



UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN  
Campus Loma Bonita

---

INGENIERÍA AGRÍCOLA TROPICAL

**SIMULACIÓN DE BIOMASA DE MAÍZ (*Zea mays*) NATIVO CON EL  
MODELO AQUACROP PARA LOS AÑOS 2030 Y 2050 EN LOMA  
BONITA OAXACA**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO AGRÍCOLA TROPICAL

PRESENTA:

**MARDOQUEO GONZÁLEZ AGUILAR**

DIRECTOR DE TESIS:

**DR. JOSÉ ANTONIO YAM TZEC**



# UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

Campus Loma Bonita

LA PRESENTE TESIS TITULADA "SIMULACIÓN DE BIOMASA DE MAIZ (*Zea mays*) NATIVO CON EL MODELO AQUACROP PARA LOS AÑOS 2030 Y 2050 EN LOMA BONITA, OAXACA", PRESENTADA POR EL PASANTE MARDOQUEO GONZÁLEZ AGUILAR, BAJO LA DIRECCIÓN DEL DR. JOSÉ ANTONIO YAM TZEC, HA SIDO APROBADA POR LA COMISIÓN REVISORA Y ACEPTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO AGRÍCOLA TROPICAL.

## COMISIÓN REVISORA

---

DR. JOSÉ ANTONIO YAM TZEC  
DIRECTOR DE TESIS

---

DR. HIPÓLITO HERNÁNDEZ  
HERNÁNDEZ  
REVISOR

---

DR. JOSÉ ORBELIN GUTIÉRREZ  
HERNÁNDEZ  
REVISOR

LOMA BONITA, OAXACA, MÉXICO. 2022



# Universidad del Papaloapan

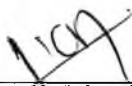
FECHA:	18 de Marzo del 2022
ÁREA:	Vice-Rectoría Académica
OFICIO NUMERO:	UNPA/VRA/068/2022
ASUNTO:	Autorización de Impresión de tesis.

**C. MARDOQUEO GONZÁLEZ AGUILAR**  
**P R E S E N T E:**

En base al artículo 120 del reglamento de alumnos, por medio de la presente se aprueba la impresión de la tesis titulada **“SIMULACION DE BIOMASA DE MAIZ (*Zea mays*) NATIVO CON EL MODELO AQUACROP PARA LOS AÑOS 2030 Y 2050 EN LOMA BONITA, OAXACA”** así como la programación del examen profesional bajo la dirección del Dr. José Antonio Yam Tzec.

Sin más por el momento aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

Atentamente.  
terra ubérrima, mens aperta  
Bou Lo-tama, chi jí jú

  
MC. HÉCTOR LÓPEZ ARJONA  
Vice-Rector Académico.



C.c.p. Dr Rogelio Enrique Palacios Torres Jefe de Carrera de la Ingeniería agrícola Tropical  
C.c.p. L.P. Yesenia Barrientos Arrenal. Jefa del Departamento de Servicios Escolares  
C.c.p. Dr. José Antonio Yam Tzac. Director de tesis.  
C.c.p. Archivo.

**OAXACA**



# UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

## CAMPUS LOMA BONITA

Oficio No. JCIAT/33/22

Loma Bonita, Oaxaca a 17 de marzo de 2022

**M.E. YESENIA BARRIENTOS ARENAL**  
**JEFA DEL DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES**  
**PRESENTE**

Por este medio le comunico que la Jefatura de Carrera a mi cargo ha designado como jurado del proyecto de tesis titulado **"SIMULACIÓN DE BIOMASA DE MAÍZ (*Zea mays*) NATIVO CON EL MODELO AQUACROP PARA LOS AÑOS 2030 Y 2050 EN LOMA BONITA, OAXACA"**, para examen de titulación del egresado **C. MARDOQUEO GONZÁLEZ AGUILAR**, a los profesores:

Presidente: Dr. Hipólito Hernández Hernández  
Secretario: Dr. José Orbelin Gutiérrez Hernández  
Vocal: Dr. José Antonio Yam Tzec

Como suplentes:  
Dra. Ana Rosa Ramírez Seañez  
Dr. Rogelio Enrique Palacios Torres

Sin más por el momento, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

**Atentamente**

*"Terra Uberrima, mens aperta"*  
*Bou Lo tãma, Chi Ji Jú*

**Dr. Rogelio Enrique Palacios Torres**  
Jefe de la Carrera de Ingeniería Agrícola Tropical



INGENIERÍA  
AGRÍCOLA  
TROPICAL

17 MAR 2022  
UNPA  
VIC  
1809

Vo.Bo

**M.C. Héctor López Arjona**  
Vice-Rector Académico

c.c.p. Archivo

## **AGRADECIMIENTO**

Gracias a Dios, por darme la oportunidad de vivir, por mantenerme con salud, por darme las fuerzas para culminar este proyecto, por estar conmigo en cada paso que doy, por iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas tan maravillosas que han sido mi soporte y compañía en estos cinco años.

A la Universidad del Papaloapan (Campus Loma Bonita) terra ubérrima, mens aperta (Bou Lo-tama, chi jí jú) por darme la oportunidad de seguir estudiando y terminar mi licenciatura, por el apoyo y oportunidades que me ha dado para desarrollarme como profesionalista. Por siempre te llevaré en mi corazón.

Al doctor José Antonio Yam Tzec, por ser un maestro ejemplar y compartir su experiencia conmigo.

Al Dr. Hipólito Hernández Hernández y el Dr. José Orbelin Gutiérrez Hernández por ser personas increíbles, apoyarme y brindarme sus experiencias.

Y a todos mis maestros por sus enseñanzas y experiencias compartidas, durante mi formación en la carrera de Ingeniería Agrícola Tropical.

## **DEDICATORIA**

De forma muy especial a mis padres: María Socorro Aguilar González e Hipólito González Martínez, por ser el pilar fundamental de mi vida, por estar conmigo en las buenas y en las malas, por creer en mi en todo momento, por el apoyo incondicional y por la motivación que siempre me dieron para lograr lo que un día me propuse.

A mis hermanos: Elide, Natanael y Séfora, que me brindaron su apoyo en todo momento, en diferentes aspectos y por creer en mí, los quiero mucho.

A mis hijos: Alexander y Miller Eduardo por ser mi motor para seguir adelante.

A Qaty por ser la persona muy especial y estar conmigo en todo momento y brindarme su apoyo incondicional.

A mi cuñado Eleazar, por ofrecerme siempre su apoyo  
y para todos mis amigos.

## CONTENIDO

AGRADECIMIENTO .....	I
DEDICATORIA .....	II
CONTENIDO.....	III
ÍNDICE DE TABLAS.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
RESUMEN .....	VIII
ABSTRACT.....	X
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>5</b>
2.1 Objetivo General .....	5
2.2 Objetivos Específicos.....	5
<b>4. REVISIÓN DE LITERATURA.....</b>	<b>7</b>
4.1 Origen del maíz .....	7
4.2. Importancia del cultivo de maíz en el mundo.....	7
4.3 Importancia del cultivo de maíz en México .....	8
4.5 Descripción taxonómica.....	9
4.6.1 Raíz.....	9
4.5.2 Tallo.....	10
4.5.3 Hojas .....	10
4.5.4 Flores.....	10
4.5.5 Fruto y semilla.....	10
4.6 Exigencias agroecológicas del cultivo .....	11
4.6.1 Clima .....	11
4.6.2 Riego .....	11
4.6.3 Época de siembra.....	11
4.7 Labores culturales .....	12
4.7.1 Densidad de siembra .....	12
4.7.2 Preparación de terreno.....	12
4.7.3 Fertilización.....	12
4.7.4 Control de maleza .....	13
4.7.5 Cosecha.....	13

4.8. Plagas y enfermedades .....	13
4.8.1 Plagas .....	13
4.8.2 Enfermedades .....	14
4.9 Modelos de simulación en el cultivo de Maíz .....	14
4.9.1 El modelo AquaCrop .....	15
4.9.2 Investigaciones realizadas con el modelo AquaCrop .....	19
4.10 Escenarios de cambio climático .....	20
<b>5. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>23</b>
5.1 Localización .....	23
5.2 Establecimiento del experimento .....	23
5.3 Variables registradas .....	24
5.4 Parámetros climatológicos registrados y/o calculados .....	25
5.5 Software utilizado .....	28
5.6 Análisis de datos .....	29
<b>6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>31</b>
6.1 Cálculo de evapotranspiración de referencia (ETo) .....	31
6.2 Ajustes del software .....	38
6.3 Datos del clima .....	38
6.4 Parámetros de cultivo .....	39
6.5 Prácticas de manejo .....	42
6.6 Perfil de suelo .....	42
6.7 Datos morfológicos de la planta para la calibración .....	44
6.7.1 Longitud de raíz .....	44
6.7.2 Longitud de tallo .....	44
6.7.3 Longitud de la hoja .....	46
6.7.4 Grosor del tallo .....	46
6.7.5 Biomasa .....	47
6.8 Datos de cultivo para calibración .....	49
6.9 Simulación de la biomasa para el año 2020 .....	54
6.9.1 Periodo de simulación .....	54
6.9.2 Condiciones Iniciales .....	54
6.9.3 Rotación de cultivos .....	55
6.11 Simulación del crecimiento de raíz para el año 2020 .....	59

6.12 Simulación de la producción de biomasa para el año 2020 .....	60
6.13 Producción de biomasa, crecimiento de raíz y rendimiento bajo escenarios de cambio climático.....	62
<b>7. CONCLUSIONES.....</b>	<b>66</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>67</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b>	Clasificación taxonómica del cultivo de maíz.....	9
<b>Tabla 2.</b>	Propiedades físicas del suelo donde se llevó a cabo el experimento.....	24
<b>Tabla 3.</b>	VARIABLES meteorológicas a utilizar en el modelo.....	27
<b>Tabla 4.</b>	Valores utilizados para la calibración del modelo. ....	50
<b>Tabla 5.</b>	Indicadores de biomasa y crecimiento de raíz de maíz nativo. ....	57

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b>	Diagrama de flujo de AquaCrop (Sánchez-Sastre <i>et al.</i> , 2011). ....	15
<b>Figura 2.</b>	Datos de entrada que definen el ambiente en el cual se desarrolla el cultivo (Steduto <i>et al.</i> , 2012) .....	16
<b>Figura 3.</b>	Menú del programa ETo calculator.....	32
<b>Figura 4.</b>	Creación de nombre de archivo del lugar de estudio.....	33
<b>Figura 5.</b>	Ventana de confirmación de datos meteorológicos.....	34
<b>Figura 6.</b>	Selección de variables para el cálculo de la ETo en el simulador AquaCrop. ....	35
<b>Figura 7.</b>	Valores de ETo obtenidos con datos de la (EMA) de Loma Bonita.....	36
<b>Figura 8.</b>	Menú de los límites de datos meteorológicos.....	36
<b>Figura 9.</b>	Evapotranspiración de referencia (ETo) por meses. ....	37
<b>Figura 10.</b>	Menú de los datos para el reporte de la ETo para el sitio experimental.....	37
<b>Figura 11.</b>	Menú principal del programa AquaCrop para el ingreso de los datos. ....	38
<b>Figura 12.</b>	Datos de clima: a) descripción, b) lluvia, c) evapotranspiración de referencia y d) dióxido de carbono atmosférico. ....	39
<b>Figura 13.</b>	Datos de cultivo: a) parámetros de cultivo, b) desarrollo del dosel del cultivo, c) desarrollo del cultivo sin estrés hídrico, de fertilidad o salinidad, d) calendario del cultivo sin estrés hídrico, de fertilidad o salinidad.....	41
<b>Figura 14.</b>	Práctica de manejo: a) Superficie mojada en cada riego, b) ventana de ingreso del calendario de riego. ....	42
<b>Figura 15.</b>	Perfil del suelo: a) descripción, b) características de los horizontes del suelo, c) superficie del suelo y d) aumento capilar. ....	43
<b>Figura 16.</b>	Longitud de raíz de maíz criollo durante el ciclo del cultivo, a partir de los días 35 a 90 después de la siembra, $\pm$ el error de la desviación estándar. ....	44

<b>Figura 17.</b>	Comportamiento de la altura de tallo de maíz criollo durante el ciclo del cultivo, a partir de los días 35 después de la siembra hasta los días 90 después de la siembra. Los datos de cada barra representan la media $\pm$ la desviación estándar. ....	45
<b>Figura 18.</b>	Longitud de la hoja madura de maíz criollo durante el ciclo del cultivo, a partir de los días 35 después de la siembra hasta los días 90 después de la siembra. Los datos de cada barra representan la media $\pm$ la desviación estándar.....	46
<b>Figura 19.</b>	Grosor de tallo de maíz criollo, a partir de los días 35 después de la siembra hasta los días 90 después de la siembra. Los datos de cada barra representan la media $\pm$ la desviación estándar. ....	47
<b>Figura 20.</b>	Peso seco de biomasa total de maíz criollo a partir de los días 35 después de la siembra hasta los días 90 después de la siembra. Los datos de cada barra representan la media $\pm$ la desviación estándar.....	48
<b>Figura 21.</b>	Peso fresco de biomasa total de maíz criollo a partir de los días 35 después de la siembra hasta los días 90 después de la siembra. Los datos de cada barra representan la media $\pm$ la desviación estándar.....	49
<b>Figura 22.</b>	Periodo de simulación.....	54
<b>Figura 23.</b>	Condiciones iniciales, antes de la simulación .....	55
<b>Figura 24.</b>	Menú de selección para una sola ejecución .....	56
<b>Figura 25.</b>	Simulación de raíz vs observado del año 2020. ....	59
<b>Figura 26.</b>	Línea de tendencia de los datos observados y simulados en la regresión lineal simple de la raíz. ....	60
<b>Figura 27.</b>	Biomasa del maíz criollo en el año 2020 simulado contra los observado. ....	60
<b>Figura 28.</b>	Línea de tendencia de los datos observados y simulados en la regresión lineal simple de la biomasa.....	61
<b>Figura 29.</b>	Simulación de biomasa de maíz criollo para los años 2030 y 2050. ....	62
<b>Figura 30.</b>	Simulación de raíz de maíz nativo para los años 2030 y 2050.....	64
<b>Figura 31.</b>	Rendimientos promedios de maíz nativo para los años 2030 y 2050. ....	65

**SIMULACIÓN DE BIOMASA DE MAÍZ (*Zea Mays*) NATIVO CON EL  
MODELO AQUACROP PARA LOS AÑOS 2030 Y 2050 EN LOMA BONITA  
OAXACA**

MARDOQUEO GONZÁLEZ AGUILAR

GRADO: Ingeniero Agrícola Tropical

Universidad del Papaloapan, 2022

**RESUMEN**

El maíz es uno de los tres principales cereales más importante a nivel mundial, para México es considerado como un grano básico, debido a que alimenta a millones de personas, y es utilizado para el insumo en el sector ganadero. México se caracteriza por tener una gran variabilidad de maíz, como es el maíz criollo, donde sigue siendo la base de la agricultura campesina. Muchas entidades de la república mexicana cultivan el maíz, entre ellos los estados de Sinaloa, Jalisco, Michoacán y Estado de México. En el año 2020 se obtuvo una producción de 27,424,527.55 toneladas a nivel nacional. El estado de Oaxaca ocupa el sexto lugar nacional en cuanto a superficie dedicada a este cultivo. Los maíces criollos desempeñan un papel importante para los agricultores, las razones por las que lo prefieren es que con ese tipo de maíz pueden realizar diferentes tipos de aprovechamiento, la preferencia radica en que la mayoría de los productores lo cultivan bajo condiciones de temporal y esto les ha permitido adaptarlo en diferentes condiciones de clima, creando resistencia a sequías, plagas y enfermedades. Actualmente se usan diferentes tipos de modelos dentro de la agricultura, la cual ha surgido como una alternativa en la planificación e investigación. En el presente trabajo se calibró y simuló el modelo AquaCrop. Para la calibración fueron necesarios los parámetros de entrada como lo son: clima, cultivo, suelo y manejo donde se estableció el experimento. Después de realizar la calibración, se simuló y se observó un buen ajuste de los datos medidos

contra los simulados con base en los indicadores propuestos. Bajo escenarios de cambio climático, los rendimientos de grano para los años 2020 y 2030 no reportan disminución, sin embargo, para el año 2050 si habrá una disminución de aproximadamente una tonelada por hectárea. Los bajos rendimientos para el año 2050 se deben por las diferencias de temperatura y de precipitación provocando problemas en el desarrollo de la floración y en el rendimiento del cultivo de maíz.

**Palabras clave:** calibración, cambio climático, rendimiento de maíz.

**SIMULATION OF BIOMASS OF NATIVE CORN (*Zea Mays*) WITH THE  
AQUACROP MODEL FOR THE YEARS 2030 AND 2050 IN LOMA BONITA  
OAXACA**

MARDOQUEO GONZÁLEZ AGUILAR

GRADO: Ingeniero Agrícola Tropical

Universidad del Papaloapan, 2022

**ABSTRACT**

Corn is one of the three most important cereals worldwide, for Mexico it is considered a basic grain, because it feeds millions of people, and is used for input in the livestock sector. Mexico is characterized by having a great variability of corn, such as Creole corn, where it continues to be the basis of peasant agriculture. Many entities of the Mexican Republic grow corn, including the states of Sinaloa, Jalisco, Michoacán and the State of Mexico. In 2020, a production of 27,424,527.55 tons was obtained nationwide. The state of Oaxaca occupies the sixth national place in terms of area dedicated to this crop. Creole corn plays an important role for farmers, the reasons why they prefer it is that with this type of corn they can make different types of use, the preference is that most producers grow it under temporary conditions and this It has allowed them to adapt it to different weather conditions, creating resistance to droughts, pests and diseases. Different types of models are currently used within agriculture, which has emerged as an alternative in planning and research. In the present work, the AquaCrop model was calibrated and simulated. For the calibration, the input parameters were necessary, such as: climate, crop, soil and management where the experiment was established. After performing the calibration, it was simulated and a good fit of the measured data against the simulated data was observed based on the proposed indicators. Under climate change scenarios, grain yields for the

years 2020 and 2030 do not report a decrease, however, for the year 2050 there will be a decrease of approximately one ton per hectare. The low yields for the year 2050 are due to differences in temperature and precipitation, causing problems in the development of flowering and in the yield of the corn crop.

**Keywords:** Calibration, Climatic change, corn performance.

**Revision by:** Cheryl Lynn Gad

JEFA DEL CENTRO DE IDIOMAS, UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN, CAMPUS LOMA BONITA, OAXACA.

**Date:** March 22<sup>th</sup>, 2022

## 1. INTRODUCCIÓN

El maíz es considerado como uno de los principales cereales en el mundo y su importancia no solo es para el consumo humano, sino que también es muy importante para el insumo en la producción del sector ganadero; al mismo tiempo se considera un grano básico para la población mexicana, porque alimenta a millones de familias. En 2010 el maíz fue uno de los cultivos más importantes a nivel mundial en donde se produjo 840.3 millones de toneladas (mt), después de la caña de azúcar (1,71.1 mt) y en tercer lugar el arroz (696.3 mt) (Guzmán-Soria *et al.*, 2014). Los países que más producen este cereal a nivel mundial son (en millones de toneladas métricas) Estados Unidos (361.1), China (215.8), Brasil (79.9), Argentina (33.1), Ucrania (28.5), India (24.2), México (23.3), Indonesia (19.0), Santana Francia (18.3) y Sudáfrica (14.2), en donde el 63% de la producción lo aportan los tres primeros países (Carvajal y Caviedes, 2019). En México la demanda no se satisface internamente; por tanto, se tiene que depender de otros países, principalmente de Estados Unidos con hasta el 98 % de las importaciones.

Muchas entidades de la república cultivan el maíz, entre ellos los estados de Sinaloa, Jalisco, Michoacán y Estado de México (Santana-Robles *et al.*, 2018). En el año 2020 se obtuvo una producción de 27,424,527.55 toneladas a nivel nacional, los estados antes mencionados producen el 51.4 %. Otros estados representativos son: Guanajuato, Guerrero, Chihuahua, Veracruz, Chiapas y Puebla, estos estados tienen una participación de 29.2%, mientras que el resto del país participan con 19.4%.

El estado de Oaxaca ocupa el sexto lugar en cuanto a superficie dedicada a este cultivo con 511 mil 944.43 ha, mismas que produjeron 725 mil 832.93 toneladas de maíz, con

rendimientos promedio de 1.42 t ha<sup>-1</sup> (SIAP, 2020). Sin embargo, los datos recabados por el Gobierno estatal en el año 2013 afirman que el estado tiene un déficit de la producción de 180 mil toneladas anuales, por lo que se han implementado programas estatales como el Programa Estatal de Semillas Certificadas de Maíz. El programa consistió en ofrecer de manera gratuita a los productores de maíz de semilla mejorada certificada, para que los agricultores pudieran aumentar los rendimientos de sus cosechas. La implementación de dicho programa no tuvo el éxito deseado, ya que la adopción de semillas mejoradas se vio afectada por limitaciones para su difusión, la adaptación ambiental y a los aspectos culturales y gastronómicos, que no cumplen con las expectativas, usos y costumbres de los agricultores, por lo que los agricultores optaron por seguir utilizando maíz criollo (Luna-Mena *et al.*, 2016). La utilización de maíz criollo es debido a que se ha adaptado a la zona desde hace muchos años (Luna-Mena *et al.*, 2016). El estado de Oaxaca utiliza cerca del 90 % de su superficie para sembrar maíces criollos de diferentes razas, colores y textura (Salinas-Moreno *et al.*, 2013). En el caso particular del Municipio de Loma Bonita se siembran alrededor de 1480 hectáreas de este cereal con un rendimiento de 2.8 t ha<sup>-1</sup> (Sánchez-Hernández *et al.*, 2011). Los maíces criollos desempeñan un papel importante para los agricultores, las razones por las que lo prefieren es que con ese tipo de maíz pueden realizar diferentes productos, por ejemplo, obtener sus hojas (totomoxtle) que se utilizan para preparar tamales y hacer el pozole (platillo tradicional) en la mesa central de México (Hellin *et al.*, 2013).

La diversidad de maíz criollo continúa siendo la base de la agricultura campesina mexicana. Los factores que influyen en la conservación de los maíces nativos en orden de

importancia son los sistemas agroecológicos y las condiciones climáticas, aunados a los socioculturales; debido a que la mayoría de los productores cultivan en condiciones de temporal y son más adaptables; además, prefieren consumirlo por el sabor y quieren conservar su tradición de cultivarlo, porque así ha sido a través de varias generaciones al igual que los factores técnicos, dado que han identificado que los maíces criollos son más resistentes a plagas y enfermedades (Espinosa *et al.*, 2013). La preservación del maíz criollo y los sistemas tradicionales son fundamentales por su contribución en el desarrollo del conocimiento, tecnología y cultura de los pueblos americanos, principalmente en México (Pérez *et al.*, 2017). Uno de los problemas que se enfrentan los productores es el cambio climático (CC), que ya se está observando a nivel mundial. Se estima que como consecuencia de la acumulación de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, es posible que se presente un aumento de la temperatura y mayor variabilidad de la precipitación que afecta la agricultura y con ello, la seguridad alimentaria del planeta. El cultivo de maíz podría verse disminuida seriamente en su producción debido a los efectos adversos del CC (Ahumada-Cervantes *et al.*, 2014).

Actualmente se usan diferentes tipos de modelos dentro de la agricultura, la cual ha surgido como una alternativa de planificación e investigación, además ayuda a predecir el comportamiento de una planta con diferentes manejos, las características del suelo, la interacción de diferentes cultivos y el comportamiento de sistemas de producción con interacciones como el ganado y cultivos (Candelaria-Martínez *et al.*, 2011). De igual forma permite que los agricultores implementen medidas de manejo, la ubicación de sus cultivos y estrategias de mitigación y/o adaptación. Otros aspectos importantes son la toma de decisiones para evaluar el suelo en donde se desea cultivar, porque predicen el

requerimiento hídrico de cultivos y nos proporciona datos de un posible rendimiento y hasta el pronóstico en la reducción del mismo por efecto del cambio climático en un lugar específico (Cleves *et al.*, 2016).

Por lo anterior se destaca la importancia de conocer el impacto de este CC en la producción del maíz nativo y que sirvan para proponer alternativas de manejo que garanticen su preservación por las características técnicas y sociológicas que representa. En el presente trabajo se está proponiendo la calibración y simulación del modelo AquaCrop que permitirá saber cómo afectará estos cambios en el rendimiento del cultivo de maíz, que servirán para planear el proceso productivo.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo General**

- Calibrar y simular la producción de biomasa de maíz nativo para los años 2030 y 2050 en Loma Bonita, Oaxaca, utilizando el modelo AquaCrop desarrollado por la FAO.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Calibrar el modelo AquaCrop para el cultivo de maíz nativo en Loma Bonita Oaxaca para los años 2030 y 2050.
- Simular la producción de biomasa de maíz nativo para los años 2030 y 2050 con las limitaciones que se espera se generen por el cambio climático.

### **3. HIPÓTESIS**

- La producción de biomasa de maíz nativo para los años 2030 y 2050 en Loma Bonita, Oaxaca puede simularse con el modelo AquaCrop de la FAO.

## **4. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **4.1 Origen del maíz**

Actualmente Mesoamérica es uno de los ocho centros de origen donde se llevó a cabo la domesticación de varias plantas de mayor importancia, sobre todo el maíz, donde crecieron diferentes sociedades que han ocupado esta zona a lo largo de la historia (Carrillo, 2009). En México empezó a domesticar diferentes cultivos, entre ellos el maíz, frijol y la calabaza, dentro de los cuales se encontraron en las cuevas de Romero y Valenzuela muy cerca de Ocampo en Tamaulipas; las cuevas de Guild Naquitz en Oaxaca; las cuevas de Coxcatlán y San Marcos en Tehuacán Puebla (Smith, 1997). Sánchez (2000) afirma que en México hay una gran diversidad genética, donde representan un total de 59 razas. Por su parte Hellin *et al.* (2013) reporta que 56 razas son las que se han definida, por varias razones, tanto en ámbito social, económicas y culturales. Otro de las razones es por la confianza que tienen los productores con el maíz criollo por tener resistencia y por ser predecibles, en comparación con las variedades mejoradas, además lo prefieren por la adaptación que ha tenido con respecto al cambio climático (Hellin *et al.*, 2013). La preferencia que se tiene con el maíz criollo es por el uso que se le da, por ejemplo, obtener sus hojas (totomoxtle) que se utilizan para hacer los tamales y hacer el pozole (platillo tradicional) en la mesa central de México (Hellin *et al.*, 2013).

### **4.2. Importancia del cultivo de maíz en el mundo**

El maíz representa la seguridad alimentaria a nivel mundial y junto al arroz y el trigo son considerados los tres cereales más cultivados en el mundo. El principal productor es

Estados Unidos (USA), seguido de China y Brasil, quienes utilizan alrededor de 47% de la superficie para sembrar maíz (184 M ha), estos tres países aportan el 64% del volumen mundial de maíz (FAO, 2017). La importancia de este cultivo se debe a que se puede cultivar desde el nivel del mar hasta por encima de los 3800 msnm en la sierra. Sin embargo el maíz no solo es importante para la alimentación humana y animal, también al ser materia prima para la fabricación de harinas precocidas, aceites, hojuelas para desayuno, de este cultivo se derivan productos alimenticios e industriales, que van desde la fabricación de edulcorantes, golosinas, bebidas refrescantes y atoles, bebidas alcohólicas (García, 2017).

### **4.3 Importancia del cultivo de maíz en México**

En México se utilizan una gran variedad de maíz nativo desde la época preclásica, para elaborar la tortilla, del mismo modo una enorme cantidad de preparaciones culinarias tradicionales, lo que hace del maíz sea uno de los elementos fundamentales de la cocina nacional, siendo el sustento de miles de familias rurales mexicanas. La ventaja de utilizar maíz nativo es la posibilidad de hacer un mejor manejo de las labores agrícolas, lo que proporciona mayores garantías en la producción de alimentos en cantidad suficiente (Fernández *et al.*, 2013).

El maíz es el cultivo más sensible hablando económicamente político, normalmente se toma como un indicador de los éxitos y fracasos en la agricultura nacional. La tercera parte de la superficie agrícola se destina para este cereal, siendo los estados que más lo producen: Jalisco, Veracruz, Estado de México, Zacatecas, Guanajuato, Michoacán, Chiapas, Puebla y Tamaulipas. A pesar de las grandes producciones que aportan estos

estados, México no es capaz de satisfacer la demanda que exige la población, por tanto tiene que importar maíz proveniente de Estados Unidos (Pérez *et al.*, 2014).

#### 4.5 Descripción taxonómica

La descripción taxonómica del cultivo de maíz se presenta en la Tabla 1 (Tovar, 2008).

**Tabla 1.** Clasificación taxonómica del cultivo de maíz.

Reino:	<i>Plantae</i>
División:	<i>Magnoliophyta</i>
Clase:	<i>Liliopsida</i>
Subclase:	<i>Commelinidae</i>
Orden:	<i>Poales</i>
Familia:	<i>Poales</i>
Subfamilia:	<i>Panicoideae</i>
Tribu	<i>Andropogoneae</i>
Género:	<i>Zea</i>
Especie:	<i>Z. mays</i>
Nombre científico:	<i>Zea mays</i> L.

#### 4.6 Descripción botánica

##### 4.6.1 Raíz

La raíz es fasciculada y es el órgano que crece en el interior del suelo cuya función es el anclaje y absorción de nutrientes para la planta. Además, emite raíces adventicias cuando llega a tener una altura mayor a 0.5 metros (Valladares, 2010).

#### 4.5.2 Tallo

El tallo presenta varias estructuras básicas denominada fitómero: meristemo apical, profilo, hojas e internudos. El tallo es simple, erecto, pudiendo alcanzar alturas entre 2 y 6 metros de altura, con numerosos nudos y entrenudos (Sánchez y Pérez, 2014).

#### 4.5.3 Hojas

Las hojas son largas, lanceoladas, está compuesto por tejidos, dentro de su estructura están las células llamada parénquima y con paredes delgadas. Uno de entre tantas funciones que tiene es el transporte de minerales hacia otras partes de las plantas (Prado-Martínez *et al.*, 2012 ).

#### 4.5.4 Flores

Las flores del maíz son denominado monoico, debido a que presenta flores masculinas con inflorescencia terminal y flores femeninas pistiladas en diferentes partes de la misma planta; entre la mazorca y la panoja hay una separación por lo que se da la polinización cruzada y se le considera una especie alógama (Deras-Flores, 2020).

#### 4.5.5 Fruto y semilla

El fruto del maíz es un cariósipide. El pericarpio con la cubierta de la testa está unido y ambas forman la pared del fruto. Las partes del fruto son: el embrión, la testa y el endospermo y la capa de aleurona es la más externa del endospermo (Takhtajan, 1980).

## **4.6 Exigencias agroecológicas del cultivo**

### 4.6.1 Clima

Para que el maíz pueda germinar adecuadamente es necesario que se tenga una temperatura óptima que oscile entre 18 y 21 °C, por debajo de 10 °C no se lleva a cabo la germinación. La temperatura máxima puede ser entre 27 y 30 °C (Ruiz *et al.*, 1999).

### 4.6.2 Riego

El cultivo de maíz necesita por lo menos de 500 a 700 mm de modo que estén bien distribuidos durante el periodo del cultivo. Se debe tomar en cuenta de no tener encharcamientos, ya que este cultivo es muy sensible donde los suelos son saturados (Deras-Flores, 2020).

### 4.6.3 Época de siembra

La época de siembra va depender de la zona y de la raza de maíz a cultivar, pero por lo regular se siembra antes de que empiece la temporada de lluvia, en algunos lugares del Estado de Oaxaca como es Tamazulapan empiezan a sembrar desde el mes de febrero, debido a que es una zona alta mientras que en la mixteca empiezan a sembrar a principios de mayo hasta mediados de junio cuando las lluvias están presentes (Valadez y Blanco, 2005). Sin embargo, para la región del Papaloapan se recomienda sembrar del 15 de octubre al 20 de noviembre, con la finalidad de aprovechar la humedad existente y obtener mayor floración y llenado de fruto (García, 2008).

## **4.7 Labores culturales**

### 4.7.1 Densidad de siembra

Se recomienda una población de 44,000 plantas por hectárea, donde los suelos son fértiles con aportaciones de fertilizantes. En suelos donde la fertilidad es mediana o con aplicaciones de fertilizantes moderadas, es recomendable una densidad de 35,000 plantas por hectárea (Cruz, 2013). Sánchez-Hernández *et al.* (2011) recomienda tres densidades (50 000, 62 500, 83 333 plantas/ha), aunque este último lo recomienda por lo que obtienen mayores rendimientos y mayor área foliar.

### 4.7.2 Preparación de terreno

Las labores previo a la siembra son el desvare, con el objetivo de desmenuzar los residuos de la cosecha anterior y combatir las malezas que brotan después de la cosecha. Posteriormente se lleva a cabo el primer rastreo con la finalidad de romper los terrones y finalmente se vuelve a dar el segundo rastreo para eliminar las malezas que hayan germinado por la humedad de las primeras lluvias (Tucuch-Cauich *et al.*, 2007).

### 4.7.3 Fertilización

La dosis óptima de fertilización recomendada por Arrieché y Ruiz (2014) es 300 kg/ha de cachaza (CA), 200 kg/ha de N, 200 kg/ha de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y 90 K<sub>2</sub>O. Por otro lado, Jurado *et al.* (2013) sugiere aplicar 180 kg de nitrógeno y 90 kg de fósforo, donde la aplicación de nitrógeno se debe realizar en dos etapas, el primero se debe de realizar al momento de la siembra o en la pre siembra y la otra mitad cuando se aplique el primer riego de auxilio,

con lo que respecta al fósforo esto se debe de aplicar todo cuando se aplique la primera fertilización de nitrógeno.

#### 4.7.4 Control de maleza

Para el control de maleza Jurado *et al.* (2013) recomienda controlar la maleza de forma manual o por control químico con 2,4-D Amina en dosis de 1.0 a 1.5 L/ha. Esta labor se debe de llevar a cabo en las primeras 2 semanas después de la emergencia hasta los 40 días después de la siembra. Tejada y Helfgott (2018) también recomienda deshierbo manual y con control químico pendimetalin 1.000 g ha<sup>-1</sup> y atrazina 750 g ha<sup>-1</sup>.

#### 4.7.5 Cosecha

La cosecha es la última labor que se lleva a cabo Sevilla y Valdez (1985) recomienda cosechar el grano cuando tenga una humedad de aproximadamente de 30%. La cosecha se puede realizar 160 días después de la siembra, cuando alcance un contenido de humedad del 25 % y posteriormente se deberá someter a un proceso de secado de modo que alcance hasta 14 % de humedad (Arellano-Vásquez *et al.*, 2018).

### **4.8. Plagas y enfermedades**

4.8.1 Plagas: El gusano cogollero *Spodoptera frugiperda* J. E. Smith y *Heliothis Zea* (Boddie), (Lepidóptera: *Noctuidae*) son las principales plagas que limitan la producción del cultivo de maíz. El daño es provocado durante el desarrollo de la planta y por ende reducen el rendimiento (Hernández *et al.*, 2019).

#### 4.8.2 Enfermedades:

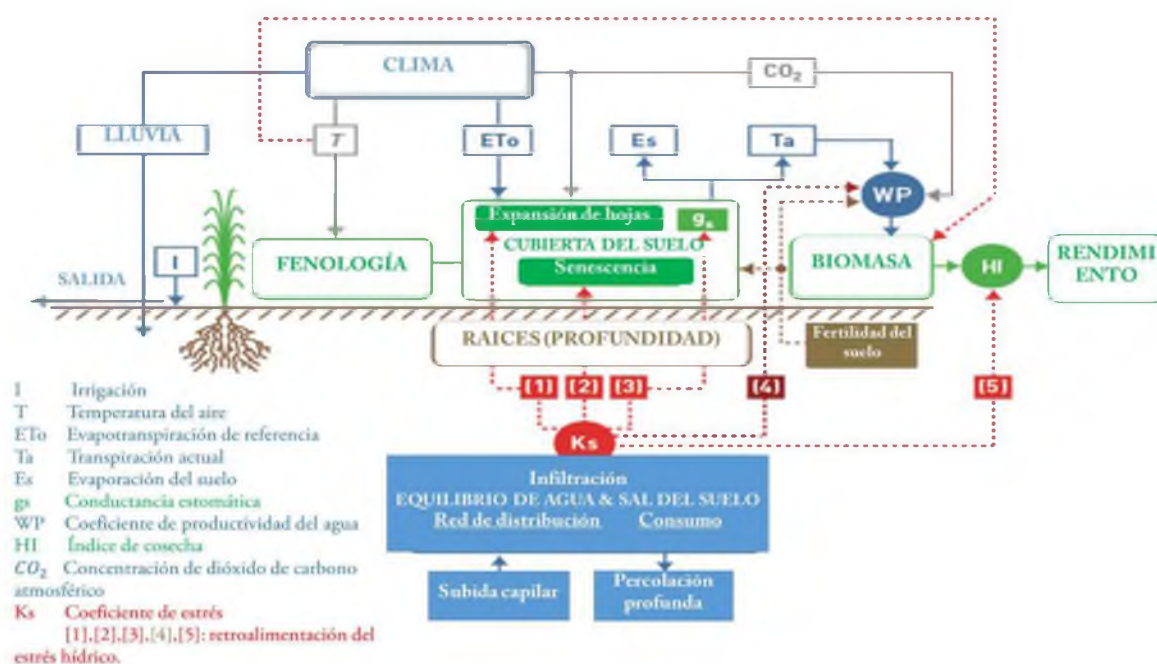
Las enfermedades fúngicas de importancia en el cultivo de maíz son la roya común (*Puccinia sorghi*) y el tizón foliar (*Exserohilum turcicum*), se presentan en cada ciclo del cultivo, con diferentes niveles de daños, donde dependen mucho del tipo de clima, el material genético y los biotipos de los patógenos presentes (De Rossi, 2016).

#### 4.9 Modelos de simulación en el cultivo de Maíz

Hoy en día existen muchos modelos de simulación biológica, que ayudan a estimar la producción y al mismo tiempo identificar los factores que limitan esa producción en relación con el manejo hídrico de los cultivos. Entre los modelos de simulación se puede mencionar el DSSAT (Sistema de Apoyo para la Toma de Decisiones en la Transferencia Agrotecnológica), este modelo ayuda a estimar los efectos que ocasionan las prácticas que se le proporciona al cultivo, de la misma manera lo hace con las condiciones ambientales. Con la nueva versión del DSSAT se pueden simular el maíz y otros 16 cultivos. CERES-Maize es otro modelo utilizado para estudiar el comportamiento del desarrollo del cultivo de maíz (Jones *et al.*, 1986), también se puede utilizar Hybrid-Maize (Yang *et al.*, 2004), CropSyst (Stöckle *et al.*, 2003), EPICphase (Cavero *et al.*, 2000) y APSIM (Keating *et al.*, 2003). Sin embargo (Heng *et al.*, 2009) afirma que los modelos antes mencionados requieren de mucha habilidad para poder calibrarlos y posteriormente usarlo para la simulación de los cultivos, debido a que se necesitan muchos parámetros para cultivos en específico, por estas razones los agricultores no lo utilizan con frecuencia.

#### 4.9.1 El modelo AquaCrop

AquaCrop es un modelo desarrollado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) predice la productividad de los cultivos, las necesidades de agua y la eficiencia del uso del agua (WUE) en condiciones de limitación de agua (Heng *et al.*, 2009). Es un modelo sencillo, ocupa pocos datos y se puede estimar con los datos que se pueden encontrar en la literatura (Morla y Giayetto, 2012) como lo muestra la Figura 1.



**Figura 1.** Diagrama de flujo de AquaCrop (Sánchez-Sastre *et al.*, 2011).

##### 4.9.1.1 Datos de entrada

Los datos de entrada son: datos del clima, características del suelo, del cultivo y prácticas de manejo que definen el ambiente en el que se desarrollará el cultivo, y se resume en la Figura 2.



**Figura 2.** Datos de entrada que definen el ambiente en el cual se desarrolla el cultivo (Steduto *et al.*, 2012)

#### 4.9.1.1.1 Datos del clima

AquaCrop requiere una temperatura mínima ( $T_{min}$ ) y máxima ( $T_{max}$ ) del aire, precipitación, y evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) como medida de la demanda evaporativa de la atmósfera. Adicionalmente, la concentración atmosférica media anual de  $CO_2$  debe ser conocida (Steduto *et al.*, 2012).

La ETo se calcula usando la ecuación de Penman-Monteith, Allen *et al.* (1998), a partir de set completos de datos diarios del clima, el cual comprende; radiación, Tmax y Tmin, velocidad del viento y humedad, todos diarios.

Los datos diarios, de 10 días o mensuales de temperatura del aire, ETo y precipitación para cada ambiente específico son almacenados en su propia carpeta de clima en la base de datos de AquaCrop, desde donde el programa recupera los datos en el momento de la ejecución. En caso de que no se tengan los datos diarios del clima, se puede ser uso de datos ya incorporados en el modelo AquaCrop. En cuanto al CO<sub>2</sub>, el programa lo proporciona que es la media anual requerida para la simulación, aplicable para la mayoría de ubicaciones. Estos valores anuales son medidos en el Observatorio de Mauna Loa en Hawái y comprenden el período desde 1902 hasta los más recientes.

#### 4.9.1.1.2 Parámetros de cultivo

La FAO ha calibrado los parámetros de cultivo para diferentes cultivos, y los proporciona como valores predeterminados en los archivos de cultivo almacenados en la base de datos de AquaCrop. Los parámetros se clasifican en dos categorías: conservativos o varietales y dependientes de las condiciones.

Los parámetros conservativos de cultivo no cambian con el tiempo, las prácticas de manejo, el clima, ni la ubicación geográfica. Con respecto a las características de las variedades, hasta ahora los ensayos muestran que el mismo valor de un parámetro conservativo es aplicable a muchas variedades, aunque se puede esperar alguna desviación para las variedades de características extremas (Steduto *et al.*, 2012).

Los parámetros más importantes los podemos resumir en: (1) desarrollo y crecimiento de cultivo, (2) transpiración del cultivo, (3) estrés hídrico (4) estrés por temperaturas, (5) fenología, (6) dependientes del manejo, (7) dependientes del suelo y (8) dependientes del suelo y del manejo. Las características específicas de cada uno de estos parámetros, así como sus valores utilizados para la calibración se describen a detalle en la tabla 2.

#### 4.9.1.1.3 Datos del suelo

Los parámetros necesarios son: contenido volumétrico de agua a capacidad de campo (FC), punto de marchitez permanente (PWP), y saturación, y la conductividad hidráulica saturada (Ksat), para cada capa de suelo diferenciada que abarca la zona radicular. A partir de estas características, AquaCrop deriva otros parámetros que controlan la evaporación del suelo, el drenaje interno y la percolación profunda, la escorrentía superficial y el ascenso capilar (Raes *et al.*, 2011). En caso de que el usuario tuviera información más precisa, puede modificar esos parámetros desde el programa. Y si por alguna razón hiciera falta algunos valores de los primeros cuatro parámetros, el usuario podría hacer uso de los valores que AquaCrop proporciona en su base de datos (Steduto *et al.*, 2012).

#### 4.9.1.1.4 Datos de manejo

Las prácticas de manejo se dividen en: manejo de riego y manejo de campo. En las prácticas de manejo de campo se refiere a la fertilidad del suelo, nivel de infestación de malas hierbas, y prácticas que afectan el balance de agua del suelo como el acolchado del suelo para reducir la evaporación del suelo, los caballones para almacenar agua en el campo, y la eliminación de la escorrentía mediante prácticas de conservación. Los niveles

de fertilidad del suelo van desde no limitante a baja, con efectos en la WP (productividad del agua), en la tasa de crecimiento de dosel, en la cobertura del dosel máxima y en la senescencia. En manejo de riego el usuario elige si el cultivo es de temporal o de riego. Si es de riego, el usuario especifica el método de aplicación (por aspersión, por goteo o superficial), la fracción de superficie húmeda, y para cada evento de riego, la calidad del agua de riego, el momento y la cantidad de riego aplicado (Steduto *et al.*, 2012).

#### 4.9.2 Investigaciones realizadas con el modelo AquaCrop

El modelo AquaCrop ha sido utilizado en varias simulaciones de cultivos, entre ellos se encuentra un estudio realizado en la Universidad Autónoma Chapingo, en donde analizaron el rendimiento de maíz temporal con diferentes fechas de siembra. La variedad de maíz que se evaluó fue H-52 la cual se calibró con datos experimentales. Se simularon 11 fechas de siembra anuales para 28 años, después se compararon los rendimientos obtenidos, así, determinar la fecha óptima en que se obtienen mayores rendimientos. Finalmente, se obtuvieron los mejores rendimientos en el periodo comprendido del día 124 al 154 del calendario juliano (Hernández-Bautista *et al.*, 2016). El modelo AquaCrop es una buena herramienta que sirve para planificar y determinar el periodo óptimo de siembra en respuesta de los cultivos y el cambio climático del lugar (Hernández-Bautista *et al.*, 2016).

Otra investigación realizada fue en Argentina, en donde el objetivo fue calibrar y validar el modelo utilizando trigo, maíz y soja como cultivos de referencia. Este trabajo se basó en varios ensayos de los cultivos ya mencionado. Esto fue validado usando los métodos del coeficiente de determinación del ajuste lineal, la pendiente 1:1 y la raíz cuadrado medio del error. Los resultados obtenidos muestran que las simulaciones realizadas por

el modelo presentan un nivel de ajuste aceptable con errores de 5, 13, 11% para maíz, trigo y soja, respectivamente. Al momento de realizar la calibración se observó que el programa AquaCrop es sensible a parámetros hidrológicos como la cantidad de precipitaciones ocurridas durante el ciclo del cultivo, la cantidad de agua transpirada y al contenido hídrico del suelo a la siembra (Morla y Giayetto, 2012).

Sánchez-Sastre *et al.* (2011) reportan una investigación que se hizo en Castilla y León, España sobre el cultivo de remolacha azucarera (*Beta vulgaris var. saccharifera*) en donde calibró el modelo AquaCrop para la zona de estudio, considerando cuatro escenarios climáticos distintos como datos de entrada del programa, tomando como salida los valores de producción de biomasa que arroja AquaCrop. A partir de esos datos, en combinación con el porcentaje de carbono en muestras de campo se obtuvo la estimación de CO<sub>2</sub> asimilado. De los resultados en forma de mapas se infiere que el cultivo de la remolacha en Castilla y León puede llegar a mejorar en su capacidad de captura ante las previsiones de Cambio Climático para 2050.

#### **4.10 Escenarios de cambio climático**

Dadas las tendencias actuales, se espera que el uso de energía de transporte y las emisiones de CO<sub>2</sub> aumenten un 50 por ciento en 2030, por lo tanto, la elevación de la temperatura será de 0,2°C por década. Posteriormente, las proyecciones de temperatura serán dependientes de escenarios de emisiones específicos, es decir, mientras más aumente la concentración de CO<sub>2</sub>, así aumentará la temperatura y por ende la productividad de los cultivos disminuirá incluso con relación a pequeños aumentos de temperaturas locales (Vessuri, 2016).

Estudios realizados predicen que, en el año 2050, habrá cambios en la aptitud para cultivar maíz en aproximadamente el 40% de la superficie del país. De igual forma han previsto que la temperatura promedio de México en el año 2080 aumentaría de entre 2 a 4°C., lo que provocaría incendios forestales, alteraciones del ciclo hidrológico. Se estima que para el año 2030 habrá una disminución del 10% respecto a la que teníamos en el 2000, provocando serios problemas en los procesos estacionales como son la floración de las plantas, las migraciones de las aves y la aparición de las primeras hojas de los árboles en la primavera (SEMARNAT, 2009). Los científicos ahora saben con relativa confianza que se afectarán los regímenes de precipitación, es decir, la manera en cómo y cuánto llueve en un sitio particular, de hecho, mucha de la preocupación es en la manera en que este fenómeno afectará a nuestra vida diaria, tales como la alimentación debido a la caída de la producción agrícola y pesquera. El abasto de agua para uso humano, agrícola y para la generación de electricidad podrían afectarse notablemente, mientras tanto los rendimientos de cultivos y la producción pecuaria se verán afectados (SEMARNAT, 2009).

Como consecuencia del aumento de los niveles de concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero, se espera que la temperatura media global aumente entre 1.4 y 5.8° C de 1990 al 2100, esto provocará disminución en la producción de maíz de temporal en México y al mismo tiempo los ecosistemas se modificarían en un 50.0% de la vegetación del país, siendo los climas templados los más afectados (Estrada, 2001). AquaCrop permite realizar simulaciones del rendimiento en función del agua en relación con el cambio climático bajo diversos escenarios; lo que el modelo no toma en cuenta son

las plagas y enfermedades presentes durante el ciclo del cultivo, mismas que influyen de manera directa en el rendimiento de los cultivos.

## **5. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **5.1 Localización**

El proyecto se desarrolló dentro de las instalaciones de la Universidad del Papaloapan, Campus Loma Bonita, localizada en la región del Papaloapan en el estado de Oaxaca con coordenadas de 95° 53' longitud oeste y 18° 06' latitud norte, a una altura de 30 m.s.n.m. El Clima es cálido húmedo (Am) con abundantes lluvias en verano (García, 2004). La temperatura media anual es de 25 °C, y el mes más cálido con temperatura media de 34.7 °C y la temperatura media mínima es de 16.6 °C, con una precipitación promedio anual de 1,902 mm. (SMN, 2019).

### **5.2 Establecimiento del experimento**

Para calibrar el modelo, se evaluó maíz criollo originario de Loma Bonita Oaxaca. El área donde se llevó a cabo el establecimiento del cultivo fue de 10 m x 20 m. Primeramente, se preparó el suelo con el arado y en seguida con la rastra; una vez que el terreno quedó listo, se instaló el sistema de riego por goteo, posteriormente se sembró a una distancia de 1.60 m entre surcos tomando como referencia la línea de riego, en cada línea de riego se sembró a doble hilera, es decir, la distancia entre plantas y planta fue de 30 cm. Se sembró a una profundidad de 3 a 5 cm.

La dosis de fertilización empleada fue de 184-69-60, dosis recomendada por Fernández (2007). Al momento de la siembra se aplicó la mitad del nitrógeno y la otra mitad a los 45 días después de la siembra cuando las plantas alcanzaron de 15 a 20 cm de altura (se

aplicó a 10 cm de la planta). De igual manera el potasio se aplicó la mitad al momento de la siembra y la otra mitad cuando se aplicó la segunda dosis de nitrógeno y el fósforo se aplicó todo al momento de la siembra. Para la eliminación de maleza se utilizó azadón. Para el combate de la plaga *Spodoptera frugiperda* se aplicó Cipermetrina 5ml/L en el cogollo de la planta.

La Tabla 2 muestra las características del suelo donde se estableció el experimento.

**Tabla 2.** Propiedades físicas del suelo donde se llevó a cabo el experimento.

<b>Propiedades Físicas del Suelo</b>			
Clase Textura	Franco		
Punto de Saturación	30.6	%	Mediano
Capacidad de Campo	16.2	%	Mediano
Punto de Marchitez Permanente	9.64	%	Mediano
Conductividad Hidráulica	7.40	cm/hr	Alto
Densidad aparente	1.32	g/cm <sup>3</sup>	

### 5.3 Variables registradas

Las variables fueron tomadas dos semanas después de la siembra de forma destructiva y son las siguientes:

- Diámetro de tallo (mm): mediante un vernier digital, se tomó el diámetro del tallo a 5 cm del suelo.
- Longitud de tallo (m): Utilizando un flexómetro, se tomó desde la base del tallo en la superficie del suelo hasta el final del punto de crecimiento.

- Peso de tallo (g): con la báscula se pesó todo el tallo de la planta quitando las hojas con anterioridad.
- Peso de hojas (g): con ayuda de una báscula se pesaron las hojas producidas por la planta.
- Longitud de las hojas. Con base en el procedimiento de muestreo sugerido por INIFAP (2012), se registraron las dimensiones de la hoja localizada en un tercio de en medio de las hojas.
- Longitud de raíz (m): mediante un flexómetro se midió la raíz a partir del inicio del suelo hasta la ramificación más larga de la raíz.
- Peso de raíz (m): una vez lavada, se midió y se pesó con ayuda de una báscula digital.
- Rendimiento ton/ha<sup>-1</sup>: el rendimiento se calculó con la ecuación 1.

$$Y = HI. (B). \quad (1)$$

#### **5.4 Parámetros climatológicos registrados y/o calculados**

Para la realización del experimento durante la etapa del cultivo, se registraron las siguientes variables climáticas:

- Humedad relativa: se obtuvo cada 10 min., en porcentaje mediante un sensor de humedad WATCHDOG Mod A160 TEMP/RH/CO2
- Temperatura máxima y mínima: las temperaturas registradas por la Estación Meteorológica Automática (EMA) que registra cada 10 min que se encuentra instalada en la Universidad del Papaloapan. con los sensores cada 10 minutos.

- Precipitación: las variables de precipitación se tomó los datos registrados por la Estación Meteorológica Automática (EMA).
- Radiación solar: con ayuda de los sensores de radiación solar y sensor de radiación PAR marca SPECTRUM® se tomaron los datos durante el desarrollo del experimento configurados para toma de registro de datos cada 10 min (estos datos también son de la EMA, si es así, mencionarlo).
- Evapotranspiración de referencia. para calcular la ETo fue necesario utilizar el software *ETo calculator* de la FAO RKD(Raes y Muñoz, 2009).

La Tabla 3 muestra los datos promedios mensuales utilizados en el software.

**Tabla 3.** Variables meteorológicas a utilizar en el modelo.

Mes	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Punto de rocío (°C)	Humedad Relativa (%)	Precipitación (mm)	Radiación solar (W m <sup>-2</sup> )
Enero	35.4	14.2	18.9	80.0	1.8	939
Febrero	37.3	12.6	19.8	78.8	28.0	994
Marzo	40.6	16.9	20.4	77.5	86.0	1057
Abril	42.4	18.2	21.0	71.3	25.2	1068
Mayo	40.7	18.3	23.3	73.9	52.0	1031
Junio	38.4	22.7	24.0	79.5	118.6	1108
Julio	35.7	21.5	23.9	84.0	298.8	1196
Agosto	33.2	23.2	24.1	82.4	122.2	1098
Septiembre	34.4	19.9	24.1	86.8	139.4	1151
Octubre	34.4	18.4	22.7	86.4	207.2	1200
Noviembre	32.1	16.1	20.5	83.0	4.2	917
Diciembre	31.6	12.3	19.0	84.5	0.4	845

Con los datos de temperatura máxima y mínima, evapotranspiración y precipitación se construyeron los archivos climáticos de entrada de AquaCrop. Las demás variables relativas a humedad, radiación y velocidad del viento se utilizaron para el cálculo de ET (Sánchez-Sastre *et al.*, 2011).

## 5.5 Software utilizado

AquaCrop es un modelo dinámico que simula el rendimiento alcanzable de los cultivos herbáceos como una función del consumo de agua. Para poder expresar agua- rendimiento se utiliza la ecuación 2.

$$\frac{Y_x - Y_a}{Y_x} = \frac{K_y(ET_x - ET_a)}{ET_x} \quad (2)$$

donde:

$Y_x$ =máximo rendimiento alcanzado;  $Y_a$ =rendimiento actual;  $ET_x$ =evapotranspiración máxima;  $ET_a$ = evapotranspiración actual;  $K_y$ =factor de proporcionalidad entre la pérdida relativa en el rendimiento y la reducción relativa de la evapotranspiración.

Para utilizar el modelo AquaCrop, la FAO considera primeramente la separación de la evapotranspiración (ET) en sus componentes, evaporación (E) y transpiración (T) como se describe en la ecuación 3:

$$ET = E + Tr \quad (3)$$

Se separó las variables de evapotranspiración con el fin de entender y evitar la confusión entre el uso consuntivo no productivo del agua, cuando la cobertura del suelo es incompleta, es decir en las primeras etapas del cultivo. Posteriormente se separaron las variables de rendimiento final, biomasa cosechada (B) e índice de cosecha (HI) como se muestra en la ecuación 4 y 5; esto permite distinguir la relación que se da entre las condiciones ambientales, la producción de biomasa y el índice de cosecha del cultivo.

$$B = WP \cdot \sum Tr \quad (4)$$

donde:

B=biomasa producida WP= productividad del agua  $\sum Tr$  = sumatoria de transpiración

$$Y = HI \cdot (B) \quad (5)$$

donde:

Y= rendimiento cosechado, HI= índice de cosecha y B= biomasa

El modelo final se fundamenta entre la relación biomasa y transpiración, y no en el rendimiento y evapotranspiración como se muestra en la Figura 4. De esta manera en el modelo de crecimiento y simulación se toma en cuenta la transpiración en milímetros (Tr) y al mismo tiempo la productividad del agua (WP) para determinar la producción de biomasa, que multiplicado por el índice de cosecha definido para cada cultivo resulta en el rendimiento cosechado (Y) (Sánchez-Sastre *et al.*, 2011).

## 5.6 Análisis de datos

Los datos obtenidos en campo se calcularon sus medias y posteriormente fueron analizadas en el simulador y finalmente se graficaron con el programa Sigmaplot®.

Se usaron los siguientes indicadores estadísticos con la finalidad de juzgar de manera correcta, ya que no es aceptable usar una sola medida para ajustar un modelo agronómico:

Desviación estándar (DE) con la finalidad de conocer la dispersión de los datos sobre la media.

Regresión lineal ( $R^2$ ), cuadrado medio del error (RMSE), desviación porcentual (Pd), cuadrado medio del error normalizado (NRMSE), coeficiente de eficacia (EF) e índice de concordancia (d-index)

$$R^2 = - \frac{\sum_{t=1}^T (\hat{y}_t - \bar{y})^2}{\sum_{t=1}^T (y_t - \bar{y})^2} \quad (6)$$

$$Pd = \left( \frac{P_i - O_i}{O_i} \right) \times 100 \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (8)$$

$$NRMSE = \frac{1}{\bar{O}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \times 100 \quad (9)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (10)$$

$$d - index = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (11)$$

donde:

- $O_i$  = dato observado
- $\bar{o}$  = la media de datos observados
- $P_i$  = dato simulado
- $\bar{P}$  = promedio de dato simulado
- $N$  = número de mediciones tomados

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para simular en AquaCrop, es necesario realizar la calibración del programa, para ello, se necesitaron parámetros de entrada (datos del clima, características del suelo y del cultivo) y prácticas de manejo que definen el ambiente en el que se desarrolló el cultivo. Para cada día del período de simulación, AquaCrop requirió una temperatura mínima ( $T_{min}$ ) y máxima ( $T_{max}$ ) del aire, precipitación (Rain). Los datos de las variables utilizadas fueron las que proporciona la estación meteorológica automática (EMA) instalada en la Universidad del Papaloapan Campus Loma Bonita, y evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) como medida de la demanda evaporativa de la atmósfera, la información de dicha variable es introducida al modelo. De igual manera, se adiciona la concentración atmosférica media anual de  $CO_2$  conocida (Steduto *et al.*, 2012).

### 6.1 Cálculo de evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ )

Para el cálculo de  $ET_0$  se apoyó de la ecuación de Penman-Monteith, Allen *et al.* (1998) como se muestra en la ecuación 12, a partir de datos de radiación, temperatura máxima ( $T_{max}$ ), temperatura mínima ( $T_{min}$ ), velocidad del viento ( $V_v$ ) y humedad relativa del ambiente (HR).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (12)$$

Para poder calcular la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ), se utilizó el software *ET\_0 calculator* de la FAO, Figura 3. En el programa se pueden ingresar los parámetros climáticos utilizados para calcular la  $ET_0$ , los datos meteorológicos se pueden actualizar, especificar y graficar, y los resultados se pueden exportar (Raes y Muñoz, 2009).



*Figura 3.* Menú del programa ETo calculator.

Los datos que se ingresó en el programa para calcular la evapotranspiración de referencia ETo, son los mostrados en la Tabla 3.

Para utilizar el programa, es necesario crear el archivo ETo LOMA, de la misma manera se le ingresó nombre de la estación y país (EMA y México). Raes *et al.* (2011) recomienda utilizar datos de latitud, longitud y altitud. Las coordenadas donde se llevó a cabo el experimento son: Latitud :18 grados, 6 minutos Norte, Longitud: 95 grados, 53 minutos Oeste y con una altura de 30 m.s.n.m. Los datos meteorológicos utilizados en la calibración corresponden al año 2020, comprendido del 1 de enero a 31 de diciembre. Una vez ingresado los datos correspondientes se le dio **crear archivo**, Figura 4.

**Create menu**

File name: Eto Loma

**Station description**

Station: EMA  
Country: Mexico

Location:  Degrees and Minutes  
 Decimal degrees

Latitude: 18 degrees 6 minutes North  
Longitude: 95 degrees 53 minutes West  
Altitude: 30 meter above sea level

**Meteorological Data**

Type:  Daily  
 10-daily  
 Monthly

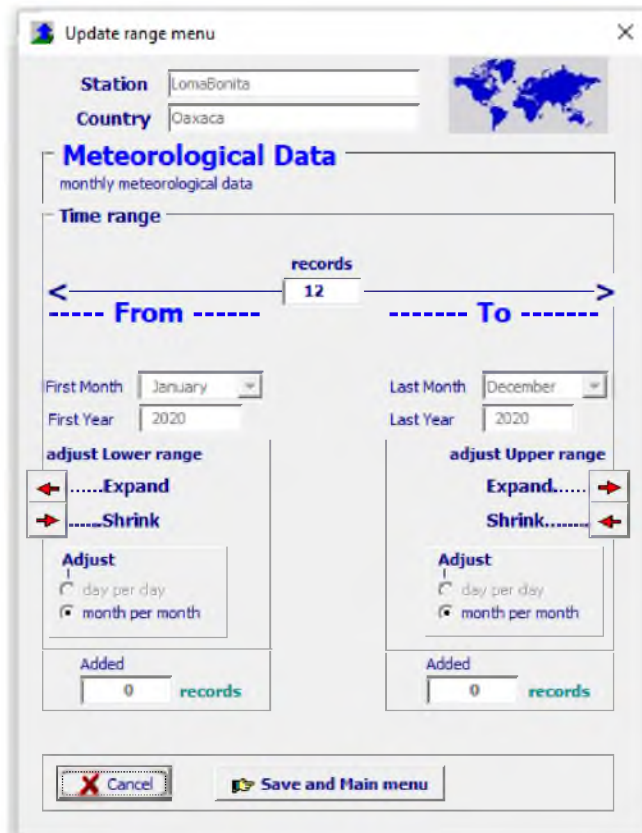
Time range:  not linked to a specific year

First Month: December Last Month: December  
First Year: 2020 Last Year: 2020

Cancel Create

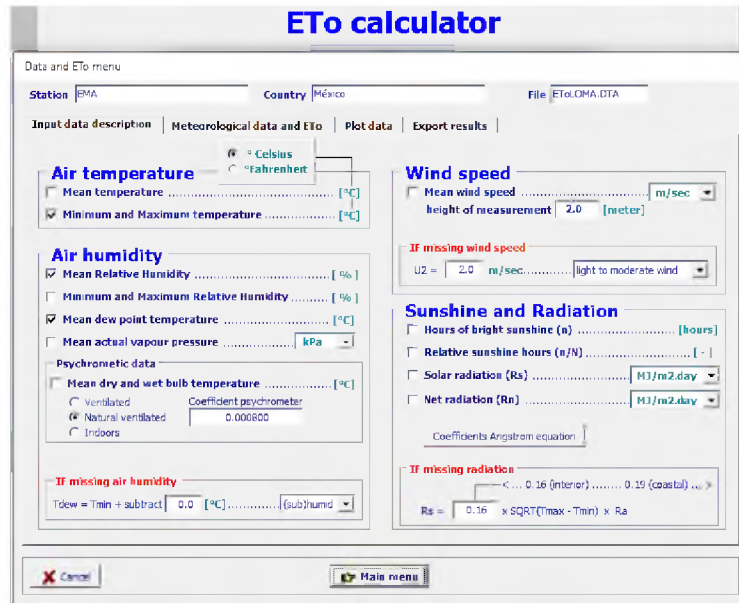
**Figura 4.** Creación de nombre de archivo del lugar de estudio.

Después de haber creado el archivo con las características de la estación, se procedió a verificar que realmente fue guardado en el programa, Figura 6. Aquí se puede observar que los datos corresponden a 12 meses del año 2020, el nombre de la estación y el país en que se encuentra, como se muestra en la Figura 5.



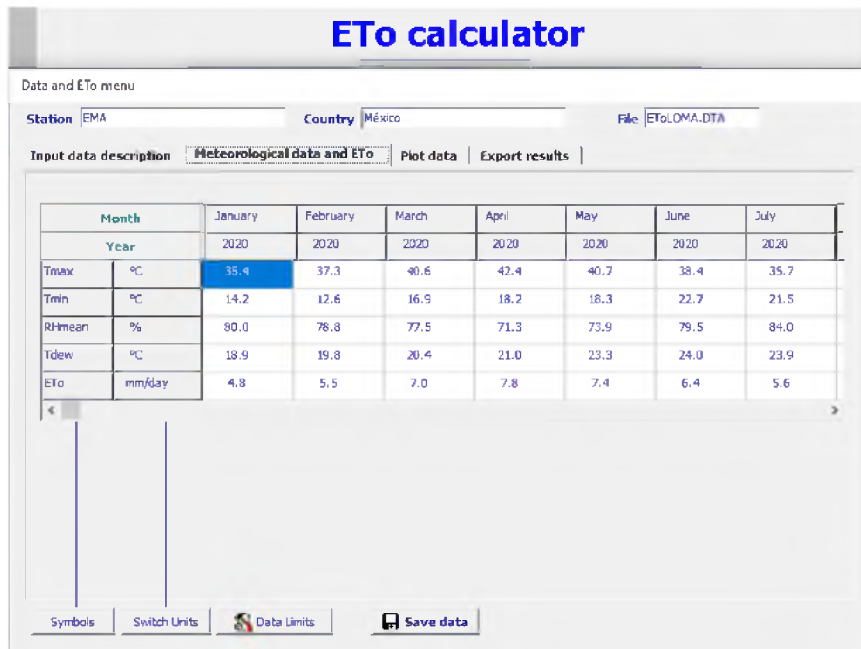
**Figura 5.** Ventana de confirmación de datos meteorológicos

Con el archivo creado se procede a seleccionar las variables correspondientes para el cálculo de la ETo, con sus respectivas unidades. En este caso se utilizó temperatura mínimas y máximas mensuales en grados centígrado (°C), humedad relativa en porcentaje (%) y temperatura punto de rocío en grados centígrado (°C) como puede verse en la Figura 6.



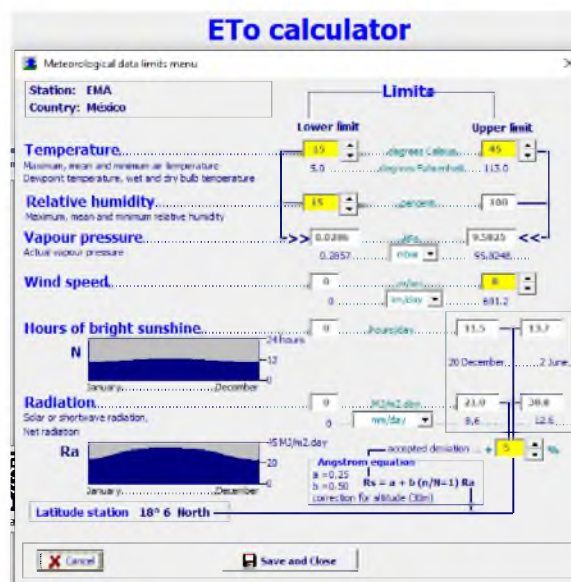
**Figura 6.** Selección de variables para el cálculo de la ETo en el simulador AquaCrop.

Para obtener la ETo mensual, es necesario ingresar los datos promedios mensuales de temperatura máxima (Tmax), temperatura mínima (Tmin), humedad relativa (RHmean) y temperatura punto de rocío (Tdew). Después de ingresar los datos ya mencionados, el programa proporciona la ETo promedio mensual, como se muestra en la Figura 7.



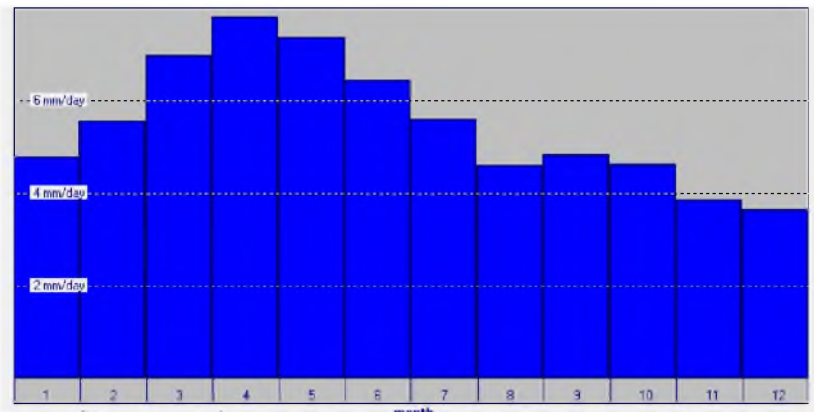
**Figura 7.** Valores de ETo obtenidos con datos de la (EMA) de Loma Bonita.

Si por alguna razón marca error al generar los datos de la evapotranspiración de referencia (ETo), posiblemente se debe a que el rango seleccionado para cada variable no corresponde a los datos ingresados, Figura 8. Si ese es el caso, se debe verificar y corregir.

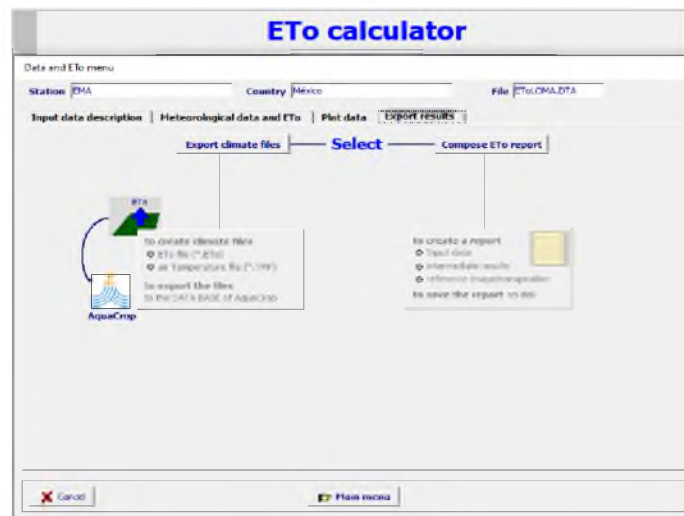


**Figura 8.** Menú de los límites de datos meteorológicos.

Finalmente se obtiene la gráfica del comportamiento de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) mensual del año calculado, como se muestra en la Figura 9; y posteriormente este archivo se debe guardar como se observa en la Figura 10.



**Figura 9.** Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) por meses.



**Figura 10.** Menú de los datos para el reporte de la ET<sub>o</sub> para el sitio experimental.

## 6.2 Ajustes del software

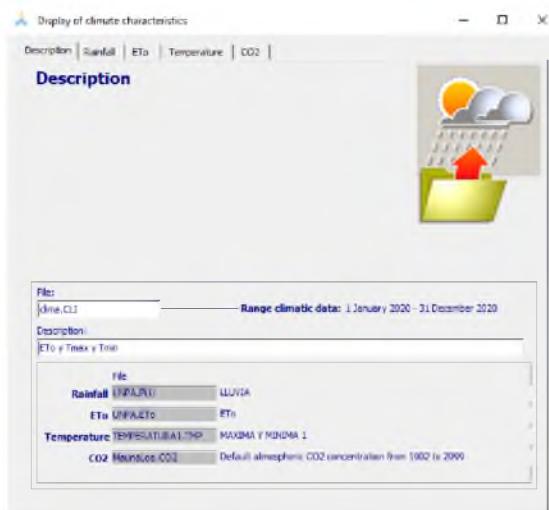
Para poder simular es necesario calibrar el modelo, para esto se ingresa datos de entradas, los cuales pueden ser; características del cultivo, datos de clima, prácticas de manejo y datos del análisis de suelo, Figura 11.



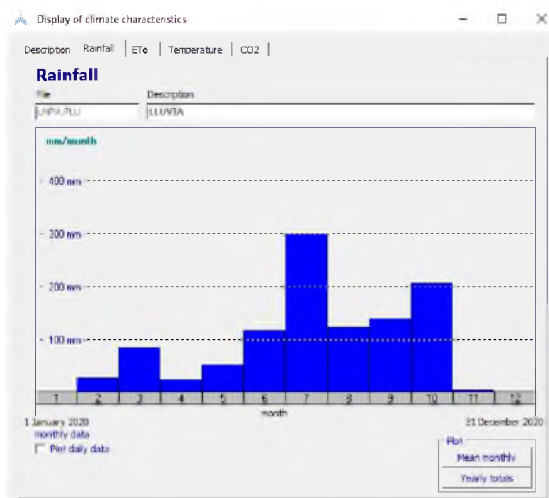
**Figura 11.** Menú principal del programa AquaCrop para el ingreso de los datos.

## 6.3 Datos del clima

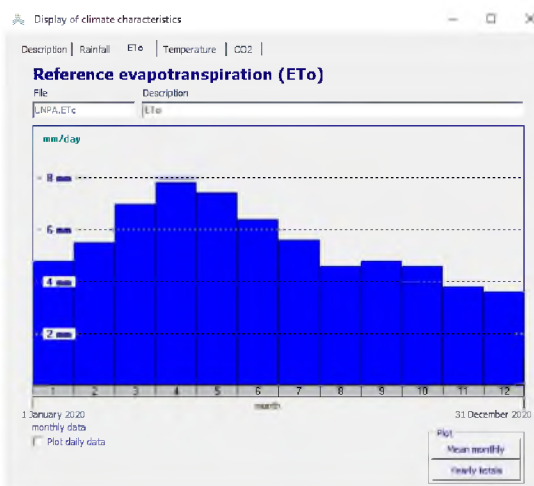
Los datos que se ingresaron en el parámetro **Datos de clima** fueron datos de temperaturas máximas y mínimas ya calculadas, como se muestra en la Tabla 3. También se ingresaron los datos de evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) ya calculados, de igual manera se utilizó los datos de CO<sub>2</sub> que el mismo programa proporciona con el reporte de escenarios de emisiones del panel de cambio climático de la ONU (Cavero *et al.*, 2000). Posteriormente se generan datos del clima para los años 2030 y 2050, como se muestra en la Figura 12a, 12b, 12c y 12d.



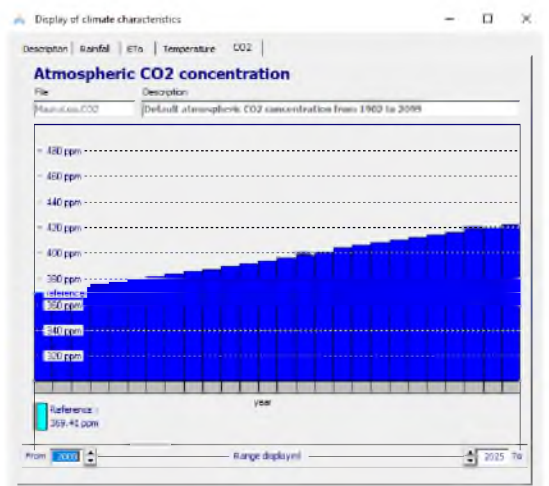
a)



b)



c)



d)

**Figura 12.** Datos de clima: a) descripción, b) lluvia, c) evapotranspiración de referencia y d) dióxido de carbono atmosférico.

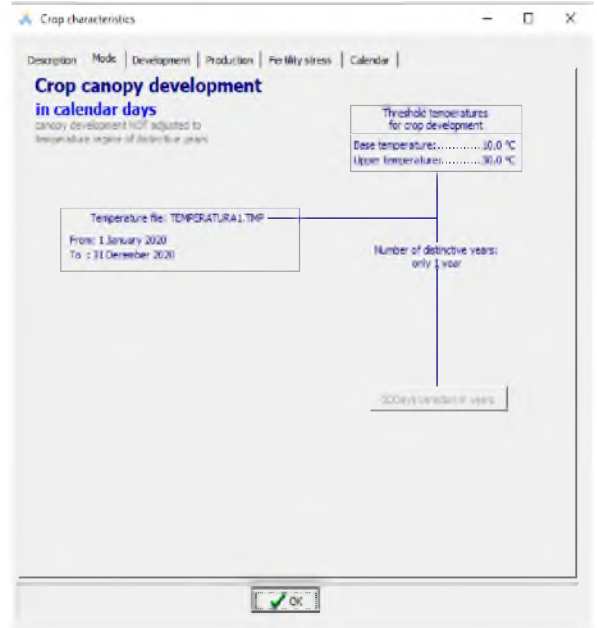
## 6.4 Parámetros de cultivo

Para calibrar la parte de cultivo, primeramente, se especifica la fecha de siembra hasta la maduración, lo cual se desarrolló del 11 de junio al 8 de septiembre de 2020.

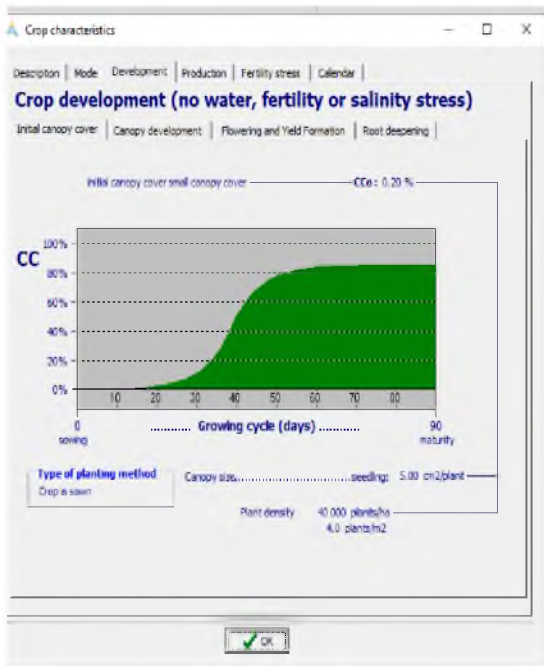
Seguidamente, se utilizó un conjunto de datos limitantes, en este caso se ingresó datos con un cierto límite de variables, en donde se utilizó datos evaluados durante el cultivo, con excepción de la temperatura base, cobertura de dosel inicial y el índice de cosecha. Se utilizó una temperatura base de 10 °C y temperatura superior para grados días en aumento. En cuanto al desarrollo del cultivo la densidad fue de 40,000 plantas/ha, con 4 plantas por m<sup>2</sup>, y con una cobertura de dosel inicial de 0.20 %. En variable de calendario, se ingresó datos de días de la siembra hasta la emergencia que fueron 3, cobertura de dosel máximo 60, profundidad máxima de raíz 69, inicio de la senescencia 80, hasta la maduración 90, hasta la floración 60, duración de la floración 14 y longitud acumulada de índice de cosecha (HI) en 26 días. La Figura 13a, 13b, 13c y 13d, muestra las ventanas de ingreso de datos de variables de cultivo.



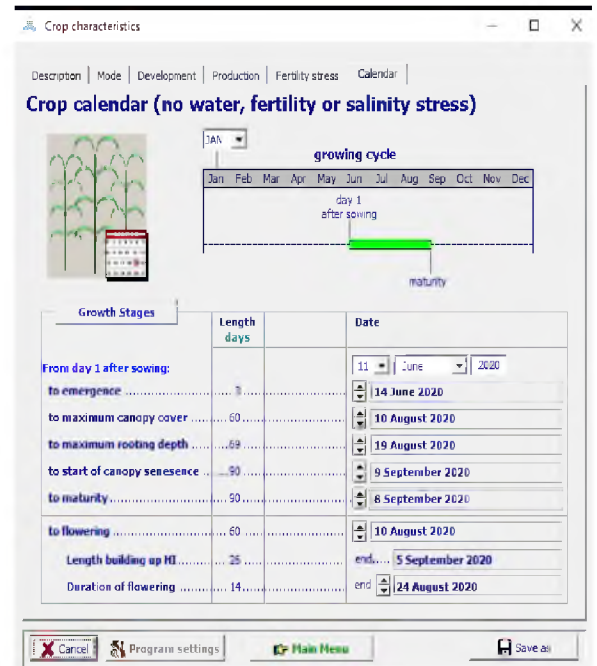
a)



b)



c)

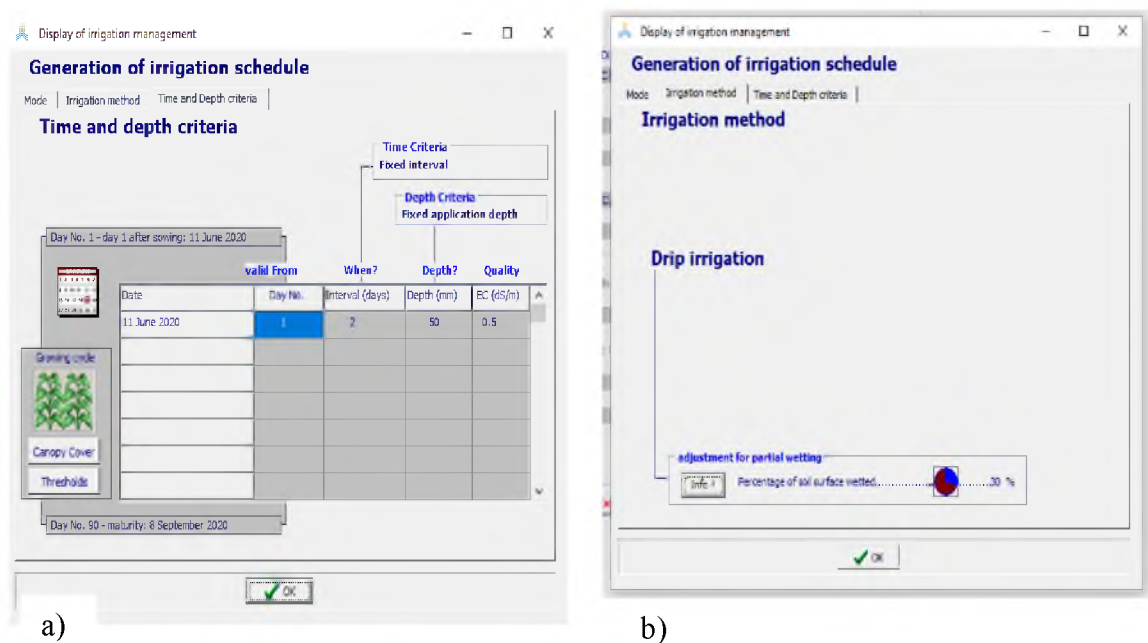


d)

**Figura 13.** Datos de cultivo: a) parámetros de cultivo, b) desarrollo del dosel del cultivo, c) desarrollo del cultivo sin estrés hídrico, de fertilidad o salinidad, d) calendario del cultivo sin estrés hídrico, de fertilidad o salinidad.

## 6.5 Prácticas de manejo

En cuanto a prácticas de manejo, se estuvo regando diariamente con sistema de riego por goteo, en donde el 30 % (se obtiene en automático cuando se ingresa datos en parámetros de cultivo) de la superficie del suelo se mojaba al regar, así como se muestra en la Figura 14, de igual manera, la conductividad eléctrica se registró en el software con un valor de 0.5 dS/m. El riego se proporcionó un día después de la siembra, durante todo el ciclo del cultivo que fueron 90 días desde la siembra hasta la floración.

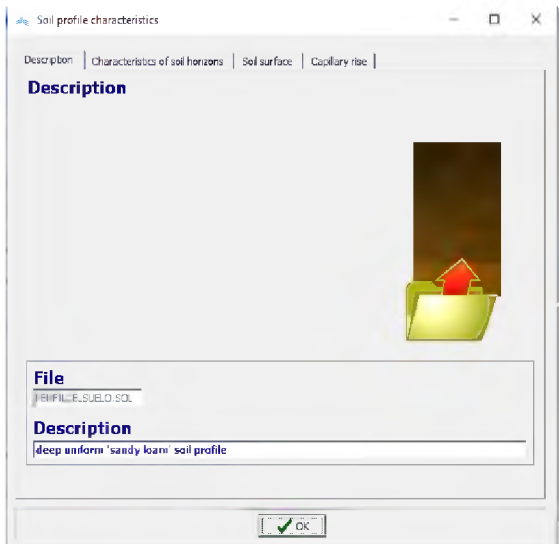


**Figura 14.** Práctica de manejo: a) Superficie mojada en cada riego, b) ventana de ingreso del calendario de riego.

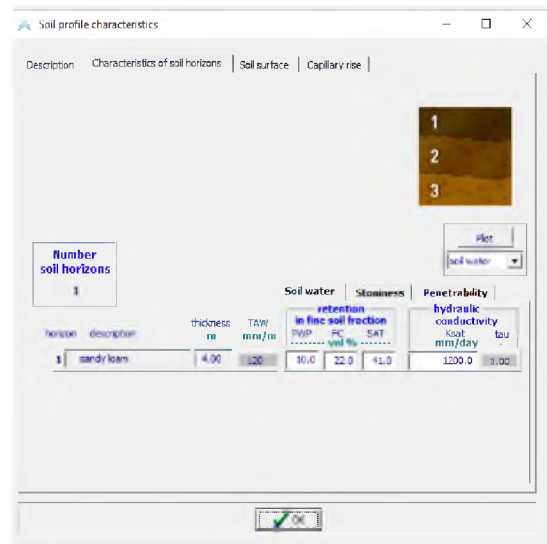
## 6.6 Perfil de suelo

De acuerdo con el diagnóstico de la fertilidad del suelo realizado en el año 2018 por la empresa Fertilab, para el campo experimental en la Universidad del Papaloapan, Campus Loma Bonita, Oaxaca, donde se llevó a cabo el experimento, el suelo presenta textura

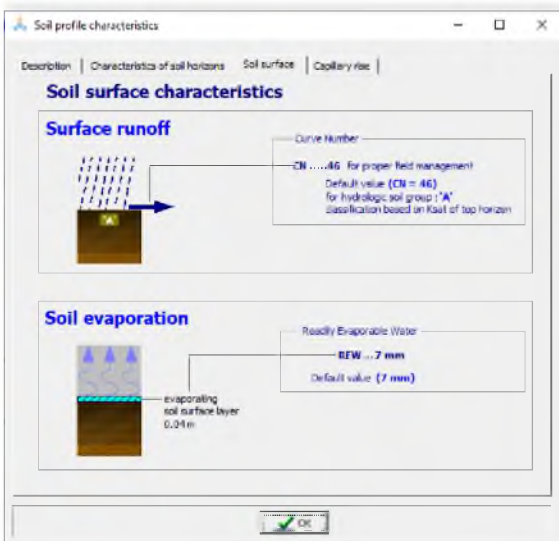
Franco, con un perfil de profundidad uniforme, con punto de marchitez permanente de 9.64 %, capacidad de campo de 16.2 %, punto de saturación de 30.6 % y conductividad hidráulica de 7.40 cm/hr equivalente a 1776 mm/día. Los datos que se ingresaron se muestran en la Figura 15a, 15b, 15c y 15d.



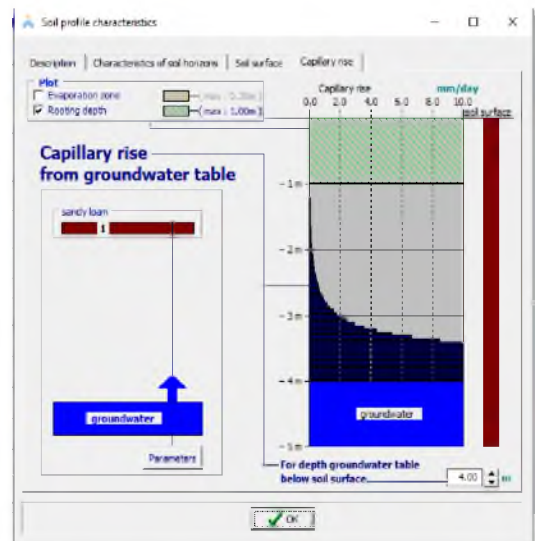
a)



b)



c)



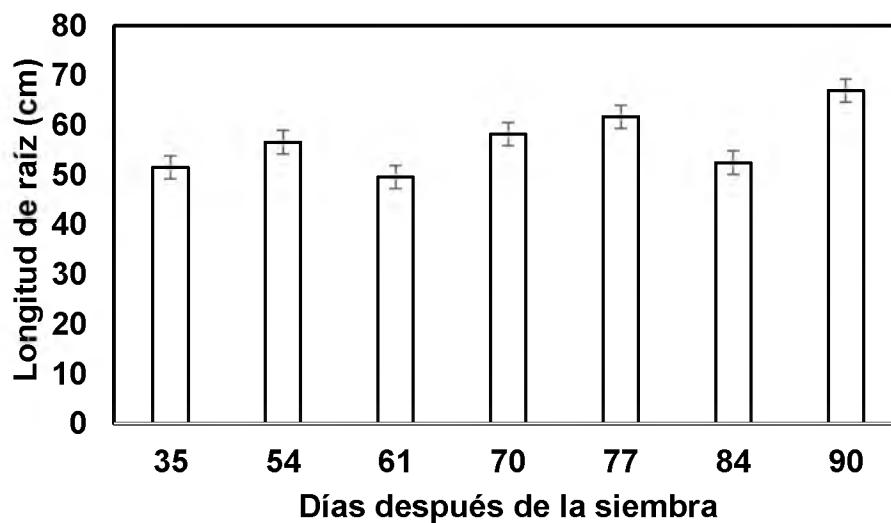
d)

**Figura 15.** Perfil del suelo: a) descripción, b) características de los horizontes del suelo, c) superficie del suelo y d) aumento capilar.

## 6.7 Datos morfológicos de la planta para la calibración

### 6.7.1 Longitud de raíz

Las longitudes promedio de raíz durante el ciclo del cultivo fueron de 49.6 y 67 cm como se observa en la en la Figura 16, estas longitudes se presentaron los 61 y 90 días después de la siembra. Estos valores son superiores a los reportados por Marcos *et al.* (2016) en donde evaluaron maíz nativo al término del ciclo del cultivo , lo cual duró 140 días, obteniendo longitudes promedios de 25.7, 30.6 y 16.7 (cm) para tres ambientes diferente (montaña, valle y planicie).

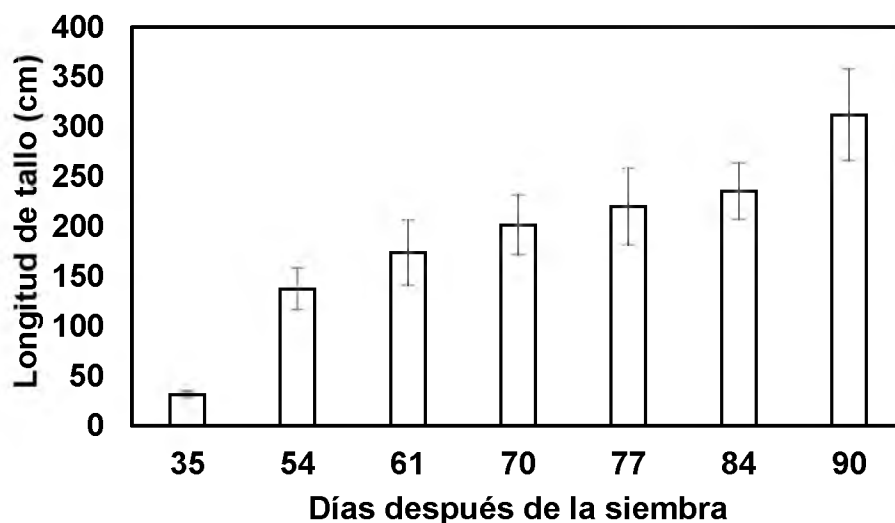


**Figura 16.** Longitud de raíz de maíz criollo durante el ciclo del cultivo, a partir de los días 35 a 90 después de la siembra,  $\pm$  el error de la desviación estándar.

### 6.7.2 Longitud de tallo

El promedio de altura del tallo de las plantas durante las distintas etapas del desarrollo fenológico se presenta en la Figura 17, desde los 35 hasta los 90 días después de la siembra, donde se obtuvo un crecimiento de 31.25 y 312.25 cm, respectivamente.

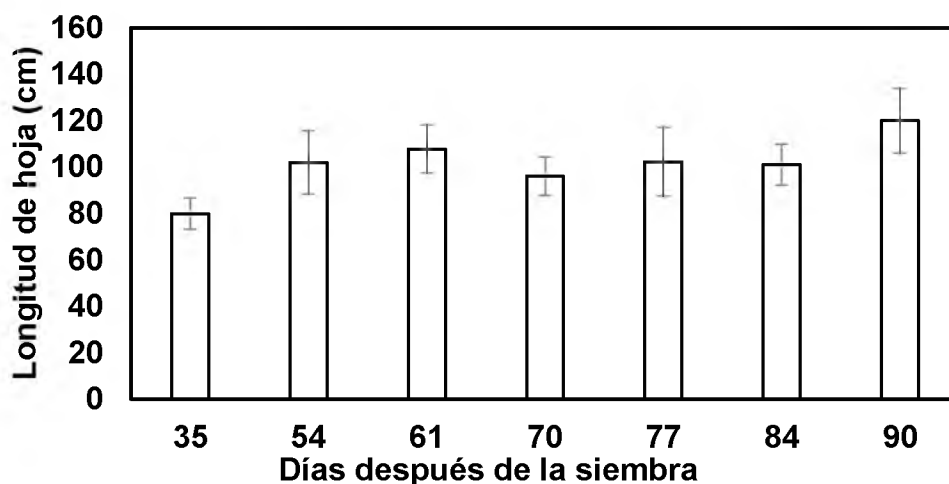
El promedio del crecimiento del tallo con respecto al tiempo se comportó de manera continua. De igual manera, Amador y Boschini (2000) obtuvieron datos similares a lo que se obtuvo en la presente investigación, utilizando maíz criollo forrajero para evaluar la fenología productiva y nutricional de maíz, obteniendo una altura de 27.30 cm el día 37 después de la siembra, mientras que el día 93 se obtuvo una altura de 309.00 cm. Sin embargo Guzmán-Gómez (2020) reportaron algo diferente en su estudio realizado con una variedad de maíz amarillo y un híbrido blanco, en donde la altura creció de manera continua hasta el día 55 después de la siembra, llegando a un punto de estabilidad luego del día 65, obteniendo un promedio de altura al final del ciclo de 2.12 m para la variedad de maíz amarillo y de 2.13 m para el híbrido blanco. Sus resultados se debieron comportarse de esa forma por ser un híbrido y una variedad mejorada genéticamente. En cambio, para este estudio se utilizó un maíz criollo de la región.



**Figura 17.** Comportamiento de la altura de tallo de maíz criollo durante el ciclo del cultivo, a partir de los días 35 después de la siembra hasta los días 90 después de la siembra. Los datos de cada barra representan la media  $\pm$  la desviación estándar.

### 6.7.3 Longitud de la hoja

La longitud de hoja mostró diferencias significativas durante el ciclo del cultivo. Presentando el mayor promedio el día 90 después de la siembra con 120 y la mínima de 79 cm el día 35, Figura 18. Los promedios obtenidos fueron altos, porque al cultivar maíz criollo se obtiene mayor producción en cuanto biomasa verde y seco, obteniendo más del 30 % por hectárea comparándolo con los híbridos, obteniendo un promedio de altura de tallo de 1.7 m (Salazar y Boschini, 2002). Otros estudios realizados por Martínez- Fornos (2020) reportan una longitud máxima de 56.53 cm y una mínima de 52.68 cm.

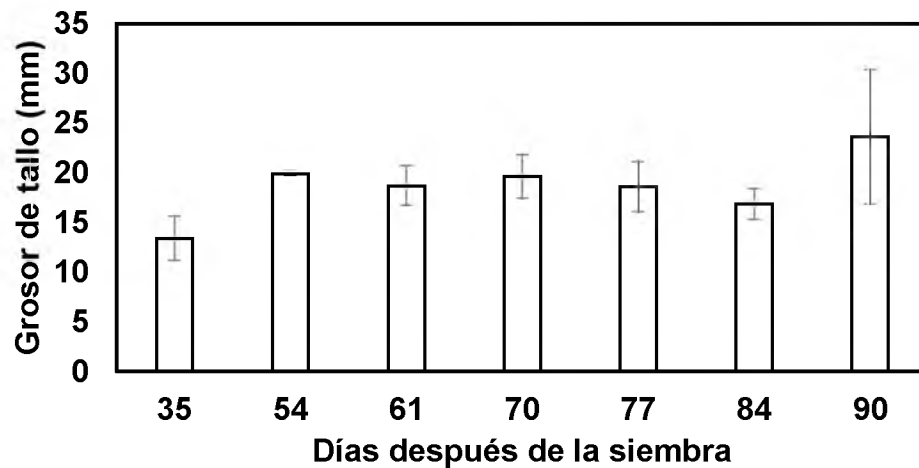


**Figura 18.** Longitud de la hoja madura de maíz criollo durante el ciclo del cultivo, a partir de los días 35 después de la siembra hasta los días 90 después de la siembra. Los datos de cada barra representan la media  $\pm$  la desviación estándar.

### 6.7.4 Grosor del tallo

El grosor de tallo fue aumentando conforme transcurría los días obteniendo 13.3 mm en la primera toma de datos que fue el día 35 después de la siembra y el último dato tomado

el día 90 alcanzó el mayor grosor con 23.6 mm, los demás se comportaron de manera similar en los días 54 y 84 días después de la siembra obteniendo un grosor de entre 16.84 y 19.8 mm como se muestra en la Figura 19. Tucuch *et al.* (2017) reportaron resultados similares en donde evaluaron dos experimentos para dos años diferentes utilizando maíz criollo Xmejen-nal (Nal- telxTuxpeño) y empleando las mismas concentraciones para ambos experimentos, de 0.1 y 1  $\mu\text{M}$  de AS, más el testigo agua destilada para evaluar el efecto y el ácido salicílico (AS) para estudiar el efecto que tiene sobre el crecimiento, efecto, estatus nutrimental y rendimiento en maíz, obteniendo promedio de diámetros de tallo entre 16.03 y 20.28 mm, pero adicionando ácido salicílico (AS).

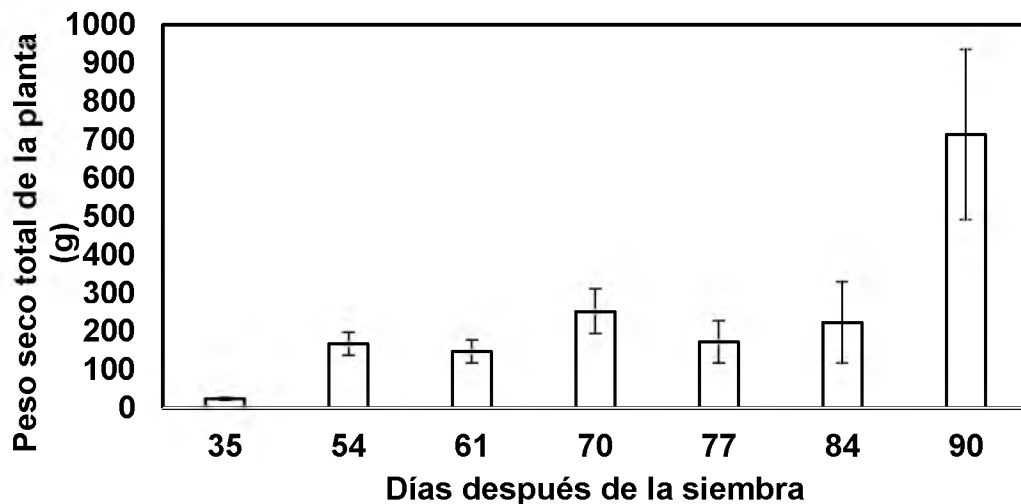


**Figura 19.** Grosor de tallo de maíz criollo, a partir de los días 35 después de la siembra hasta los días 90 después de la siembra. Los datos de cada barra representan la media  $\pm$  la desviación estándar.

#### 6.7.5 Biomasa

La Figura 20 muestra el peso promedio de biomasa seca de la planta en diferentes etapas del cultivo, desde el día 35 después de la siembra hasta los días 90, en donde se ostenta que el peso mínimo se obtuvo en la primera toma de datos tomados a los 35 días después

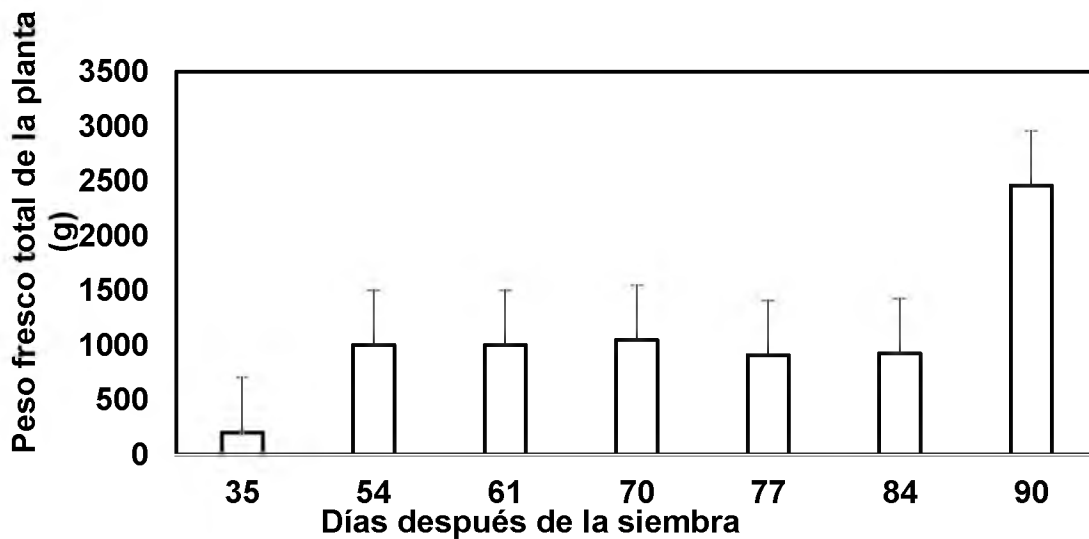
de la siembra que fue de tan solo 24 g, posteriormente no hubo mucha diferencia significativa, excepto el último dato tomado el día 90 después de la siembra que fue de 714 g. Los datos que se obtuvo al final del cultivo fue superior en comparación con lo que reporta Tucuch *et al.* (2017), en los experimentos que realizaron para evaluar ácido salicílico en el crecimiento y estatus nutrimental y rendimiento de maíz, donde obtuvieron un peso de 218.4 g para el primer experimento y 229.03 g por planta para el segundo estos datos se tomaron a los 140 días después de la siembra.



**Figura 20.** Peso seco de biomasa total de maíz criollo a partir de los días 35 después de la siembra hasta los días 90 después de la siembra. Los datos de cada barra representan la media  $\pm$  la desviación estándar.

El peso promedio de biomasa fresca se muestra en la Figura 21, en donde los datos obtenidos el día 35 después de la siembra fue de 204.25 g, mientras que los pesos de las plantas de los días 54, 61, 70, 77 y 84 (167.3, 147.25, 252, 172.25 y 223 g) después de la siembra no hubo variación significativa, de acuerdo con los resultados encontrados se tuvo diferencia significativa para los últimos datos tomados a los 90 días de después de

la siembra, obteniendo un promedio de 2460.4 g de biomasa fresca. Por otro lado, Forero *et al.* (2010) reporta un promedio mínimo de 491.449 g y un máximo de 575.405 g de biomasa a los 110 días después de la siembra comportándose de manera lineal, en contraste con lo obtenido en este trabajo que fue de 2460.4 g.



**Figura 21.** Peso fresco de biomasa total de maíz criollo a partir de los días 35 después de la siembra hasta los días 90 después de la siembra. Los datos de cada barra representan la media  $\pm$  la desviación estándar.

### 6.8 Datos de cultivo para calibración

En la Tabla 4 se describen los datos introducidos al modelo. Se especifican los medidos en campo y/o la fuente. Algunos datos fueron seleccionados después de una revisión de literatura. Los valores que diversos autores utilizan para calibrar el modelo los pueden consultar en los anexos de este documento.

**Tabla 4.** Valores utilizados para la calibración del modelo.

Variable	Unidades	Valor	Fuente
Determinación del ciclo del cultivo: por días naturales	días	1	Datos generados
Los factores de agotamiento del agua del suelo (p) son ajustados por Eto	°C	1	Datos generados
Temperatura base (° C) por debajo de la cual no progresa el desarrollo del cultivo	°C	10	Kheng <i>et al.</i> , 2009
Temperatura superior (° C) por encima de la cual el desarrollo del cultivo ya no aumenta con la T.	°C	30	Kheng <i>et al.</i> , 2009
factor de agotamiento del agua del suelo para umbral s.	%of TAW	0.20	Ahmadi, 2015
Factor de agotamiento del agua del suelo para la expansión del dosel (p-exp) - Umbral inferior	%of TAW	0.55	Diaz-Pérez <i>et al.</i> , 2018
Factor de forma para el coeficiente de estrés hídrico para la expansión del dosel (0.0 = línea recta)	%of TAW	3.0	Diaz-Pérez <i>et al.</i> , 2018
Fracción de agotamiento del agua del suelo para el control de las estomas (p - sto) - Umbral superior	adimensional	0.50	Abedinpour, 2012
Factor de forma para el coeficiente de estrés hídrico para el control de las estomas (0.0 = línea recta)	adimensional	3	Ahmadi, 2015
Factor de agotamiento del agua del suelo para la senescencia del dosel (p - sen) - Umbral superior	adimensional	0.70	Ahmadi, 2015
Factor de forma para el coeficiente de estrés hídrico para la senescencia del dosel (0.0 = línea recta)	adimensional	3.0	Diaz-Pérez <i>et al.</i> , 2018
Suma (ETo) durante el período de estrés que debe superarse antes de que se active la senescencia	adimensional	0	Hsiao <i>et al.</i> , 2009

Continúa la tabla 4

Continuación de la Tabla 4

Factor de agotamiento del agua del suelo para la adimensional polinización (p - pol) - Umbral superior	0.80		Hsiao <i>et al.</i> , 2009
Vol% para el punto anaerobiótico (* (SAT - [vol%]) en el que se produce una aireación deficiente *)	%	5	Hsiao <i>et al.</i> , 2009
Estrés de fertilidad del suelo considerado para la calibración de la respuesta al estrés (%)	%	50	Hsiao <i>et al.</i> , 2009
No se considera la respuesta de la expansión del dosel	cm2	25	Hsiao <i>et al.</i> , 2009
No se considera la respuesta de la cobertura máxima del dosel.	cm3	25	Hsiao <i>et al.</i> , 2009
No se considera la respuesta de la productividad del agua del cultivo	cm4	25	Hsiao <i>et al.</i> , 2009
No se considera la respuesta al declive de la cubierta del dosel.	cm5	25	Hsiao <i>et al.</i> , 2009
Temperatura mínima del aire por debajo de la cual la polinización comienza a fallar (estrés por frío) (°)	°C	8	Gabriel, 2016
Temperatura máxima del aire por encima de la cual la polinización comienza a fallar (estrés por calor)	°C	40	Gabriel, 2016
grados mínimos de crecimiento requeridos para la transpiración total del cultivo (° C - día)	°C	12	Gabriel, 2016
Conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo en el que el cultivo comienza a verse afectado	cds/m	2	Hsiao <i>et al.</i> , 2009
Conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo en el que el cultivo ya no puede crecer (d	ds/m	10	Hsiao <i>et al.</i> , 2009
,Distorsión calibrada (%) de CC debido al estrés de salinidad (Rango: 0 (ninguno) a +100 (muy fuerte))	%	25	Hsiao <i>et al.</i> , 2009
Respuesta calibrada (%) del estrés de las estomas a EC <sub>sw</sub> (Rango: 0 (ninguno) a +200 (extremo))	%	100	Hsiao <i>et al.</i> , 2009

Continúa la Tabla 4

Continuación de la Tabla 4

coeficiente del cultivo a la máxima cobertura del dosel	-	1.20	Temitope <i>et al.</i> , 2020
Disminución del coeficiente de cultivo como resultado del envejecimiento, deficiencia de nitrógeno	%/día	0.30	Hsiao <i>et al.</i> , 2009
mínima profundidad efectiva de raíz	m	0.3	Datos generados
máxima profundidad efectiva de raíz	m	1.0	Datos generados
Factor de forma que describe la expansión de la zona de la raíz		15	Datos generados
Extracción máxima de agua de la raíz en el cuarto superior de la zona	(m <sup>3</sup> de agua / m <sup>3</sup> de suelo por día)	0.045	Hsiao <i>et al.</i> , 2009
Extracción máxima de agua de la raíz en el cuarto inferior de la zona	(m <sup>3</sup> de agua / m <sup>3</sup> de suelo por día)	0.011	Hsiao <i>et al.</i> , 2009
Efecto de la cobertura del dosel en la reducción de la evaporación del suelo al final de la temporada	adimensional	50	Hsiao <i>et al.</i> , 2009
Superficie del suelo cubierta por una plántula individual al 90% de emergencia (cm <sup>2</sup> )	cm <sup>2</sup>	6.5	Gabriel, 2016
Tamaño del dosel de la planta individual (rebrote) al primer día (cm <sup>2</sup> )	cm <sup>2</sup>	5	Datos generados
Numero de planta por hectárea	plantas / h	40000	Datos generados
Coeficiente de crecimiento del dosel (CGC): Aumento de la cobertura del dosel (fracción de cobertura)	% day <sup>-1</sup>	0.16	Gabriel, 2016
Cobertura máxima del dosel (CCx) en fracción de cobertura del suelo	%	0.90	Ahmadi, 2015
Coeficiente de disminución del dosel (CDC): Disminución de la cobertura del dosel (en fracción por día)	% day <sup>-1</sup>	0.11	Gabriel, 2016
Días calendario: desde la siembra hasta la emergencia	días	3	Datos generados

Continúa la tabla 4

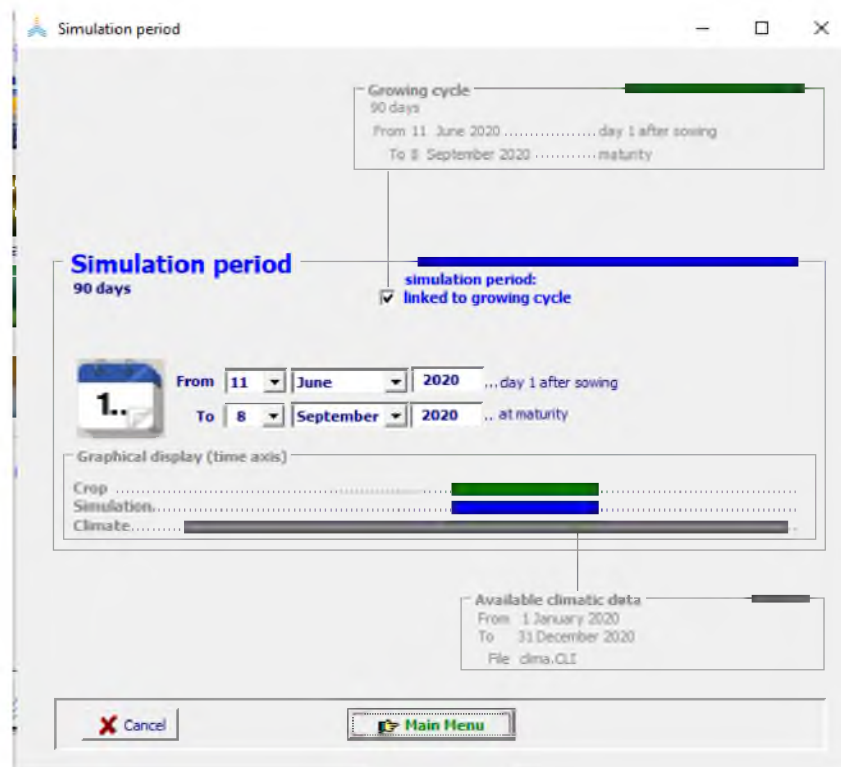
Continuación de la Tabla 4

Días calendario: desde la siembra hasta la profundidad máxima de enraizamiento	días	80	Datos generados
Días calendario: desde la siembra hasta el inicio de la senescencia	días	86	Datos generados
Días calendario: desde la siembra hasta la madurez (duración del ciclo de cultivo)	días	115	Datos generados
Días naturales: desde la siembra hasta la floración	días	60	Datos generados
Duración de la etapa de floración (días)	días	5	Datos generados
Determinación del cultivo vinculada a la floración	días	1	Datos generados
Exceso de frutos potenciales (%)	%	50	Datos generados
Generación del índice de cosecha a partir de la floración (días)	días	40	Datos generados
Productividad del agua normalizada para ETo y CO2 (WP *) (gramos / m2)	gr.m-2	33.7	Gabriel, 2016
Productividad de agua normalizada para ETo y CO2 durante la formación de rendimiento (como% WP	gr.cm-3	100	Hsiao <i>et al.</i> , 2009
Rendimiento del cultivo bajo una concentración elevada de CO2 atmosférico (%)	ton/ha	50	Hsiao <i>et al.</i> , 2009
Índice de cosecha de referencia	%	56	Hamid, 2015
Posible aumento (%) de HI debido al estrés hídrico antes de la floración	%	0	Datos generados
Coefficiente que describe el impacto positivo en el HI del crecimiento vegetativo restringido durante l	%	10	Gabriel, 2016
Coefficiente que describe el impacto negativo en el IH del cierre de estomas durante la formación del	%	3	Kheng, 2009
Aumento máximo permitido de HI especificado	%	15	Gabriel, 2016

## 6.9 Simulación de la biomasa para el año 2020

### 6.9.1 Período de simulación

Después de llevar a cabo la calibración del programa AquaCrop, en el panel Simulation (Simulación), se debe de especificar el período de simulación, es decir el tiempo que duró el ciclo del cultivo, la duración del cultivo fue de 90 días calendario desde la siembra, Figura 22.

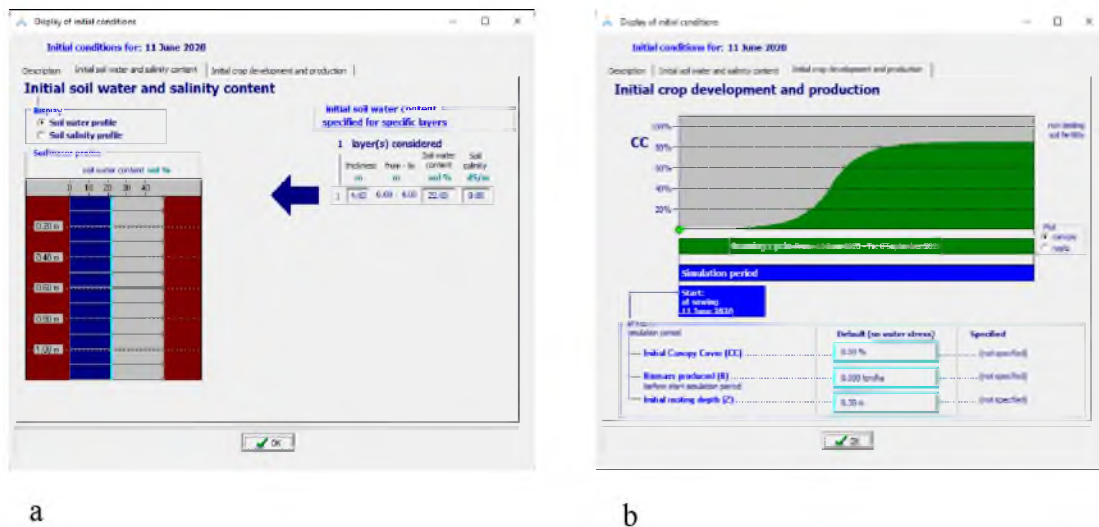


*Figura 22.* Período de simulación.

### 6.9.2 Condiciones Iniciales

Las condiciones iniciales fueron datos que se utilizaron para la simulación, en donde se especificó la humedad del suelo y el contenido de sales en el perfil del mismo al comienzo de la simulación. Se ingresaron datos de manejo, como lo son: acolchado de suelo y el

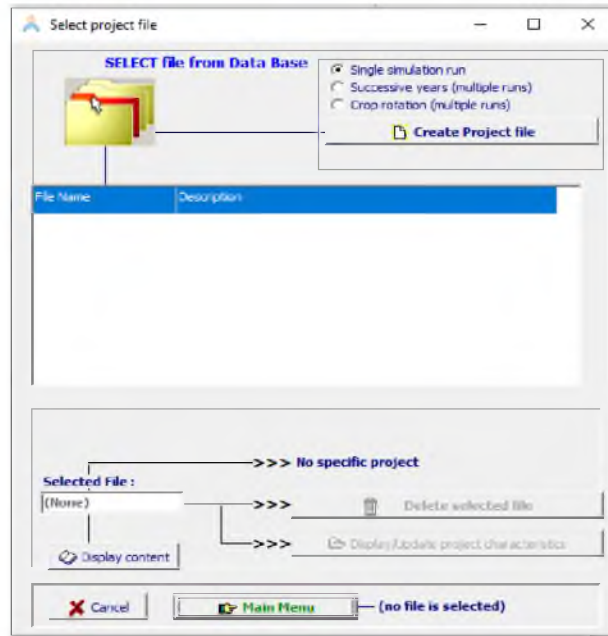
tipo de riego, esto se hace si se desea simular los efectos del riego pre-estación y en barbecho (Figura 23), comenzando con cero.



**Figura 23.** Condiciones iniciales, antes de la simulación

### 6.9.3 Rotación de cultivos

En este apartado se describe el proceso de selección sobre el tipo de datos a ingresar, si son de una única ejecución, de múltiples ejecuciones o de rotación de cultivo. Para este estudio se seleccionó la opción de una sola ejecución, Figura 24.



*Figura 24.* Menú de selección para una sola ejecución

### 6.10 Indicadores estadísticos

Los resultados obtenidos a través de los indicadores estadísticos para la biomasa y la raíz se muestran en la Tabla 5; cuadrado medio del error (RMSE), desviación porcentual (Pd), cuadrado medio del error normalizado (NRMSE), coeficiente de eficacia (EF) e índice de concordancia (d-index).

**Tabla 5.** Indicadores de biomasa y crecimiento de raíz de maíz nativo.

INDICADORES	ECUACIÓN	RESULTADOS	
		BIOMASA	CRECIMIENTO DE LA RAIZ
Pd	$\left(\frac{P_i - O_i}{O_i}\right) \times 100$	117.65	1.05
RMSE	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}$	4.50	0.13
NRMSE	$\frac{1}{\bar{O}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \times 100$	22.36	2.44
EF	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$	0.64	-0.75
d-índex	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n ( P_i - \bar{O}  +  O_i - \bar{O} )^2}$	0.78	0.96

El coeficiente de eficacia (EF) proporciona el ajuste que existe entre los datos observados y los datos simulados. El EF debe ser igual a 1 para tener un valor óptimo. Un EF entre 0.0 y 1.0 se considera un rendimiento aceptable, mientras que los valores cercanos a 1.0 significan que la varianza del residuo es mucho menor que la varianza de los datos observados y por lo tanto se puede afirmar que el rendimiento del modelo es bueno. Cuando el EF se encuentra cerca de 0 o se obtiene un número negativo indica que los datos observados son mejores que los datos de simulación y debido a esto el modelo se rechaza (Adeboye *et al.*, 2021).

De acuerdo con Moriasi *et al.* (2007), los resultados con coeficientes de determinación mayores a 0.5 se consideran aceptables para el modelo como el que se está analizando. Para el caso de la raíz del cuadrado medio del error (RMSE), para tener un ajuste perfecto del modelo el valor debe de ser igual a 0, aunque no es posible, ya que la mayoría de los valores dependen de la serie de datos que se esté manejando, mientras los valores se manejen por debajo de la desviación estándar de los datos medidos, esto indica un uso adecuado para la comparación y evolución del modelo.

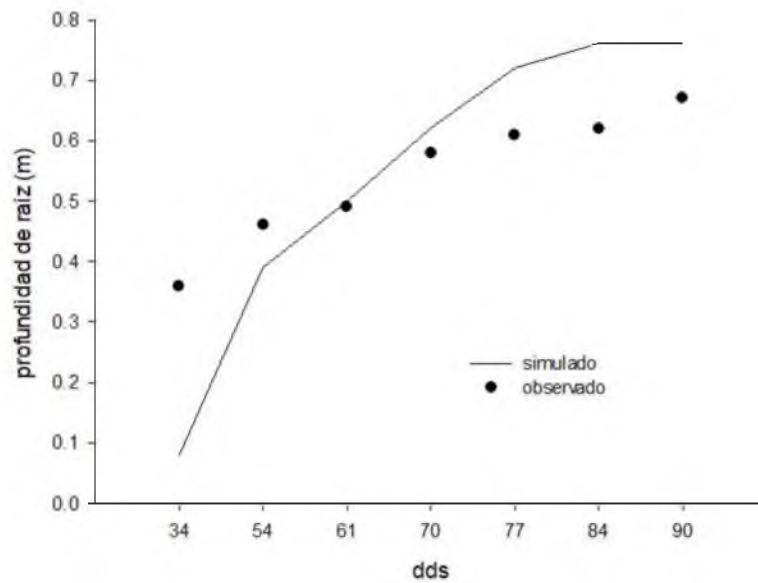
El coeficiente de eficacia (EF) para la biomasa fue de 0.6, es decir, se obtuvo un rendimiento aceptable, ya que el valor está próximo a 1, por lo tanto, la varianza del residuo es menor que la varianza de los datos observados y que el rendimiento del modelo es adecuado (Adeboye *et al.*, 2021).

El índice de concordancia de Willmott (d-index) obtenido en la modelación fue de 0.78. El índice d oscila entre 0 y 1, por lo que 1 significa una concordancia perfecta entre los datos observados y los predichos, por otro lado, un valor de 0 muestra que no hay concordancia. Un índice d superior a 0,7 es aceptable para la calibración en agronomía Adeboye *et al.* (2021) el cual concuerda con lo encontrado en esta investigación.

La biomasa simulada resultó tener un rendimiento de (4.53 ton/ha), un cuadrado medio del error normalizado (NRMSE) de 22.36 % y una desviación porcentual (Pd) de 18.3%, la cual se considera alta. De acuerdo a Sandhu y Irmak (2019) reportan un RMSE de 4.5% y NRMSE de 31% diferente a lo que se obtuvo en la presente investigación.

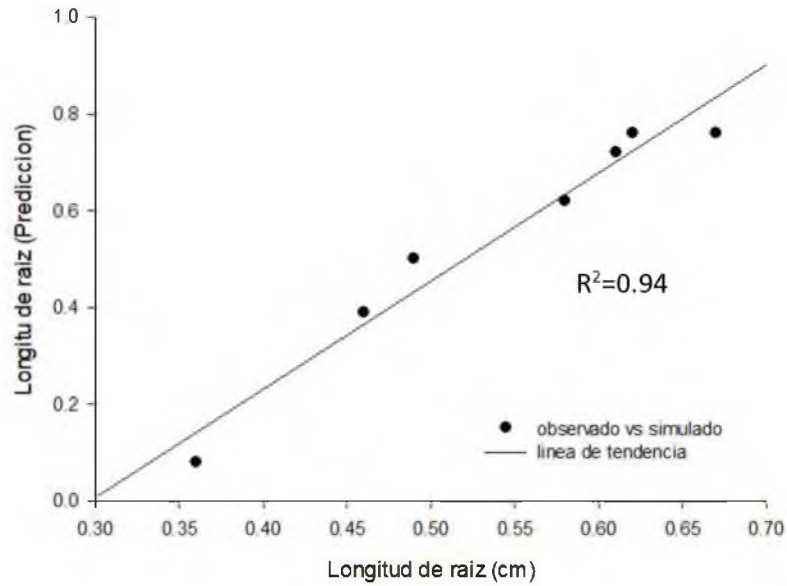
### 6.11 Simulación del crecimiento de raíz para el año 2020

En la Figura 25 se representa la simulación de raíz de los datos observados contra lo simulado, donde la tendencia del crecimiento de las raíces con respecto al tiempo se comporta de manera lineal.



*Figura 25.* Simulación de raíz vs observado del año 2020.

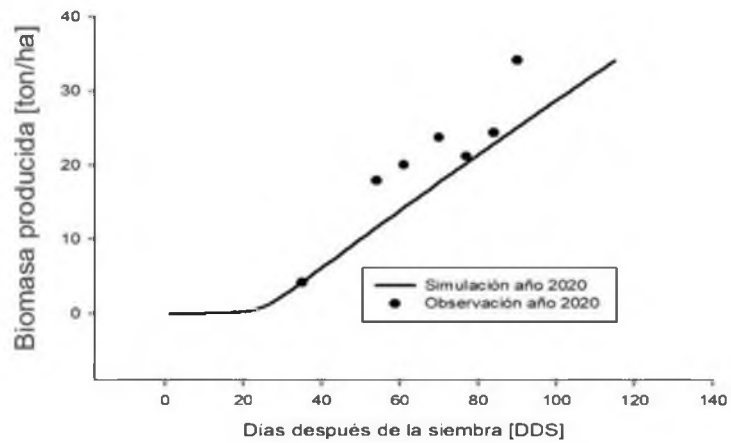
En la Figura 26 se describe la regresión lineal de la raíz del cultivo de maíz, dicha regresión expresa la concordancia que tienen los datos observados y lo simulado donde se obtuvo una  $R^2=0.94$ . De esta manera se puede concluir que el modelo se ajusta bastante bien.



**Figura 26.** Línea de tendencia de los datos observados y simulados en la regresión lineal simple de la raíz.

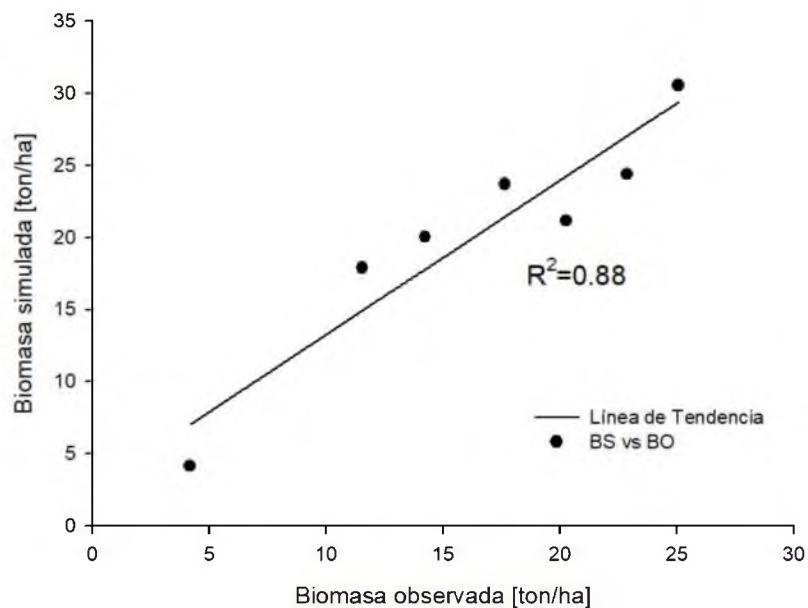
### 6.12 Simulación de la producción de biomasa para el año 2020

La Figura 27 describe el comportamiento de los datos simulados contra los datos medidos para la producción de biomasa.



**Figura 27.** Biomasa del maíz criollo en el año 2020 simulado contra los observado.

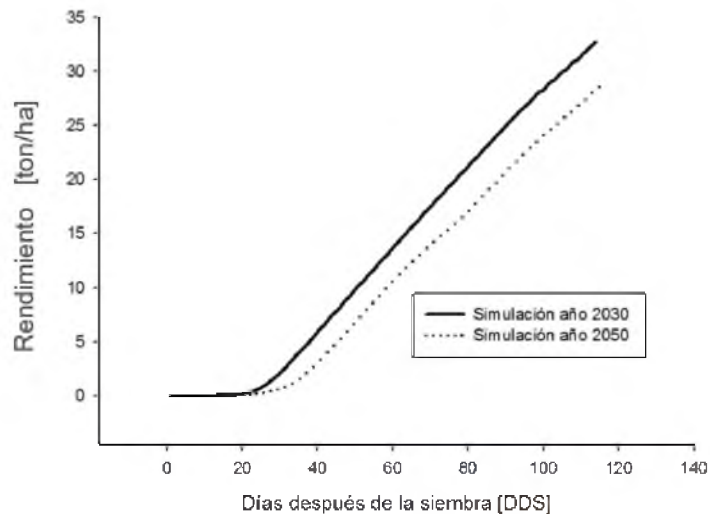
Con la finalidad de saber que correlación tienen los datos medidos con los simulados se realizó una regresión lineal, de acuerdo a los resultados obtenidos en esta regresión lineal la  $R^2$  que se obtuvo entre los datos observados y simulados fue de 0.88 para la biomasa como se muestra en la Figura 28, este resultado indica que hay una buena concordancia entre el conjunto de datos observados y los simulados, este valor concuerda con lo recomendado por Adeboye *et al.* (2021) quienes recomiendan una  $R^2 > 0.80$ , para los estudios de simulación de cultivos.



**Figura 28.** Línea de tendencia de los datos observados y simulados en la regresión lineal simple de la biomasa.

### 6.13 Producción de biomasa, crecimiento de raíz y rendimiento bajo escenarios de cambio climático.

La tendencia que tendrá la producción de maíz nativo para los años 2030 y 2050 se describe en la Figura 29, en donde la producción para los años 2030 será mucho mayor que para los años 2050. Esto debido al aumento de gas de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, lo cual traerá graves consecuencias como es el aumento de la temperatura y mayor variabilidad de la precipitación y por ende el cultivo de maíz disminuiría notablemente su producción por efectos adversos del CC (Ahumada-Cervantes *et al.*, 2014). Estrada (2001) también afirma que los niveles de concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico aumentarán y otros gases de efecto invernadero, por lo tanto la temperatura media global aumentará entre 1.4 y 5.8 °C del año 1990 al 2100; esto reducirá la producción de maíz de temporal en México y los ecosistemas se modificarán en un 50.0%, afectando especialmente los climas templados (Estrada, 2001).



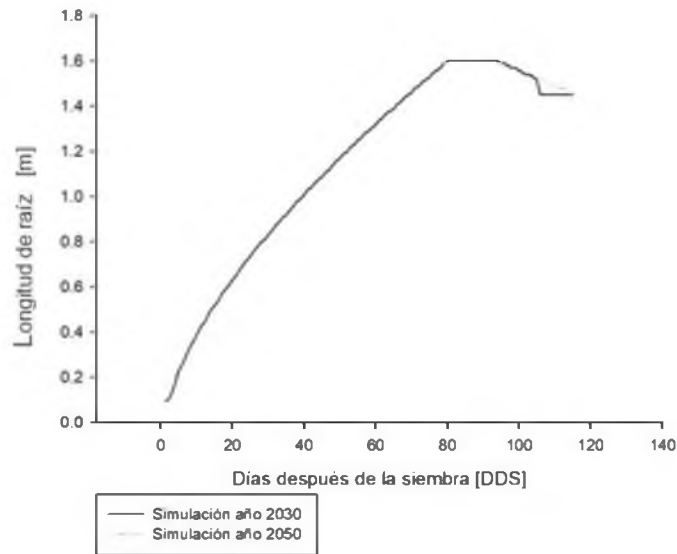
**Figura 29.** Simulación de biomasa de maíz criollo para los años 2030 y 2050.

Los escenarios climáticos para la región de Centroamérica se prevé que la temperatura oscilará entre 1.5 °C a 4 °C, y una disminución de la precipitación de un 10 y 30 % para el año 2100, de igual forma habrá una reducción de los rendimientos agrícolas la cual se verá afectado entre el 12 al 50%, lo que provocará un impacto directo en la producción agrícola (IIICA, 2014). De acuerdo con las investigaciones realizadas por Zarazúa-Villaseñor *et al.* (2011) predice que para finales del siglo XXI habrá un incremento de 6.5 °C en temperaturas máximas, mientras que las temperaturas medias serán de 3.6 °C y de 0.09 °C en temperaturas mínimas, en comparación las temperaturas actuales. Por otro lado, Imbach *et al.* (2012) describe que el cambio de temperatura oscilará entre 1.8 y 3.8 °C y al mismo tiempo habrá una disminución de lluvia, lo cual se estima que será de 70 a 120 mm.

Para los años 2050, habrá cambios en la forma de cultivar maíz en aproximadamente el 40% de la superficie del país. En cuanto a la temperatura que se registrará en México en el año 2080 aumentará entre 2 a 4°C, lo que tendría graves consecuencia, principalmente en el ciclo hidrológico. Se estima que para el año 2030 habrá una disminución del 10% de agua disponible respecto a la que teníamos en el 2000, provocando problemas en la floración de las plantas, las migraciones de las aves y la aparición de las primeras hojas de los árboles en la primavera (SEMARNAT, 2009).

En la Figura 30 se muestra el comportamiento que tendrá el crecimiento de raíz para los años 2030 y 2050, en donde se observa que a partir de la siembra hasta los días 80 el crecimiento se comporta de manera lineal, sin embargo, para los días restantes de lo que dura el ciclo del cultivo habrá una reducción de 10 cm para ambos, tanto para la simulación del año 2030 como para el año 2050. Este resultado se debe a que el maíz criollo se ha

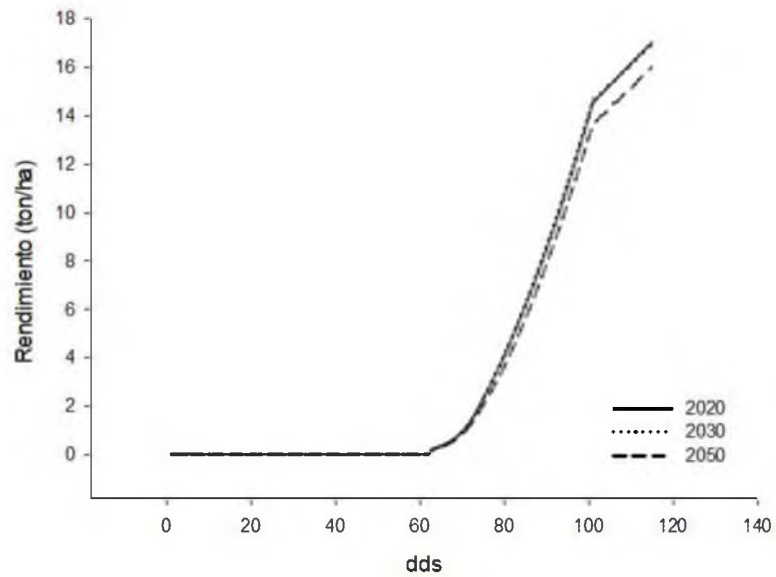
seleccionado por los productores durante varias generaciones y a razón de esto se ha adaptado a las condiciones climáticas de diferentes regiones (Delgado-Ruiz *et al.*, 2018).



**Figura 30.** Simulación de raíz de maíz nativo para los años 2030 y 2050.

Con relación a los rendimientos de biomasa, considerando escenarios de cambio climático, se puede apreciar en la Figura 31 el comportamiento a 30 años. Estos rendimientos corresponden a rendimientos potenciales que se podrían obtener con el maíz nativo; es decir se trata de un rendimiento máximo considerando algunos supuestos como la no afectación por plagas y enfermedades o la limitación en CO<sub>2</sub>. Khanal *et al.* (2021) predice que los rendimientos serán de 14 hasta 22 toneladas por hectárea bajo diferentes condiciones de labranza con maquinaria. Los rendimientos para los años 2020 y 2030 no habrá disminución en la producción de grano, sin embargo, para el año 2050 si habrá una

disminución de una tonelada por hectárea. Los bajos rendimientos para el año 2050 se debe por el aumento de temperatura de 1.5 y el aumento de 114 mm de precipitación, provocando problemas en el desarrollo de la floración y en el rendimiento del cultivo de maíz (Granado y Sarabia, 2013).



**Figura 31.** Rendimientos promedios de maíz nativo para los años 2030 y 2050.

## 7. CONCLUSIONES

El rendimiento de biomasa de maíz nativo se calibró y simuló para los años 2030 y 2050 en Loma Bonita, Oaxaca utilizando datos meteorológicos y datos de cultivo de maíz nativo con el modelo AquaCrop. La simulación entre los datos observados y simulados obtuvo un coeficiente de determinación de  $R^2= 0.88$ , obteniendo un ajuste adecuado entre los datos reales y simulados. Con respecto a la simulación de biomasa para los años 2030 y 2050, el rendimiento será de 32.7 ton/ha y 28.2 ton/ha, respectivamente. El modelo AquaCrop es una herramienta que se puede utilizar para estimar el rendimiento de maíz nativo bajo diferentes escenarios climáticos, estrés hídrico, necesidades de riego y el impacto de diferentes condiciones agronómicas.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Abedinpour, M., Sarangi, A., Rajput, T. B. S., Singh, M., Pathak, H., y Ahmad, T. (2012). Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 110, 55-66.
- Adeboye, O. B., Schultz, B., Adeboye, A. P., Adekalu, K. O., y Osunbitan, J. A. (2021). Application of the AquaCrop model in decision support for optimization of nitrogen fertilizer and water productivity of soybeans. *Information Processing in Agriculture*, 8(3), 419–436. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2020.10.002>
- Ahmadi, S. H., Mosallaeepour, E., Kamgar-Haghighi, A. A., y Sepaskhah, A. R. (2015). Modeling maize yield and soil water content with AquaCrop under full and deficit irrigation managements. *Water Resources Management*, 29(8), 2837-2853.
- Ahumada-Cervantes, R., Velázquez, G., Flores Tavizón, E., y Romero, J. (2014). Impactos potenciales del cambio climático en la producción de maíz. *Investigación y Ciencia*, 22(61), 48–53.
- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D. y Smith M. (1998). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO: Riego y drenaje N.º 56.
- Amador, A. L., y Boschini-Figueroa, C. (2000). Fenología productiva y nutricional de maíz para la producción de forraje. *Agronomía mesoamericana*, 11(1), 171-177.
- Angella, G. A. (2016). *Sistema de riego del Río Dulce, Santiago del Estero, Argentina. Brecha de rendimientos y productividad del agua en los cultivos de maíz y algodón*. Tesis de doctorado. Universidad de Córdoba Departamento de Agronomía. Disponible en: <https://helvia.uco.es/bitstream/handle/10396/13217/2016000001263.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (consultado: 14 de marzo de 2022).
- Arellano-Vázquez, José Luis, Virgen-Vargas, Juan, y Rojas-Martínez, Israel. (2018). Venado H74: híbrido de maíz precoz para áreas de temporal y riego del Altiplano Central de México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 9(7), 1539-1546. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i7.1678>

- Arrieche, I., y Ruiz, M. (2014). Efecto de la fertilización orgánica con NPK sobre la materia orgánica y el rendimiento del maíz en suelos degradados. *Revista Observador del conocimiento*, 2(1), 203-212.
- Salazar, J. A. E., y Boschini-Figueroa, C. (2002). Producción de forraje con maíz criollo y maíz híbrido. *Agronomía mesoamericana*, 13(1), 13-17.
- Candelaria-Martinez, B., Ruiz Rosado, O., Gallardo López, F., Pérez Hernández, P., Martínez Becerra, Á., y Vargas Villamil, L. (2011). Aplicación de modelos de simulación en el estudio y planificación de la agricultura, una revisión. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(3), 999–1010.
- Carrillo, C. (2009). El origen del maíz. Naturaleza y cultura en Mesoamérica. *Ciencias*, 92–93(092), 4–13.
- Carvajal, F. E., y Caviedes, M. (2019). Análisis comparativo de la eficiencia productiva del maíz en Ecuador, Sudamérica y el mundo en las dos últimas décadas y análisis prospectivo en el corto plazo Análisis de la eficiencia productiva de maíz. *ACI Avances En Ciencias e Ingenierías*, 11(17), 94–103.
- Cavero, J., Farre, I., Debaeke, P., y Faci, J. M. (2000). Simulation of maize yield under water stress with the EPICphase and CROPWAT models. *Agronomy Journal*, 92(4), 679–690. <https://doi.org/10.2134/agronj2000.924679x>
- Cleves, J. A., Toro, J., y Martínez, L. F. (2016). Los balances hídricos agrícolas en modelos de simulación agroclimáticos. Una revisión analítica. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 10(1), 149-163. <http://dx.doi.org/10.17584/rcch.2016v10i1.4460>
- Espinoza, L. C., Casillas, J. M. H., Sangerman-Jarquín, D. M., Hirán, S., y Bañuelos, M. (2013). Los maíces criollos y su conservación desde la perspectiva de los productores. *ARTÍCULOS in extenso*, 26.
- Cruz, O. (2013). El cultivo del maíz, manual para el cultivo de maíz en Honduras. Programa Nacional de Maíz-DICTA. Secretaría de Agricultura y Ganadería (SAG). Tegucigalpa, Honduras.
- De Rossi, R., Guerra, F., Plaza, M. C., Vuletic, E., Brücher, E., Guerra, G., ... y Magnone, G. (2016, August). Enfermedades del maíz en las últimas cinco campañas. In *Actas resúmenes XXIV Congreso Aapresid-Resiliar*. Rosario, Argentina (Vol.

3).

- Delgado-Ruiz, Fredy, Guevara-Hernández, Francisco, y Acosta-Roca, Rosa. (2018). Criterios campesinos para la selección de maíz (*Zea mays* L.) en Villaflores y Villa Corzo, Chiapas, México. *CienciaUAT*, 13(1), 123-134. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v13i1.985>
- Deras-Flores, H. (2020). Guía técnica: el cultivo de maíz. Disponible en: [file:///C:/Users/ASUS/Downloads/BVE20098105e%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/ASUS/Downloads/BVE20098105e%20(2).pdf). (consulta: 15 de marzo de 2022).
- Díaz-Pérez, Y., y Villalobos-Pérez, M. A. (2018). Validación del modelo AquaCrop en maíz (*Zea mays* L.) y sorgo (*Sorghum vulgare* L. Monech). *Revista Ingeniería Agrícola*, 8(2), 3-10.
- Estrada, M. (2001). Cambio Climático Global, causa y consecuencias. *Revista de Información y Análisis*, 01(16), 7–17. [https://www.academia.edu/6789690/Cambio\\_climático\\_global\\_causas\\_y\\_consecuencias](https://www.academia.edu/6789690/Cambio_climático_global_causas_y_consecuencias)
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., y Raes, D. (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. Estudio FAO: Riego y Drenaje (FAO) spa no. 66.
- Raes, D., y Munoz, G. (2009). The ETo Calculator. Reference Manual Version, 3, 480.
- Fernández, R., Morales, L. A., y Gálvez, A. (2013). Importancia De Los Maíces Nativos De México En La Dieta Nacional. Una Revisión Indispensable. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 36(Supl.3-A), 275–283.
- Fernández, T. J. A. A. (2007). Mensaje del Presidente. Disponible en: [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/31790079/revista\\_maiz-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1647373571&Signature=FEoMSuLn625d86aUtcAE8ytYrOSXWoJrX3~PSr7jZziOZUQD5sSqtus0FYFw32awUOcVUs9hHqD0Gm5pol3e4VnjFC11NP4tsKAQmrTpazOTCHRNiMSmIn8o0KoAu9SLY1PnSpZLbrZAYBjrnqEqbX3gkw9QkHkLQpDbk7Q5m9C98gl0414PMxNSIHThfnd1uOolHJ4~eCI4DKSYZu69vVgYyXvyR3X-ZRRQeNFNajMY~~nOmbourAHTEGdjAc4AFWyat0opvx317zb-toLw7V5cBQe3MRPxufub0U5ahmffyo3dzaAcqYuPpFz4Kr6yR0IUWxnJedqZ-6xi~rSA\\_\\_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/31790079/revista_maiz-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1647373571&Signature=FEoMSuLn625d86aUtcAE8ytYrOSXWoJrX3~PSr7jZziOZUQD5sSqtus0FYFw32awUOcVUs9hHqD0Gm5pol3e4VnjFC11NP4tsKAQmrTpazOTCHRNiMSmIn8o0KoAu9SLY1PnSpZLbrZAYBjrnqEqbX3gkw9QkHkLQpDbk7Q5m9C98gl0414PMxNSIHThfnd1uOolHJ4~eCI4DKSYZu69vVgYyXvyR3X-ZRRQeNFNajMY~~nOmbourAHTEGdjAc4AFWyat0opvx317zb-toLw7V5cBQe3MRPxufub0U5ahmffyo3dzaAcqYuPpFz4Kr6yR0IUWxnJedqZ-6xi~rSA__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA). (consulta: 15 de

marzo de 2022).

- Flores-Gallardo, H., Ojeda-Bustamante, W., Flores-Magdaleno, H., Sifuentes-Ibarra, E., y Mejía-Saénz, E. (2013). Simulación del rendimiento de Maíz (*Zea mays* L.) en el norte de Sinaloa usando el modelo AquaCrop. *Agrociencia*, 47(4), 347-359.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 2017. Base de datos de producción agropecuaria FAOSTAT. Disponible en <http://faostat3.fao.org/download/Q/QC/E>. (consulta: 22 de enero de 2022).
- Forero, F. E., Fernández, J. P., y Álvarez Herrera, J. G. (2010). Efecto de diferentes dosis de cachaza en el cultivo de maíz (*Zea mays*). *Revista U.D.C.A Actualidad y Divulgación Científica*, 13(1), 77-86. <https://doi.org/10.31910/rudca.v13.n1.2010.711>
- García, A. J. L. (2008). Tecnología para la producción de maíz en la región Papaloapan. *Agroproduce. Fundación Produce Oaxaca, AC*, 21-22. [https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as\\_sdt=0%2C5&q=Garc%C3%ADa%2C+A.J.L.+2008.+Tecnolog%C3%ADa+para+la+producci%C3%B3n+de+ma%C3%ADz+en+la+regi%C3%B3n+Papaloapan.+Agroproduce.+Fundaci%C3%B3n+Produce+Oaxaca+A.+C.+pp.+21-22.&btnG=](https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Garc%C3%ADa%2C+A.J.L.+2008.+Tecnolog%C3%ADa+para+la+producci%C3%B3n+de+ma%C3%ADz+en+la+regi%C3%B3n+Papaloapan.+Agroproduce.+Fundaci%C3%B3n+Produce+Oaxaca+A.+C.+pp.+21-22.&btnG=). (consulta: 12 de diciembre de 2021).
- García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de koppen. in Instituto de Geografía Universidad Nacional Autónoma de México. <https://doi.org/10.2307/j.ctv1xxv3n.2>. Fecha de consulta: 10 de octubre de 2022.
- García, P. J. (2017). El cultivo del maíz en el mundo y en Perú. *Revista de Investigaciones de La Universidad Le Cordon Bleu*, 4(2), 73-79. <https://doi.org/10.36955/riulcb.2017v4n2.005>.
- Guzmán-Gómez, L. R. (2020). Efecto de la aplicación de bioestimulantes en el crecimiento y rendimiento de un híbrido y una variedad de maíz (*Zea mays*) en Santa Clara de San Carlos, Alajuela Costa Rica. Tesis de licenciatura. Instituto Tecnológico de Costa Rica Campus Tecnológico local San Carlos. Disponible en: [https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/12296/efecto\\_aplicacio](https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/12296/efecto_aplicacio)

n\_bioestimulantes\_crecimiento\_rendimiento.pdf?sequence=1&isAllowed=y.  
(consultado: 14 de marzo de 2022).

- Guzmán-Soria, E., Garza-Carranza, M. T., González-Farías, J. P., y Hernández-Martínez, J. (2014). Análisis de los costos de producción de maíz en la Región Bajío de Guanajuato. *Análisis Económico*, 29(70), 145–156.
- Hellin, J., Keleman, A., López, D., Donnet, L., y Flores, D. (2013). La Importancia De Los Nichos De Mercado. Un estudio de caso del maíz azul y del maíz para pozole en México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 36(SUPPL.3), 315–328.
- Heng, L. K., Hsiao, T., Evett, S., Howell, T., y Steduto, P. (2009). Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. *Agronomy Journal*, 101(3), 488–498. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0029xs>
- Hernández-Bautista, B., Ojeda Bustamante, W., Ruiz García, A., y Flores Velazquez, J. (8-10 de septiembre, 2016). Uso del modelo de simulación fao-aquacrop para determinar el período óptimo de siembra de maíz bajo condiciones de temporal. II Congreso Nacional de Riego y Drenaje COMEII 2016. Simposio. Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo. km 38.5 Carr.México-Texcoco. 56230. Chapingo, México.
- Hernández, A., Estrada-Drouaillet, B., Rodríguez-Herrera, R., García-Giron, J. M., Patiño-Arellano, S. A., y Osorio-Hernández, E. (2019). Importancia del control biológico de plagas en maíz (*Zea mays* L.). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(4), 803–813.
- Hernández, V. M. (2016). *Extracción de Antocianina a partir de maíz morado (Zea mays L.) para ser utilizado como antioxidante y colorante en la industria alimentaria*. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. Disponible en: <https://repositorio.unprg.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12893/878/BC-TES-5646.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. (consultado: 14 de marzo de 2022).
- Hsiao, T. C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., y Fereres, E. (2009). AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*, 101(3), 448-459.
- Imbach, P., Molina, L., Locatelli, B., Rouspard, B. Mahé, G., Neilson, R., Ciais, P. (2012). Modeling Potential Equilibrium States of Vegetation and Terrestrial Water Cycle

of Mesoamerica under Climate Change. Scenarios. *American Meteorological Society*. 13,665-680. Recuperado de: <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/JHM-D-11-023.1>. Fecha de consulta: 12 de enero de 2022.

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). (2014). Participación del sector agropecuario latinoamericano en las negociaciones de la convención marco de las naciones unidas sobre cambio climático y en otros foros internacionales: Resultados del Encuentro Regional “Fortalecimiento del Diálogo Interamericano sobre Agricultura y Cambio Climático”. Recuperado de: [http://www.infoagro.net/sites/default/files/migrated\\_documents/attachment/ES\\_21\\_3vbfh225561.pdf](http://www.infoagro.net/sites/default/files/migrated_documents/attachment/ES_21_3vbfh225561.pdf). Fecha de consulta: 02 de febrero de 2022.

Jones, C. A., J. R. Kiniry, P. T. Dyke, D. B. Farmer, and D. C. Godwin. 1986. CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development. Texas A&M University Press, College Station. 194 p.

Jurado, P., Lara Macías, C. R., y Saucedo Terán, R. A. (2013). Paquete tecnológico para la producción de maíz forrajero en Chihuahua. In SSRN Electronic Journal (Vol. 1, Issue 2). <http://www.eldis.org/vfile/upload/1/document/0708/DOC23587.pdf>  
<http://socserv2.socsci.mcmaster.ca/~econ/ugcm/3ll3/michels/polipart.pdf>  
<https://www.theatlantic.com/magazine/archive/1994/02/the-coming-anarchy/304670/>  
<https://scholar.google.it/scholar?> (consulta: 10 de diciembre de 2022).

Keating, B. A., Carberry, P. S., Hammer, G. L., Probert, M. E., Robertson, M. J., Holzworth, D., Huth, N. I., Hargreaves, J. N. G., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verburg, K., Snow, V., Dimes, J. P., Silburn, M., Wang, E., Brown, S., Bristow, K. L., Asseng, S. y Smith, C. J. (2003). An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*, 18(3–4), 267–288. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00108-9](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00108-9)

Khanal, S., Klopfenstein, A., KC, K., Ramarao, V., Fulton, J., Douridas, N., y Shearer, S. A. (2021). Assessing the impact of agricultural field traffic on corn grain yield using remote sensing and machine learning. *Soil and Tillage Research*, 208, 104880. doi:10.1016/j.still.2020.104880

- López, B., y Sosa Montes, E. (2013). Caracterización Física Y Composición Química De Razas De Maíz De Grano Azul/Morado De Las Regiones Tropicales Y Subtropicales De Oaxaca. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 36(1), 23–31.
- Luna-Mena, B. M., Altamirano-Cárdenas, J. R., Santoyo-Cortés, V. H., y Rendón-Medel, R. (2016). Factores e innovaciones para la adopción de semillas mejoradas de maíz en Oaxaca. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 7(SPE15), 2995-3007.
- Marcos, B., Martínez Campos, Á. R., López Urquidez, G. A., López Orona, C. A., y Arteaga Reyes, T. T. (2016). La biomasa de los sistemas productivos de maíz nativo (*Zea mays*) como alternativa a la captura de carbono. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32(3), 361–367. <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.03.10>
- Martinez-Fornos, A. D. J., y Sandoval Rizo, U. J. (2020). Evaluación del crecimiento y rendimiento de los cultivos asociados maíz (*Zea mays* L.), tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y camote (*Ipomoea batatas* L.) en la producción biointensivo bajo riego complementario, Finca El Plantel, 2019 (Doctoral dissertation, Universidad Nacional Agraria).
- Morla, F. D., y Giayetto, O. (2012). Calibración y validación del modelo AquaCrop de la FAO en cultivos representativos del centro sur de Córdoba. en *XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Argentina*.
- Luna-Mena, B. M., Altamirano-Cárdenas, J. R., Santoyo-Cortés, V. H., y Rendón-Medel, R. (2016). Factores e innovaciones para la adopción de semillas mejoradas de maíz en Oaxaca. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 7(SPE15), 2995-3007.
- Pérez, F., Figueroa Hernández, E., Godínez Montoya, L., García Núñez, R. M., Sepúlveda Jiménez, D., y Santos Melgoza, D. M. (2014). Investigación en matemáticas, economía y ciencias sociales (pp. 404–421).
- Prado-Martínez, Maribel, Anzaldo-Hernández, José, Becerra-Aguilar, Bruno, Palacios-Juárez, Hilda, Vargas-Radillo, José de Jesús, y Rentería-Urquiza, Maite. (2012). Caracterización de hojas de mazorca de maíz y de bagazo de caña para la elaboración de una pulpa celulósica mixta. *Madera y bosques*, 18(3), 37-51

- Pérez, D. C. Q., Herrera, J. C., Escalante, L. N., y del Valle, J. M. Z. (2017). Maíz: Sustento de vida en la cultura Teenek. Comunidad Tamaletom, Tancanhuitz, SLP México. *Revista de Geografía Agrícola*, (58), 5-19.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. y Fereres, E. 2011. AquaCrop - Reference Manual. Disponible en: <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>. (consulta: 19 de septiembre de 2021).
- Ruiz, C. J. A.; Medina, G. G.; Ortiz, T. C.; Martínez, P. R.; González, A. I. J.; Flores, L. H. E. y Byerly, M. K. F. (1999). Requerimientos agroecológicos de cultivos. INIFAP. Libro técnico. Núm. 3. 324 p.
- Salinas-Moreno, Y., Aragón Cuevas, F., Ybarra Moncada, C., Aguilar Villarreal, J., Altunar López, B., y Sosa Montes, E. (2013). Caracterización física y composición química de razas de maíz de grano azul/morado de las regiones tropicales y subtropicales de Oaxaca. *Revista fitotecnia mexicana*, 36(1), 23-31.
- Sánchez, I., y Pérez, E. (2014). Maíz I (*Zea mays* L.). *REDUCA Biología*, 7(2), 151–171.
- Sánchez-Hernández, Miguel Ángel, Aguilar-Martínez, Cecilio Ubaldo, Valenzuela-Jiménez, Nicolás, Sánchez-Hernández, César, Jiménez-Rojas, María Concepción, y Villanueva-Verduzco, Clemente. (2011). Densidad de siembra y crecimiento de maíces forrajeros. *Agronomía Mesoamericana*, 22(2), 281-295. Retrieved February 11, 2022, from [http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1659-13212011000200005&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1659-13212011000200005&lng=en&tlng=es).
- Sánchez-Sastre, L. F., Navas Gracia, L. M., Martín Gil, J., Hernández Navarro, S., Correa Guimaraes, A., Sánchez Bravo, C. T., Ruiz Potosme, N. M., y del Río Moreno, J. (5-7 de septiembre, 2011). Uso del Modelo de Crecimiento AquaCrop para Estimar el Papel de Cultivos Agrícolas en el Cambio Climático. VI Congreso Ibérico de AgroIngeniería. Conferencia llevada a cabo en el congreso. Universidad de Évora, Portugal.
- Sandhu, R., y Irmak, S. (2019). Performance of AquaCrop model in simulating maize growth, yield, and evapotranspiration under rainfed, limited and full irrigation. *Agricultural Water Management*, 223, 105687. Doi:10.1016/j.agwat.2019.105687.

- Santana-Robles, F., Granillo Macías, R., Espinoza Sánchez, F. I., Aguilar Ortega, J. C., y Ortega Zavala, J. G. (2018). Caracterización de la cadena de valor del maíz. *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de La Escuela Superior Ciudad Sahagún*, 5(9), 1–15. <https://doi.org/10.29057/ess.v5i9.2899>
- SEMARNAT. (2009). Cambio climático : ciencia, evidencia y acciones.
- Stöckle, C. O., Donatelli, M., y Nelson, R. (2003). CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*, 18(3–4), 289–307. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00109-0](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00109-0)
- Servicio Meteorológico Nacional, SMN. (2019). Normales climatológicas. Recuperado de <https://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/Normales51110/NORMAL20237.TXT>. (consulta: 20 de febrero de 2022).
- Sevilla, P., y Valdez, M. (1985). Manual del cultivo, maíz morado. FOPEX. Lima, Perú.
- SIAP. 2020. (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera), México. <http://siap.gob.mx>. México. (consulta: 14 de enero de 2022).
- Smith, B.D. (1997). Reconsidering the Ocampo Caves and the Era of Incipient Cultivation in Mesoamerica. *Latin American Antiquity*, 8(4), 342-383.
- Stöckle, C. O., M. Donatelli, and R. Nelson. (2003). CropSyst, a cropping systems simulation model. *Eur. J. Agron.* 18: 289-307.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., and Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Takhtajan, A (1980). Outline of classification of flowering plants (Magnoliophyta). *The Botanical Review*. 46: 225 – 318.
- Tejada Sorraluz, J. L., y Helfgott Lerner, S. (2018). Evaluación técnica y económica de atrazina, pendimetalin y metribuzin en maíz amarillo duro. *Idesia (Arica)*, 36(4), 121-126.
- Tovar, B, T. (2008). Caracterización morfológica y térmica del almidón de maíz (*Zea mays* L.) obtenido por diferentes métodos de aislamiento.
- Tucuch, C., Alcántar, G., Trejo, L., Volke, H., Salinas, Y., y Larqué, A. (2017). Efecto del ácido salicílico en el crecimiento, estatus nutrimental y rendimiento en maíz

- (*Zea mays* L.). *Agrociencia*, 51(7), 771–781.  
<http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v51n7/1405-3195-agro-51-07-00771.pdf>
- Tucuch-Cauich, F. M., Naal, R. K., Estrada-Vivas, J. D., y Palacios-Pérez, A. (2007). Caracterización de la producción de maíz en la zona centro-norte del estado de Campeche, México. *Agronomía Mesoamericana*, 18(2), 263-270.
- Valadez, R., y Blanco, A. (2005). Perros, maíz, el México prehispánico. *Revista de la Asociación Mexicana de Médicos Veterinarios Especialistas en Pequeñas Especies*, 16(2), 63-70.
- Valladares, C. A. (2010). Taxonomía y Botánica de los cultivos de grano. Serie Lecturas Obligatoria. Universidad Autónoma de Honduras. *La Ceiba-Honduras*, 11.
- Vessuri, H. (2016). La ciencia para el desarrollo sostenible (Agenda 2030). *CIILAC:Foro Abierto de Ciencias Latinoamerica y El Caribe, Agenda 2030*, 20.  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>. (consulta: 04 de enero de 2022).
- Yang, H. S., Dobermann, A., Lindquist, J. L., Walters, D. T., Arkebauer, T. J., y Cassman, K. G. (2004). Hybrid-maize - A maize simulation model that combines two crop modeling approaches. *Field Crops Research*, 87(2–3), 131–154.  
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2003.10.003>
- Zarazúa-Villaseñor, P., Ruiz-Corral, J. A., González-Eguiarte, D. R., Flores-López, H. E., y Ron-Parra, J. (2011). Impactos del cambio climático sobre la agroclimatología del maíz en Ciénega de Chapala, Jalisco. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(2), 351-363.

## EVIDENCIAS DEL EXPERIMENTO







## Universidad del Papaloapan

otorga la presente

### CONSTANCIA

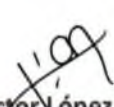
A: **Mardoqueo González Aguilar**

Por su ponencia :

**Simulación de biomasa de maíz nativo mediante el modelo  
*aquacrop***

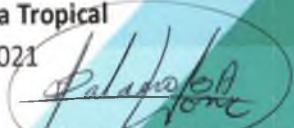
**VIII Foro de Producción Animal y IV Foro de Agricultura Tropical**

**Loma Bonita, Oaxaca; 1 al 3 de diciembre de 2021**

  
**M. C. Héctor López Arjona**  
Vicerrector Académico



  
**Dra. Tania Zúñiga Marroquín**  
Jefa de Carrera  
Licenciatura en Zootecnia

  
**Dr. Rogelio E. Palacios Torres**  
Jefe de Carrera  
Ingeniería Agrícola Tropical