y ALTA TEMPERATURA EN CAFÉ (Coffea arabica L.) EN CONDICIONES DE VIVERO"
TESIS PARA OPTAR TÍTULO DE ING. AGRÓNOMO
FABIOLA RUBÍ LEÓN ROJAS
LIMA – PERÚ
2022

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

“ESTRÉS HÍDRICO Y ALTA TEMPERATURA EN CAFÉ (*Coffea arabica* L.) EN CONDICIONES DE VIVERO”

FABIOLA RUBÍ LEÓN ROJAS

Tesis para optar el título de:

INGENIERA AGRÓNOMA

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

.....
Dr. Erick Espinoza Núñez.
PRESIDENTE

.....
Dr. Ricardo Roberto Borjas Ventura
ASESOR

.....
Dr. Alberto Julca Otiniano
MIEMBRO

.....
Dr. Juan Waldir Mendoza Cortez.
MIEMBRO

LIMA - PERÚ

2022

DEDICATORIA

A mis padres, *Miguel y Margarita*, por su apoyo incondicional y por ser el motivo que me sostiene día a día.

A *Maylon y Manchitas* por hacer de mis días los mejores, al brindarme su compañía y cariño incondicional.

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor, el Dr. Ricardo Borjas Ventura, por su dedicación, paciencia, y compromiso en el desarrollo de la presente investigación; y sobre todo por compartir conocimientos y experiencias que me acompañarán no solamente en el ámbito académico, sino también en lo cotidiano.

Al Departamento Académico de Suelos, en la figura de la profesora Sara Inés Malpica y al Laboratorio e invernadero de Fertilidad del Suelo “Sven Villagarcía Hermosa” de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria La Molina, por brindarme las facilidades de desarrollar el ensayo de la mejor forma.

Al Círculo de Investigación en Cultivos Tropicales – CICTROP quienes, motivados por aprender, apoyaron en las actividades con entusiasmo y diligencia.

Al Ing. Mg. Sc Leonel Alvarado por su disposición y aportes durante el desarrollo de la investigación.

Al Ing. Mg. Sc. Andrés Casas, por facilitarme el uso de las instalaciones del Laboratorio de Post cosecha a fin de realizar las evaluaciones pertinentes para la investigación.

Al Ing. Alan Cardoza Sánchez por ser uno de los primeros profesionales en brindarme su apoyo para la ejecución del Proyecto.

A cada uno de mis amigos, quienes dedicaron su tiempo y esfuerzo en las diferentes actividades durante la ejecución de la presente investigación.

A mi familia por brindarme su apoyo y motivación a lo largo de todo el proceso.

ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivo General	2
1.1.2. Objetivos específicos	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Importancia del café en el mundo	3
2.2. Importancia del café en el Perú	3
2.3. Origen del café	4
2.4. Botánica del café	4
2.5. Ouro Verde IAC H 5010-5	5
2.6. Cambio climático y la producción de café	6
2.7. Estrés hídrico por sequía	7
2.7.1. Síntomas de estrés hídrico en plantas	7
2.7. 2. Tolerancia al estrés hídrico	10
2.8. Estrés por altas temperaturas	10
2.8.1. Causas del estrés por altas temperaturas	11
2.8.2. Síntomas del estrés por altas temperaturas	11
2.8.3. Efectos del estrés térmico por altas temperaturas	11
2.8.4. Tolerancia al estrés térmico por altas temperaturas	13
2.9. Estrés combinado por sequía y altas temperaturas	13
III. METODOLOGÍA	15
3.1. Material vegetal y sitio de estudio	15

3.2. Pre - instalación de los tratamientos	16
3.2.1. Germinación de semillas de café Ouro Verde IAC H0050	16
3.2.2. Repique en bolsas	17
3.2.3. Fertilización de plántulas	17
3.2.4. Determinación de porcentaje de humedad de sustrato inerte	17
3.3. Instalación de los tratamientos	18
3.3.1. Tratamientos	18
3.3.2. Evaluación de las variables	18
3.4. Procesamiento de datos	20
3.5. Análisis estadístico	20
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
4.1. Temperaturas durante el establecimiento y crecimiento de la planta	21
4.2. Crecimiento de la planta	23
4.2.1. Altura de la planta	23
4.2.2. Diámetro de las plantas	24
4.2.3. Longitud de raíz	25
4.2.4. Número de hojas	26
4.2.5. Área foliar	28
4.3. Características cuantitativas de la planta	29
4.3.2. Peso seco de hojas y tallo	29
4.3.3. Peso seco de la raíz	31
4.3.4. Relación peso seco parte aérea/raíz (A/R)	32
4.3.5. Índice de robustez – IR	33

4.3.6. Índice de calidad de Dickson	34
4.3.7. Porcentaje de Nitrógeno Total	35
V. CONCLUSIONES	37
VI. RECOMENDACIONES	38
VII. BIBLIOGRAFÍA	39
VIII. ANEXOS	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ficha técnica del café cv. Ouro Verde IAC H 5010 - 5	6
Tabla 2. Tratamientos aplicados en el experimento con café cv. Ouro Verde IAC H 5010-5 bajo condiciones de vivero en La Molina, Perú	18

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del vivero de cultivos tropicales en la Universidad Nacional Agraria La Molina.	15
Figura 2. Germinador acondicionado para alcanzar temperaturas superiores a 25 °C.	16
Figura 3. Interior del germinador acondicionado con plántulas en estado fosforito.	16
Figura 4. Temperaturas (°C) al interior del vivero durante evaluación de tratamientos.	21
Figura 5. Temperaturas (°C) al interior del túnel durante evaluación de tratamientos.	22
Figura 6. Comparación entre las temperaturas (°C) al interior y exterior del túnel durante evaluación de los tratamientos.	22
Figura 7. Altura de planta de café cv. Ouro Verde IAC H 5010-5, según cuatro tratamientos T0: control; T1: estrés hídrico; T2: estrés térmico y T3: estrés hídrico por estrés térmico (Prueba de Scott & Knott: $P \leq 0.05$).	23
Figura 8. Diámetro de plantas de café cv. Ouro Verde IAC H 5010-5, según cuatro tratamientos T0: control; T1: estrés hídrico; T2: estrés térmico y T3: estrés hídrico por estrés térmico (Prueba de Scott & Knott: $P \leq 0.05$).	24
Figura 9. Longitud de raíz de plantas de café cv. Ouro Verde IAC H 5010-5, según cuatro tratamientos T0: control; T1: estrés hídrico; T2: estrés térmico y T3: estrés hídrico por estrés térmico (Prueba de Scott & Knott: $P \leq 0.05$).	26
Figura 10. Número de hojas en plantas de café cv. Ouro Verde IAC H 5010-5, según cuatro tratamientos T0: control; T1: estrés hídrico; T2: estrés térmico y T3: estrés hídrico por estrés térmico (Prueba de Scott & Knott: $P \leq 0.05$).	27
Figura 11. Área foliar de plantas de café cv. Ouro Verde IAC H 5010-5, según cuatro tratamientos T0: control; T1: estrés hídrico; T2: estrés térmico y T3: estrés hídrico por estrés térmico (Prueba de Scott & Knott: $P \leq 0.05$).	28
Figura 12. Peso seco de hojas de café cv. Ouro Verde IAC H 5010-5, según cuatro tratamientos T0: control; T1: estrés hídrico; T2: estrés térmico y T3: estrés hídrico por estrés térmico (Prueba de Scott & Knott: $P \leq 0.05$).	29

Figura 13. Peso seco de tallo de plantas de café cv. Ouro Verde IAC H 5010-5, según cuatro tratamientos T0: control; T1: estrés hídrico; T2: estrés térmico y T3: estrés hídrico por estrés térmico (Prueba de Scott & Knott: $P \leq 0.05$). 30

Figura 14. Peso seco de raíz de plantas de café cv. Ouro Verde IAC H 5010-5, según cuatro tratamientos T0: control; T1: estrés hídrico; T2: estrés térmico y T3: estrés hídrico por estrés térmico (Prueba de Scott & Knott: $P \leq 0.05$). 31

Figura 15. Relación peso seco de parte aérea/ raíz (A/R) en plantas de café cv. Ouro Verde IAC H 5010-5, según cuatro tratamientos T0: control; T1: estrés hídrico; T2: estrés térmico y T3: estrés hídrico por estrés térmico (Prueba de Scott & Knott: $P \leq 0.05$). 32

Figura 16. Índice de robustez (IR) en plantas de café cv. Ouro Verde IAC H 5010-5, según cuatro tratamientos T0: control; T1: estrés hídrico; T2: estrés térmico y T3: estrés hídrico por estrés térmico (Prueba de Scott & Knott: $P \leq 0.05$). 33

Figura 17. Índice de calidad de Dickson en plantas de café cv. Ouro Verde IAC H 5010-5, según cuatro tratamientos T0: control; T1: estrés hídrico; T2: estrés térmico y T3: estrés hídrico por estrés térmico (Prueba de Scott & Knott: $P \leq 0.05$). 34

Figura 18. Porcentaje de Nitrógeno total en café cv. Ouro Verde IAC H 5010-5, según cuatro tratamientos T0: control; T1: estrés hídrico; T2: estrés térmico y T3: estrés hídrico por estrés térmico (Prueba de Scott & Knott: $P \leq 0.05$). 35

RESUMEN

La presente investigación se realizó con el objetivo de cuantificar el efecto combinado del estrés hídrico y el estrés térmico sobre plántulas de *Coffea arabica* cv. Ouro Verde IAC H5010-5, en vivero bajo condiciones de La Molina, Perú. Para ello, se trabajó con cuatro tratamientos que incluyen T0: control; T1: estrés hídrico; T2: estrés térmico y T3: estrés hídrico por estrés térmico. Para inducir estrés hídrico se trabajó con la disponibilidad de agua en el suelo, sometiendo a los tratamientos correspondientes a regímenes de humedad por debajo del 50% de agua disponible. Mientras que, para inducir estrés térmico por altas temperaturas, se ubicó los tratamientos bajo plástico agrícola transparente desde el inicio de la instalación del ensayo. Las evaluaciones realizadas dieron como resultado la respuesta negativa de los parámetros de crecimiento tales como: altura, diámetro, longitud de raíz, número de hojas y área foliar, en los tratamientos T1 y T3, que fueron sometidos a estrés hídrico. Sin embargo, la respuesta ante el estrés térmico solo se evidenció en el diámetro de cuello de planta sobre los tratamientos T2 y T3; mientras que la respuesta ante la interacción de ambos estreses fue nula para todas las variables evaluadas. De tal forma, pudimos concluir que la variedad Ouro Verde IAC H 5010-5 a pesar de ser descrito como tolerante ante la sequía, mostró respuesta ante el efecto aislado del estrés hídrico, mas no ante el efecto aislado del térmico, ni a la interacción entre ambos estreses sobre ningún parámetro de crecimiento evaluado.

Palabras clave: café, estrés hídrico, estrés térmico, sequía, altas temperaturas, crecimiento

ABSTRACT

The present investigation was carried out to quantify the combined effect of drought stress and heat stress on seedlings of *Coffea arabica* cv. Ouro Verde IAC H5010-5, under controlled conditions in La Molina, Peru. For this, we worked with four treatments that include T0: control; T1: drought stress; T2: heat stress, and T3: drought stress x heat stress. To induce drought stress, we worked with the availability of soil water, subjecting the corresponding treatments to moisture regimes below 50% of available water. To induce heat stress due to high temperatures, the treatments were placed under transparent agricultural plastic until the evaluations ended. The evaluations carried out resulted in the negative response of growth parameters such as height, girth, root length, number of leaves, and leaf area, in treatments T1 and T3, which were subjected to water stress. However, the response to heat stress was only evident in the plant girth on treatments T2 and T3; while the response to the interaction of both stresses was null for all the variables evaluated. In this way, we were able to conclude that the variety Ouro Verde IAC H 5010-5, despite being described as tolerant to drought, showed a response to the isolated effect of water stress, but not to the isolated effect of the heat stress, nor to the interaction between both stresses on any growth parameter evaluated.

Keywords: coffee, water stress, heat stress, drought, high temperatures, growth

I. INTRODUCCIÓN

El café es uno de los cultivos más importantes a nivel mundial. De él dependen cerca de 25 millones de familias y cerca de 100 millones de personas alrededor de 80 países (Solidaridad, 2016). En el Perú, la producción de café es el sustento de 200 000 familias; asimismo, el Perú ha ocupado puestos destacados en el ranking de productores de este grano, de hecho, es el noveno productor mundial de *Coffea arabica* (ICO, 2014).

Por otra parte, en los últimos años tanto la temperatura como la precipitación han ido variando de forma significativa por el cambio climático trayendo consigo largos periodos sequías acompañado de altas temperaturas afectando indudablemente el crecimiento y desarrollo de las plantas, especialmente el cultivo de café (Guerrero et al., 2020).

Tanto el aumento de temperatura como la caída en la precipitación causan en la planta condiciones de estrés (Borjas-Ventura et al., 2019), cuyas consecuencias la podemos observar a nivel molecular, fisiológico, morfológico y finalmente en el rendimiento de los cultivos (Borjas et al., 2019). Ahora bien, estas modificaciones pueden verse acrecentadas con el cambio climático.

Asimismo, es importante destacar que la respuesta al estrés por falta de agua y aumento de temperatura depende en gran medida del material genético evaluado (Mihaljevic et al., 2021). En este sentido, es importante notar que en IRD-Selva se encuentra el material de café introducido desde Brasil denominado Ouro Verde IAC H 5010-5, el mismo que posee alto vigor, ramificación secundaria abundante y un buen sistema radicular (Fazuoli et al., 2008), siendo esta última una característica importante para hacer frente a la disminución de agua. Sin embargo, son extremadamente limitados los trabajos que buscan cuantificar su resistencia tanto al estrés por falta de agua como por aumento de temperatura, siendo este conocimiento relevante ya que le permitirá saber al agricultor si puede o no contar con este genotipo a la hora de enfrentar el cambio climático.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Cuantificar el efecto de la combinación de estrés por falta de agua y por el aumento de temperatura en café cv. Ouro Verde IAC H 5010-5 en fase de vivero.

1.1.2. Objetivos específicos

- Evaluar el efecto del estrés hídrico y térmico sobre el crecimiento longitudinal de la planta de café.
- Evaluar el efecto del estrés hídrico y térmico sobre el crecimiento radial de la planta de café.
- Evaluar el efecto del estrés hídrico y térmico sobre el número de hojas del café.
- Evaluar el efecto del estrés hídrico y térmico sobre el crecimiento del sistema radicular.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Importancia del café en el mundo

El café es uno de los *commodities* más comercializados a nivel internacional, generando cerca 11.6 US\$ billones por año durante el período 2000-2013 (ICO, 2014). Brasil es el principal productor cafetalero, representando cerca del 35% de la producción total, por ello su comportamiento determina la tendencia de la producción mundial (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, 2020).

Su importancia también radica en que contribuye con el desarrollo socioeconómico de los países tropicales debido a que un aproximado del 70% de la producción mundial de este cultivo recae en el trabajo de familias productoras (Fridell et al., 2008), siendo así favorecidas más de 120 millones de personas a nivel mundial (TCI, 2016).

Entre otros beneficios, y dado que la mayoría de las plantaciones se manejan bajo un sistema agroforestal, se generan servicios ambientales como captura de carbono (Virginio y Abarca, 2008) y conservación de la biodiversidad (Jha et al., 2014), conservación de suelos (Meylan et al., 2017).

2.2. Importancia del café en el Perú

En el Perú, uno de los principales productos exportados es el café especialmente el convencional y en una proporción menor (20- 25%) los cafés especiales y orgánicos. Su estacionalidad suele ser muy marcada y se aprecia un incremento en la producción desde marzo que continúa hasta alcanzar su máximo entre los meses de mayo y junio. La producción nacional es exclusivamente de *Coffea arabica*, siendo el 70% correspondiente a la variedad Typica, 20% de Caturra, y el 10% de otras variedades (Cámara Peruana de Café Cacao, 2017).

La generación de divisas viene acompañada con un impacto social de este cultivo, por ejemplo, se estima que 200 000 familias dependen directamente de la producción de este

grano, las mismas que se encuentran distribuidas en 17 regiones del país (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, 2012) siendo las principales los departamentos de San Martín, Junín y Cajamarca que representan el 23%, 22%, y 18% de la producción nacional con 93 987, 94 913 y 64 908 ha, respectivamente (DIGESE, 2019).

Actualmente, debido a las restricciones dadas bajo el contexto de COVID-19 que se dieron en el 2020, se generó la reducción en mano de obra y transporte, ocasionando para el periodo 2021 una baja producción en comparación con el año anterior, hasta 3,3% menos según los datos recogidos por Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (2021).

2.3. Origen del café

Tanto el café (*Coffea arabica*) como el *Homo sapiens* han tenido su origen en el continente africano (Herrera y Lambot, 2017). El café, originario de Etiopia, fue descubierto aproximadamente hace 850 años mientras que su primera plantación como cultivo data cerca de 1870 en el Congo (Smith, 1985). Siendo su procedencia el Sotobosque, este arbusto creció bajo los bosques a altitudes de 1300 a 2000 msnm, siendo posteriormente adaptado bajo condiciones de sombra con altitudes que oscilan entre los 600 a 1200 msnm (Wintgens, 2004). Además, a partir de diversos estudios a lo largo del siglo 20 se reconoció formalmente que el origen de *C. arabica* fue resultado de una hibridación natural entre dos ecotipos relacionados a *C. eugenioides* y *C. canephora* (Lashermes et al., 1999).

2.4. Botánica del café

El café pertenece a la división de Fanerógamas, clase Angiospermas, subclase Eudicotiledónea, orden Rubiales, familia Rubiaceae y género botánico de *Coffea* (Guerreiro et al., 2008). *C. arabica* es la única excepción dentro de la mayoría de las especies del género *Coffea* que es Alotetraploide con $2n=4x=44$ (Berthaud y Charrier, 1988), autofértil y con 10% de polinización cruzada (Carvalho y Mónaco, 1964).

Donizeti (2008) mencionó que debido a múltiples factores tales como mutaciones, cruzamientos naturales y artificiales, manejo agronómico, y principalmente el clima, existe una gran variación entre las características de los diferentes cultivares de *C. arabica*.

Farah (2015) describe al café como un arbusto perenne de 10 a 15 años vida con una producción que decae con los años, siendo necesaria su renovación constante. En general,

tiene una forma cilíndrica que consta de un brote principal ortotrópico del cual derivan ramas laterales plagiotrópicas principales y secundarias. La zona radicular se encuentra firmemente anclada al suelo, la longitud de su raíz principal varía de 40 a 60 cm de profundidad, mientras que las laterales se extienden por 30 cm en la capa superficial del suelo (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2014).

La disposición de las hojas en el tallo es opuesta y decusada, estas hojas son cerosas, brillantes, de color verde oscuro y presentan venas pinnadas. Además, cada nudo alberga de cuatro a seis yemas, con una adicional sobre ellas que se desarrollará como rama lateral (Murphy y Naidu, 2012).

Las inflorescencias son tipo glomerular, cada flor posee una corola blanca de 5 pétalos y un cáliz con 5 estambres y 1 pistilo. Estas nacen a partir de las yemas laterales luego de que se diferencien en florales para finalmente, luego de superada la dormancia, se dé la anthesis floral (Wintgens, 2004).

El fruto es una baya que contiene dos almendras, cada una con su respectivo embrión. En *C. arabica*, los frutos tienen forma oblonga, pueden presentar coloración rojiza o amarilla dependiendo del cultivar (Donizeti, 2008).

2.5. Ouro Verde IAC H 5010-5

Es producto del cruzamiento controlado de los cultivares Catuai Amarelo IAC H 2077-2-12-70 y Mundo Novo IAC 515-20. Este cultivar fue desarrollado en Campinas (Brasil) en 1961 con el objetivo de otorgar al cultivar Catuai mayor vigor, productividad y otras características agronómicas importantes (Fazuoli et al., 2008). El mismo autor lo describe como un cultivar altamente productivo, comparado con Vermelho IAC 81, gracias a diferencias como su porte bajo, la abundante ramificación secundaria, así como su sistema radicular capaz de sostener su vigorosa parte aérea. Entre algunas más de sus características se menciona el color verde en hojas nuevas, color verde oscuro para las hojas viejas, un color rojo para los frutos, una excelente calidad de taza y además tolerancia a la sequía (Tabla 1).

Tabla 1. Ficha técnica del café cv. Ouro Verde IAC H 5010 - 5

Ficha técnica	
Altura de la planta	Bajo
Copa	Cilíndrica
Diámetro de copa	Medio
Tamaño de entrenudo	Corto
Ramificación secundaria	Abundante
Color de brotes	Verde
Tamaño de hoja	Medio
Color de fruto maduro	Rojo
Forma de fruto	Oblonga
Tamaño de semilla	Medio
Forma de semilla	Corto y ancho
Ciclo de maduración	Medio a tardío
Borde de la hoja	Poco ondulada
Resistencia a nematodos	Susceptible
Resistencia a roya	Susceptible
Vigor	Alto
Calidad de taza	Bueno
Productividad	Alto

Fuente: Fazuoli et al. (2008).

2.6. Cambio climático y la producción de café

Según el IPCC (2014), se puede definir al cambio climático como “cualquier cambio en el clima a través del tiempo, producto de la variación natural o de la intervención del hombre”. Una de las principales causas se debe al incremento de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI); entre los más importantes se encuentran el vapor de agua (H₂O), Dióxido de Carbono (CO₂), Óxido Nitroso (N₂O), Metano (CH₄) y el Ozono (O₃) (IPCC, 2001).

En el caso del café, su cadena productiva también genera considerables emisiones de GEI. Las principales fuentes de emisión provienen de la fertilización, aplicación de plaguicidas, y del beneficio húmedo (Díaz y Carmen, 2018). Sin embargo, Robiglio et al. (2015) mencionan que alrededor del 80% de los productores manejan su finca de manera tradicional,

es decir conservan prácticas de hace más de 100 años. Por lo tanto, la adopción de nuevas tecnologías por parte de estos productores, tales como la introducción de especies nativas como sombra, el uso de coberturas vivas o muertas, la reutilización de subproductos de cosecha, el uso eficiente de fertilizantes, entre otras labores que contribuyan al secuestro de carbono dentro de la finca, contribuirán a la reducción de emisiones.

En el sector cafetalero, las elevadas temperaturas pueden provocar la migración del café a zonas más altas (Schepp et al., 2010), la incidencia de plagas y enfermedades que afectaría producción y calidad de taza. Además, según Gokavi y Kishor (2020), también obligará al productor a demandar mayor cantidad agua, incrementando así sus costos de producción. Otros efectos del cambio climático sería una maduración acelerada que provocará granos grandes, pero de menor calidad (Torres y Gómez, 2008). Teniendo en cuenta que la producción recae en pequeños productores es de suma importancia establecer estrategias que permitan mitigar los efectos del cambio climático (Gokavi y Kishor, 2020).

2.7. Estrés hídrico por sequía

La falta de agua (sequía) es uno de los fenómenos climáticos que afecta el desarrollo de las plantas a nivel mundial. (Seleiman et al., 2021). Además de afectar la distribución de las especies vegetales, el estrés por falta de agua puede limitar el rendimiento de los cultivos. (DaMatta et al., 2018).

Desde un punto de vista agrícola, Dai (2010) define la sequía como la poca disponibilidad de agua en el suelo para las plantas, debido a una baja humedad del suelo por un tiempo prolongado causado por una heterogeneidad en las precipitaciones, presencia de sales en el suelo, bajas temperaturas o por una baja capacidad de retención de agua por parte del suelo (Seleiman et al., 2021; Salehi-Lisar y Bakhshayeshan, 2016). Mientras que a nivel fisiológico, el estrés por sequía se da cuando la transpiración es mayor que la absorción de agua, lo cual se da generalmente cuando el potencial hídrico del suelo es menor al potencial hídrico de la raíz (Salehi-Lisar et al., 2016). Bajo estas circunstancias, el café, por ejemplo, ve reducido su rendimiento bajo estrés hídrico (De Oliveira et al., 2021).

2.7.1. Síntomas de estrés hídrico en plantas

Es preciso tomar en cuenta que la edad de la planta, su estado fenológico, así como la severidad y duración de la sequía son los principales factores que determinarán la respuesta

de la planta ante el estrés hídrico (Yang et al., 2021). El estrés hídrico afecta a diferentes niveles de organización en las plantas. Por ejemplo, ante dichas condiciones adversas, la expansión celular decae o cesa, por lo tanto, el crecimiento de la planta es retardado (Lisar et al., 2012; Corso et al., 2020), además se pueden notar otros síntomas como el marchitamiento, enrollamiento, clorosis y los cambios en el número de hojas y en el área foliar (Corso et al., 2020).

A continuación, se muestra el efecto de la falta de agua en el desarrollo de las plantas:

a. Crecimiento y desarrollo de la planta

Para un adecuado crecimiento y desarrollo de la planta, se necesita una adecuada disponibilidad de agua para la rizósfera, de tal manera que una dotación menor al óptimo compromete tanto crecimiento como la toma de nutrientes (Elemike et al., 2019). Por ello, se dice que el estrés hídrico tiene efectos negativos sobre la productividad y calidad de los cultivos.

Por otro lado, al generarse una reducción de la presión de turgencia, de la actividad enzimática, y del suministro de energía para la fotosíntesis, se afectan procesos tales como división, elongación y diferenciación celular, de los cuales dependen el crecimiento y desarrollo de la planta. Entonces, al disminuir el potencial hídrico de la planta y la turgencia, esta no podrá sobrevivir bajo dichas condiciones adversas (Osakabe et al., 2014).

b. Características morfológicas y anatómicas

La altura de la planta afectada por estrés hídrico está relacionado al alongamiento celular y la senescencia de las hojas, además una menor altura tiene que ver con una disminución de la expansión celular, caída de hojas y mitosis deteriorada. Al mismo tiempo, la caída de las hojas maduras se explica como una consecuencia de la ineficiencia hídrica durante el período de estrés (DaMatta et al., 2018).

Las hojas, principales órganos de la planta encargada de procesos fisiológicos tales como absorción y transpiración, suelen adoptar una menor área, así como una mayor densidad del tejido y grosor, a fin de adaptarse mejor a los efectos del estrés hídrico (Yang et al., 2021).

c. Fotosíntesis

La reducción en la tasa fotosintética es uno de los mayores efectos generado por la sequía, se sabe que varios factores son responsables de dicha reducción, entre ellos se encuentran la reducción en la expansión foliar, el incremento de la temperatura en la hoja, la senescencia prematura de hojas y el deterioro del sistema fotosintético (Umair et al., 2020).

El déficit de agua provoca además la reducción progresiva en la capacidad asimilativa de CO₂. Esta reducción en la tasa fotosintética neta se debe al cierre de las estomas, que a su vez fue provocado por la reducción de la turgencia de las células de las hojas, la cual limita la difusión de CO₂ dentro de la cámara subestomática (Arbona et al., 2013). Como consecuencia, el proceso de photoinhibición, que reduce el rendimiento cuántico de PSII, inducirá la fotorespiración y producción de H₂O₂, así como de otras especies de oxígeno reactivo (EOR) que provocan daños oxidativos en los cloroplastos (Hossain et al., 2009; Bhargava y Sawant, 2012).

Aún así, en 1992, Meinzer et al. observaron en ejemplares de *C. arabica* que la reducción del área foliar no siempre está acompañada de una reducción de la tasa fotosintética neta por unidad de área foliar (A), empero a medida que la sequía se acentuó se observaron mayores reducciones en A.

Batista et al., (2012) señala que estas reducciones están fuertemente ligadas a factores estomáticos, debido a que la estoma del café es sensible tanto a disponibilidad de agua en el suelo como a la evapotranspiración.

d. Metabolismo de nutrientes

La absorción de nutrientes a través de las raíces se ve limitada a causa de una menor disponibilidad de agua en el suelo, lo cual termina por reducir la zona radicular de la planta (Farooq et al., 2009). Además, según Akhtar y Nazir (2013), el estrés por sequía conduce a una mayor concentración de nitrógeno que a su vez reduce la del fósforo, sin interferir en la concentración de Potasio en las plantas. Así mismo, Lisar et al. (2012) reportaron la disminución en los niveles de Calcio en las plantas. Se sabe también que la membrana celular juega un papel fundamental en la nutrición de las plantas, al ser un factor importante en la homeostasis iónica. Por ello, al ser la más sensible ante los efectos del estrés hídrico es clave que se preserve su estabilidad para lograr resistencia (Öztürk y Demir, 2003).

e. Hormonas

Por otro lado, las hormonas son clave en la interacción de la planta frente al estrés por sequía (Bernacchia y Furini, 2004). Siendo el ácido abscísico (ABA) el más efectivo al responder ante este estrés. Este es sintetizado en las raíces y traslocado hacia brotes y hojas, y bajo condiciones de estrés hídrica se sintetiza en los cloroplastos (Bray, 1997). La acumulación de ABA desencadena el cierre de las estomas a fin de evitar pérdidas de agua, pero a cambio de reducir su capacidad fotosintética (Lisar et al., 2012).

2.7. 2. Tolerancia al estrés hídrico

A nivel del sistema fotosintético, los mecanismos desarrollados incluyen la reducción del área foliar, además de evitar la expansión de las hojas nuevas con el fin de reducir las pérdidas de agua por transpiración (Zhang et al., 2019). Sin embargo, Tiwari et al. (2021) menciona que la principal estrategia se da a nivel radicular incluyendo así la longitud, expansión, densidad y tasa de crecimiento de la raíz.

Pinheiro et al. (2005) observaron que los cultivares de *Coffea Canephora* tolerantes a la sequía son capaces de mantener un mejor estado del agua, a diferencia de aquellos susceptibles, durante períodos prolongados de sequía. Esto gracias a una combinación de un enraizamiento profundo y un adecuado control estomático de la transpiración.

Entre otros mecanismos comunes encontramos: ajuste osmótico, mecanismo de defensa antioxidante, acumulación de solutos, y cierre de estomas; los cuales permiten a la planta tolerar los efectos del estrés hídrico (Tzortzakis et al., 2020).

2.8. Estrés por altas temperaturas

Porch y Hall (2013), definen al estrés por altas temperaturas como aquel fenómeno complejo que se manifiesta en plantas provocando daños irreversibles en el crecimiento y desarrollo de la planta. La respuesta de las plantas dependerá del tipo de exposición al calor que tengan. Es decir, si son temperaturas muy altas (>50°C), el daño será severo y rápido, mientras que, si son temperaturas moderadamente altas, los daños serán notados luego de un tiempo de exposición prolongado (Wahid et al., 2007).

2.8.1. Causas del estrés por altas temperaturas

Desde la época preindustrial, la temperatura de la superficie terrestre se ha incrementado en 0.85°C, y se espera que a final del actual siglo se alcance una temperatura de 4,8 °C. Además, como resultado del cambio climático, se prevé eventos extremos como incremento de olas de calor, inundaciones y episodios prolongados de sequía (DaMatta et al., 2018).

Actualmente, el incremento de las temperaturas viene generando estragos en la producción de cultivos, de hecho, los está desplazando a nuevas regiones, por lo cual para el desarrollo de la agricultura será clave ubicar aquellas plantas resistentes que serán capaces de adaptarse a condiciones de estrés (Hussain et al., 2021).

2.8.2. Síntomas del estrés por altas temperaturas

Rodríguez et al. (2005) describe síntomas como quemaduras de hojas, tallos y ramas, senescencia de hojas y caída de frutos. Mientras que Omae et al. (2012), señala que también se puede observar el enrollamiento, marchitamiento, necrosis y daño en las puntas de las hojas.

2.8.3. Efectos del estrés térmico por altas temperaturas

En el mundo vegetal, muchas especies son susceptibles al estrés por temperaturas, y se ven afectados cuando las temperaturas están por encima de su umbral definido (Chaves y Guitierrez, 2017). Por ejemplo, en cultivares de *C. arabica* se mostraron múltiples desordenes fisiológicos en la flor y fruto que se tradujeron en pérdidas de rendimiento y calidad de taza (Lara et al., 2020).

a. Crecimiento y desarrollo de la planta

Las altas temperaturas pueden afectar múltiples procesos fisiológicos, sin embargo, los más importantes son aquellos que se ven afectados inmediatamente después de elevar la temperatura sobre el óptimo para su crecimiento. Entre los procesos más sensibles documentados se encuentran la fotosíntesis y desarrollo de polen (Sharkey & Schrader, 2006). De tal manera, comprometiendo tanto crecimiento como reproducción de la planta.

En el café, la variedad *Coffea arabica* ve afectado su crecimiento y calidad de la cereza, debido a la maduración acelerada de ésta, a temperaturas mayores a 23°C. Empero, se ha

observado que ciertos cultivares de *C. arabica* x *C. canephora* se desenvuelven correctamente a temperaturas de 24 -25°C, siendo como alternativa final la introducción de *Coffea canephora* en zonas con temperaturas adversas donde *C. arabica* ha sido desplazada (DaMatta et al., 2018).

b. Características morfológicas y anatómicas

En la revisión hecha por Hassan et al. (2020), se menciona que, al reducir el crecimiento celular y estado hídrico, se producen plantas de baja altura. Sin embargo, Patel & Franklin (2009), afirman que en algunas especies (a temperaturas mayores de 30°C) se observó el elongamiento del tallo pero que sumado a la epinastia de las hojas dieron como resultado bajos rendimientos.

c. Fotosíntesis

Las plantas sometidas a estrés por altas temperaturas presentaran un aumento en su tasa respiratoria, tal como la reducción de tasa fotosintética (Rizhsky et al., 2002). Estudios recientes hacen referencia a una reprogramación metabólica en los cloroplastos que provoca la descomposición de la clorofila, la síntesis de especies de oxígeno reactivo (EOR), defensa antioxidante, recambio proteico y alteraciones metabólicas en la asimilación de CO₂ (Wang et al., 2018).

De manera similar, Qiu y Liu (2003) sostienen que la fotosíntesis es altamente sensible debido a que las altas temperaturas ocasionan daños a nivel de los fotosistemas II y ciclo de Calvin. Sin embargo, tanto Salvucci y Crafts (2004) como Sharkey (2005), señalan que al solo ser sensible ante temperaturas muy altas (<45°C), lo principal en la inhibición de la fotosíntesis, serían la desactivación de la enzima Rubisco así como el incremento de la tasa respiratoria.

d. Proteínas

Según Iba (2002), como respuesta también se produce la síntesis rápida e intensa de proteínas específicas del estrés por calor, denominadas como “heat shock proteins” (HSP), cuyo objetivo es estabilizar las membranas. Por otro lado, se encuentran las enzimas antioxidantes que actúan sobre los EOR para amortiguar el daño provocado por estas (Almeselmani et al., 2006).

Wang et al. (2011), mencionan que las membranas celulares son las principalmente afectadas por el estrés por altas temperaturas. Lo anterior, debido a que el calor provoca la desnaturalización de las proteínas y enzimas, aumentando a su vez la cantidad de ácidos grasos insaturados (Savchenko et al., 2002). Al mismo tiempo, esto ocasiona una mayor permeabilidad de la membrana por la fluidez de los lípidos que la conforman, permitiendo la pérdida de electrolitos (Los y Murata, 2014).

2.8.4. Tolerancia al estrés térmico por altas temperaturas

Una planta tolerante al estrés por altas temperaturas es aquella que tiene la capacidad de desarrollarse y producir económicamente bajo condiciones adversas (Hassan et al., 2020).

Cabe resaltar que si bien es cierto la temperatura suele acelerar el desarrollo vegetal, la respuesta de los procesos fisiológicos ante el estrés por altas temperaturas, serán distinta según la etapa fenológica en la que se presente y según las especies y cultivares (Chaves y Guitierrez, 2017).

Dicho lo anterior, Rodríguez et al. (2005) señala que las plantas pueden cambiar la orientación de sus hojas, realizar transpiración intensiva, e incluso cambiar la composición lipídica de las membranas fin de sobrevivir bajo altas temperaturas. Además, presentan también mecanismos como: ajustes osmóticos e iónicos, cambios en permeabilidad de la membrana, así como protección y reparación de proteínas y membranas celulares dañadas por estrés térmico (Wahid et al., 2007; Porph y Hall, 2013).

2.9. Estrés combinado por sequía y altas temperaturas

La respuesta de las plantas ante la interacción simultánea entre los estreses abióticos resulta ser compleja debido a que las reacciones que se desencadenan pueden estimularse o inhibirse (Suzuki et al., 2014). Según estudios realizados por Rizhsky et al. (2002), los efectos del estrés combinado son diferentes a los causados individualmente por el estrés por sequía y estrés por altas temperaturas. Entre estos se encuentran el cierre de la estoma, la inhibición de fotosíntesis, incremento de la respiración, así como el aumento de la temperatura en hojas.

Mittler y Blumwald (2010) proponen respuestas antagónicas ante la combinación de estreses. Como en un estudio de Rizhsky (2004), se observó que, bajo condiciones de estrés por altas temperaturas, las plantas incrementan su conductancia estomática a fin de enfriar sus hojas a través de la transpiración. No obstante, al estar simultáneamente bajo sequía, las

estomas no serán capaces de abrirse por lo tanto la temperatura en sus hojas serán de 2 a 5°C más altas.

Vile et al. (2012), realizaron un estudio sobre los efectos del estrés combinado en *Arabidopsis*. Si bien el crecimiento de la planta fue reducido bajo la influencia individual de los estreses, el efecto combinado mostró mayores daños. Por lo tanto, se consideran como efectos aditivos, sugiriendo así una cierta independencia entre los mecanismos respuesta de la planta ante el estrés de sequía como al de altas temperaturas.

Por su parte, Rollins et al. (2013) observaron en la cebada que la sequía tuvo fuertes repercusiones en el crecimiento de la biomasa, altura y número de espigas, mientras que el estrés por calor no generó mayores daños en estas características por si sola. En contraste, las altas temperaturas afectaron el peso de grano, así como el incremento de las espigas abortadas, siendo esta vez el estrés por sequía indiferente ante estas.

En base a lo anterior, y avalándose de los estudios anteriormente mencionados Suzuki et al. (2014) califica como interacción negativa la combinación de estreses por sequía y altas temperaturas ya que provocan daños severos en el desarrollo de la planta, sobre todo en el tejido reproductivo.

III. METODOLOGÍA

3.1. Material vegetal y sitio de estudio

Este trabajo de investigación se desarrolló en el vivero de cultivos tropicales (12°04'55"S 76°56'53"O) en la Universidad Nacional Agraria La Molina (Lima-Perú) (Figura 1). El material vegetal utilizado fue café (*C. arabica*) cv. Ouro Verde IAC H 5010-5. El ensayo se llevó a cabo desde diciembre/2021 hasta mayo/2022. El mencionado cultivar fue obtenido del banco de germoplasma de café ubicado en el distrito de San Ramón (provincia de Chanchamayo).

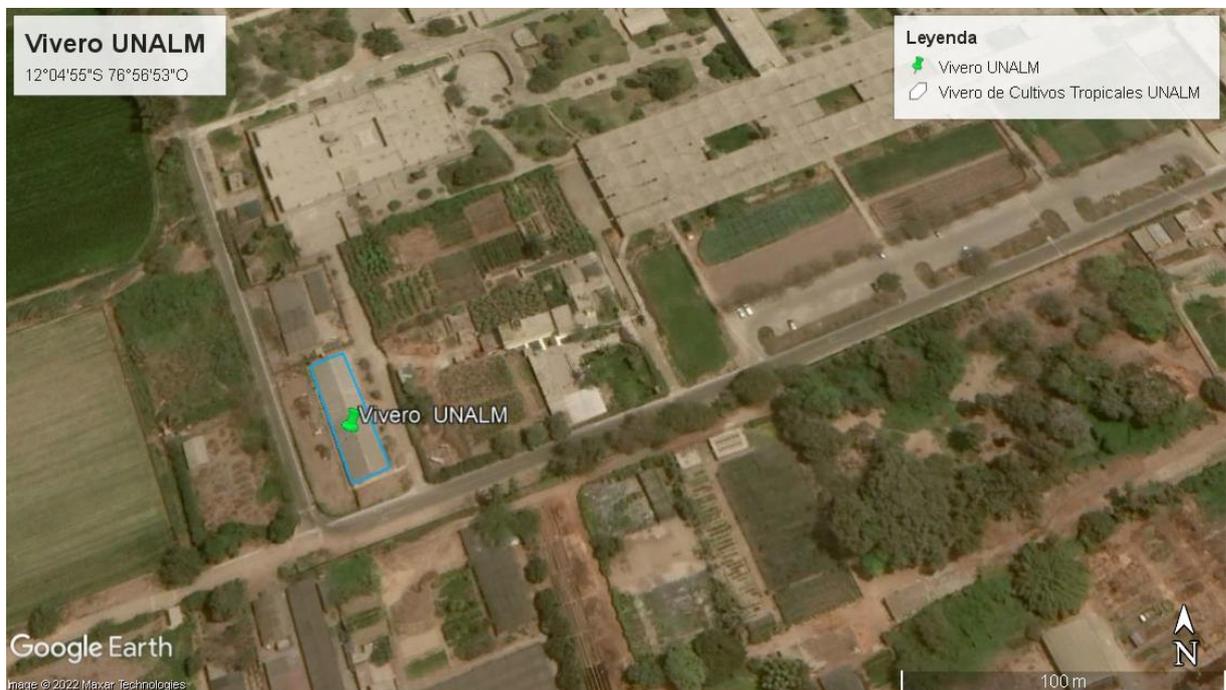


Figura 1. Ubicación del vivero de cultivos tropicales en la Universidad Nacional Agraria La Molina.

3.2. Pre - instalación de los tratamientos

3.2.1. Germinación de semillas de café Ouro Verde IAC H0050

Las semillas del café Ouro Verde fueron obtenidas del Banco de Germoplasma de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Estas semillas, fueron sometidas a un tratamiento

pregerminativo con la finalidad de acelerar el proceso de germinación. Es decir, fueron remojadas por 24 horas en agua, con el pergamino previamente retirado (Urbaez et al., 2014).

Además, con el objetivo de brindarles las condiciones óptimas para su germinación, se elaboró un germinador provisto con un foco de 100W que permita alcanzar temperaturas de hasta 35°C. Así mismo, tanto germinador como bandejas fueron recubiertas con plástico negro de tal manera que se asegure un ambiente cálido y oscuro.



Figura 2. Germinador acondicionado para alcanzar temperaturas superiores a 25 °C.



Figura 3. Interior del germinador acondicionado con plántulas en estado fosforito.

3.2.2. Repique en bolsas

Bajo un régimen de riego pesado, la emergencia se observó pasados los 18 días. Mientras que, en los siguientes 30 días, se logró un estado de “fósforo” en la mayoría de las plántulas. Por ende, el paso siguiente fue el repique en bolsas de un litro de capacidad, haciendo uso del sustrato estéril, PREMIX #8.

Además, a fin de evitar pérdidas por chupadera, se realizó la aplicación de HOMAI (Thiophanate methyl + Thiram) a una dosis de 1 g l^{-1} , a los 7 días después del repique. El control de plagas o arvenses ocasionales se realizó de forma manual.

3.2.3. Fertilización de plántulas

Debido a que se utilizó un sustrato estéril que no garantizaba los niveles óptimos de nutrientes en las plántulas. Se complementó con una fertilización a base de soluciones nutritivas hidropónicas, con dosis de 5 ml l^{-1} para macronutrientes “A”, y dosis de 2 ml l^{-1} para micronutrientes “B”. Dicha solución (A+B) fue agregada a razón de 100 ml por planta, una vez por semana durante las primeras seis semanas de la instalación.

3.2.4. Determinación de porcentaje de humedad de sustrato inerte

Se realizó la determinación del porcentaje de humedad volumétrica (%Hv) a 15 y a 0,3 bares de tensión mátrica, así como la densidad aparente del sustrato inerte. Con estos datos se procedió a calcular el peso aproximado de las bolsas para un estado de estrés hídrico, es decir por debajo del 50% de agua disponible.

De tal manera que, siendo:

$$\begin{array}{l} \rightarrow \% \text{ H.v. (15 bar)} = 170,18 \text{ cm}^3 \\ \rightarrow \% \text{ H.v. (0,3 bar)} = 118,31 \text{ cm}^3 \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} \rightarrow \% \text{ H.v. (15 bar)} = 170,18 \text{ cm}^3 \\ \rightarrow \% \text{ H.v. (0,3 bar)} = 118,31 \text{ cm}^3 \end{array}} \right\} \text{ Agua disponible} = 51,87 \text{ cm}^3 \left. \vphantom{\text{ Agua disponible} = 51,87 \text{ cm}^3} \right\} 25,935 \text{ cm}^3$$

Entonces, bajo condiciones de estrés hídrico (< 50% a. d.):

$$118,31 \text{ cm}^3 + 25,935 \text{ cm}^3 = 144,245 \text{ cm}^3 \approx 144,245 \text{ g}$$

El peso aproximado de bolsa deberá estar por valores inferiores a:

$$\text{Peso seco (bolsa) + humedad} = 105,04 \text{ g} + 144,245 \text{ g} = 249,885 \text{ g} \approx 250 \text{ g.}$$

3.3. Instalación de los tratamientos

3.3.1. Tratamientos

Este experimento se evaluó el efecto de falta de agua y alta temperatura, tanto de manera aislada como combinada, sobre el crecimiento de café. Para tal efecto, las plantas crecieron por tres meses en condiciones de ambiente sin falta de agua, luego del cual los tratamientos fueron aplicados. Los tratamientos fueron: 1) Control (C) (plantas que recibieron una buena dotación de agua y crecieron a temperatura de ambiente); 2) Estrés hídrico (S) (plantas bajo déficit hídrico); 3) plantas bajo altas temperaturas (AT), y 4) Estrés hídrico + alta temperatura (S+AT) (Tabla 2).

Tabla 2. Tratamientos aplicados en el experimento con café cv. Ouro Verde IAC H 5010-5

Tratamientos	Descripción
T0	Control (C)
T1	Estrés hídrico (S)
T2	Altas temperaturas (AT)
T3	S + AT

El déficit hídrico fue generado disminuyendo la dotación de agua hasta que el peso del sustrato alcanzó valores por debajo de 250 g, lo que significa que el contenido de agua en el sustrato era el 50% de la capacidad de campo. El aumento de temperatura se consiguió usando un túnel hecho con plástico agrícola. En este ambiente, se midió la temperatura; además se midió la temperatura en el vivero.

3.3.2. Evaluación de las variables

Se realizaron evaluaciones semanales, siendo un total de cuatro evaluaciones durante el transcurso de la investigación. Las variables evaluadas fueron:

Altura de la planta. - Se hizo con una regla desde el cuello de la planta hasta el ápice superior.

Diámetro de la planta. – Se hizo con un vernier en el cuello de la planta.

Número de hojas. – Se contó el número de hojas.

Peso fresco y seco de las hojas. - Con una balanza electrónica se pesaron las hojas.

Peso fresco y seco del tallo. - Con una balanza electrónica se pesó el tallo.

Peso fresco y seco de la raíz. - Con una balanza electrónica se pesó la raíz.

Longitud de la raíz. - Con una regla se midió la longitud de la raíz.

Área foliar. - Imágenes fueron procesadas a través de Programa ImageJ.

Relación peso seco parte aérea/raíz (A/R).

Relación entre la altura de la planta y el diámetro (Índice de robustez-IR).

Índice de calidad de Dickson. – para esta variable se usó la fórmula $PST/[(IR) + (A/R)]$, donde PST es el peso seco total.

Nitrógeno total. – se realizó a través del método de Micro Kjeldahl en el Laboratorio e invernadero de Fertilidad del Suelo “Sven Villagarcía Hermosa” – UNALM. Las hojas fueron secadas en estufa a 70°C por 24 horas, para posteriormente 0,1 g de cada muestra ser digerida con 0,9 g de K₂SO₄; 0,1 g de CuSO₄, y 3ml de H₂SO₄ a 1N. El producto resultante fue sometido a destilación en presencia de NaOH al 50%, y recogido en 20ml de H₃BO₃ al 2%. Este destilado fue titulado con H₂SO₄ a 0,02N. Dicho gasto de ácido fue utilizado en la siguiente fórmula para hallar el % de Nitrógeno Total en cada muestra.

$$\% \text{ de N} = \frac{V \times 0,02 \times 0,014 \times 100}{0,1^*}$$

Siendo:

V = Gasto en ml de 0,02N de H₂SO₄ usados para la titulación.

*Hace referencia a los 0,1 gramos de material utilizado (Baker & Thompson, 1992).

3.4. Procesamiento de datos

Los datos obtenidos de las variables propuestas fueron analizados mediante el Paquete Estadístico AgroEstat, desarrollado por el Departamento de Ciencias Exactas de UNESP (Barbosa & Junior, 2010).

3.5. Análisis estadístico

Para el experimento se utilizó el diseño experimental completamente al azar (DCA) con un arreglo factorial de dos factores (Humedad y temperatura), con dos niveles para cada factor. El factor humedad tuvo dos niveles: Riego normal y déficit hídrico. El factor temperatura tuvo dos niveles: Temperatura vivero y alta temperatura. Dando un total de cuatro tratamientos. Cada tratamiento con 14 repeticiones. Con los datos obtenidos se hará un ANOVA y luego una comparación de medias con la prueba de Scott & Knott (95%).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

IV.1. Temperaturas durante el establecimiento y crecimiento de la planta

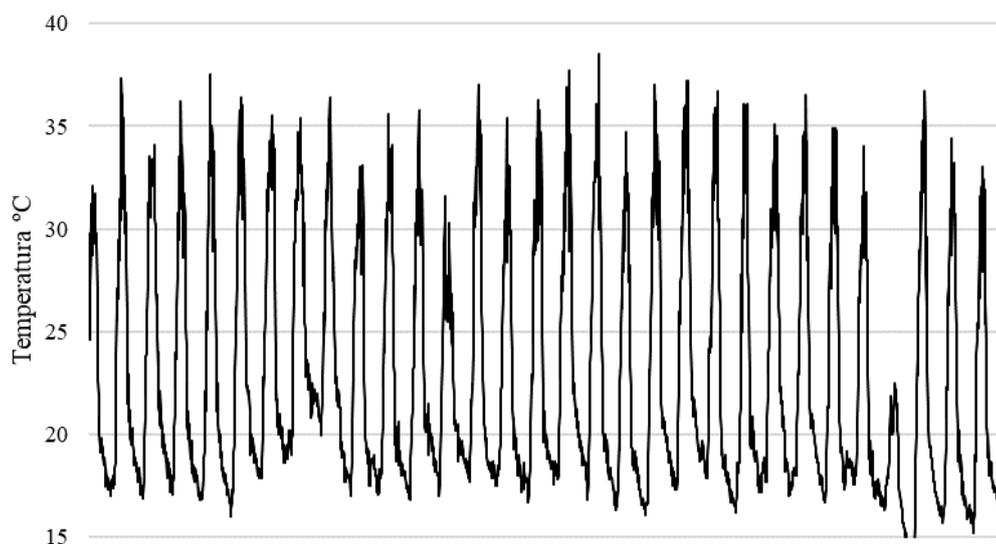


Figura 4. Temperaturas (°C) al interior del vivero durante evaluación de tratamientos.

Los datos obtenidos a partir del Datalogger para el vivero, mostraron mínima de 13,7 °C alrededor de las 4:15 am del 11-05-2022, mientras que la máxima temperatura registrada fue de 38,5 °C alrededor de las 15:15 pm del 30-04-2022. De tal manera que la temperatura promedio al interior del vivero fue de 22,7°C (Figura 4), siendo esta temperatura muy cercana a los 21 °C, la misma que es considerada la temperatura óptima para el crecimiento del café (Jaramillo-Robledo y Guzmán-Martínez, 1984), aunque otros autores mencionan un rango de 18-22 °C (CENICAFE, 2022).

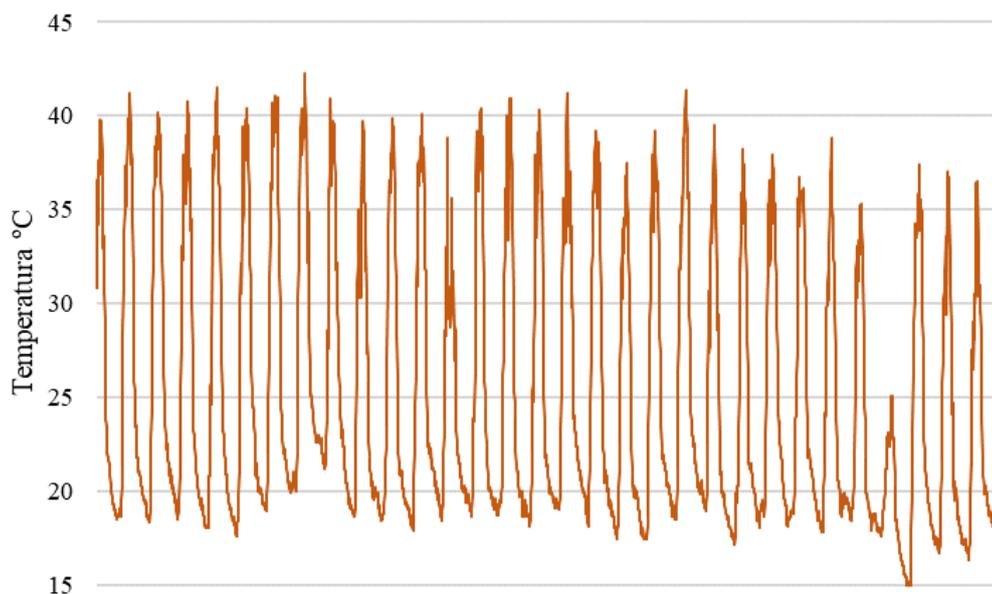


Figura 5. Temperaturas (°C) al interior del túnel durante evaluación de tratamientos.

Por otro lado, las plantas sometidas a altas temperaturas y al estrés combinado estuvieron situadas en un túnel hecho con plástico agrícola donde se tuvo una mínima de 14,7 °C alrededor de las 5:45 a.m. del 11-05-2022, mientras que la máxima temperatura registrada fue de 42,3 °C alrededor de las 13:45 p.m. del 20-04-2022. De tal manera que la temperatura promedio al interior del vivero fue de 25,2°C (Figura 5, Figura 6).

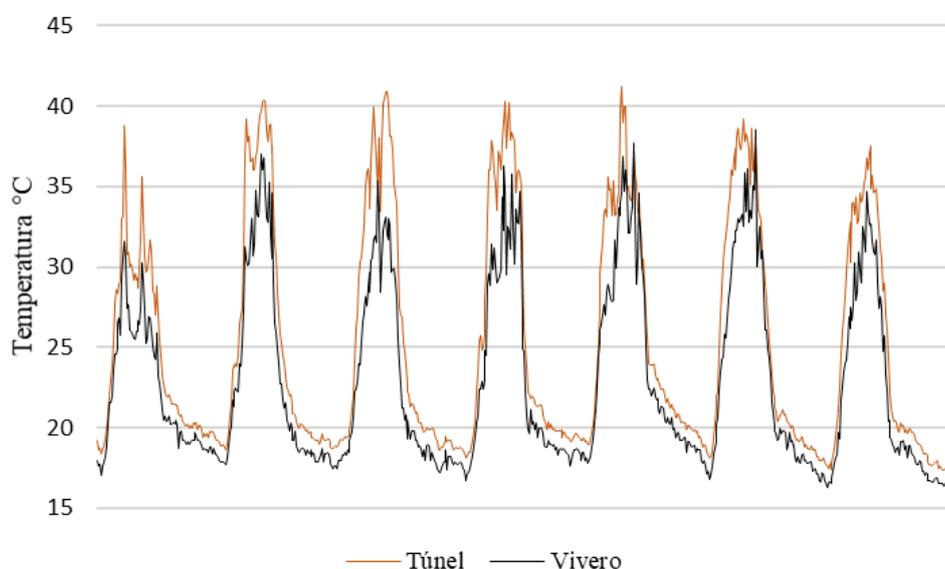


Figura 6. Comparación entre las temperaturas (°C) al interior y exterior del túnel durante evaluación de los tratamientos.

Estos datos son interesantes pues demuestran fehacientemente el incremento de la temperatura media esperado que fue de 2,5 °C. A pesar de que este incremento parecer ser pequeño, existe evidencia, en otros cultivos, que este rango puede modificar la fisiología y bioquímica de la planta (Borjas-Ventura et al., 2019).

4.2. Crecimiento de la planta

4.2.1. Altura de la planta

Los resultados del análisis de variancia solo muestran diferencias significativas entre los tratamientos para el factor *estrés hídrico* (Anexo 1). La Prueba de Scott & Knott a un nivel de significancia de 0.05, indica que los tratamientos no sometidos a sequía (T0 y T2) mostraron una altura superior a los tratamientos sometidos a estrés hídrico (T1 y T3). Siendo el tratamiento superior, T0 con una altura superior de 12,2357 cm, seguido del T2 con 12,0142 cm, T1 con 11,1571 cm, y T3 con 10,8916 cm (Figura 7).

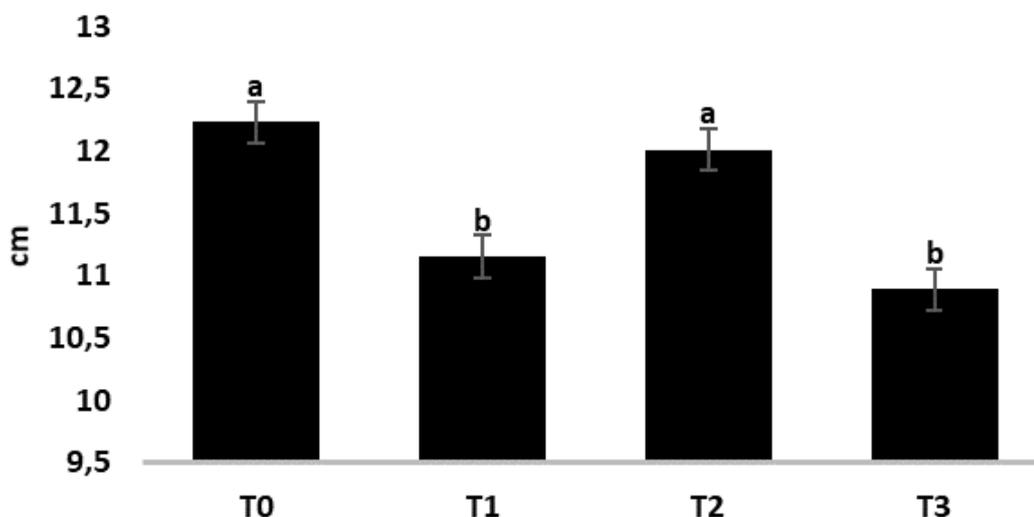


Figura 7. Altura de planta de café cv. Ouro Verde IAC H 5010-5, según cuatro tratamientos T0: control; T1: estrés hídrico; T2: estrés térmico y T3: estrés hídrico por estrés térmico (Prueba de Scott & Knott: $P \leq 0.05$). Letras diferentes indican diferencias significativas entre los mencionados tratamientos.

Los resultados coinciden con lo descrito por Malau et al. (2018), quienes determinaron que la altura de las plantas de café fue negativamente afectada por el estrés hídrico (falta de agua), resultado de un porcentaje menor a 50% de agua disponible en el suelo, incluso en aquellos genotipos de *Coffea arabica* tolerantes a sequía. Quiroz et al. (2009) explica que la variable altura se relaciona con su capacidad fotosintética y su superficie de transpiración.

Esto nos llevan a inferir que las plantas sin estrés hídrico poseen también mayor capacidad fotosintética.

4.2.2. Diámetro de las plantas

A partir de los resultados del análisis de variancia, se pudo reconocer diferencias significativas en los tratamientos para el factor *estrés hídrico*, así como para el factor *estrés térmico* (Anexo 2). La Prueba de Scott & Knott a un nivel de significancia de 0.05, indica que los tratamientos no sometidos a estrés por sequía (T0 y T2) presentan un mayor diámetro de tallo en contraste con los tratamientos sometidos a estrés hídrico (T1 y T3). De forma similar, el promedio de los tratamientos no sometidos a estrés térmico (T0 y T1) revelan un mayor diámetro en comparación con aquellos tratamientos sometidos a altas temperaturas (T2 y T3). De tal manera que T0 presenta un diámetro de 2,9321 mm, seguido del T2 con 2,8307 mm, el T1 2,5714 mm, y finalmente el T3 que presenta un diámetro de 2,3914 mm (Figura 8).

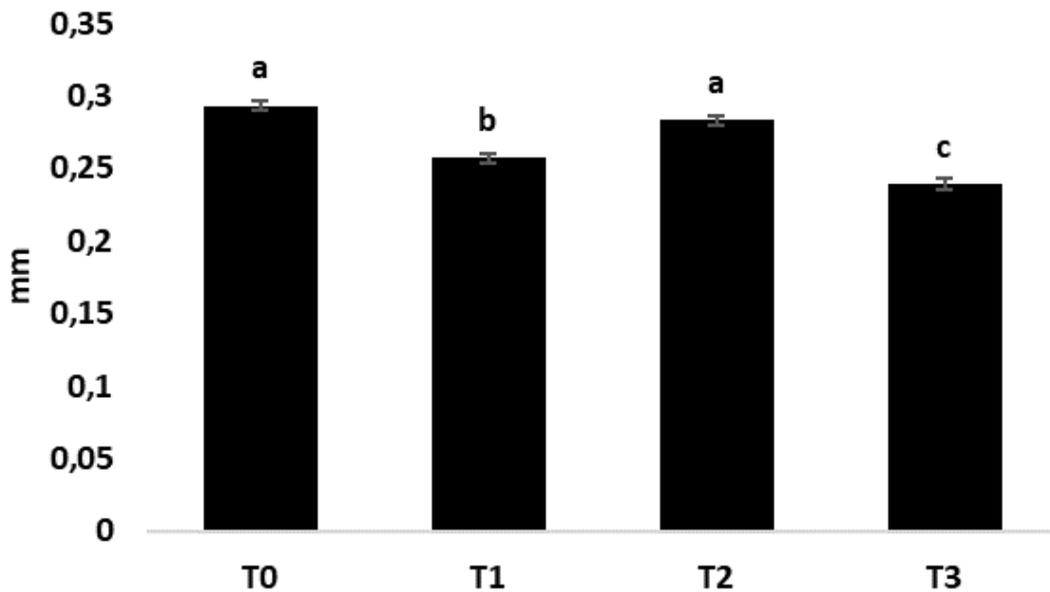


Figura 8. Diámetro de plantas de café cv. Ouro Verde IAC H 5010-5, según cuatro tratamientos T0: control; T1: estrés hídrico; T2: estrés térmico y T3: estrés hídrico por estrés térmico (Prueba de Scott & Knott: $P \leq 0.05$). Letras diferentes indican diferencias significativas entre los mencionados tratamientos.

El diámetro a la altura de cuello es un indicador de la capacidad de transporte de agua hacia la parte aérea, de la resistencia mecánica y de la capacidad relativa de tolerar altas temperaturas de la planta (Quiroz et al., 2009). La reducción del diámetro de cuello de planta observado coincide con Malau et al. (2018), quienes afirman que el diámetro de las plantas de café sometidas a estrés hídrico, con una disponibilidad de agua en el suelo menor al 50%, muestran una caída en su crecimiento, pero también señalan que este parámetro se ve más influenciado por la temperatura ambiente.

Sin embargo, Tefera et al. (2019), y Wegari & Amin (2020), coinciden al señalar una disminución en el diámetro del cuello de planta, incluso en aquellos genotipos tolerantes al estrés hídrico, provocado por una baja disponibilidad de agua en el suelo. Por otro lado, Wu et al. (2017), afirman que en plantas de Canola (*Brassica napus L.*) las altas temperaturas provocaron una disminución sobre su diámetro. También, DaMatta et al. (2018) explican que al someter cultivares de *Coffea arabica* sobre temperaturas $>23^{\circ}\text{C}$, se afecta el crecimiento y desarrollo de las plantas, empero aquellos cultivares con cierto grado de introgresión de *C. canephora* han demostrado mejor adaptabilidad a climas adversos.

Finalmente, mayores alcances sobre el efecto del estrés térmico sobre la morfología de la planta han sido poco estudiados debido a que estas suelen ser más sensibles en su fase reproductiva que vegetativa (Hinojosa et al., 2018).

4.2.3. Longitud de raíz

Los resultados del análisis de variancia demuestran diferencias significativas entre los tratamientos para el factor *estrés hídrico*, sin embargo, no existen diferencias significativas para el factor *estrés térmico*, así como para la interacción de ambos factores (Anexo 3). La Prueba de Scott & Knott a un nivel de significancia de 0.05, indica que los tratamientos no sometidos a estrés por sequía (T0 y T2), así como el tratamiento, resultado de la interacción de estrés por sequía y altas temperaturas, (T3) se muestran superiores a diferencia del tratamiento sometido únicamente a estrés hídrico (T1). Siendo así, el tratamiento superior, T0 con 17,9928 cm, seguido del T2 con 17,95 cm, T3 16,8058 cm y como último el T1 con 16,54 cm (Figura 9).

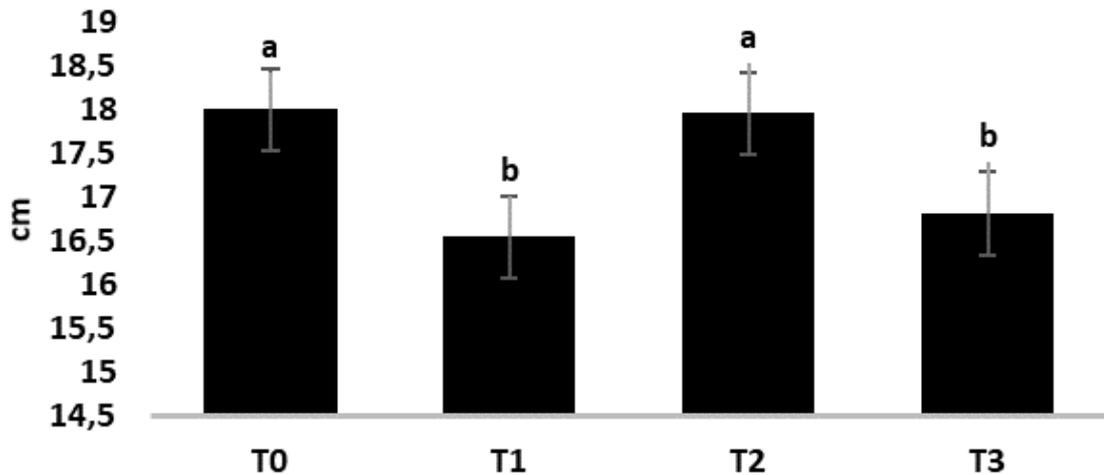


Figura 9. Longitud de raíz de plantas de café cv. Ouro Verde IAC H 5010-5, según cuatro tratamientos T0: control; T1: estrés hídrico; T2: estrés térmico y T3: estrés hídrico por estrés térmico (Prueba de Scott & Knott: $P \leq 0.05$). Letras diferentes indican diferencias significativas entre los mencionados tratamientos.

Los resultados anteriores discrepan de lo expuesto por Melke & Fetene (2014) quienes encuentran mayor crecimiento de raíces en condiciones de baja disponibilidad hídrica porque, probablemente, la intensidad del estrés por falta de agua supero los umbrales que estimulaban el crecimiento de este órgano.

Del mismo modo, Wegari & Amin (2020) afirman que el estrés hídrico se manifestó más rápido en aquellos genotipos sensibles, a comparación de aquellos tolerantes, y que la razón del incremento de la longitud es una estrategia usada por las especies vegetales para confrontar la falta de agua en su medio.

4.2.4. Número de hojas

Según los resultados del análisis de variancia, podemos notar diferencias significativas entre los tratamientos para el factor *estrés hídrico*, sin embargo, no existen diferencias significativas para el factor *estrés térmico*, así como para la interacción de ambos factores (Anexo 4). La Prueba de Scott & Knott a un nivel de significancia de 0.05, indica que los tratamientos no sometidos a estrés hídrico (T0 y T2) se muestran superiores a los tratamientos sometidos a estrés por sequía (T1 y T3). De tal manera, el tratamiento con mayor número de hojas es el T0 presentando un promedio de 10 hojas, seguido del T2 con 9,71428 hojas, T1 con 8,4285 hojas y finalmente T3 con 8,1666 hojas (Figura 10).

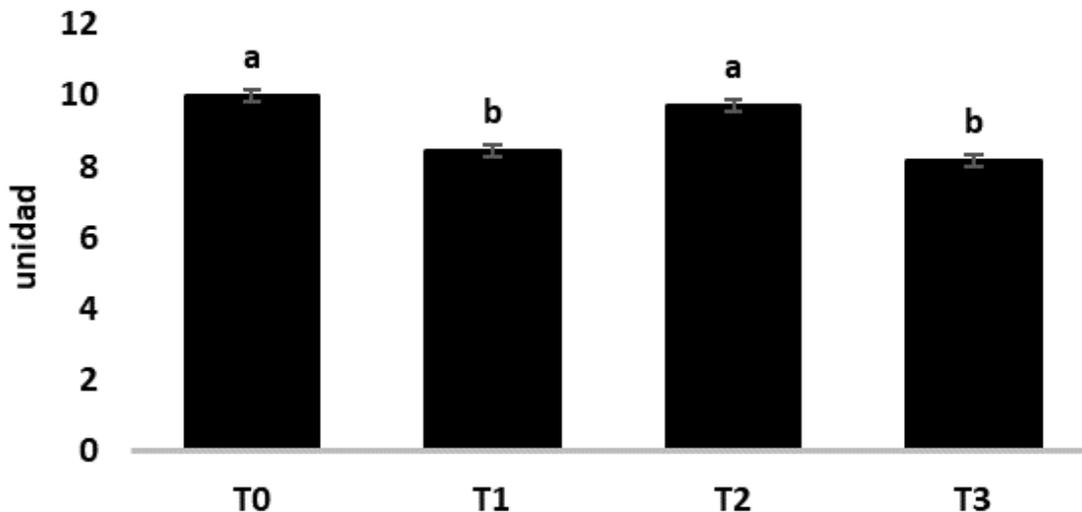


Figura 10. Número de hojas en plantas de café cv. Ouro Verde IAC H 5010-5, según cuatro tratamientos T0: control; T1: estrés hídrico; T2: estrés térmico y T3: estrés hídrico por estrés térmico (Prueba de Scott & Knott: $P \leq 0.05$). Letras diferentes indican diferencias significativas entre los mencionados tratamientos.

Según Kiwuka et al. (2022), el estrés por sequía generó en la mayoría de los cultivares estudiados, una reducción significativa en el número de hojas. En relación a lo anterior, Eziz et al. (2017) explica que esto se debe a que la planta prioriza su estructura según el recurso limitante esté sobre o debajo del suelo.

Es decir, con el objetivo de disminuir la pérdida de agua a través de la transpiración, la plántula limita el crecimiento y desarrollo de sus hojas a cambio de desarrollar las raíces y enfocarse en la absorción de agua y nutrientes claves para su supervivencia.

Así también, Malau et al. (2018) y De Almeida et al. (2018) afirman que aquellos genotipos más sensibles, vieron reducido el incremento en el número de hojas frente a la reducción de la disponibilidad de agua en el suelo, mientras que aquellos tolerantes mantuvieron un desarrollo estable.

4.2.5. Área foliar

A partir de los resultados del análisis de variancia, podemos confirmar que existen diferencias significativas entre los tratamientos para el factor *estrés hídrico* (Anexo 5). La Prueba de Scott & Knott a un nivel de significancia de 0.05, indica que los tratamientos no sometidos a estrés hídrico (T0 y T2), así como los tratamientos sometidos a sequía, pero sin presencia de altas temperaturas (T1) muestran la mayor área foliar a excepción del tratamiento producto de la interacción de ambos factores (T3). Siendo así el tratamiento con mayor área foliar: T2, el cual presenta 164387,78 cm²; seguido del T0 con 160090,71 cm², T1 con 141011,07 cm², y T3 con 121564,53 cm² (Figura 11).

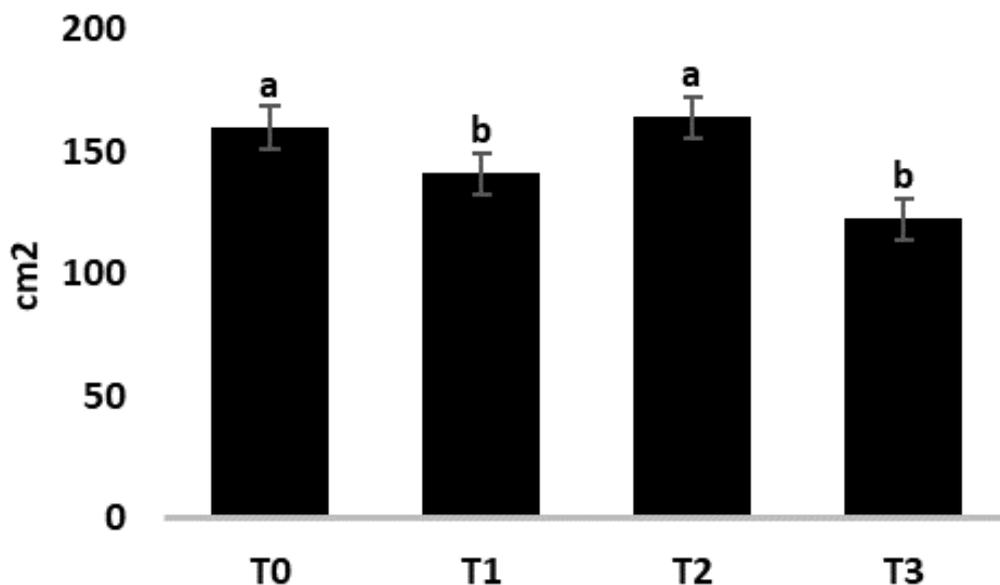


Figura 11. Área foliar de plantas de café cv. Ouro Verde IAC H 5010-5, según cuatro tratamientos T0: control; T1: estrés hídrico; T2: estrés térmico y T3: estrés hídrico por estrés térmico (Prueba de Scott & Knott: $P \leq 0.05$). Letras diferentes indican la diferencia significativa entre los mencionados tratamientos.

En la investigación de Tesfera et al. (2019) se describe un comportamiento semejante a los resultados previamente descritos, donde las plántulas de café también presentan una reducción del área foliar bajo condiciones de estrés hídrico.

Esta reducción en el área de las hojas de las plantas con estrés hídrico podría estar asociado tanto a la reducción de hojas individuales, así como con el incremento en la senescencia y abscisión de hojas (Tesfaye et al., 2015).

4.3 Características cuantitativas de la planta

4.2.6 Peso seco de las hojas y tallos

Los resultados del análisis de variancia demuestran diferencias significativas entre los tratamientos para el factor *estrés hídrico*, así como para el factor *estrés térmico* (Anexo 6). La Prueba de Scott & Knott a un nivel de significancia de 0.05, indica que los tratamientos no sometidos a estrés hídrico (T0 y T2) presentan mayores niveles de peso seco de hojas; a diferencia de los tratamientos sometidos a estrés hídrico (T1 y T3). Al mismo tiempo, el promedio de los tratamientos no sometidos a estrés térmico (T0 y T1) fue superior a los tratamientos sometidos a altas temperaturas (T2 y T3). De tal manera, el tratamiento con mayor peso seco de hojas es el T0, seguido de T2, T1 y T3. Presentando pesos de 0,9468 g, 0,8283g, 0,7291g, y 0,6576g, respectivamente (Figura 12).

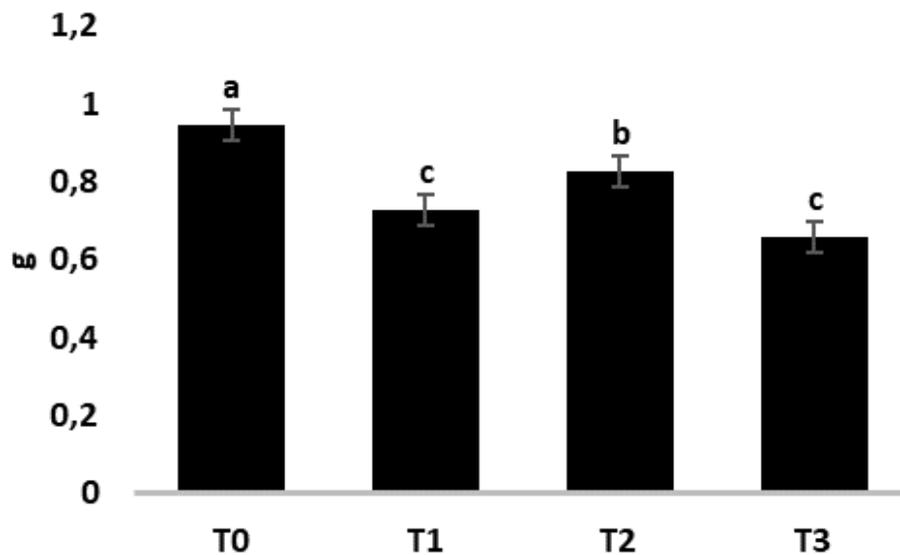


Figura 12. Peso seco de hojas de café cv. Ouro Verde IAC H 5010-5, según cuatro tratamientos T0: control; T1: estrés hídrico; T2: estrés térmico y T3: estrés hídrico por estrés térmico (Prueba de Scott & Knott: $P \leq 0.05$). Letras diferentes indican diferencias significativas entre los mencionados tratamientos.

Mientras que para la variable peso seco del tallo, existen diferencias significativas entre los tratamientos para el factor *estrés hídrico*, así como para el factor *estrés térmico*, empero, no existen diferencias significativas para la interacción de ambos factores (Anexo 7). La Prueba de Scott & Knott a un nivel de significancia de 0.05, indica que los tratamientos no sometidos a estrés térmico por altas temperaturas (T0 y T1) muestran un peso seco del tallo superior a los tratamientos que si fueron sometidos a altas temperaturas (T2 y T3). Al mismo tiempo,

el promedio de los tratamientos no sometidos a estrés hídrico (T0 y T2) fue superior a los tratamientos sometidos a estrés hídrico por sequía (T1 y T3). Siendo el tratamiento superior T0, seguido de T1, T2 y T3; con un peso de 0,2446gr, 0,2127gr, 0,2123gr, y 0,1878gr respectivamente (Figura 13).

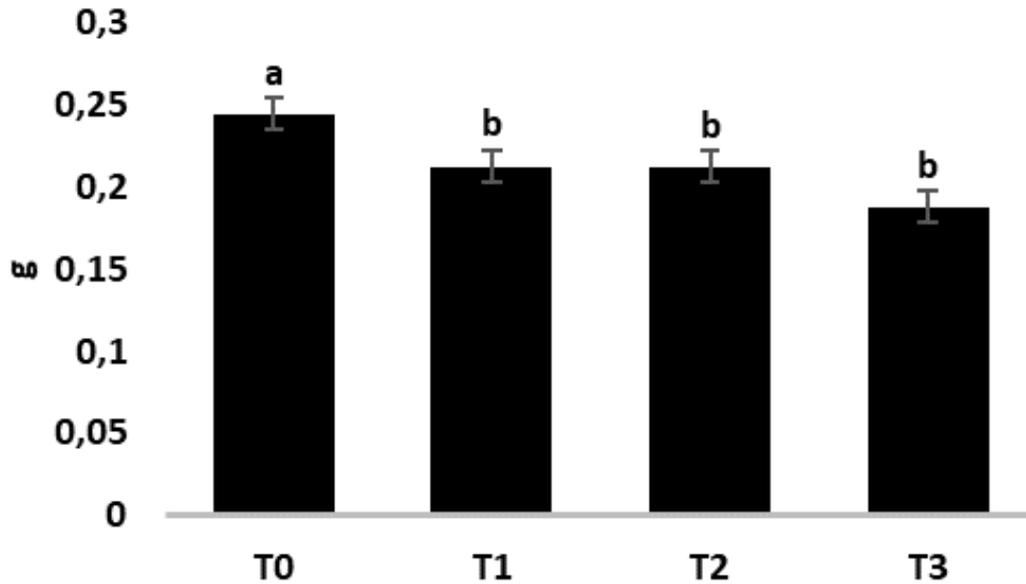


Figura 13. Peso seco de tallo de plantas de café cv. Ouro Verde IAC H 5010-5, según cuatro tratamientos T0: control; T1: estrés hídrico; T2: estrés térmico y T3: estrés hídrico por estrés térmico (Prueba de Scott & Knott: $P \leq 0.05$). Letras diferentes indican diferencias significativas entre los mencionados tratamientos.

Por su parte, la hoja es un órgano primordial para la fotosíntesis, mientras que el tallo transporta agua y nutrientes necesarios, así como también brinda soporte a la estructura de la planta (Stock et al., 1992). Sin embargo, bajo condiciones de estrés hídrico, ambos son considerados como una salida importante del agua a través de la transpiración (Lambers et al., 2008).

En este ensayo hubo una caída en la biomasa de ambos órganos, lo que coincide con lo observado por Eziz et al., (2017) y Tesfaye et al. (2019). Asimismo, la temperatura es un factor ambiental que modifica la morfología de la planta, aunque algunos órganos son más afectados que otros de acuerdo a nuestros resultados.

4.2.7. Peso seco de la raíz

Los resultados del análisis de variancia muestran diferencias significativas entre los tratamientos solo para el factor *estrés térmico* (Anexo 8). La Prueba de Scott & Knott a un nivel de significancia de 0.05, indica que los tratamientos no sometidos a estrés por alta temperatura (T0 y T1) presentan un mayor peso de raíz en comparación a los tratamientos sometidos a altas temperaturas (T2 y T3). Siendo así T0, el tratamiento con un peso de raíz superior, seguido de T1, T2 y T3, con unos valores de 0,4255gr, 0,3826gr, 0,3385gr, y 0,3255gr respectivamente (Figura 14).

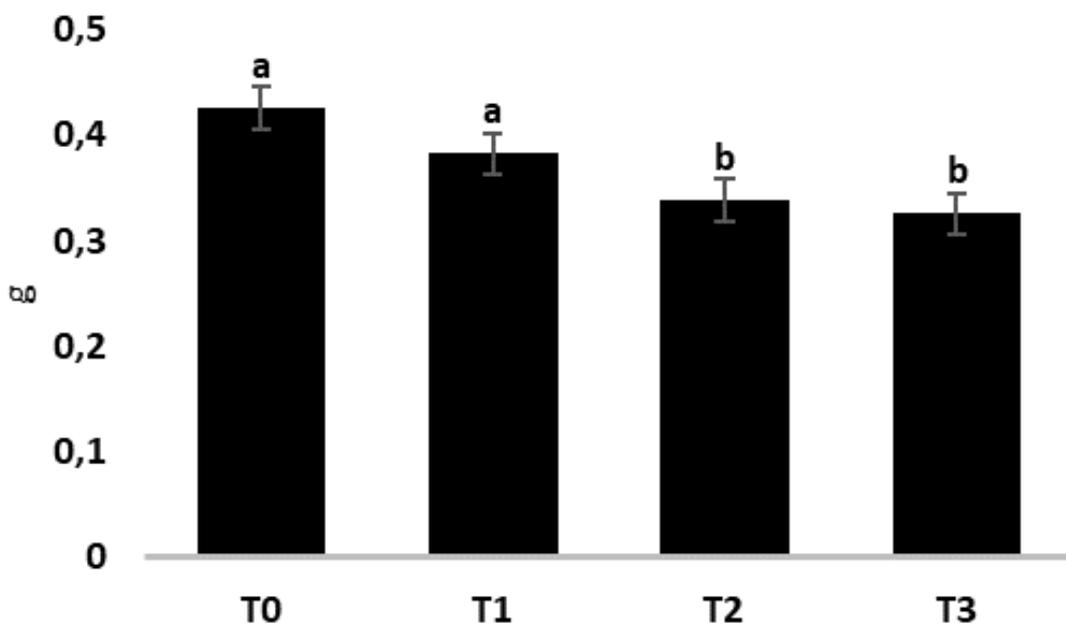


Figura 14. Peso seco de raíz de plantas de café cv. Ouro Verde IAC H 5010-5, según cuatro tratamientos T0: control; T1: estrés hídrico; T2: estrés térmico y T3: estrés hídrico por estrés térmico (Prueba de Scott & Knott: $P \leq 0.05$). Letras diferentes indican la diferencia significativa entre los mencionados tratamientos.

Según la revisión de DaMatta & Ramalho (2006), para el adecuado desarrollo radicular de la planta de café la temperatura debe estar alrededor de 24-27°C. Sin embargo, en nuestro experimento, y particularmente dentro de la manga de crecimiento, se tuvieron temperaturas en un rango de 25,2 °C a 42,3 °C, los mismos que estuvieron muy por encima de lo requerido por esta especie. Lo cual, explica el menor desarrollo radicular para los tratamientos sometidos a estrés térmico por altas temperaturas, como lo son el T2 y T3.

4.2.8. Relación peso seco parte aérea/raíz (A/R)

Con base en los resultados del análisis de variancia, podemos señalar diferencias significativas entre los tratamientos para el factor *estrés hídrico*, así como para el factor *estrés térmico*, empero, no existen diferencias significativas para la interacción de ambos factores (Anexo 9). La Prueba de Scott & Knott a un nivel de significancia de 0.05, señala que los tratamientos no sometidos a estrés hídrico (T0 y T2) se muestran superiores a los tratamientos sometidos a estrés hídrico (T1 y T3). Mientras que el promedio de los tratamientos no sometidos a altas temperaturas (T0 y T1) se muestran inferiores al promedio de los tratamientos bajo dichas condiciones adversas (T2 y T3). De tal manera, el tratamiento superior fue el T2, seguido del T0, T3 y T1; con los valores de 3,1574, 2,8144, 2,614, y 2,5087, respectivamente.

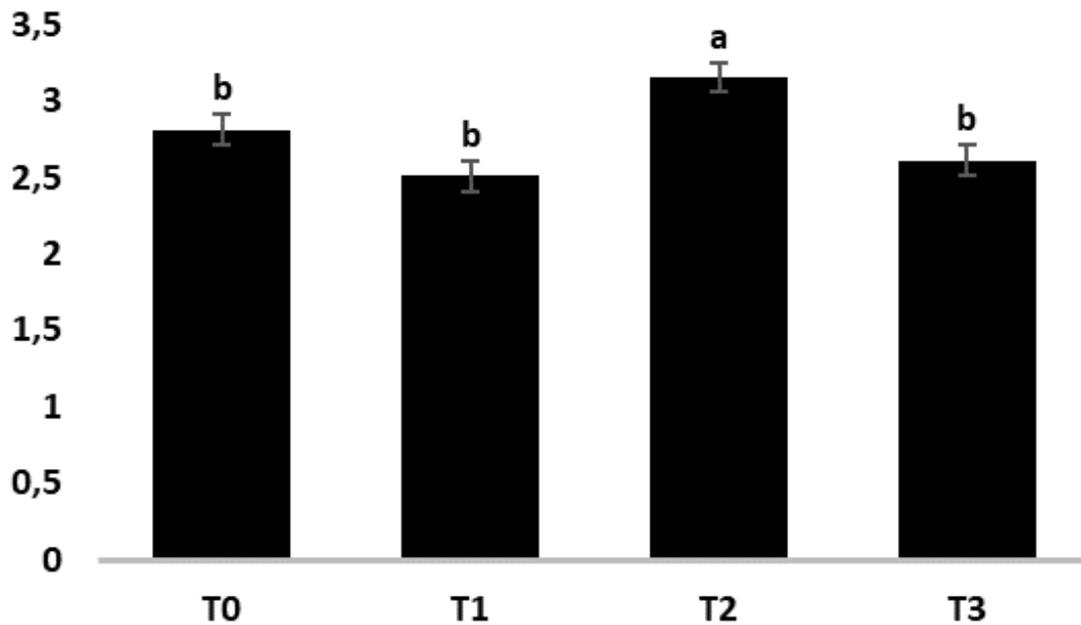


Figura 15. Relación peso seco de parte aérea/ raíz (A/R) en plantas de café cv. Ouro Verde IAC H 5010-5, según cuatro tratamientos T0: control; T1: estrés hídrico; T2: estrés térmico y T3: estrés hídrico por estrés térmico (Prueba de Scott & Knott: $P \leq 0.05$). Letras diferentes indican la diferencia significativa entre los mencionados tratamientos.

Generalmente, la biomasa total de las plantas es negativamente afectada por el estrés hídrico (Tesfaye, 2018); empero la zona aérea de las plantas tiende a una mayor caída en contraste al aumento de la biomasa radicular (Eziz et al., 2017). Por su parte, Mohammed & Meskelu (2021), reportaron la reducción del peso seco de tallos y hojas en relación a la raíz en

genotipos de *Coffea arabica* sometidos a estrés hídrico. Así también, Tesfaye et al., (2015) afirman que dicha disminución en la proporción se debe al menor impacto del estrés hídrico sobre la acumulación de materia seca en las raíces que en los brotes. Por otro lado, DaMatta & Ramalho (2006) opinan que el café posee una gran tolerancia a altas temperaturas, de lo contrario la producción de este bajo climas tropicales no sería posible.

4.3.5. Índice de robustez – IR

Los resultados del análisis de variancia evidencian diferencias significativas entre los tratamientos tanto para el factor *estrés hídrico*, así como para el factor *estrés térmico* (Anexo 10). La Prueba de Scott & Knott a un nivel de significancia de 0.05, señala que los tratamientos sometidos a estrés hídrico (T1 y T3) muestran un índice de robustez superior a los tratamientos bajo un régimen de riego óptimo (T0 y T2). Al mismo tiempo, el promedio de los tratamientos sometidos a altas temperaturas (T2 y T3) se muestran superiores al promedio de los tratamientos no sometidos bajo dichas condiciones adversas (T0 y T1). Es decir, el tratamiento que presentó el mayor IR es el T3, seguido de T1, T2 y T0; cuyos valores son 4,5992, 4,3415, 4,2639 y 4,1779 cm/mm, respectivamente.

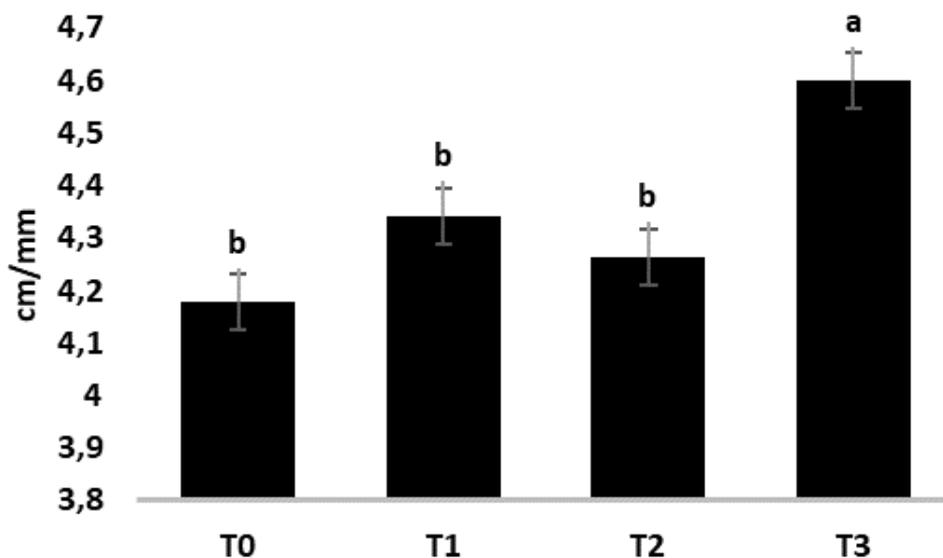


Figura 16. Índice de robustez (IR) en plantas de café cv. Ouro Verde IAC H 5010-5, según cuatro tratamientos T0: control; T1: estrés hídrico; T2: estrés térmico y T3: estrés hídrico por estrés térmico (Prueba de Scott & Knott: $P \leq 0.05$). Letras diferentes indican la diferencia significativa entre los mencionados tratamientos.

El índice de robustez es la relación entre la altura y el diámetro del tallo de la planta, además se menciona que las plantas con un menor índice de robustez son capaces de mantenerse en

condiciones óptimas mediante el uso eficiente del agua bajo condiciones de estrés hídrico (Stewart y Bernier, 1995; Leiva y Fernández, 1998, como se citó en Villalón, 2016). Por otro lado, se sabe que bajo condiciones de estrés térmico la altura tiende a incrementarse (Oh-e et al., 2007). Nuestros resultados sugieren que la planta responde fortaleciéndose cuando está sometido al estrés combinado.

4.3.6. Índice de calidad de Dickson

En función de los resultados del análisis de variancia, podemos decir que existen diferencias significativas entre los tratamientos para el factor *estrés hídrico*, así como para el factor *estrés térmico*, empero, no existen diferencias significativas para la interacción de ambos factores (Anexo 11). La Prueba de Scott & Knott a un nivel de significancia de 0.05, indica que los tratamientos no sometidos a estrés por alta temperatura (T0 y T1) presentan un mayor índice de calidad de Dickson, en comparación a los tratamientos sometidos a altas temperaturas (T2 y T3). Siendo así T0, el tratamiento con un índice de calidad de Dickson superior, seguido de T1, T2 y T3, con unos valores de 0,2319, 0,1941, 0,1877, y 0,1627 respectivamente.

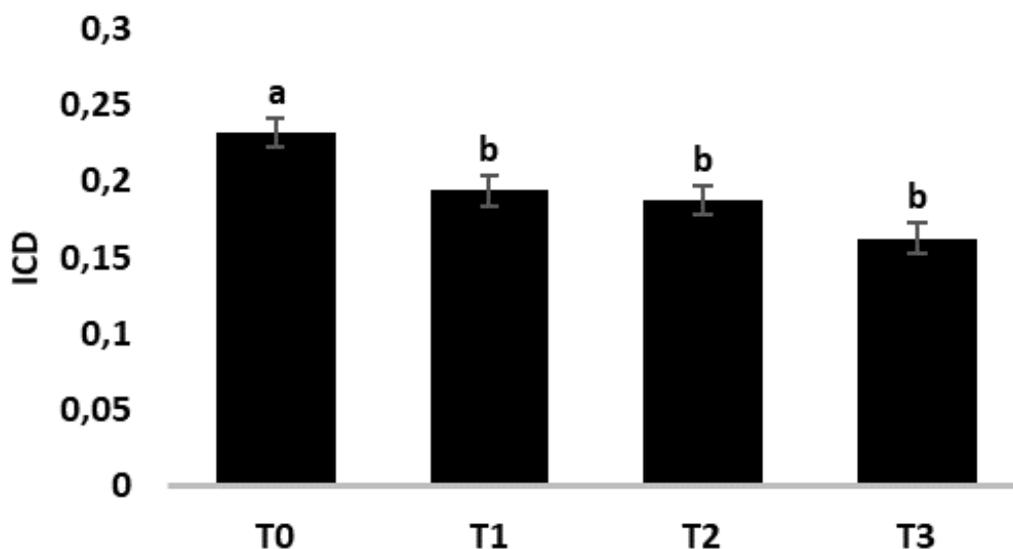


Figura 17. Índice de calidad de Dickson en plantas de café cv. Ouro Verde IAC H 5010-5, según cuatro tratamientos T0: control; T1: estrés hídrico; T2: estrés térmico y T3: estrés hídrico por estrés térmico (Prueba de Scott & Knott: $P \leq 0.05$). Letras diferentes indican diferencias significativas entre los mencionados tratamientos.

El índice de calidad de Dickson, al integrar en su fórmula distintos parámetros de crecimiento, representa el equilibrio entre la distribución de la masa y la robustez de la planta, evitando así excluir plantas de porte bajo, pero de un mayor vigor. De tal forma, valores superiores de ICD corresponderán a una planta cuyo desarrollo fue óptimo y balanceado. En este ensayo, tanto la falta de agua como el incremento de temperatura provocaron una caída drástica del ICD sugiriendo que ambos factores modificaron el balance en la distribución de foto asimilados y morfología de la planta.

4.3.7. Porcentaje de Nitrógeno Total

De acuerdo con los resultados del análisis de variancia, existen diferencias significativas entre los tratamientos para el factor *estrés hídrico*, sin embargo, no significativas para el factor *estrés térmico*, así como para la interacción de ambos factores (Anexo 12). La Prueba de Scott & Knott a un nivel de significancia de 0.1, indica que los tratamientos no sometidos a estrés por sequía (T0 y T2) presentan un menor porcentaje de nitrógeno total en las hojas, en comparación a los tratamientos sometidos a sequía (T1 y T3). Siendo así T1, el tratamiento con el porcentaje de nitrógeno total foliar superior, seguido de T3, T0 y T2, con unos valores de 2,4642, 2,1897, 2,0982, y 1,9392 respectivamente.

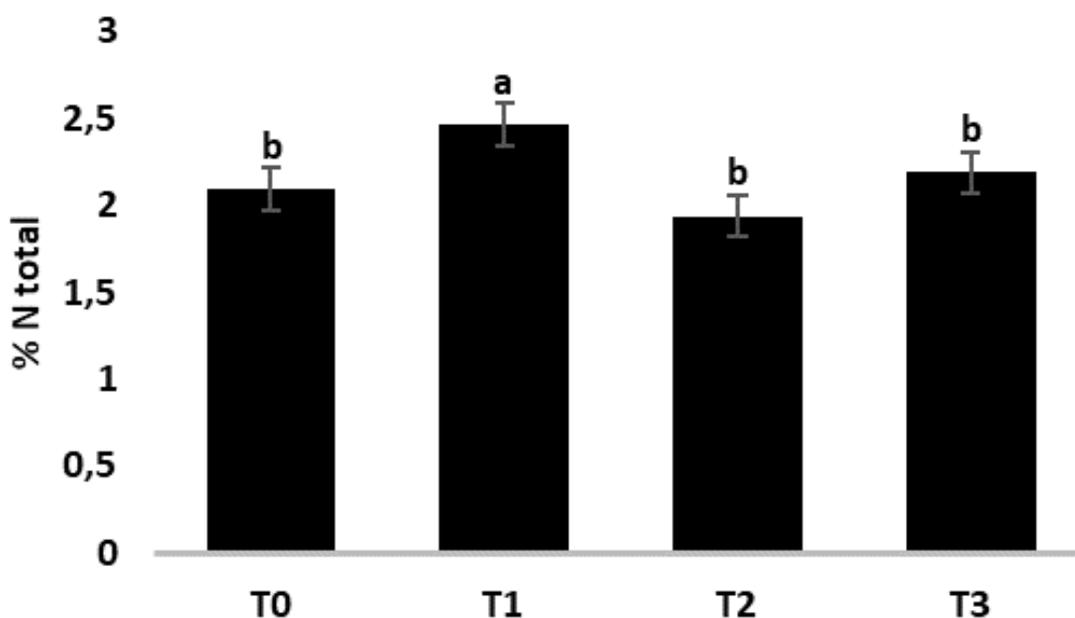


Figura 18. Porcentaje de Nitrógeno total en café cv. Ouro Verde IAC H 5010-5, según cuatro tratamientos T0: control; T1: estrés hídrico; T2: estrés térmico y T3: estrés hídrico por estrés térmico (Prueba de Scott & Knott: $P \leq 0.05$). Letras diferentes indican diferencias significativas entre los mencionados tratamientos.

Los resultados muestran entonces la superioridad de los tratamientos sometidos a estrés por sequía, discrepa de la extensa bibliografía que señala que las plantas sometidas a estrés hídrico inhiben la absorción y metabolismo de nitrógeno (Akhtar & Nazir, 2013; Salehi & Bakhshayeshan, 2016). Según Martínez et al. (2020), un mayor porcentaje de nitrógeno total en los tratamientos T1 y T3, probablemente responda a la acumulación de nitrato en las hojas provocado por un mayor efecto del estrés sobre la asimilación que sobre el transporte y/o absorción de nitrógeno.

Sin embargo, Wang et al. (2017) señala que mayores niveles de nitrógeno total, en plantas sometidas a estrés por sequía, responden al incremento de la mayoría de los genes codificadores involucrados en el transporte y metabolismo de nitrógeno, que permitieron una mayor captación de este en el tejido radicular, y en menor medida en el tejido foliar (Gonzales Dugo et al., 2012); optimizando así el proceso de absorción bajo condiciones adversas.

V. CONCLUSIONES

El efecto aislado del estrés hídrico y térmico se hicieron evidentes sobre las variables morfológicas de la planta. Sin embargo, no se pudo cuantificar el efecto de la interacción entre ambos estreses sobre ningún parámetro de crecimiento evaluado en café cv. *Ouro Verde IAC H 5010-5* en fase de vivero.

1. El café ve afectado su crecimiento longitudinal al ser sometido a periodos de estrés hídrico, determinando su grado de afectación el periodo de sequía y el porcentaje de la disponibilidad de agua en el suelo.
2. El diámetro del cuello de planta puede ser afectado por la baja disponibilidad de humedad en el suelo, sin embargo, elevadas temperaturas también pueden causar el mismo efecto, pero no lo suficiente para generar un efecto combinado negativo.
3. El número de hojas como el área foliar fueron menores en los tratamientos sometidos a estrés hídrico.
4. De forma natural, el crecimiento longitudinal de la raíz se vio afectado ante la escasez de agua. Sin embargo, la expansión de esta se vio principalmente limitada por la temperatura.
5. Se observó la reducción el índice de calidad de Dickson.
6. El contenido de nitrógeno se vio aumentado por el estrés hídrico.

VI. RECOMENDACIONES

1. Para próximas investigaciones considerar evaluar la temperatura del suelo o sustrato a utilizar.
2. Se recomienda evaluar el contenido relativo de agua en diferentes momentos para futuros ensayos.
3. Repetir el ensayo haciendo uso de más de una variedad a fin de comparar los efectos sobre genotipos sensibles y tolerantes.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Akhtar, I., & Nazir, N. 2013. Effect of Waterlogging and Drought Stress in Plants. 2(2), 34–40. <https://doi.org/10.5829/idosi.ijwres.2013.2.2.11125>
- Almeselmani, M., Deshmukh, P.S., Sairam, R.K., Kushwaha, S.R. y Singh, T.P. 2006. Protective role of antioxidant enzymes under high temperature stress. *Plant Science*. 171, 382-388. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2006.04.009>
- Arbona, V., Manzi, M., Ollas, C. d., y Gómez, A. 2013. Metabolomics as a tool to investigate abiotic stress tolerance in plants. *International journal of molecular sciences*. 14(3), 4885–4911. <https://doi.org/10.3390/ijms14034885>
- Baker, W. H., & Thompson, T. L. 1992. Determination of total nitrogen in plant samples by Kjeldahl. *Plant analysis reference procedures for the southern region of the United States*, 368, 13-16.
- Barbosa, J., & Junior, M. 2010. *Agrostat-Sistema para análises estatísticas de ensaios agronômicos*. Versão 1.0. Jaboticabal, Brazil: Departamento de Ciências Exatas–Universidade Estadual Paulista (UNESP).
- Batista, K. D., Araújo, W. L., Antunes, W. C., Cavatte, P. C., Moraes, G. A. B. K., Martins, S. C. V., & DaMatta, F. M. 2012. Photosynthetic limitations in coffee plants are chiefly governed by diffusive factors. *Trees*, 26(2), 459–468. <https://doi.org/10.1007/s00468-011-0606-2>
- Bernacchia, G., y Furini, A. 2004. Biochemical and molecular responses to water stress in resurrection plants. *Physiologia Plantarum*, 121(2), 175–181. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2004.00321.x>
- Berthaud, J. y Charrier, A. 1988. Genetic resources of *Coffea*. R. J. Clarke y R. Macrae (Eds.), *Coffee* (4). ELSEVIER APPLIED SCIENCE.

Bhargava, S., y Sawant, K. 2012. Drought stress adaptation: metabolic adjustment and regulation of gene expression. *Plant Breeding*, 132(1), 21–32. <https://doi.org/10.1111/pbr.12004>

Borjas Ventura, R. 2019. Efeito do déficit hídrico e do aumento de temperatura sobre variáveis produtivas fisiológicas e bioquímicas do “cacao” *Theobroma cacao* L. *Arnaldoa*, 26(1), 287–296. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.261.26112>

Borjas-Ventura, R., Ferraudo, A. S., Martínez, C. A., & Gratão, P. L. 2020. Global warming: Antioxidant responses to deal with drought and elevated temperature in *Stylosanthes capitata*, a forage legume. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 206(1), 13–27. <https://doi.org/10.1111/jac.12367>

Bray, E. A. 1997. Plant responses to water deficit. *Trends in Plant Science*, 2(2), 48–54. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(97\)82562-9](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(97)82562-9)

Cámara Peruana del Café y Cacao. 2017. Estudio de mercado del café peruano: Posición Internacional y el seguimiento de café sostenibles. Proyecto Café y Clima. 41 pp. Recuperado de: <https://camcafeperu.com.pe/admin/recursos/publicaciones/Estudio-de-mercado-del-cafe-peruano.pdf>

Carvalho, A. y Mónaco, L. C. 31 de Agosto – 08 de Setiembre, 1964. Natural cross-pollination in *C. arabica*. [Resumen de la presentación en el congreso]. International Horticultural Congress, Brusellas, Bélgica.

Chaves-Barrantes, N. F., & Gutiérrez-Soto, M. V. 2017. Respuestas al estrés por calor en los cultivos. I. Aspectos moleculares, bioquímicos y fisiológicos. *Agronomía Mesoamericana*, 28(1), 237. <https://doi.org/10.15517/am.v28i1.21903>

Chaves-Barrantes, N. F., & Gutiérrez-Soto, M. V. 2017. Respuestas al estrés por calor en los cultivos. II. Tolerancia y tratamiento agronómico. *Agronomía Mesoamericana*, 28(1), 255. <https://doi.org/10.15517/am.v28i1.21904>

Corso, D., Delzon, S., Lamarque, L. J., Cochard, H., Torres-Ruiz, J. M., King, A., & Brodribb, T. 2020. Neither xylem collapse, cavitation, or changing leaf conductance drive stomatal closure in wheat. *Plant, Cell & Environment*, 43(4), 854–865. <https://doi.org/10.1111/pce.13722>

- DaMatta, F. M., & Ramalho, J. D. 2006. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: A review. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 18(1), 55–81. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202006000100006>
- DaMatta, F. M., Avila, R. T., Cardoso, A. A., Martins, S. C. V., & Ramalho, J. C. 2018. Physiological and Agronomic Performance of the Coffee Crop in the Context of Climate Change and Global Warming: A Review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(21), 5264–5274. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b04537>
- De Almeida, J. A. S., de Azevedo, M. T. V. L. G., Salomon, M. V., & Medina, P. F. 2018. Water stress in germination, growth and development of coffee cultivars. *Journal of Seed Science*, 40(1), 82–89. <https://doi.org/10.1590/2317-1545v40n176667>
- De Oliveira Santos, M., Coelho, L.S., Carvalho, G.R. et al. 2021. Photochemical efficiency correlated with candidate gene expression promote coffee drought tolerance. *Sci Rep* 11, 7436 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86689-y>
- Díaz, C., y Carmen, M. 2018. Línea de base del sector café en el Perú. [Documento de trabajo]. Recuperado de: <https://camcafeperu.com.pe/admin/recursos/publicaciones/Linea-base-del-sector-cafe-en-Peru.pdf>
- Donizeti, J. 2008. Morfologia do Cafeeiro. En C. H. Siquiera de Carlvalho (Ed.), *Cultivares de café* (pp. 31-48). EMBRAPA.
- Elemike, E., Uzoh, I., Onwudiwe, D., & Babalola, O. 2019. The Role of Nanotechnology in the Fortification of Plant Nutrients and Improvement of Crop Production. *Applied Sciences*, 9(3), 499. <https://doi.org/10.3390/app9030499>
- Eziz, A., Yan, Z., Tian, D., Han, W., Tang, Z., & Fang, J. 2017. Drought effect on plant biomass allocation: A meta-analysis. *Ecology and Evolution*, 7(24), 11002–11010. <https://doi.org/10.1002/ece3.3630>
- Farah, A., y Ferreira, T. 2015. *The Coffee Plant and Beans: An Introduction. Coffee in Health and Disease Prevention*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409517-5.00001-2>

Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., y Basra, S. M. A. 2009. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(1), 185–212. <https://doi.org/10.1051/agro:2008021>

Fazuoli, L. C., Carvalho, C. H., Rodrigues, G., Alves, A., Guerreriro, O., Roque, S., Braz, J., Ferrerira, G., Sera, T., Moura, W., Guimaraes, A., Almeida, A., Gava, M., Gava, R., Nacif, A., y Silvarolla, M. B. 2008. Cultivares de Café arabica (*Coffea arabica* L.). En C. H. Siquiera de Carvalho (Ed.), *Cultivares de café* (pp. 125-198). EMBRAPA.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2014. Arabica coffee manual for Lao PDR 2005. Recuperado de: <http://www.fao.org/docrep/008/ae939e/ae939e00.htm>

Fridell M, Hudson I, Hudson M. 2008. With friends like these: the corporate response to fair trade coffee. *Review of Radical Political Economics*, 40(1), 8–34. <https://doi.org/10.1177/0486613407311082>

Gokavi, N., y Kishor, M. 2020. Impact of climate change on coffee production: An overview. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 9(3), 1850-1858.

Gonzalez-Dugo, V., Durand, J. L., Gastal, F., Bariac, T., & Poincheval, J. (2012). Restricted root-to-shoot translocation and decreased sink size are responsible for limited nitrogen uptake in three grass species under water deficit. *Environmental and Experimental Botany*, 75, 258–267. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2011.07.009>

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. IPCC. 2014. Cambio climático 2014. [Resumen para responsables de políticas]

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. IPCC. 2001. Cambio Climático 2001: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad. [Resumen para responsables de Política]. OMM-PNUMA. Ginebra, Suiza. 95 pp.

Guerreiro, O., Guimaraes, A. N., Carvalho, G., Silvarolla, M., Botelho, C. y Fazuoli, L. C. 2008. Origem e classificacao botánica do Cafeeiro. En C. H. Siquiera de Carvalho (Ed.), *Cultivares de café* (pp. 23-30). EMBRAPA.

Guerrero-Carrera, J., Jaramillo-Villanueva, J. L., Mora-Rivera, J., Bustamante-González, Á., Vargas-López, S., y Chulim-Estrella, N. 2020. Impact of climate change on coffee production. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 23(3), 1850–1858.

Hassan, M. U., Chattha, M. U., Khan, I., Chattha, M. B., Barbanti, L., Aamer, M., ... Aslam, M. T. 2020. Heat stress in cultivated plants: nature, impact, mechanisms, and mitigation strategies - A review. *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with All Aspects of Plant Biology*, 1–56. <https://doi.org/10.1080/11263504.2020.1727987>

Herrera, J. C., y Lambot, C. 2017. The Coffee Tree-Genetic Diversity and Origin. In *The Craft and Science of Coffee*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803520-7.00001-3>

Hinojosa, L., Matanguihan, J. B., & Murphy, K. M. (2019). Effect of high temperature on pollen morphology, plant growth and seed yield in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Journal of Agronomy and Crop Science*, 205(1), 33–45. <https://doi.org/10.1111/jac.12302>

Hossain, Z., López, M. F., Arbona, V., Pérez, R. M., y Gómez, A. 2009. Modulation of the antioxidant system in citrus under waterlogging and subsequent drainage. *Journal of Plant Physiology*, 166(13), 1391–1404. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2009.02.012>

Hussain, S., Ulhassan, Z., Brestic, M., Zivcak, M., Weijun Zhou, Allakhverdiev, S. I., Ehsan S, M., Yang, W., Liu, W. 2021. Photosynthesis research under climate change. *Photosynthesis Research*. <https://doi.org/10.1007/s11120-021-00861-z>

Iba, K. 2002. Acclimative response to temperature stress in higher plants: approaches of gene engineering for temperature tolerance. *Rev. Plant Biol.* 53, 225-245. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.53.100201.160729>

Jaramillo, Á., & Guzmán, O. 1984. Relación entre la temperatura y crecimiento en *Coffea arabica* L, variedad Caturra. *Cenicafé*, (8), 57–65. Recuperado de: <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/708/1/arc035%2803%2957-65.pdf>

Jha S, Bacon CM, Philpott SM, Mendez VE, Laderach P, Rice RA. 2014. Shade coffee: update on a disappearing refuge for biodiversity. *Bioscience* 64, 416–428. <https://doi.org/10.1093/biosci/biu038>

- Kiwuka, C., Vos, J., Douma, B., Musoli, P., Mulumba, J., Poncet, V., ... Anten, N. P. R. 2022. Intraspecific variation in growth response to drought stress across geographic locations and genetic groups in *Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner. Retrieved from <https://doi.org/10.22541/au.165355931.17246188/v1>
- Lambers, H., Chapin, F. S. III, & Pons, T. L. 2008. Plant water relations. In D.T. Clarkson (Ed.), *Plant physiological ecology*, 2nd ed. (pp. 163–223). New York, NY, USA: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-78341-3>
- Lashermes, P., Combes, M.C., Robert, J., Trouslot, P., D'Hont, A., Anthony, F., Charrier, A., 1999. Molecular characterization and origin of the *Coffea arabica* L. genome. *Molecular Genome y Genetics* 261, 259-266.
- Los, D.A., y N. Murata. 2004. Membrane fluidity and its roles in the perception of environmental signals. *Biomembranes* 1666, 142-157. <https://doi.org/10.1016/j.bbamem.2004.08.002>
- Martinez, H. E. P., de Souza, B. P., Caixeta, E. T., de Carvalho, F. P., & Clemente, J. M. 2020. Water deficit changes nitrate uptake and expression of some nitrogen related genes in coffee-plants (*Coffea arabica* L.). *Scientia Horticulturae*, 267, 109254. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109254>
- Malau, S., Siagian, A., Sirait, B., & Ambarita, H. 2018. Plant growth of genotypes of Arabica coffee on water stress. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 420(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/420/1/012066>
- Meinzer, F. C.; Saliendra, N. Z.; Crisosto, C. H. 1992. Carbon isotope discrimination and gas exchange in *Coffea arabica* during adjustment in different soil moisture regimes. *Aust. J. Plant Physiol.* 1992, 19, 171– 184
- Melke, A., & Fetene, M. 2014. Eco-physiological basis of drought stress in coffee (*Coffea arabica*, L.) in Ethiopia. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, 26(3–4), 225–239. <https://doi.org/10.1007/s40626-014-0022-2>
- Meylan L, Gary C, Allinne C, Ortiz J, Jackson L, Rapidel B. 2017. Evaluating the effect of shade trees on provision of ecosystem services in intensively managed coffee plantations.

Agriculture, Ecosystem and Environment 245, 32– 42.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.05.005>

Mihaljević, I., Viljevac Vuletić, M., Šimić, D., Tomaš, V., Horvat, D., Josipović, M., Zdunić, Z.; Dugalić, K.; Vuković, D. 2021. Comparative Study of Drought Stress Effects on Traditional and Modern Apple Cultivars. *Plants*, 10(3), 561.
<https://doi.org/10.3390/plants10030561>

Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. 2012. Plan de Gestión de Riesgos y Adaptación al Cambio Climático en el Sector Agrario. Período 2012-2021. Recuperado de:
<https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/especiales/plangracc/plangracc.pdf>

Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. 2020. Observatorio Comodities: Café jul-set 2020. Recuperado de:
<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1537333/Commodities%20Caf%C3%A9%20julio-set%202020.pdf>

Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. 2021. Observatorio Comodities: Café abr-jun 2021. Recuperado de:
<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2325424/Commodities%20Caf%C3%A9%20abr-jun%202021.pdf>

Mittler R, Blumwald E. 2010. Genetic engineering for modern agriculture: challenges and perspectives. *Annual Review of Plant Biology* 61, 443–462.
<https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042809-112116>

Oh-e, I., Saitoh, K., & Kuroda, T. 2007. Effects of high temperature on growth, yield and dry-matter production of rice grown in the paddy field. *Plant Production Science*, 10(4), 412–422. <https://doi.org/10.1626/pps.10.412>

Osakabe, Y., Osakabe, K., Shinozaki, K., & Tran, L.-S. P. 2014. Response of plants to water stress. *Frontiers in Plant Science*, 5. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00086>

Öztürk, L., y Demir, Y. 2003. Effects of putrescine and ethephon on some oxidative stress enzyme activities and proline content in salt stressed spinach leaves. *Plant Growth Regulation* 40(1), 89–95. <https://doi.org/10.1023/A:1023078819935>

Patel D, Franklin KA. 2009. Temperature-regulation of plant architecture. *Plant Signal Behav.* 4:577–579.

Pinheiro, H. A., DaMatta, F. M., Chaves, A. R. M., Loureiro, M. E., & Ducatti, C. 2005. Drought tolerance is associated with rooting depth and stomatal control of water use in clones of *Coffea canephora*. *Annals of Botany*, 96(1), 101–108. <https://doi.org/10.1093/aob/mci154>

Porch, T.G., and A.E. Hall. 2013. Heat tolerance. C. Kole (Ed.), *Genomics and breeding for climate-resilient crops 2*, 167-202. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-37045-8>

Qiu, N., y C. Lu. 2003. Enhanced tolerance of photosynthesis against high temperature damage in salt- adapted halophyte *Atriplex centralasiatica* plants. *Plant Cell Environment* 26, 1137-1145. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-3040.2003.01038.x>

Quiroz Marchant, I., Garcia Rivas, E., Gonzales Ortega, M., Chung Guin.Po, P., & Soto Guevara, H. 2009. Vivero forestal: Produccion de plantas nativas a raiz descubierta. 75–102.

Rizhsky L, Liang H, Shuman J, Shulaev V, Davletova S, Mittler R. 2004. When defense pathways collide. The response of *Arabidopsis* to a combination of drought and heat stress. *Plant Physiology* 134, 1683–1696. <http://dx.doi.org/10.1104/pp.103.033431>

Rizhsky, L., Liang, H. y Mittler, R. 2002. The Combined Effect of Drought Stress and Heat Shock on Gene Expression in Tobacco. *Plant Physiology*, 130(3), 1143–1151. <https://doi.org/10.1104/pp.006858>

Robiglio, V., M. Reyes Acebedo y E. Castro. 2015. Diagnóstico de los productores familiares en la Amazonía peruana. Lima: ICRAF – Oficina Regional para América Latina, por encargo de GGGI y DIE. Recuperado de: <https://www.worldagroforestry.org/sites/default/files/outputs/Diagnostico-de-los-productores-familiares-en-la-Amazonia-peruana-.compressed.pdf>

Rodríguez M, Canales E, Borrás-Hidalgo O. 2005. Molecular aspects of abiotic stress in plants. *Biotechnol Appl.* 22:1–10.

Rollins J. A., Habte E., Templer S. E., Colby T., Schmidt J., von Korff M. 2013. Leaf proteome alterations in the context of physiological and morphological responses to drought

and heat stress in barley (*Hordeum vulgare* L.). *Journal of Experimental Botany* 64, 3201–3212. <http://dx.doi.org/10.1093/jxb/ert158>

Salehi-Lisar, S. Y., y Bakhshayeshan-Agdam, H. 2016. Drought Stress in Plants: Causes, Consequences, and Tolerance. *Drought Stress Tolerance in Plants* 1, 1–16. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-28899-4_1

Salvucci, M. E., y Crafts-Brandner, S. J. 2004. Inhibition of photosynthesis by heat stress: the activation state of Rubisco as a limiting factor in photosynthesis. *Physiologia Plantarum*, 120(2), 179–186. <https://doi.org/10.1111/j.0031-9317.2004.0173.x>

Savchenko, G.E., E.A. Klyuchareva, L.M. Abrabchik, and E.V. Serdyuchenko. 2002. Effect of periodic heat shock on the membrane system of etioplasts. *Russian Journal Plant Physiol.* 49(3), 49-359. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1015592902659>

Seleiman, M. F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., ... Battaglia, M. L. 2021. Drought Stress Impacts on Plants and Different Approaches to Alleviate Its Adverse Effects. *Plants*, 10(2), 259. <https://doi.org/10.3390/plants10020259>

Sharkey, T. D., & Schrader, S. M. 2006. High temperature stress. In *Physiology and Molecular Biology of Stress Tolerance in Plants* (pp. 101–129). https://doi.org/10.1007/1-4020-4225-6_4

Sharkey, T.D. 2005. Effects of moderate heat stress on photosynthesis: importance of thylakoid reactions, rubisco deactivation, reactive oxygen species, and thermotolerance provided by isoprene. *Plant Cell Environment*. 28, 269-277. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2005.01324.x>

Silva, E. A., DaMatta, F. M., Ducatti, C., Regazzi, A. J., & Barros, R. S. (2004). Seasonal changes in vegetative growth and photosynthesis of Arabica coffee trees. *Field Crops Research*, 89(2–3), 349–357. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.02.010>

Sistema Integrado de Estadística Agrícola. 2019. Anuario Estadístico de Producción Agrícola 2018. Ministerio de Desarrollo Agrario. <https://siea.midagri.gob.pe/portal/publicaciones/datos-estadisticas/anuarios/category/26-produccion-agricola?download=431:agricola-2019>

Smith, R., 1985. A history of coffee. Clifford, M.N., Willson, K.C. (Eds.), *Coffee: Botany, Biochemistry and Production of Beans and Beverage*, 1-12. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6657-1>

Solidaridad. 2016. *Café 2.0: climáticamente inteligente*. Solidaridad, Proyecto Caficultura Conocimiento y Carbono para REDD en el Perú (CCC). 103pp

Stock, W. D., Heyden, F. V. D., & Lewis, O. A. M. 1992. Plant structure and function. In R Cowling (Ed.), *The ecology of Fynbos. Nutrients, fire and diversity*, 1st edn. pp. 226–240.

TCI. 2016. A brewing storm: the climate change risks to coffee. The Climate Institute. <http://www.climateinstitute.org.au/coffee.html>. Accessed 05/07/2019

Tesfera, T., Yaziz, B., & Shimbir, T. 2019. Response of Coffee Genotypes (*Coffea Arabica*) for Moisture Stress Condition at Tepi, South West of Ethiopia. *International Journal of Research Studies in Agricultural Sciences*, 5(1). <https://doi.org/10.20431/2454-6224.0501002>

Tesfaye, S. G., Ismail, M. R., Ramlan, M. F., Marziah, M., Kausar, H., & Hakim, M. A. 2015. Effect of water deficiency on growth and dry matter yield of selected in Robusta coffee (*Coffea canephora*) clones in Malaysia. *Journal of Environmental Biology*, 36(5), 1239–1245.

Tesfaye, S. G. 2018. Some physiological aspects of drought tolerance in selected Arabica coffee (*Coffea arabica* L.) genotypes as evaluated by early stage response to soil drying. *International Journal of Agriculture and Biosciences*, 7(2), 81-90.

Tiwari, P., Srivastava, D., Chauhan, A. S., Indoliya, Y., Singh, P. K., Tiwari, S., ... Nautiyal, C. S. 2021. Root system architecture, physiological analysis and dynamic transcriptomics unravel the drought-responsive traits in rice genotypes. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 207, 111252. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111252>

Torres J., Gómez A. 2008. *Agroforestería: una estrategia de adaptación al cambio climático*. Soluciones Prácticas – ITDG. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/agroforesteria-una-estrategia-adaptacion-cambio-climatico>

Tzortzakis, Chrysargyris, & Aziz. 2020. Adaptive Response of a Native Mediterranean Grapevine Cultivar Upon Short-term Exposure to Drought and Heat Stress in the Context of Climate Change. *Agronomy*, 10(2), 249. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020249>

Urbaz, C., Natera, R. M., Acu, S., y Padilla, S. M. 2014. Evaluación de métodos químicos y mecánicos para promover la germinación de semillas y producción de fosforitos en café (*Coffea arabica*) var. Catuaí Rojo. *Idesia*, 32(1), 43–54. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292014000100006>.

Vile D, Pervent M, Belluau M, Vasseur F, Bresson J, Muller B, Granier C, Simonneau T. 2012. Arabidopsis growth under prolonged high temperature and water deficit: independent or interactive effects? *Plant, Cell & Environment* 35, 702–718. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2011.02445.x>

Villalón Mendoza, H; Ramos Reyes, J; Vega López, J; Marino, B; Muños Palomino, M; Garza Ocañas, F. 2016. Indicadores de calidad de la planta de *Quercus canby* Trel. (encino) en vivero forestal. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 12(1), 7.

Virginio F, E., Abarca M, S. 2008. Cafetales para servicios ecosistémicos, con énfasis en el potencial de sumideros de carbono. CATIE

Wahid, A., S. Gelani, M. Ahsraf, and M.R. Fooland. 2007. Heat tolerance in plants: an overview. *Environmental and Experimental Botany*. 61, 199-223. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.05.011>

Wang, L.C., M.C. Tsai, K.Y. Chang, Y.S. Fan, C.H. Yeh, and S.J. Wu. 2011. Involvement of the Arabidopsis HIT1/AtVPS53 tethering protein homologue in the acclimation of the plasma membrane to heat stress. *Journal of Experimental Botany* 62(10), 3609-3620. <https://doi.org/10.1093/jxb/err060>

Wang, H., Yang, Z., Yu, Y., Chen, S., He, Z., Wang, Y., ... Zhang, Z. 2017. Drought enhances Nitrogen uptake and assimilation in maize roots. *Agronomy Journal*, 109(1), 39–46. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.01.0030>

Wang, Q.-L., Chen, J.-H., He, N.-Y., y Guo, F.-Q. 2018. Metabolic Reprogramming in Chloroplasts under Heat Stress in Plants. *International Journal of Molecular Sciences* 19(3), 849. <https://doi.org/10.3390/ijms19030849>

- Wegari, A., & Amin, M. (2020). Early growth response of hararghe coffee selections to soil moisture deficit at seedling stage at Mechara, Eastern Ethiopia. *Universal Journal of Agricultural Research*, 8(6), 223–232. <https://doi.org/10.13189/ujar.2020.080603>
- Wintgens J.N. 2004. *The Coffee Plant*. J. N. Wintgens (Ed.). *Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production. A Guidebook for growers, processors, traders, and researchers*, 1-24. <https://doi.org/10.1002/9783527619627>
- Wu, W., Duncan, R. W., & Ma, B. L. 2017. Quantification of canola root morphological traits under heat and drought stresses with electrical measurements. *Plant and Soil*, 415(1–2), 229–244. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3155-z>
- Yang, X., Lu, M., Wang, Y., Wang, Y., Liu, Z., & Chen, S. 2021. Response Mechanism of Plants to Drought Stress. *Horticulturae*, 7(3), 50. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7030050>
- Zhang, F., Wang, P., Zou, Y.-N., Wu, Q.-S., & Kuča, K. 2019. Effects of mycorrhizal fungi on root-hair growth and hormone levels of taproot and lateral roots in trifoliolate orange under drought stress. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 65(9), 1316–1330. <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1563780>

VIII. ANEXOS

Anexo 1. Análisis de variancia para efectos principales e interacción para la variable altura de la planta.

Causas de Variação	GL	SQ	QM	F	P
Efeito Fator A	1	16,940000000	16,940000000	43,20**	< 0,0001
Efeito Fator B	1	0,8257142857	0,8257142857	2,11NS	0,1528
Ef. Interação AxB	1	0,0064285714	0,0064285714	0,02NS	0,8986
(Tratamentos)	3	17,772142857	-	-	-
Resíduo	52	20,392857143	0,3921703297	-	-
Total	55	38,165000000	-	-	-

Média Geral do Experimento: 11,575000
 Desvio Padrão Residual.....: 0,6262350
 Erro Padrão da Média.....: 0,1673684
 Coeficiente de Variação...: 5,4102380

Nível de significación = 0,05 (Scott & Knott)

Anexo 2. Análisis de variancia para efectos principales e interacción para la variable diámetro de la planta.

Causas de Variação	GL	SQ	QM	F	P
Efeito Fator A	1	2,2320071429	2,2320071429	124,32**	< 0,0001
Efeito Fator B	1	0,2744000000	0,2744000000	15,28**	0,0003
Ef. Interação AxB	1	0,0208285714	0,0208285714	1,16NS	0,2864
(Tratamentos)	3	2,5272357143	-	-	-
Resíduo	52	0,9335857143	0,0179535714	-	-
Total	55	3,4608214286	-	-	-

Média Geral do Experimento: 2,6817857
 Desvio Padrão Residual.....: 0,1339909
 Erro Padrão da Média.....: 0,0358106
 Coeficiente de Variação...: 4,9963327

Nível de significación = 0,05 (Scott & Knott)

Anexo 3. Análisis de variancia para efectos principales e interacción para la variable longitud de raíz.

Causas de Variação	GL	SQ	QM	F	P
Efeito Fator A	1	23,595044643	23,595044643	7,68**	0,0077
Efeito Fator B	1	0,1749446429	0,1749446429	0,06NS	0,8124
Ef. Interação AxB	1	0,3348017857	0,3348017857	0,11NS	0,7427
(Tratamentos)	3	24,104791071	-	-	-
Resíduo	52	159,82040714	3,0734693681	-	-
Total	55	183,92519821	-	-	-

Média Geral do Experimento: 17,322321
 Desvio Padrão Residual....: 1,7531313
 Erro Padrão da Média.....: 0,4685440
 Coeficiente de Variação...: 10,120649

Nivel de significación = 0,05 (Scott & Knott)

Anexo 4. Análisis de variancia para efectos principales e interacción para la variable número de hojas.

Causas de Variação	GL	SQ	QM	F	P
Efeito Fator A	1	34,049499206	34,049499206	88,74**	< 0,0001
Efeito Fator B	1	1,0495849207	1,0495849207	2,74NS	0,1042
Ef. Interação AxB	1	0,0019849207	0,0019849207	0,01NS	0,9429
(Tratamentos)	3	35,101069048	-	-	-
Resíduo	52	19,952380954	0,3836996337	-	-
Total	55	55,053450002	-	-	-

Média Geral do Experimento: 9,0773821
 Desvio Padrão Residual....: 0,6194349
 Erro Padrão da Média.....: 0,1655509
 Coeficiente de Variação...: 6,8239380

Nivel de significación = 0,05 (Scott & Knott)

Anexo 5. Análisis de variancia para efectos principales e interacción para la variable área foliar.

Causas de Variação	GL	SQ	QM	F	P
Efeito Fator A	1	12848,715402	12848,715402	12,58**	0,0008
Efeito Fator B	1	698,86980179	698,86980179	0,68NS	0,4119
Ef. Interação AxB	1	1807,7169446	1807,7169446	1,77NS	0,1892
(Tratamentos)	3	15355,302148	-	-	
Resíduo	52	53116,244250	1021,4662356	-	
Total	55	68471,546398	-	-	

Média Geral do Experimento: 147,09232
 Desvio Padrão Residual....: 31,960385
 Erro Padrão da Média.....: 8,5417723
 Coeficiente de Variação...: 21,728113

Nível de significación = 0,05 (Scott & Knott)

Anexo 6. Análisis de variancia para efectos principales e interacción para la variable peso seco de hojas.

Causas de Variação	GL	SQ	QM	F	P
Efeito Fator A	1	0,5279683037	0,5279683037	23,43**	< 0,0001
Efeito Fator B	1	0,1263389170	0,1263389170	5,61*	0,0216
Ef. Interação AxB	1	0,0077248431	0,0077248431	0,34NS	0,5607
(Tratamentos)	3	0,6620320638	-	-	
Resíduo	52	1,1716015285	0,0225307986	-	
Total	55	1,8336335922	-	-	

Média Geral do Experimento: 0,7905092
 Desvio Padrão Residual....: 0,1501026
 Erro Padrão da Média.....: 0,0401166
 Coeficiente de Variação...: 18,988093

Nível de significación = 0,05 (Scott & Knott)

Anexo 7. Análisis de variancia para efectos principales e interacción para la variable peso seco de tallo.

Causas de Variação	GL	SQ	QM	F	P
Efeito Fator A	1	0,0111224587	0,0111224587	8,51**	0,0052
Efeito Fator B	1	0,0114118157	0,0114118157	8,73**	0,0047
Ef. Interação AxB	1	0,0001922030	0,0001922030	0,15NS	0,7029
(Tratamentos)	3	0,0227264774	-	-	-
Resíduo	52	0,0679599902	0,0013069229	-	-
Total	55	0,0906864676	-	-	-

Média Geral do Experimento: 0,2143990
 Desvio Padrão Residual.....: 0,0361514
 Erro Padrão da Média.....: 0,0096619
 Coeficiente de Variação...: 16,861730

Nível de significación = 0,05 (Scott & Knott)

Anexo 8. Análisis de variancia para efectos principales e interacción para la variable peso seco de raíz.

Causas de Variação	GL	SQ	QM	F	P
Efeito Fator A	1	0,0109340402	0,0109340402	1,97NS	0,1669
Efeito Fator B	1	0,0725832002	0,0725832002	13,05**	0,0007
Ef. Interação AxB	1	0,0031305302	0,0031305302	0,56NS	0,4566
(Tratamentos)	3	0,0866477705	-	-	-
Resíduo	52	0,2893010443	0,0055634816	-	-
Total	55	0,3759488148	-	-	-

Média Geral do Experimento: 0,3680482
 Desvio Padrão Residual.....: 0,0745887
 Erro Padrão da Média.....: 0,0199347
 Coeficiente de Variação...: 20,266027

Nível de significación = 0,05 (Scott & Knott)

Anexo 9. Análisis de variancia para efectos principales e interacción para la variable A/R.

Causas de Variação	GL	SQ	QM	F	P
Efeito Fator A	1	2,5223790179	2,5223790179	18,17**	< 0,0001
Efeito Fator B	1	0,7035844464	0,7035844464	5,07*	0,0286
Ef. Interação AxB	1	0,1976594464	0,1976594464	1,42NS	0,2382
(Tratamentos)	3	3,4236229107	-	-	
Resíduo	52	7,2195849286	0,1388381717	-	
Total	55	10,643207839	-	-	

Média Geral do Experimento: 2,7736964
 Desvio Padrão Residual....: 0,3726099
 Erro Padrão da Média.....: 0,0995842
 Coeficiente de Variação....: 13,433696

Nivel de significación = 0,05 (Scott & Knott)

Anexo 10. Análisis de variancia para efectos principales e interacción para la variable Índice de robustez (IR).

Causas de Variação	GL	SQ	QM	F	P
Efeito Fator A	1	0,8720025714	0,8720025714	22,29**	< 0,0001
Efeito Fator B	1	0,4138320714	0,4138320714	10,58**	0,0020
Ef. Interação AxB	1	0,1033720714	0,1033720714	2,64NS	0,1101
(Tratamentos)	3	1,3892067143	-	-	
Resíduo	52	2,0339207143	0,0391138599	-	
Total	55	3,4231274286	-	-	

Média Geral do Experimento: 4,3457143
 Desvio Padrão Residual....: 0,1977722
 Erro Padrão da Média.....: 0,0528569
 Coeficiente de Variação....: 4,5509720

Nivel de significación = 0,05 (Scott & Knott)

Anexo 11. Análisis de variancia para efectos principales e interacción para la variable Índice de calidad de Dickson.

Causas de Variação	GL	SQ	QM	F	P
Efeito Fator A	1	0,0156947545	0,0156947545	8,37**	0,0056
Efeito Fator B	1	0,0222841502	0,0222841502	11,89**	0,0011
Ef. Interação AxB	1	0,0002533002	0,0002533002	0,14NS	0,7147
(Tratamentos)	3	0,0382322048	-	-	
Resíduo	52	0,0974821407	0,0018746566	-	
Total	55	0,1357143455	-	-	

Média Geral do Experimento: 0,1930911
 Desvio Padrão Residual.....: 0,0432973
 Erro Padrão da Média.....: 0,0115717
 Coeficiente de Variação...: 22,423255

Nível de significación = 0,05 (Scott & Knott)

Anexo 12. Análisis de variancia para efectos principales e interacción para la variable Porcentaje de Nitrógeno total.

Causas de Variação	GL	SQ	QM	F	P
Efeito Fator A	1	1,3299446429	1,3299446429	6,39*	0,0146
Efeito Fator B	1	0,6579446429	0,6579446429	3,16NS	0,0812
Ef. Interação AxB	1	0,0467486429	0,0467486429	0,22NS	0,6375
(Tratamentos)	3	2,0346379286	-	-	
Resíduo	52	10,821913429	0,2081137198	-	
Total	55	12,856551357	-	-	

Média Geral do Experimento: 2,1728929
 Desvio Padrão Residual.....: 0,4561948
 Erro Padrão da Média.....: 0,1219232
 Coeficiente de Variação...: 20,994815

Nível de significación = 0,05 (Scott & Knott)

Anexo 13. Plántulas de *C. arabica* cv. Ouro Verde IAC H 5010 -5, en estado fosforito, previo a su trasplante a bolsa.



Anexo 14. Trasplante de plántulas a 50 dds en bolsas de polietileno de 1L de capacidad.



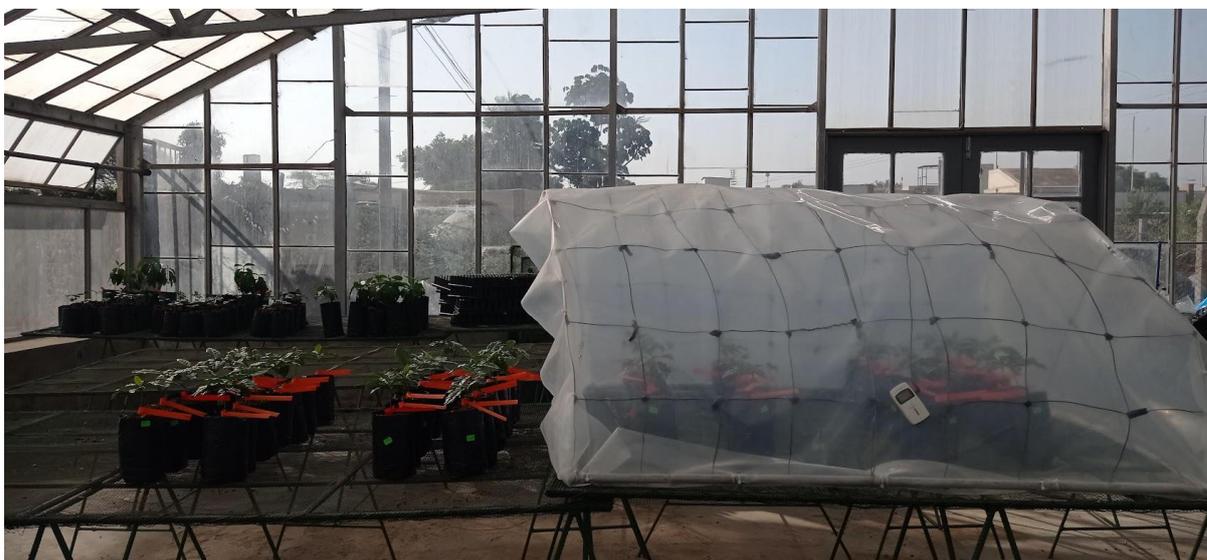
Anexo 15. Instalación del túnel incorporado con datalogger para registrar temperaturas.



Anexo 16. Fertilización con soluciones hidropónicas A y B, fuente de micro y macronutrientes.



Anexo 17. Instalación de tratamientos T0:control, T1: estrés hídrico por sequía, T2: estrés térmico por altas temperaturas y T3: estrés combinado.



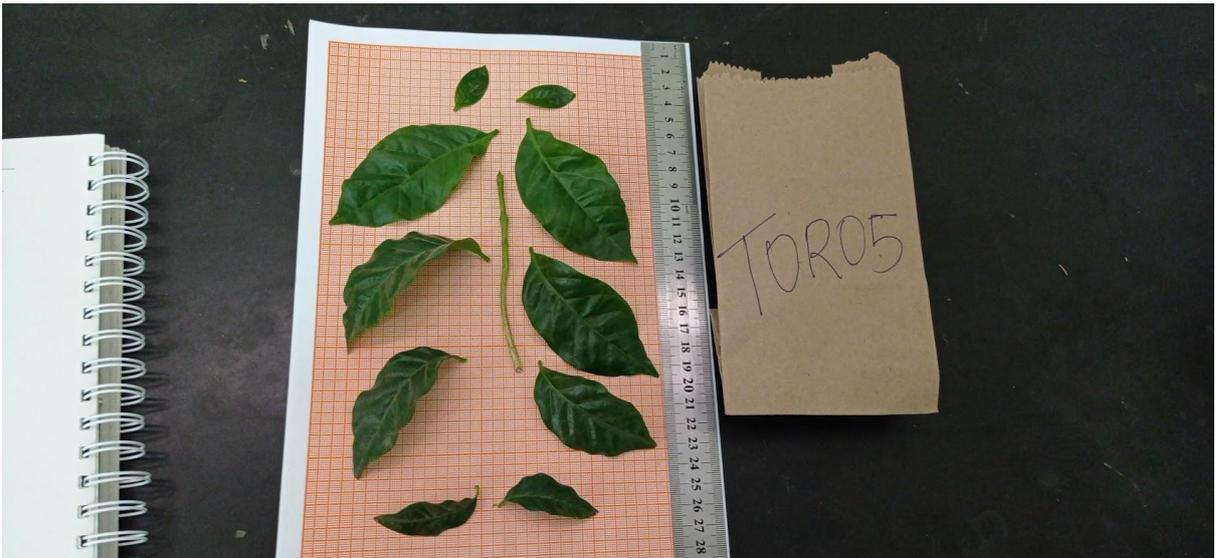
Anexo 18. Tratamiento 0: control (izquierda) y Tratamiento 1: estrés hídrico por sequía (derecha).



Anexo 19. Tratamiento 2: estrés térmico por altas temperaturas (izquierda) y Tratamiento 3: estrés combinado (derecha).



Anexo 20. Evaluación final de área foliar y peso fresco de zona aérea de la planta.



Anexo 21. Evaluación final de longitud de zona radicular de la planta.

