



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CONKAL

**FISIOLOGÍA Y METABOLÓMICA EN LA  
BÚSQUEDA DE VARIEDADES LOCALES DE  
MAÍZ (*Zea mays* L.) TOLERANTES A ESTRÉS  
HÍDRICO.**

**TESIS**

Que presenta:

**Reyna Marisol Lizama Cime**

Como requisito parcial para obtener el grado de:

**Maestra en Ciencias en Horticultura Tropical**

Director de tesis:

**Dr. Rubén Humberto Andueza Noh**

Conkal, Yucatán, México

Noviembre, 2023



**TecNM**



Conkal, Yucatán, México a 29 de Noviembre de 2023

El comité de tesis del candidato a grado: Reyna Marisol Lizama Cime, constituido por los CC. Dr. Rubén Humberto Andueza Noh, Dr. René Garruña Hernández, Dr. Emanuel Hernández Nuñez, habiéndose reunido con el fin de evaluar el contenido teórico-metodológico y verificar la estructura y formato de la tesis titulada: **Fisiología y metabolómica en la búsqueda de variedades locales de maíz (zea mays l.) tolerantes a estrés hídrico**, que presenta como requisito parcial para obtener el grado de Maestra en Ciencias en Horticultura Tropical, según lo establece el Capítulo 2, inciso, 2.13.3, de los Lineamientos para la Operación de los Estudios de Posgrado en el Sistema Nacional de Institutos Tecnológicos, dictaminaron su aprobación para que pueda ser presentada en el examen de grado correspondiente.

### Atentamente

Dr. Rubén Humberto Andueza Noh

Director de tesis

Dr. René Garruña Hernández

Co-Director de tesis

Dr. Emanuel Hernández Nuñez

Asesor de tesis



Conkal, Yucatán, México a 29 de Noviembre de 2023

### DECLARATORIA DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en las secciones de materiales y métodos, resultados y discusión de este documento, es producto del trabajo de investigación realizado durante mi estudio de posgrado y con base en los términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial le pertenece patrimonialmente al Instituto Tecnológico de Conkal. En virtud de lo manifestado reconozco que los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que se deriven de lo correspondiente a dicha información son propiedad de la citada institución educativa.

---

Reyna Marisol Lizama Cime

# ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARATORIA DE PROPIEDAD .....	i
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	iv
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT.....	viii
CAPÍTULO 1 .....	1
1.1 INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.2 ANTECEDENTES.....	3
1.2.1 Origen y distribución del maíz.....	3
1.2.2 Clasificación y descripción del maíz.....	3
1.2.3 Clasificación botánica .....	3
1.2.4 Clasificación estructural del maíz .....	4
1.2.5 Características botánicas .....	4
1.2.6 Etapas fenológicas del cultivo.....	5
1.2.7 Importancia del maíz.....	6
1.2.8 Importancia social del maíz.....	6
1.2.9 Importancia económica .....	7
1.2.10 Problemáticas a las que se enfrenta el cultivo de maíz .....	8
1.2.11 Investigaciones realizadas .....	9
1.3 HIPÓTESIS.....	11
1.4 OBJETIVOS .....	11
1.4.1 Objetivo general:.....	12
1.4.2 Objetivos específicos: .....	12
1.5 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	13
1.6 LITERATURA CITADA.....	14
CAPITULO II .....	17
EFFECTO DEL ESTRÉS HÍDRICO EN LA FISIOLÓGÍA Y METABOLÓMICA DE SEIS ACCESIONES LOCALES DE MAÍZ ( <i>Zea mays</i> L.) .....	17
2.1 RESUMEN.....	17

# ÍNDICE DE CUADROS Y FIGURAS

## CAPÍTULO 1

<b>Cuadro 1.</b> Etapas fenológicas del cultivo de maíz.....	5
<b>Figura 1.</b> Producción y rendimiento de maíz en todo el mundo.....	7
<b>Figura 2.</b> Tendencias de la producción de Maíz en México.....	8
<b>Figura 3.</b> Principales países productores de maíz.....	9

## CAPÍTULO II

<b>Cuadro 1.</b> Descripción de las accesiones de maíz evaluadas y sitios de colecta...	20
<b>Cuadro 2.</b> Variables de crecimiento evaluadas en seis accesiones de maíz sometidas a estrés hídrico.....	27
<b>Cuadro 3.</b> Tasa de fotosíntesis a CO <sub>2</sub> saturante (ACO <sub>2</sub> sat), respiración diurna (RD), eficiencia de carboxilación (EC) y punto de compensación de CO <sub>2</sub> (Γ) de dos accesiones de maíz (36 y 39) sometidos a tres niveles de estrés hídrico (T0, T1 y T2). Literales diferentes entre columnas indican diferencias significativas entre tratamientos (ANOVA; Scott Knott, p<0.05) .....	32
<b>Cuadro 4.</b> Metabolitos identificados por la técnica de Resonancia Magnética Nuclear en hojas de seis accesiones de maíz sometidas a estrés hídrico.....	34
<b>Figura 1.</b> Variables de crecimiento evaluadas en seis accesiones de maíz sometidas a estrés hídrico. A) altura de planta, B) diámetro de tallo, C) número de hojas y D) área foliar. Los datos son $\bar{x} \pm EE$ . Diferentes literales señalan diferencias estadísticamente significativas (Scott Knott p=0.05) n=8.....	25
<b>Figura 2.</b> Efecto de tres niveles de estrés hídrico en el crecimiento de seis accesiones locales de maíz.....	26
<b>Figura 3.</b> Variables fisiológicas evaluadas en seis accesiones de maíz sometidas a estrés hídrico. A) Tasa de asimilación neta de CO <sub>2</sub> PRE-RIEGO, B) Tasa de asimilación de CO <sub>2</sub> POST-RIEGO, C) Transpiración PRE-RIEGO, D) Transpiración POST-RIEGO, E) Uso eficiente del agua PRE-RIEGO y F) Uso	

eficiente del agua POST-RIEGO. Los datos son  $\bar{x} \pm EE$ . Diferentes literales 30  
señalan diferencias estadísticamente significativas (Scott Knott  $p \leq 0.05$ )  $n=8$ ....

**Figura 4.** Curvas de respuesta de fotosíntesis a la concentración de  $CO_2$  31  
intercelular ( $A/C_i$ ) de dos accesiones de maíz (accesión 36 y accesión 39)  
sometidas a tres niveles de estrés hídrico (T0= riego al 100%, T1= riego al 70%  
y T2= riego al 30%).....

**Figura 5.** Variables de relaciones hídricas de seis accesiones de maíz sometidas 33  
a estrés hídrico. A) Potencial hídrico de sustrato PRE-ALBA, B) Potencial  
hídrico de sustrato MEDIO DÍA, C) Potencial hídrico de la hoja PRE-ALBA y  
D) Potencial hídrico de la hoja MEDIO DÍA. Los datos son  $\bar{x} \pm EE$ . Diferentes  
literales señalan diferencias estadísticamente significativas (Scott Knott  
 $p=0.05$ )  $n=8$ .....

**Figura 6.** A) PCA score plot (PC1 vs. PC2) de los perfiles metabólicos y B) 34  
VIPs score relacionados con las variaciones del PCA de los tres tratamientos de  
estrés hídrico T0: riego al 100%, T1: riego al 70% y T2: riego al 30%.....

**Figura 7.** PCA score plot (PC1 vs. PC2) de los perfiles metabólicos de hojas de 37  
seis accesiones de maíz sometidas a diferentes niveles de estrés hídrico.....

## RESUMEN

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cultivos más importantes en el mundo; en México es el cereal con mayor producción y en las comunidades mayas de la Península de Yucatán, el maíz es el eje de la alimentación, desde la época prehispánica hasta la actualidad y continúa hoy en día en la milpa tradicional. Sin embargo, en los últimos años su producción se ha visto limitada debido al aumento en las temperaturas y los patrones irregulares de precipitación como consecuencia del cambio climático. Por esta razón, seleccionar accesiones locales de maíz que tengan la capacidad de tolerar la sequía es una de las estrategias que podría ser esencial para sostener y aumentar la productividad. El objetivo de este trabajo fue evaluar accesiones locales de maíz con tolerancia a estrés hídrico, con base en el crecimiento, respuestas fisiológicas y metabólica de la planta. Fueron sembradas seis accesiones locales de maíz en condiciones de invernadero. A los 49 días después de la siembra se iniciaron los tratamientos de estrés hídrico con diferentes niveles de humedad: 100% (control), 70% (estrés medio) y 30% (estrés severo) por 75 días. Se registró una disminución en la altura de la planta cuando el estrés hídrico era más severo, sin embargo, presentaron valores similares a las plantas del tratamiento control. Las accesiones 36 y 58 presentaron valores más altos de peso seco total, aun cuando se encuentran en condiciones de estrés severo. Se observó un aumento en la concentración de metabolitos relacionadas al estrés hídrico. La accesión 58 y 36 son accesiones que destacan en respuestas fisiológicas, por lo tanto, podrían ser recomendadas como accesiones tolerantes al estrés hídrico

**Palabras clave:** Maíz, estrés hídrico, cambio climático, accesiones locales.

## ABSTRACT

Corn (*Zea mays* L.) is one of the most important crops in the world; In Mexico it is the cereal with the highest production and in the Mayan communities of the Yucatan Peninsula, corn is the axis of the diet, from pre-Hispanic times to the present and continues today in the traditional crop system named “milpa”. However, in recent years its production has been limited due to increased temperatures and irregular precipitation patterns as a result of climate change. For this reason, selecting accessions of landraces of maize that have the ability to tolerate drought is one of the strategies that could be essential to sustain and increase productivity. The aim of this work was to evaluate landraces of maize with tolerance to water stress, based on growth, physiological responses and plant metabolomics. Six corn landraces were planted under greenhouse conditions. At 49 days after sowing, water stress treatments were started with different levels of humidity: 100% (control), 70% (medium stress) and 30% (severe stress) for 75 days. A decrease in plant height was recorded when water stress was more severe, however they presented similar values to the control treatment plants. Landraces 36 and 58 presented higher values of total dry weight, even when they are under conditions of severe stress. An increase in the concentration of metabolites related to water stress was observed. Landraces 58 and 36 are accessions that stand out in physiological responses, therefore, they could be recommended as accessions tolerant to water stress.

**Keywords:** Corn, water stress, climate change, landraces.

# **CAPÍTULO 1**

## **1.1 INTRODUCCIÓN GENERAL**

El maíz es una especie perteneciente a la familia de las Poáceas (gramíneas). Su centro de origen y domesticación se encuentra en México, donde actualmente se cuenta con una amplia diversidad de maíces (Matsuoka et al., 2002). Debido a la alta variabilidad genética que presentan las diferentes razas y variedades de maíz, su distribución geográfica es muy amplia y se ha adaptado a regiones de Norteamérica, América central, América del sur, así como Europa, África, Asia y Oceanía (Cazco, 2006).

El maíz es un cultivo de múltiples aplicaciones tanto para la alimentación como para la industria. En México, el maíz es parte importante de la dieta humana, esto se debe a que su consumo se remonta a tiempos ancestrales y fue un elemento importante en el asentamiento de varias culturas (DHAOGTR, 2008). Por lo tanto, el maíz ocupa el segundo lugar en cuanto a superficie cultivada y el primer lugar en producción de granos (FAO, 2022).

En Yucatán el maíz ha sido considerado eje de la alimentación de las familias yucatecas y es el principal cultivo dentro del sistema de producción agrícola conocido como milpa, dentro de este sistema de producción el cultivo de maíz es principalmente de temporal, por lo tanto, su producción está determinada por factores bióticos y abióticos, siendo los factores principales los climáticos y ambientales (Hernández, 1993).

En los últimos años la fluctuación de las precipitaciones ha sido muy inestable, afectando de manera directa la agricultura de temporal, por otro lado, considerando los efectos del cambio climático se espera que a futuro se presenten cambios más severos que provocarán precipitaciones aún más irregulares e insuficientes, aumento en las temperaturas y en la intensidad de las sequías y, por lo tanto, las regiones con cultivo de temporal serán las más afectadas (Campos, 2004).

Considerando lo mencionado anteriormente, conocer las respuestas de un cultivo ante situaciones de estrés hídrico y temperatura pasan a ser de mayor importancia. Algunos

autores indican que las plantas pueden protegerse ante el estrés hídrico generando cambios en su morfología como la aparición de estigmas, el enrollamiento de las hojas, disminución del rendimiento, disminución del área foliar y la altura (Araus *et al.*, 2012); otros autores han reportado que las plantas pueden cerrar las estomas con el objetivo de reducir la tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> como respuesta al estrés por sequía (Barnaby *et al.*, 2013). por otro lado, se ha observado cambios en el metabolismo de las hojas de maíz, donde hasta un 85% de los principales metabolitos sufren variaciones en su concentración cuando se encuentran expuestos a condiciones de déficit hídrico (Hernández, 1985).

El maíz es un cultivo de gran importancia en México y el mundo, conocer las respuestas fisiológicas y metabólicas ante diferentes niveles de estrés hídrico permitirá seleccionar variedades con tolerancia al estrés hídrico. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es evaluar la tolerancia al estrés hídrico de variedades locales de maíz (*Zea mays* L.) con base en el crecimiento de la planta, respuestas fisiológicas y la acumulación de metabolitos secundarios.

## 1.2 ANTECEDENTES

### 1.2.1 Origen y distribución del maíz

El maíz es una planta perteneciente a la familia de las poaceas (gramíneas), al género *Zea* y especie *Zea mays*, es un cultivo importante en todo el mundo ya que es considerado el alimento básico para la población mundial (Sánchez, 2014; Poliwal, 2001). Se originó en Mesoamérica, específicamente en la región centro-sur de México, donde fue domesticado por indígenas mexicanos que recolectaban y cazaban en las regiones montañosas al norte del Balsas hace aproximadamente 10,000 años, a partir de allí su producción se extendió hacia todo el continente americano, (Riveiro, 2004; Iltis, 2006). La amplia distribución de este cultivo a lo largo del continente americano se debe principalmente a que es una especie vegetal con una gran capacidad de adaptación a diferentes condiciones ambientales, así como a la gran cantidad de usos que se la ha dado, tanto para el consumo humano, el consumo animal y en la industria.

### 1.2.2 Clasificación y descripción del maíz

La clasificación del maíz puede ser botánica o taxonómica, comercial, estructural y en función de su calidad (Cabrerizo, 2012).

### 1.2.3 Clasificación botánica

De acuerdo a Cabrerizo (2012) la clasificación taxonómica del maíz es la siguiente:

Reino: Vegetal

Género: *Zea*

Subreino: Embryobionta

Especie: *Zea mays*,

División: Angiospermae

Nombre científico: *Zea mays* L.

Clase: Monocotyledoneae

Orden: Poales

Familia: Poaceae

#### 1.2.4 Clasificación estructural del maíz

De acuerdo a Cabrerizo (2006) y Acosta (2009) mencionan que el maíz puede dividirse en varios tipos basándose en la estructura o textura del endospermo:

***Zea mays indentata***: maíz dentado formado por un endospermo duro en la parte externa y harinoso en la parte central. Caracterizado por presentar una depresión en la corona del grano originado por la contracción del endospermo. Utilizado principalmente en la alimentación humana y animal.

***Zea mays indurata***: maíz duro que contiene una capa gruesa de endospermo cristalino que cubre una pequeña parte harinosa.

***Zea mays amiláceo***: maíz harinoso que contiene un endospermo harinoso, no cristalino y de gran tamaño. Es común encontrarlo en la región andina del sur de América.

***Zea mays tunicata***: el grano se encuentra encerrado en una vaina o túnica. El germoplasma se utiliza principalmente en programas de fitomejoramiento.

***Zea mays saccharata***: maíz con un alto contenido de azúcar que es convertido en almidón. Se caracteriza por ser de ciclo corto y por presentar una mazorca pequeña.

***Zea mays everta***: se caracteriza por tener un endospermo cristalino muy duro y una porción pequeña de endospermo harinoso. Consumido principalmente en forma de rosetas.

#### 1.2.5 Características botánicas

De acuerdo a varios autores la descripción botánica del maíz es la siguiente:

El tallo: alcanza una altura de hasta cuatro metros, es leñosa, sin ramificaciones y está formada de nudos y entrenudos llenos de medula esponjosa (Valladares, 2010).

Las hojas: son largas y anchas con forma lanceolada, encajadas en el tallo y presentan vellosidades en el haz; los bordes de las hojas son afilados y cortantes. En la axila de las hojas se desarrollan una o dos yemas que se convierten en una inflorescencia femenina, la cual se convierte en una mazorca (Ortiz 2017; Valladares 2010).

El sistema floral: es una planta monoica con flores bien diferenciadas en la misma planta, la inflorescencia masculina se le denomina panícula o espiga, puede ser de color verde, amarilla, rojiza o morado dependiendo del genotipo. Presenta varias ramificaciones laterales con flores masculinas encargadas de la producción de polen (Kato et al., 2009). La inflorescencia femenina consta de 1-2 mazorcas que se ubican en la base de los entrenudos de las hojas, estas contienen los ovarios que después de la polinización se convierten en granos, el polen germina a través de un largo cabello que sobresale de las hojas modificadas por donde crece el estilo (Valladares, 2010).

La raíz: el sistema radicular está formado por tres tipos de raíces: temporales, permanentes y adventicias. Las raíces permanentes pueden alcanzar una profundidad de hasta dos metros y las adventicias salen en los dos o tres primeros nudos del tallo (Morales, 2015).

### 1.2.6 Etapas fenológicas del cultivo

De acuerdo al CIMMYT (2014), se describe la fenología del cultivo de maíz en el cuadro 1.

**Cuadro 2.** Etapas fenológicas del cultivo de maíz

Etapa	Características	Días
VE	Produce un crecimiento debajo de la tierra cuando el sistema	
V1	radicular comienza a mostrar crecimiento.	5
V2	Se desarrolla la primera hoja y es completamente visible.	9
	Se observa la segunda hoja.	12
V3	Inicio del proceso fotosintético y la planta comienza a depender del sistema radicular, por lo tanto, las raíces aumentan de tamaño y se empiezan a formar los pelos	
Vn	radicales, se detiene el crecimiento radicular seminal.	
	En esta etapa se desarrollan las hojas y es crucial la humedad	45
VT	de la tierra y la disponibilidad de nutrientes.	
	La última rama de la panícula es visible.	55
R0	Desarrollo de la antesis o floración masculina. Liberación de polen.	57
R1	Se observa la emisión de los estigmas y se da la fecundación.	59

R2	Etapa de ampolla. Los granos se llenan con un líquido claro y se observa el embrión.	71
R3	Etapa lechosa. Los granos se llenan con un líquido lechoso blanco.	80
R4	Etapa masosa. Los granos se llenan con una pasta blanca. El embrión mide aproximadamente la mitad del ancho del grano.	90
R5	La parte superior de los granos se llenan con almidón sólido y los granos adquieren la forma del genotipo.	102
R6	La planta adquiere la madurez fisiológica para la cosecha de las mazorcas.	112

VE: vegetativa inicial, V1: etapa vegetativa 1, V2: etapa vegetativa 2, V3: etapa vegetativa 3, Vn: de acuerdo a la variedad puede incluir diferentes etapas vegetativas, VT: etapa vegetativa final, R0: etapa reproductiva inicial, R1: etapa reproductiva 1, R2: etapa reproductiva 2, R3: etapa reproductiva 3, R4: etapa reproductiva 4, R5: etapa reproductiva 5, R6: etapa reproductiva final.

### **1.2.7 Importancia del maíz**

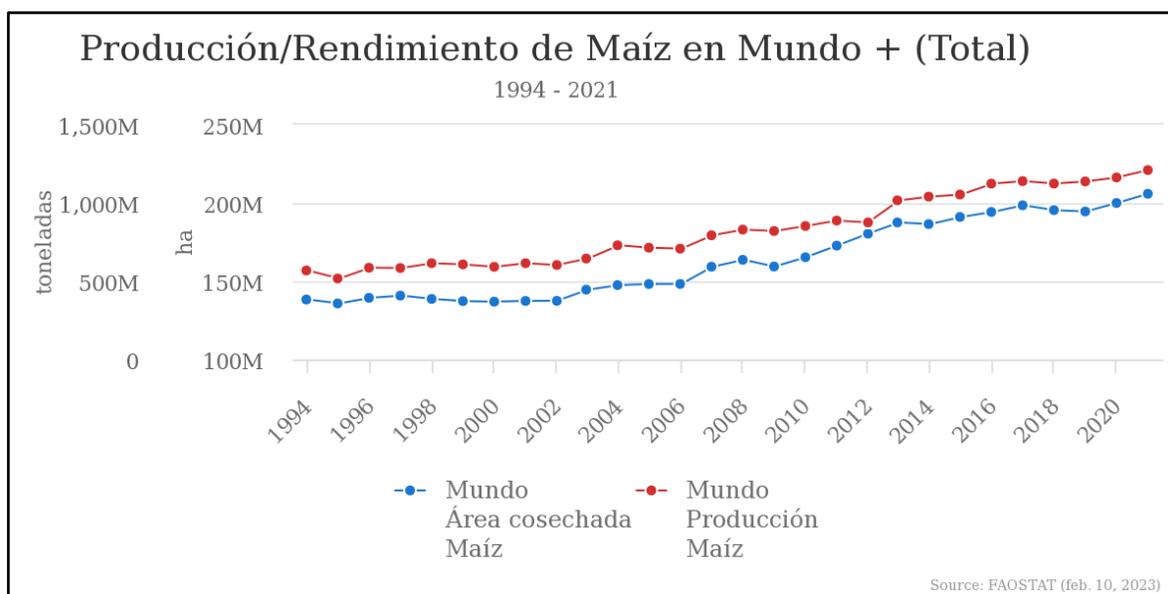
El maíz es el cultivo más importante en México ya que además de ser considerado un elemento básico en la alimentación, forma parte importante del patrimonio cultural de la identidad de los mexicanos, por lo tanto, posee importancia social y económica (CONABIO, 2012 y SIAP, 2019).

### **1.2.8 Importancia social del maíz**

El maíz es la base de la alimentación y principal fuente nutricional, ya que aporta del 7 al 13% de las proteínas y contiene tres grupos de proteínas principales: proteínas de almacenamiento, enzimas presentes en el metabolismo y proteínas estructurales (Zarcadas *et al.*, 2000). Los productores de los entornos rurales cultivan variedades locales de maíz siguiendo prácticas tradicionales en pequeñas extensiones, siendo parte fundamental del autoconsumo, por esta razón forma parte fundamental de la identidad, las tradiciones y la cultura de las comunidades (FAO, 1993).

### 1.2.9 Importancia económica

En todo el mundo se observó un cambio en la producción y rendimiento del maíz, se siembran alrededor de 205.87 millones de hectáreas de donde se obtiene una producción de 1 210.24 millones de toneladas al año. En el periodo de 1994-2021 se destaca un incremento en la producción de maíz (Fig. 1) (FAO, 2021).

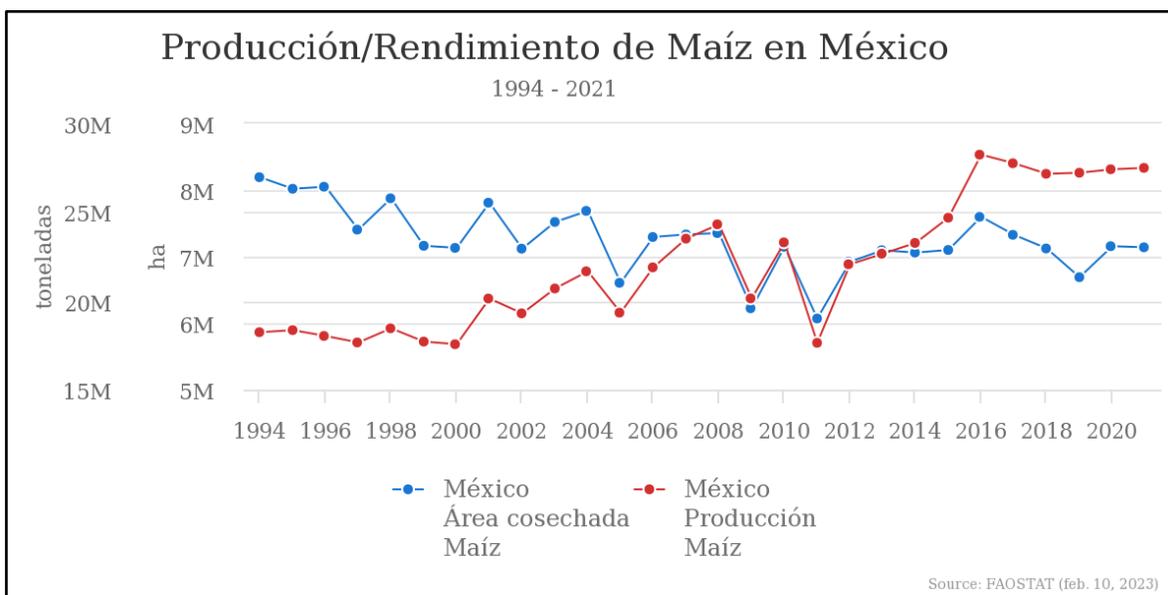


**Figura 1.** Producción y rendimiento de maíz en todo el mundo.

En México, el maíz es el cultivo más importante ya que ocupa la mayor parte de la superficie de producción (Saravia, 2013). En el año 2017 la superficie de maíz sembrada fue de 7.5 millones de hectáreas y se alcanzó una producción de 27.8 millones de toneladas. En el año 2019 la superficie sembrada fue de 7.1 millones de hectáreas y la producción fue de 21.1 millones de toneladas, gran parte del territorio tiene las condiciones para el cultivo de maíz, por esta razón se produce maíz en los 32 estados de la república mexicana. Los principales estados productores son Sinaloa (29.2%), Jalisco (9.17%), Guanajuato (6.7%), Michoacán (6.92%), México (5.3%) y Chihuahua (6.3%) (SIAP, 2019).

De acuerdo con datos de la FAO la producción y el rendimiento del maíz ha mostrado modificaciones en sus datos, donde se observa que entre el 2010-2012 hay una disminución

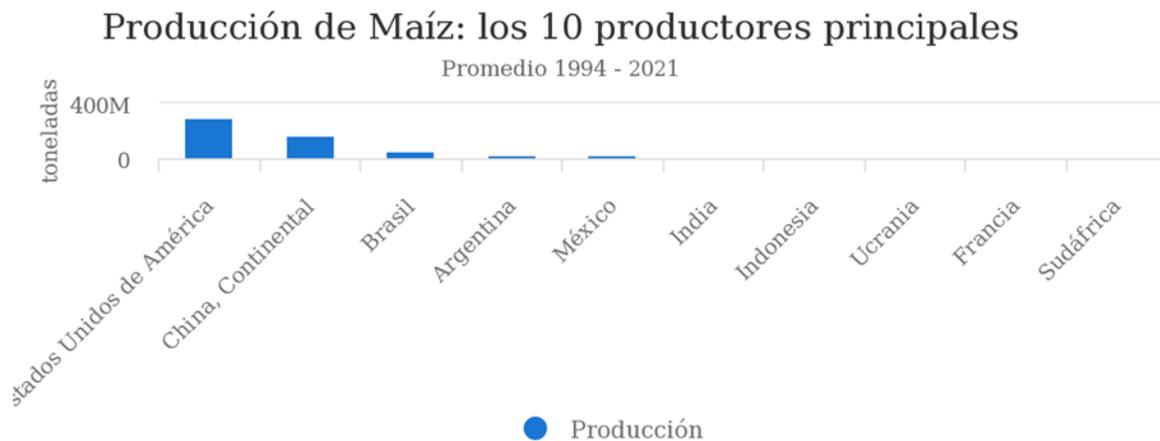
en los valores de producción y a partir del año 2018 se vuelve a presentar una tendencia a la disminución en los valores (Fig. 2) (FAOSTAT, 2021).



**Figura 2.** Tendencias de la producción de Maíz en México

### 1.2.10 Problemáticas a las que se enfrenta el cultivo de maíz

Los cultivos siempre están expuestos a condiciones ambientales que pueden ser perjudiciales ya que ocasionan diferentes tipos de estrés en las plantas, uno de los problemas más importantes es la sequía; es considerado el estrés abiótico que conduce a mayores pérdidas en la producción de los cultivos. Se espera que el cambio climático aumente la temperatura del ambiente y ocasione patrones irregulares en la precipitación, esto aumentara la frecuencia y la gravedad de las sequías (Wilson *et al.*, 2009; Campos *et al.*, 2004). La mayoría de los cultivos de maíz son de temporal y, por lo tanto, se ven expuestos a déficits hídrico que disminuyen los rendimientos en la producción y en consecuencia disminuyen los beneficios económicos (Boyer, 2004; Bruce *et al.*, 2002). Por esta razón, México enfrenta una reducción en el rendimiento de los cultivos de maíz con un valor promedio de 4.23 t/ha, mientras que en otros países como Estados Unidos se registra un rendimiento promedio de 10.96 t/ha (USDA, 2018), ocupando el 5° lugar entre los productores principales de maíz (Fig. 3) (FAO, 2021).



Source: FAOSTAT (feb. 10, 2023)

**Figura 3.** Principales países productores de maíz.

### 1.2.11 Investigaciones realizadas

Barnaby *et al.*, (2013) evaluaron la respuesta al estrés hídrico en híbridos de maíz y observaron una disminución en los valores de crecimiento, intercambio de gases, potencial hídrico y presencia de metabolitos secundarios en los híbridos susceptibles a la sequía, por otro lado, en los híbridos de maíz con tolerancia al estrés hídrico encontraron mayor acumulación de metabolitos.

Sun *et al.*, (2013) midió el potencial hídrico de la hoja, parámetros fotosintéticos y concentración de metabolitos secundarios de plántulas de maíz endogámico en condiciones de déficit hídrico y rehidratación. Estos autores, identificaron un total de 142 metabolitos de los cuales 59 mostraron cambios a medida que las plantas eran sometidas a las condiciones de estrés hídrico. De igual manera reportaron una reducción en el potencial hídrico y en la tasa de fotosíntesis cuando las plantas se encontraban en condiciones de estrés.

Por otro lado, Sicher y Barnaby (2012) evaluaron el efecto del estrés hídrico en tres variedades de maíz y encontraron que, las plantas expuestas a condiciones de déficit hídrico presentaron una disminución en el crecimiento de la planta, sin embargo, el crecimiento de las raíces no se mostró afectado. Lo mismo ocurre con el potencial hídrico ya que las plantas del tratamiento control presentan los valores más altos, mientras que las plantas bajo condiciones de déficit hídrico muestran una disminución en sus valores. En el perfil metabólico reportaron 33 metabolitos, de los cuales 28 presentaron variaciones en las

concentraciones por efecto del estrés por sequía. Se identificaron cuatro grupos jerárquicos, donde se incluyen compuestos que disminuyen con el estrés hídrico, compuestos involucrados en el ajuste osmótico y compuestos aromáticos que alivian el estrés oxidativo.

Efeoglu *et al.*, (2008) evaluaron las respuestas fisiológicas de dos cultivares de maíz en condiciones de estrés por sequía. Midieron el crecimiento de la planta a través de la altura, biomasa fresca y seca. De igual manera cuantificaron la concentración de prolina en las hojas de maíz y observaron que las plantas en condiciones de estrés presentaban una disminución en el crecimiento, sin embargo, durante la etapa de recuperación, las plantas nuevamente continuaron con su crecimiento. En cuanto al contenido de prolina se observó un aumento en las concentraciones en los tratamientos de estrés por sequía y una disminución durante la etapa de recuperación.

### **1.3 HIPÓTESIS**

Las plantas sometidas a niveles más altos de estrés hídrico son afectadas en sus características morfológicas, presentan una reducción en la fotosíntesis, aumentan su tasa de respiración, aumentan la concentración de prolina y reducen la concentración de metabolitos secundarios totales.

### **1.4 OBJETIVOS**

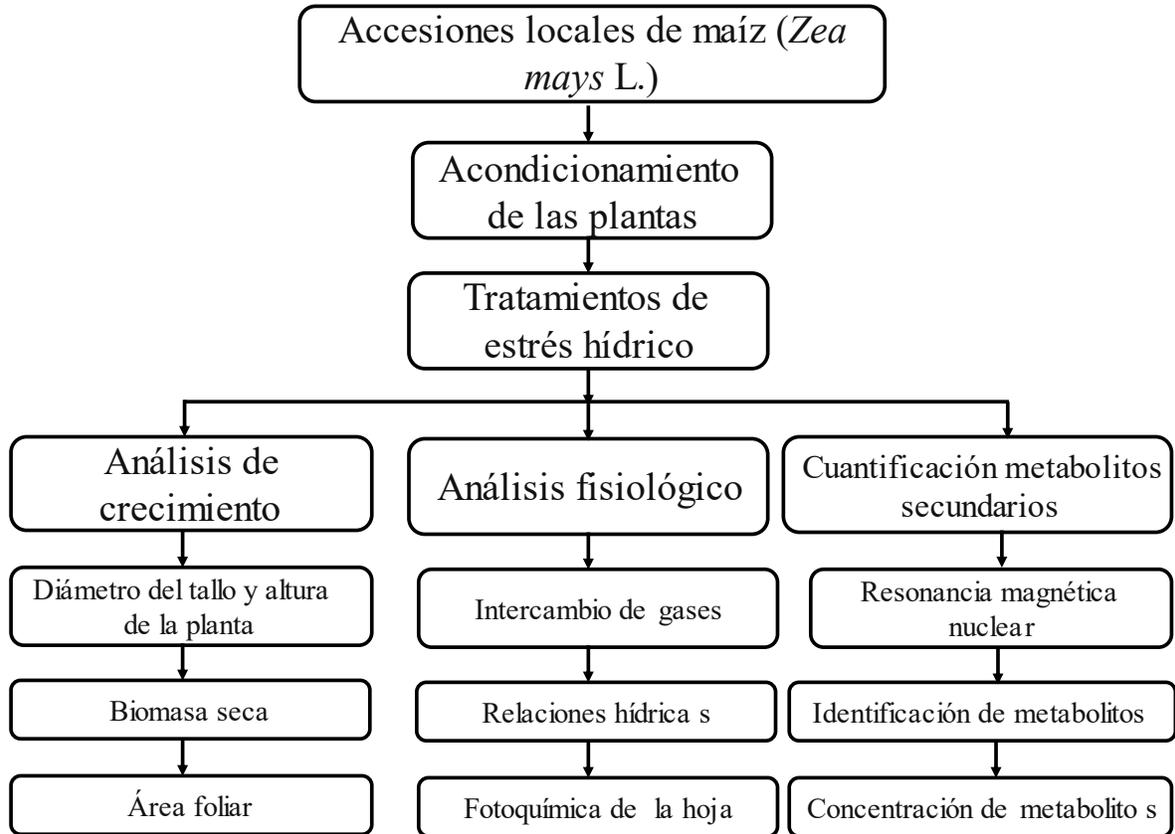
#### 1.4.1 Objetivo general:

Evaluar la tolerancia al estrés hídrico de variedades locales de maíz (*Zea mays* L.) con base en el crecimiento de la planta, respuestas fisiológicas y la acumulación de metabolitos secundarios.

#### 1.4.2 Objetivos específicos:

- Evaluar el crecimiento de variedades locales de maíz bajo diferentes niveles de estrés hídrico.
- Evaluar el intercambio de gases, las relaciones hídricas y la fotoquímica de la hoja de variedades locales de maíz sometidas a diferentes niveles de estrés hídrico.
- Determinar la concentración de metabolitos secundarios de las variedades locales de maíz, como respuesta a los diferentes niveles de estrés hídrico.

## 1.5 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL



## 1.6 LITERATURA CITADA

- Acosta, R. (2009). El cultivo del maíz, Su origen y clasificación. EL MAIZ en Cuba. Cultivos Tropicales, 30(2), 00-00.
- Araus JL, Serret MD, Edmeades GO (2012). Fenotipado del maíz para la adaptación a la sequía. *Front Physiol* 3: 305. PubMed: 22934056.
- Boyer, J. S. (2004). Grain yields with limited water. *Journal of Experimental Botany*, 55(407), 2385–2394. doi:10.1093/jxb/erh219
- Bruce, W. B., Edmeades, G. O., & Barker, T. C. (2002). Molecular and physiological approaches to maize improvement for drought tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 53(366), 13–25. doi:10.1093/jexbot/53.366.13
- Cabrerizo, C. (2012). “El maíz en la alimentación Humana”. Disponible en: [www.infoagro.com](http://www.infoagro.com).
- Campos, H., Cooper, M., Habben, J. E., Edmeades, G. O., & Schussler, J. R. (2004). Improving drought tolerance in maize: a view from industry. *Field Crops Research*, 90(1), 19–34. doi:10.1016/j.fcr.2004.07.003
- CIMMYT (2014). Genomic prediction in CIMMYT maize and wheat breeding programs. *Heredity*, 112(1), 48-60.
- CONABIO. (2012). Biodiversidad mexicana, “Razas de maíz de México”, <http://www.biodiversidad.gob.mx/usos/maices/razas>.
- Efeoğlu, B., Ekmekçi, Y., & Çiçek, N.U.R.A.N. (2009). Physiological responses of three maize cultivars to drought stress and recovery. *South African journal of botany*, 75(1), 34-42.
- Hernández E (1985). Maize and man in the greater SW. *Economic Botany* 39 (4):416-430).
- Iltis, H. H. (2006). Origin of polystichy in maize. *Histories of Maize: Multidisciplinary Approaches to the Prehistory, Linguistics, Biogeography, Domestication and Evolution of Maize*. Elsevier, Burlington, MA, 21-51.

- Kato, T. A., Mapes, C., Mera, L. M., Serratos, J. A., & Bye, R. A. (2009). Origen y diversificación del maíz: Una revisión analítica. Universidad Nacional Autónoma de México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, DF, 116.
- Morales, E. R. B. (2015). Manejo de cultivos andinos del Ecuador. Comisión Editorial de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, 145.
- Ortiz Vallejo, C. D. (2017). Sistema productivo para la conservación de una variedad de maíz criollo (*Zea mays* L.), como proyecto demostrativo en el municipio de Fortul departamento de Arauca.
- Paliwal, R. L. (2001). Los ambientes de cultivo del maíz. En: Paliwal, R. L.; Granados, G.; Lafitte, H. R.; Violic, A. D. y Marathée, J. P. (Eds.). El maíz en los trópicos. Mejoramiento y producción. Colección FAO: Producción y Protección Vegetal 28. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma. pp. 57-60.
- Riveiro, S. (2004). El día en que muera el sol: contaminación y resistencia en México. GRAIN.
- Sánchez, I. (2014). Maíz I (*Zea mays*). Reduca (Biología). Serie Botánica, 7(2), 151– 171.
- Sistema de Información Agroalimentario y Pesquero. (2019), “Producción Agrícola” [https://nube.siap.gob.mx/avance\\_agricola/](https://nube.siap.gob.mx/avance_agricola/)
- Sicher RC, Barnaby JY (2012) Impacto del enriquecimiento con dióxido de carbono en las respuestas de los transcritos y metabolitos de la hoja de maíz al estrés hídrico. *Physiol Plant* 144(3): 238-253.
- Sun, C. B., Fan, X. W., Hu, H. Y., Liang, Y., Huang, Z. B., Pan, J. L., ... & Li, Y. Z. (2013). Pivotal metabolic pathways related to water deficit tolerance and growth recovery of whole maize plant. *Plant Omics*, 6(6).
- Wilson PB, Estavillo GM, Field KJ, Pornsiriwong W, Carroll AJ, Howell KA, Woo NS, Lake JA, Smith SM, Harvey Millar A, von Caemmerer S, Pogson BJ (2009). La

nucleotidasa/fosfatasa SAL1 es un regulador negativo de Tolerancia a la sequía en *Arabidopsis*. *Plant J.* 58:299-317.

Valladares, C. (2010). *Taxonomía y Botánica de los Cultivos de Grano*. Universidad Nacional Autónoma de Honduras centro universitario regional del litoral Atlántico (CURLA), departamento de producción vegetal asignatura cultivos de grano Sección, 10 (01).

## CAPITULO II

### EFFECTO DEL ESTRÉS HÍDRICO EN LA FISIOLÓGÍA Y METABOLÓMICA DE SEIS ACCESIONES LOCALES DE MAÍZ (*Zea mays* L.)

#### 2.1 RESUMEN

El cambio climático ha traído como consecuencia el aumento de las temperaturas y patrones irregulares de precipitación, factores que limitan la producción del maíz en los sistemas de producción tradicional. Evaluar y seleccionar variedades locales de maíz que tengan la capacidad de tolerar la sequía es una de las estrategias que podría ser fundamental para mantener o aumentar la productividad. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue evaluar la tolerancia al estrés hídrico de accesiones locales de maíz (*Zea mays* L.) con base en el crecimiento de la planta, respuestas fisiológicas y la acumulación de metabolitos secundarios. Seis variedades locales de maíz fueron sembradas en condiciones de invernadero y sometidas a estrés hídrico con diferentes niveles de humedad: 100% (control), 70% (estrés medio) y 30% (estrés severo) durante 75 días. Se evaluaron variables morfológicas, fisiológicas y acumulación de metabolitos secundarios en las plantas. La accesión 36 en condiciones de riego al 30% presentó los valores más altos de asimilación de CO<sub>2</sub> y uso eficiente del agua. La accesión 36 no alcanzó su punto de saturación al realizar las curvas de respuesta a la saturación. Los perfiles metabólicos de las accesiones fueron similares, solamente se encontraron diferencias en las concentraciones de los metabolitos. La accesión 36 en condiciones de estrés hídrico al 30% presento mayor concentración de prolina.

**Palabras clave:** Cambio climático, sequía, variedades locales, tolerancia, estrés hídrico.

Estudiante: Reyna Marisol Lizama Cime    Correo: [marisol\\_lizama@live.com.mx](mailto:marisol_lizama@live.com.mx)

Director: Dr. Rubén Humberto Andueza Noh    Correo: [ruben.andueza@itconkal.edu.mx](mailto:ruben.andueza@itconkal.edu.mx)