

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA

ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



**MANEJO DEL ESTRÉS HÍDRICO EN LA SELECCIÓN DE GENOTIPOS DE
MAÍZ (*Zea mays* L.) TOLERANTES A SEQUÍA EN SINALOA**

POR

FREDY GONZÁLEZ HERNÁNDEZ

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA

OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

TORREÓN, COAHUILA

JUNIO 2017

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

MANEJO DEL ESTRÉS HÍDRICO EN LA SELECCIÓN DE GENOTIPOS DE
MAÍZ (*Zea mays*, L.) TOLERANTES A SEQUÍA EN SINALOA

POR

FREDY GONZÁLEZ HERNÁNDEZ

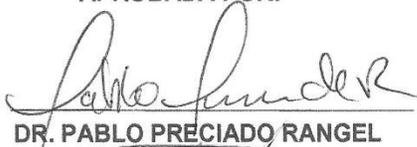
TESIS

QUE SE SOMETE A CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO EXAMINADOR COMO
REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

ING. AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

APROBADA POR:

PRESIDENTE:


DR. PABLO PRECIADO RANGEL

VOCAL:


MC. ERNESTO SIFUENTES IBARRA

VOCAL:


DR. VICENTE DE PAUL ALVAREZ REYNA

VOCAL:


DR. ESTEBAN PAVENA CHÁVEZ


M.E VÍCTOR MARTÍNEZ CUETO

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



TORREÓN, COAHUILA

JUNIO 2017

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

MANEJO DEL ESTRÉS HÍDRICO EN LA SELECCIÓN DE GENOTIPOS DE
MAÍZ (*Zea mays*, L.) TOLERANTES A SEQUÍA EN SINALOA

POR

FREDY GONZÁLEZ HERNÁNDEZ

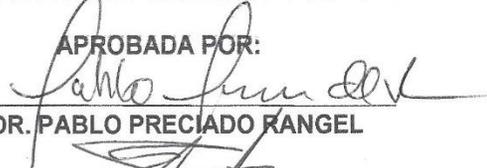
TESIS

QUE SE SOMETE A CONSIDERACIÓN DEL COMITÉ DE ASESORÍA COMO
REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

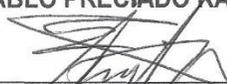
ING. AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

APROBADA POR:

ASESOR PRINCIPAL:


DR. PABLO PRECIADO RANGEL

ASESOR:


MC. ERNESTO SIFUENTES IBARRA

ASESOR:


DR. VICENTE DE PAUL ÁLVAREZ REYNA

ASESOR:


DR. ESTEBAN FAVELA CHÁVEZ

M.E VÍCTOR MARTÍNEZ CUETO

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



TORREÓN, COAHUILA

JUNIO 2017

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, una institución de gran prestigio que me brindó apoyo y las oportunidades necesarias para aprender de profesores con amplia experiencia para lograr el mayor objetivo de mi vida: ser Ingeniero Agrónomo en Horticultura.

A mis padres, el Sr. Juan González Pérez y Sra. Yaneth Hernández Ramírez por darme la vida, sus consejos y todo apoyo incondicional para ser un profesionista.

A los maestros del Departamento de Horticultura: Dr. Pablo Preciado Rangel, Dr. Pedro Cano Ríos, Dr. Ángel Lagarda Murrieta, Ing. Juan de Dios Ruiz de la Rosa, Ing. Juan Manuel Nava Santos, M.C Francisca Sánchez Bernal, Dr. Eduardo Madero Tamargo, Ing. Francisco Suarez García y Dr. Esteban Favela Chávez por compartir sus conocimientos y experiencias.

Otros profesores, Dr. Vicente de Paul Álvarez Reyna, Dr. Teodoro Herrera Pérez y Dr. Florencio Jiménez Díaz por darme la oportunidad de aprender en campo y demostrarme que no importa el grado de estudio, sino el valor y el coraje para cumplir tus objetivos.

Al Dr. Terence Luke Molnar, investigador de CIMMYT, por permitirme participar en este proyecto de tesis, por su apoyo y capacitación.

Al MC. Ernesto Sifuentes Ibarra, por darme la confianza, las oportunidades, consejos y la capacitación constante para participar en un proyecto de tesis.

Al INIFAP Campo Experimental Valle del Fuerte, institución que me dio apoyo y las oportunidades necesarias para realizar este trabajo de tesis.

Sr. Cristóbal Cortés Lara, por su apoyo incondicional en la realización de este trabajo de tesis. Un gran amigo, una persona muy humilde, muy trabajador y comprometido con su trabajo. Además, con su gran experiencia siempre demostró interés por enseñarme.

DEDICATORIAS

A mis padres:

El Sr. Juan González Pérez y Sra. Yanet Hernández Ramírez por todo el apoyo brindado y su confianza para cumplir el sueño de ser un profesionalista.

A mis abuelos:

El Sr. Artemio Hernández Pérez y Sra. María Ramírez Pérez (†), en especial a mi abuela por todos sus consejos para ser una mejor persona.

A mis hermanas:

Blanca Fabiola González Hernández e Ilsi Yasmín González Hernández por el apoyo brindado en todo momento.

A mis sobrinos

Juan Rafael Rodríguez López y William de Jesús Rodríguez López, los niños curiosos que fueron y serán motivos para seguir preparándome y ser mejor cada día.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	i
DEDICATORIAS.....	ii
INDICE DE CUADROS.....	vi
INDICE DE FIGURAS.....	vii
RESUMEN	viii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos.....	3
1.1.1. Objetivo General	3
1.1.2. Objetivos particulares	3
1.2. Hipótesis	3
2. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 Origen, historia del maíz (<i>Zea mays</i> L.).....	4
2.2 Clasificación taxonómica	6
2.3 Características botánicas de la planta de maíz.....	7
2.3.1 Raíz	7
2.3.2 Tallo	7
2.3.3 Hoja	7
2.3.4 Flor	7
2.3.5 Fruto.....	7
2.4 Requerimientos climáticos	8
2.4.1 Temperatura	8
2.4.2 Suelo	8
2.4.3 Fotoperiodo	8
2.5. Efecto del cambio climático en la agricultura	8
2.6. Fenología y tiempo térmico.....	10
2.7 Floración de maíz.....	12
2.8 Mejoramiento genético del maíz.....	12

2.8.1 Criterios de Selección según Bolaños y Edmeades (1990)	13
2.9 Importancia del riego en el cultivo de maíz	14
2.9.1 Métodos de programación del riego	15
2.10 Efecto del déficit hídrico en maíz	17
2.11 Metodologías para el manejo del estrés hídrico	18
3. MATERIALES Y MÉTODOS	21
3.1 Características agroecológicas del estado de Sinaloa.....	21
3.1.1 Regiones agrícolas	21
3.1.2 Relieve	21
3.1.3 Suelo	21
3.1.4 Vegetación y uso del suelo.....	22
3.1.5 Temperatura	22
3.1.6 Precipitación	22
3.2 Localización y ubicación del sitio experimental	23
3.3 Diseño experimental	24
3.4 Manejo agronómico del experimento.....	24
3.4.1 Barbecho	24
3.4.2 Rastreo	24
3.4.3 Nivelación.....	25
3.4.4 Marca o surcado	25
3.4.5 Fertilización.....	25
3.4.6 Siembra.....	25
3.4.7 Control de malezas	25
3.4.8 Riegos.....	26
3.4.9 Muestreo de humedad.....	27
3.4.10 Control de plagas.....	29
3.4.11 Conteo de plántulas.....	29
3.5 Variables medidas.....	30
3.5.1 Días a floración Masculina o Antesis (♂).....	30
3.5.2 Días a floración femenina o Jiloteo (♀).....	30
3.5.3 Intervalo polen-estigma (ASI)	31
3.5.4 Altura de planta.....	32
3.5.5 Altura de mazorca.....	32
3.5.6 Acame de raíz.....	32

3.5.7 Acame de tallo.....	32
3.5.8 Tiempo térmico	33
3.5.9 Estimación del rendimiento	33
3.5.10 Clasificación de genotipos de acuerdo a los requerimientos de tiempo térmico.	34
3.5.11 Elaboración de bases de datos climática	35
3.5.12 Generación de la metodología.....	35
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
4.1 Plataforma IRRIMODEL	38
4.2 Constantes hídricas del suelo	39
4.3 Parámetros del cultivo indicadores.....	39
4.4 Datos climáticos promedios (decenales y diarios).....	41
4.5 Desarrollo de algoritmo	43
5. CONCLUSIONES	45
6. LITERATURA CITADA.....	46

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación taxonómica del maíz (<i>Z. mays</i> L.).....	6
Cuadro 2. Estados o fases fenológicas del cultivo de maíz.....	10
Cuadro 3. Fases fenológicas y $^{\circ}D$ aproximados para el cultivo de maíz.....	11
Cuadro 4. Clasificación de dos grupos de variedades de maíz de acuerdo a los días a floración (FM y FF) y ASI durante el ciclo primavera-verano 2015.....	40
Cuadro 5. Tipo, dds, ΣD , Kc y Pr en el último riego para el tratamiento (DR) en la fase de prefloración. Además, se indica los dds, ΣD , Kc, Pr durante la fase de floración (FM y FF) en los 2 tratamientos y los grupos.....	41
Cuadro 6. Datos de la estación (Juan José Ríos) INIFAP-CEVAF. 25° 45' 49.0" + 108° 48' 48.0".....	42
Cuadro 7. Descripción de los algoritmos para la programación del último riego en ensayos de sequía.....	44

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Regiones biogeográficas y regiones centros de diversidad del maíz.....	5
Figura 2. Algoritmo para el manejo del estrés hídrico en ensayos de sequía.....	43

RESUMEN

El maíz es el cultivo básico de mayor importancia en México debido al alto consumo diario en la dieta de los mexicanos. En el estado de Sinaloa se sembraron 544, 070 ha de maíz y una producción de 5,380, 042 t de grano en 2015. Uno de los factores limitantes para la producción de este cultivo es el estrés hídrico, siendo el factor que tiene mayor efecto en la calidad y bajos rendimientos. El cambio climático juega un papel importante en la variación climática del planeta y provocando alteraciones fisiológicas y productivas en los cultivos agrícolas. En el INIFAP-CEVAF se desarrolló un ensayo durante el ciclo agrícola Primavera-Verano 2015 para seleccionar grupos de variedades subtropicales con posible tolerancia a sequía. Se consideraron los criterios establecidos por el CIMMYT como: días a floración (masculina y femenina), altura de planta, días a floración masculina y femenina, acame de tallo y raíz, entre otros. Los genotipos evaluados fueron sometidos a dos niveles de humedad del suelo (CC y PMP) durante la fase de floración. Se llevó un registro diario de las variables climáticas de T_{-min} , T_{-max} , ET_0 y PP así como el monitoreo de la humedad del suelo. Se lograron identificar los grupos con las variedades tolerantes a sequía para el ciclo mencionado, los cuales se cruzarán con líneas elite del CIMMYT (CML) y desarrollar líneas que serán evaluados en ciclos posteriores para su desempeño en condiciones de estrés por sequía.

Palabras clave: Cambio climático, tolerancia, diversidad genética, variedad subtropical, estrés por sequía.

1. INTRODUCCIÓN

Mundialmente, el maíz es el tercer cereal más importante, después del trigo y arroz (Aminu *et al.*, 2014). FAOSTAT (2014) reporta que a nivel mundial el área cosechada fue 184, 800,969 ha⁻¹ con una producción de 1, 037, 971, 518 t.

En México existen poco más de 3 millones de productores y es el cuarto productor mundial después de Estados Unidos, China y Brasil (Altunar, 2014). En México se sembraron 7, 600,452 ha⁻¹ con una producción de 24, 694,046 t y un rendimiento promedio de 3.48 t ha⁻¹ (SIAP, 2015). En el estado de Sinaloa se sembraron 544,070 ha⁻¹ con una producción de 5, 380,042 t con un rendimiento promedio de 9.95 t ha⁻¹ (SIAP, 2015).

El maíz puede ser preparado dentro de una gran diversidad de alimentos para los humanos y animales domésticos, además, se obtienen productos industriales como almidón, endulcolorantes, aceites, resistol, alcohol industrial, etanol (Ranum *et al.*, 2014); hojuelas de maíz, crema pastelera, glucosa, (Umar *et al.*, 2015).

No obstante lo anterior, existen varios factores que amenazan la producción y permanencia de este cultivo en México, entre los que se encuentran: 1) La variabilidad y cambio climático, 2) Sequías recurrentes, 3) Estrés térmico y 4) Estrés por calor. Ante esta situación el CIMMYT y el INIFAP a través de la línea de acción 3: Mas-Agro-Biodiversidad buscan contribuir al objetivo específico 3.1. Investigación genética del Maíz, Meta 3.1. Potencial genético identificado para caracteres prioritarios del maíz en México, para agregar valor a los recursos genéticos

conservados por el CIMMYT y otras instituciones; y en particular la actividad 3.1.2 validar al menos 800 mil datos fenotípicos adicionales para avanzar en la identificación de genes benéficos y accesiones donadoras para adaptación al cambio climático, resistencia a enfermedades y/o industriales importantes del maíz.

Los ambientes de prueba considerados aptos para la subactividad 3.1.2.1 (Evaluación de accesiones en ambientes tropicales y subtropicales para identificar y confirmar la adaptación potencial al estrés de sequía para estas áreas de adaptación) están ubicados en la costa de mexicana del Pacífico, donde las condiciones térmicas permiten cultivar maíz en invierno y la lluvia es escasa en ese periodo, facilita evaluar la tolerancia a sequía de los germoplasmas.

Aunque se tienen claros los objetivos de esta iniciativa desde el punto de vista genético, los ensayos para la selección de genotipos tolerantes a sequía, carecen de bases científicas sólidas para el manejo del estrés hídrico, los criterios que se usan generalmente son empíricos sujetos a errores frecuentes de manejo, lo cual repercute en la calidad de datos.

En el presente trabajo se desarrolló una metodología integral para el manejo eficiente del estrés hídrico en ensayos para la selección de genotipos de maíz tolerantes a sequía, que considera entre otras cosas: clima, suelo, fenología del cultivo, abatimiento de la humedad del suelo integrado en un modelo de predicción. Esta metodología permitirá un manejo más eficiente de este tipo de ensayos y generar datos de calidad y mayor aprovechamiento de los recursos económicos destinados por las diversas fuentes financieras.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Generar una metodología sistematizada que integre variables de cultivo, clima, suelo, para el manejo del estrés de hídrico en ensayos para la selección de genotipos tolerantes a sequía en el norte de Sinaloa.

1.1.2. Objetivos particulares

1. Establecer un ensayo para la caracterización de genotipos de maíz (*Zea mays* L.) con posible tolerancia a sequía para la generación de la metodología.
2. Clasificar genotipos de acuerdo a los requerimientos de tiempo térmico y sincronía floral.
3. Elaborar una base de datos climáticos con las variables Temperatura media (T_{media}), Grados día ($^{\circ}D$) y Evapotranspiración de referencia (ET_0).
4. Generar la metodología para el manejo del estrés hídrico para la selección de genotipos de maíz tolerantes a sequía

1.2. Hipótesis

Una metodología sistematizada con componentes locales de cultivo, suelo y clima, permitirá estimar con un alto índice de precisión el periodo de sometimiento a estrés severo en trabajos experimentales de sequía en el cultivo de maíz.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Origen, historia del maíz (*Zea mays* L.)

El maíz es considerado una de las primeras plantas cultivadas para alimento desde hace 7,000 a 10,000 años, según algunos sitios arqueológicos en México donde se encontraron pequeñas mazorcas en cuevas y se estima hace 5,000 años (Ranum *et al.*, 2014). Los restos más antiguos del maíz, demuestran un gran cambio morfológico desde la pequeña espiga femenina (“mazorquita”) del teosinte, con unos cuantos granos de fácil dispersión, y la espiga femenina (mazorca) del maíz con una gran cantidad de granos fuertemente adheridos al “olote” (raquis) (Serratos., 2009).

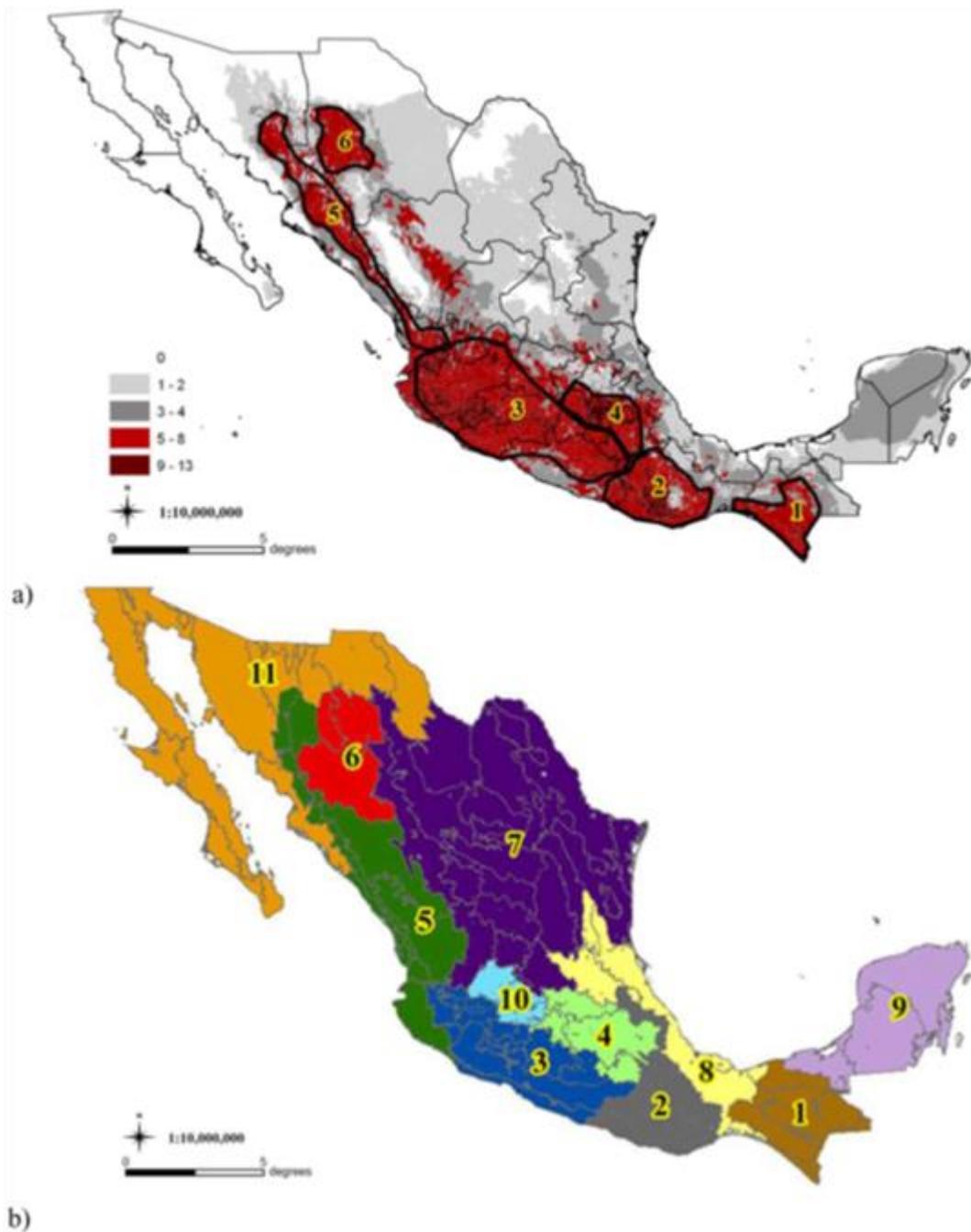


Figura 1. Perales y Golicher (2014) dividieron a México en 11 regiones biogeográficas y 6 de esas regiones son centros de diversidad, contienen 38 de 47 razas muestra estudiadas. 1) Complejo de Chiapas, 2) Valles y Sierras de Oaxaca, 3) Cordillera Costera de Occidente, 4) Mesa Central, 5) Sierras del Noroeste, 6) Cañones Chihuahuenses, 7) Mesa del Norte, 8) Planicies del Golfo e Itsmo, 9) Península de Yucatán, 10) Bajío, 11) Baja California y Noroeste.

Mera y Caballero (2010) indican que el maíz fue el alimento básico de las culturas y civilizaciones precolombinas avanzadas, como el Inca en Sudamérica y la maya y la azteca en Mesoamérica.

La diversidad de condiciones ambientales presentes en Mesoamérica y Sudamérica ha dado origen a la diversidad genética del maíz y se ha adaptado en diversas regiones del mundo.

El origen del maíz ha generado muchas controversias que constituye un desafío entre los científicos, esto se debe a la diversidad de germoplasmas que se han localizado en el continente americano, por tanto, existen muchas creencias, mitos e hipótesis que se han planteado a través del tiempo. Diversas investigaciones se han realizado para tener una respuesta sobre la evolución y domesticación del maíz.

2.2 Clasificación taxonómica

La clasificación taxonómica del maíz es la siguiente:

Cuadro 1. Clasificación taxonómica del maíz (*Z. mays* L.).

Clasificación Taxonómica del Maíz	
Reino	<i>Plantae</i>
Filum	<i>Tracheophyta</i>
Clase	<i>Liliopsida</i>
Orden	<i>Poales</i>
Familia	<i>Poaceae</i>
Genero	<i>Zea</i> L.

Fuente: Global Biodiversity Information Facility (2016).

2.3 Características botánicas de la planta de maíz

2.3.1 Raíz

El sistema radicular presenta raíces adventicias seminales que constituye aproximadamente el 52% de la planta, además es el principal sistema de fijación y absorción de la planta (Sánchez y Pérez., 2014).

2.3.2 Tallo

Los tallos poseen nudos y entrenudos muy marcados donde sostiene las hojas; la altura de los tallos varía desde 0.50 hasta 4.20 metros (Corcuera, 2012).

2.3.3 Hoja

Las hojas son largas, lanceoladas, alternas y paralelinervias (Izquierdo, 2012).

2.3.4 Flor

Las flores masculinas y femeninas se localizan en la misma planta (monoicas) pero en diferente sitio en la planta (Adhikari *et al.*, 2015). El polen se produce en la inflorescencia estaminada y el saco embrionario en la inflorescencia pistilada (Corcuera, 2012).

2.3.5 Fruto

El fruto es indehiscente, cada grano se denomina cariósipide (Sánchez y Pérez., 2014).

2.4 Requerimientos climáticos

2.4.1 Temperatura

La temperatura es uno de los factores más importantes que determina el crecimiento, desarrollo y rendimiento de las plantas (Oluwaranti *et al*, 2015). En el cultivo de maíz la temperatura óptima para el crecimiento y desarrollo del maíz es de 18 a 32°C (Belfield and Brown., 2008). Las temperaturas superiores a 35°C acompañada de una baja humedad relativa provoca desecación de los estigmas, y temperaturas mayores a 38°C reduce la viabilidad del polen (Altunar, 2014).

2.4.2 Suelo

El maíz es relativamente tolerante a un amplio rango de suelos con pH de 5.0 a 8.0 (Belfield y Brown, 2008).

2.4.3 Fotoperiodo

El maíz es una planta de día corto con un fotoperiodo crítico de 12.5 horas día⁻¹, de acuerdo a Belfield y Brown (2008).

2.5. Efecto del cambio climático en la agricultura

El aumento de las temperaturas y los cambios en los regímenes de lluvias podrían causar una caída hasta el 50% de la producción agrícola en muchos países (Osorio, 2012). En México se han presentado fenómenos extremos: huracanes más

intensos, aumento en la intensidad de lluvias, incremento en periodos de altas temperaturas y aumento de presencia de heladas negras, como las registradas en febrero de 2011 (Sifuentes *et al.*, 2013). Los modelos de pronóstico de clima indican que a finales del siglo XXI se tendrá un incremento de 6.5 °C en temperaturas máximas, 3.6 °C en temperaturas medias y de 0.09 °C en temperaturas mínimas, con respecto a los valores actuales (Zarazúa *et al.*, 2011).

El incremento de las temperaturas pueden impactar las producción de cultivos de diversas formas sobre la fenología del cultivo (Kumudini *et al.*, 2014). Primero, las altas temperaturas pueden acelerar el crecimiento de los cultivos cuya fenología es predominantemente regulado por la temperatura, como el maíz (Harrison *et al.*, 2011). Segundo, si las altas temperaturas ocurren durante la floración, como la fase de espigado del maíz, la polinización puede ser inhibida y el desarrollo de granos puede ser evitado totalmente (Harrison *et al.*, 2011). Además, el incremento de las temperaturas puede acelerar el desarrollo de la planta más que el periodo reproductivo (Harrison *et al.*, 2011).

El efecto de cambio climático sobre la producción agrícola difiere de región a región y también de cultivo a cultivo (Jaleel *et al.*, 2013). Algunos cultivos serían beneficiados del calentamiento global más que otros, mientras otros cultivos y cultivares pueden enfrentar mayores problemas y caída de producción (Sainio *et al.*, 2009).

Simulaciones predicen que el incremento de la temperatura en la etapa de crecimiento disminuye el número de días al espigado y madurez del cultivo de 3.1 a 4.1 días por cada °C, de acuerdo con los datos observados (Kumara *et al.*, 2014).

Los modelos pueden simular un amplio rango de clima y condiciones ambientales, pero son demandas computacionales y a veces patentados, que limitan su accesibilidad (Blanc and Sultan, 2015).

La alta variabilidad climática en el norte de Sinaloa ha provocado incertidumbre en el sector agrícola por la presencia de eventos extremos como sequías y heladas cada vez más recurrentes (Sifuentes *et al.*, 2014).

2.6. Fenología y tiempo térmico

La fenología de un cultivo determina su adaptación para una región, las etapas de crecimiento, habilidad para madurar, llenado de grano y la sincronía de las fases clave de desarrollo en condiciones ambientales críticas para la productividad (Kumudini *et al.*, 2014). Los cambios en la morfología externa de la planta, se expresan con la aparición, transformación o desaparición relativamente rápida de determinados órganos, esto, define las fases fenológicas o etapas de desarrollo del cultivo (Flores *et al.*, 2014). Las fases fenológicas del maíz se puede observar en el **Cuadro 2**.

Cuadro 2. Estados o fases fenológicas del cultivo de maíz.

Estados vegetativos	Estados reproductivos
Emergencia (VE)	Jiloteo (R1)
Primera hoja (V1)	Grano acuoso (R2)
Segunda hoja (V2)	Grano lechoso (R3)
Tercera hoja (V3)	Grano masoso (R4)
N° hojas (Vn)	Grano dentado (R5)
Antesis (VT)	Madurez fisiológica (R6)

Fuente: (Iowa State University, 1986).

El uso del concepto de “tiempo térmico” o $^{\circ}D$ en el cultivo del maíz, ha demostrado una amplia validez en la predicción de eventos o estados fenológicos (Fallas *et al*, 2011). Los $^{\circ}D$ es una medida indirecta del crecimiento y desarrollo de plantas e insectos, representa la integración de la temperatura ambiental entre dos temperaturas limitantes, las cuales definen el intervalo en un organismo que se encuentra activo (Ojeda *et al.*, 2006).

Parthasarathi *et al* (2013) indican que las aplicaciones de las unidades calor en la producción de los cultivos son: 1) La evaluación adecuada de una región para producción de un cultivo en particular, 2) determinar los estados de crecimiento de cultivos, 3) predecir el mejor momento para aplicación de fertilizantes, herbicidas o reguladores de crecimiento de plantas, 4) estimar el estrés de calor sobre cultivos, 5) predecir la fecha de madurez fisiológica o fechas de cosecha, 6) herramienta para el manejo de reguladores de crecimiento o ayuda a cosecha, 7) unidad ideal en modelos de clima para cultivos.

En el **Cuadro 3** se observa las etapas y los $^{\circ}D$ requeridos para cada evento.

Cuadro 3. Fases fenológicas y $^{\circ}D$ aproximados para el cultivo de maíz.

Estado	$^{\circ}D$
Emergencia (VE)	120
Segunda hoja (V2)	200
Sexta hoja (V6)	475
Decima hoja (V10)	740
Décimo cuarta hoja (V14)	1,000
Antesis (VT)	1,150
Jiloteo (R1)	1,400
Grano masoso (R4)	1,950
Grano dentado (R5)	2,450
Madurez fisiológica (R6)	2,700

Fuente: University of Illinois (1990).

Las unidades calor tienen una precisión exacta en el crecimiento de cultivos de 67 a 91% y 90 a 95% en estados reproductivos (Parthasarathi *et al.*, 2013). Ojeda *et al* (2006) indican que la maduración de las variedades (híbridos) comerciales de maíz se logra aproximadamente de 1150 a 1760 °D.

2.7 Floración de maíz

La emergencia de las anteras de las glumas encapsuladas, ocurre usualmente temprano después del rocío ha secado de la espiga (O'Keefe, 2009). En maíz la floración inicia con la liberación de polen (gametos masculinos) de las anteras. La caída de polen inicia de la mitad de la punta de la espiga, se extiende a lo largo de la espiga total en los días sucesivos, y termina con la pérdida de la punta y bases de las ramas inferiores (O'Keefe, 2009).

Bajo condiciones de crecimiento favorable, todos los estigmas emergerán y estarán listos para polinizar dentro de 3 a 5 días – suficiente tiempo para todos los estigmas reciban polen antes que la espiga termine la liberación de polen (O'Keefe, 2009).

2.8 Mejoramiento genético del maíz

En el cultivo de maíz, la duración en número de días entre la emisión de polen y la emergencia de los estigmas es conocido como Intervalo Antesis-Jiloteo (ASI). El ASI ha sido considerado un carácter secundario preciso, que tiene alta

heredabilidad y es correlacionado con el rendimiento de grano bajo estrés hídrico (Li *et al.*, 2002).

Bajos valores de ASI son indicaciones de sincronía en el tiempo de floración, que significa una mejor adaptación para rendimiento bajo condiciones de sequía, como una consecuencia parcial de un alto potencial del agua durante el tiempo de floración (Durães *et al.*, 2002). El ASI incrementado a 7.7 días bajo condiciones de estrés por sequía de un promedio de 1.6 días bajo ambientes sin estrés (Ngugi *et al.*, 2013). Los genotipos que alcanzan altos rendimientos de grano bajo niveles de estrés por sequía severos tienen un corto ASI y fue madurez tardía mientras que aquellos de madurez temprana tienen un largo ASI y bajo rendimiento de grano (Ngugi *et al.*, 2013). Plantas con un ASI elevado en condiciones de sequía son a menudo estériles o tienen pocos granos por mazorca (Araus *et al.*, 2010).

Los mejoradores de maíz buscan híbridos y sus pares endogámicos con el mínimo éxito de (ASI) de los híbridos (Li *et al.*, 2003). Para mejorar la eficiencia en el mejoramiento de plantas bajo condiciones de estrés, es necesario caracterizar esos ambientes y los cultivares evaluados dentro de esos ambientes específicos (De Souza *et al.*, 2009).

2.8.1 Criterios de Selección según Bolaños y Edmeades (1990)

Los criterios de selección son los siguientes:

1. Rendimiento de grano bajo sequía (incrementar).
2. Rendimiento de grano bajo irrigación (mantener).
3. Intervalo de la floración bajo sequía (reducir).

4. Número de mazorcas por planta bajo sequía (incrementar).
5. Enrollamiento foliar bajo sequía (reducir).
6. Temperatura foliar bajo sequía (reducir).
7. Fogueo foliar bajo todos los niveles (reducir).
8. Elongación vegetativa bajo sequía (incrementar).
9. Ángulo erecto de la hoja (incrementar).
10. Clorofila bajo todos los niveles (incrementar).

La respuesta a la sequía en maíz conlleva mejorar las líneas tolerantes a estrés por sequía y aporta oportunidades para mejorar el proceso de reproducción (Maazou *et al.*, 2016). Es un reto identificar alelos favorables para parámetros agronómicos como estreses abióticos en fondos genéticos no seleccionados para mejoramiento (Bedoya., 2012).

2.9 Importancia del riego en el cultivo de maíz

La vida está íntimamente asociado al agua, especialmente en su estado líquido y su importancia para los seres vivos es consecuencia de sus propiedades físicas y químicas exclusivas (Ramos., 2007). Es el componente mayoritario en las plantas (80-90% del peso fresco en plantas herbáceas y más del 50% en plantas leñosas) (Ramos., 2007). En las plantas, el agua conserva la estructura de la planta y mantiene la presión intercelular a nivel óptimo (turgente) (Gómez, 2015).

La actividad agrícola consume más del 80 por ciento del agua disponible a nivel mundial, se considera como una gran consumidora de los recursos hídricos (Servin, 2015).

El uso de agua para riego varía ampliamente debido a las condiciones climáticas, cultivo, tipo de suelo y las diferencias en las prácticas de riego (Levin y Zarrielo, 2013).

La tecnificación del riego plantea tres preguntas básicas: Cuanto, cuando y como regar los cultivos para obtener máxima eficiencia y productividad del agua (Servin, 2015). La aplicación de un riego se realiza cuando el contenido de humedad del suelo disminuye hasta un valor crítico que determina el grado de estrés máximo al que se somete el cultivo (Catalán *et al.*, 2007).

Csajbók *et al* (2014) llegaron a la conclusión que en condiciones secas la eficiencia en el uso del agua es muy efectivo, cuando los resultados en el suministro de riego completo tiene eficiencia de uso de agua muy bajo. Los mismos autores mencionan que el maíz transpira 150-300% más agua para asimilar 1 g CO₂ en años húmedos, comparando a años secos o estado de estrés hídrico.

2.9.1 Métodos de programación del riego

En general el manejo del riego se basa sobre la estimación o medición de la evapotranspiración por la medición del contenido de agua en la zona efectiva de las raíces o medición de algunos parámetros meteorológicos (Dağdelen *et al.*, 2008).

El método del balance hídrico consiste en realizar un balance de humedad en el perfil del suelo, tomando en cuenta, por una parte, las aportaciones del agua del riego y la lluvia, y por otra, la demanda evaporativa del cultivo (Servín, 2015). Este método estima las entradas y salidas de agua del perfil del suelo ocupado por las raíces del cultivo (Catalán *et al.*, 2007).

En función de la humedad del suelo incluye los posibles aportes de agua almacenada en el suelo, además que elimina los errores de cálculo de ET, en la elección del Kc (Servín, 2015). El TDR (Time Domain Reflectometry) es un instrumento portátil y de fácil manejo que mide el contenido volumétrico del agua presente en el suelo.

El uso de indicadores de estrés hídrico en los cultivos se basa en mediciones micrometeorológicas y la temperatura del follaje. Este método se basa en el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) y los grados días estrés (SDD) (Servín, 2015).

La programación del riego es un proceso de decisión orientado a determinar las cantidades de agua por aplicar y las fechas de aplicación de cada riego para minimizar deficiencias o excesos de humedad en suelo (Catalán *et al.*, 2012).

Es posible disminuir las láminas de riego si se aplica estrés hídrico controlado en etapas fenológicas con mayor tolerancia, sin afectar drásticamente el rendimiento potencial (Mendoza *et al.*, 2016). El consumo diario raramente excede de 3 mm para el estado 7 (hojas), alcanzando 10 mm durante el estado reproductivo, principalmente bajo altas temperaturas (De Souza *et al.*, 2009).

Sifuentes *et al* (2015) encontraron que el requerimiento de riego acumulado es de 55 cm aplicando aproximadamente 20 riegos con un intervalo de 25 a 30 días (primer auxilio), y con intervalo medio de 5 a 6 días y un mínimo de 3 a 4 días.

2.10 Efecto del déficit hídrico en maíz

De acuerdo con la FAO (2012) la sequía es el estrés ambiental más importante para la agricultura mundial. Las causas de la sequía no se conoce con precisión, se admite de manera general que se debe a alteraciones en los patrones de circulación atmosférica, provocando el calentamiento desigual de la corteza terrestre y las masas de agua, y se presenta en fenómenos como “El Niño” (Gómez., 2015).

El estrés por sequía o estrés hídrico induce anomalías estructurales, fisiológicas y moleculares en el proceso líder para el desarrollo de gametos (Alqudah *et al*, 2011). El cultivo de maíz está adaptado a áreas templadas tropicales y subtropicales, pero poco es conocido acerca de la respuesta a estrés por sequía dentro cultivares de maíz tropical (Rezaeieh and Eivazi., 2012).

Los síntomas típicos de estrés por sequía en maíz son un cambio en color de verde a verde-gris, y enrollado de hojas bajas alcanzando el follaje más alto (Edmeades, 2013). Al mismo tiempo cierre de estomas, la fotosíntesis empieza rápidamente a reducir y el crecimiento lento (Edmeades, 2013).

Cuando la sequía ocurre durante la antesis, se inhibe el crecimiento del estigma y del jilote, más que la espiga esta diferencia incrementa la asincronía entre

la caída del polen y la emergencia del estigma y con ello una falla en la polinización (Avendaño *et al.*, 2008). El estrés por sequía afecta la polinización de la flor el contenido de granos de polen viables, incrementa la falta de atractivo de flores a polinizadores y disminuye el contenido de néctar producido por las flores (Alqudah *et al.*, 2011).

Grandes pérdidas de 66-93% pueden esperarse como un resultado del estrés hídrico prolongado durante el estado de espigado y formación de mazorca (Çakir, 2004). Umar *et al* (2015) reportan reducción hasta el 70% en el rendimiento y un incremento de 33% de ASI bajo estrés hídrico. Sifuentes *et al* (2015) indican que el estrés hídrico durante el periodo de floración puede ocasionar una reducción en el rendimiento de 6 a 13 por ciento por día en el rendimiento final.

Aslam *et al.* (2012) indican que entre los nutrientes, el potasio puede mejorar la tolerancia en plantas de maíz para estrés hídrico. El mismo autor menciona que el potasio incrementa el potencial de agua de la hoja, potencial osmótico y el potencial de turgor bajo estrés hídrico.

2. 11 Metodologías para el manejo del estrés hídrico

El conocimiento acerca de la sensibilidad de una planta de maíz al estrés hídrico durante diferentes estados de crecimiento ha sido usado ampliamente en estudios que pretenden desarrollar estrategias de déficit de riego, así como para determinar el factor respuesta rendimiento del maíz (Çakir, 2004).

Bänziger *et al* (2012) indican los factores que se deben considerar el momento de manejar el estrés:

1. El momento en que se aplica el estrés, las etapas de crecimiento objetivo deben ser susceptibles a él, deben tener una gran probabilidad de ser afectadas por ese estrés en el ambiente objetivo y estar determinadas por características que puedan ser modificadas mediante el mejoramiento.
2. La intensidad del estrés, debe ser lo suficiente severo como para que las características que son importantes para el rendimiento en esas condiciones sean distintas de las que afectan el rendimiento en condiciones donde no hay estrés.
3. La uniformidad, si el estrés es uniforme en el espacio y en el tiempo, las diferencias genéticas serán más fáciles de observar y el avance será mayor.

El riego se programa de manera tal que la sequía durante la floración sea lo suficientemente severo como para retrasar la emisión de estigmas y provocar el aborto de las mazorcas (Bänziger *et al.*, 2000). Una clave para diagnosticar la humedad del suelo es tomar muestras de campo en diferentes profundidades en orden para una mejor determinación de la humedad del suelo en el campo (Tacker *et al.*, 2008).

La predicción de la fenología con el uso de datos meteorológicos de años anteriores, es posible determinar los $^{\circ}D$ que permite pronosticar programas de riegos al considerar independiente la variabilidad en las fechas de siembra y las condiciones climáticas (Ojeda *et al*, 2006). Con los $^{\circ}D$ es posible pronosticar con precisión la fecha de inicio de la fase de floración en maíz (*Zea mays* L.) y este

carácter de interés para los mejoradores en la selección de híbridos parentales apropiados (Oluwaranti *et al.*, 2015).

Bänziger *et al.*, (2012) señala que no se puede establecer con precisión el momento en que se debe suspender el riego debido a la evaporación que ocurrirá entre el momento que se suspende el riego y la etapa en que se presenta el estrés.

En suelos arcillosos (barrial) y franco-arcillosos, característicos del norte de Sinaloa, el último riego se debe aplicar en la etapa de R3 (1100°D) (Sifuentes *et al.*, 2015). La predicción de respuesta en el rendimiento para estrés hídrico del cultivo es importante en las estrategias de desarrollo y toma decisiones concernientes en el manejo del riego por agricultores y sus consejeros, así como investigadores (Dağdelen *et al.*, 2008).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Características agroecológicas del estado de Sinaloa

3.1.1 Regiones agrícolas

El estado de Sinaloa está dividido en tres regiones: norte, centro y sur. La región norte la mayor parte de la zona es agricultura de riego principalmente en el Valle del Fuerte, la región centro es muy similar a la zona norte y en la región sur se observa que la superficie agrícola de la zona es agricultura de temporal y muy disperso a pesar de que tiene mayor precipitación que la región norte.

3.1.2 Relieve

Sinaloa posee tres tipos de relieve: llanura costera, pie de sierra y sierra. La superficie del estado está conformado por las regiones fisiográficas: Sierra madre occidental y llanura costera del pacifico. La llanura costera presenta pendiente baja menor al 2% y a medida que se separa de la llanura costera del pacifico aumenta la altitud (mayor a 2,500 msnm) y la pendiente (cercana al 90%). La sierra madre occidental abarca más de la mitad de la superficie del estado con un 59.5%, mientras que la llanura costera del pacifico ocupa el 40.5%.

3.1.3 Suelo

La distribución espacial de los tipos de suelo del estado de Sinaloa, se observa que en la región norte predomina la llanura costera del pacifico donde los suelos es de textura fina, y se desarrolla con mayor superficie en agricultura de riego.

3.1.4 Vegetación y uso del suelo

La superficie estatal conforma las zonas agrícolas un 37%, las selvas ocupan el 33.7%, el 15.5% por bosques, los matorrales el 2%, los manglares el 2.0%, los pastizales ocupan el 1.8%, el 0.8 por tulares y 6.4% está ocupado por otros tipos de vegetación, cuerpos de agua y zonas urbanas. En relación al relieve, la vegetación se organiza en pisos ecológicos desde las zonas costeras a las zonas montañosas.

Las selvas ocupan los pies de sierra y estribaciones de la sierra, los bosques se encuentran en las partes altas de la sierra (montañas), los matorrales se localizan en la zona norte del estado y los pastizales se distribuyen en las franjas costeras del estado.

3.1.5 Temperatura

En la entidad la temperatura media anual oscila en los 25°C, la temperatura mínima promedio se encuentra en 10°C durante el mes de enero en las montañas de la sierra madre occidental, la temperatura máxima promedio es de 36°C, en los meses de mayo a julio en la zona centro del estado.

3.1.6 Precipitación

La precipitación promedio anual acumulada del estado es de 790 mm, se presentan en los meses de julio a septiembre. En las zonas costeras la precipitación es escasa a medida que se acerca a las zonas montañosas de la región la precipitación se incrementa.

La distribución de la precipitación es muy variable en zonas de la sierra con lluvias menores a 200 mm anuales en los estados colindantes del estado de Chihuahua y Durango al noreste del estado, debido a la poca precipitación es necesario el riego en las zonas agrícolas de la entidad.

De acuerdo a las estadísticas de la CONAGUA, el estado de Sinaloa ocupa el décimo segunda entidad más baja con una precipitación media anual de 595 mm anuales en el año 2011. La precipitación más baja a nivel nacional es el estado de Baja California Sur con 69, seguido Coahuila de Zaragoza con 176 y Baja California con 207 mm anuales respectivamente.

3.2 Localización y ubicación del sitio experimental

El trabajo experimental se realizó en una parcela de 4 ha durante el ciclo agrícola PV 2015 en el INIFAP Campo Experimental Valle del Fuerte situado en las coordenadas 25° 45'49" Latitud Norte y 108° 51'41" en Juan José Ríos, Guasave, Sinaloa. La región Valle del Fuerte recibe una precipitación anual promedio de 352 mm, tiene una temperatura media anual de 25°C y una altura de 15 msnm. El clima es cálido, seco estepario (tipo desértico) durante el verano y predomina los suelos franco arcillosos.

Con el objetivo de evaluar variedades nativas de maíces adaptados a zonas subtropicales con posible tolerancia a sequía, se llevó a cabo un ensayo para la evaluación de la sincronía floral y generar una metodología para programar el último riego e inducir el estrés hídrico en ensayos de sequía durante la floración.

3.3 Diseño experimental

El ensayo se estableció durante el ciclo Primavera-Verano 2015. Se utilizó un diseño aumentado con testigos replicados con 2 tratamientos: riego reducido durante la floración (DR) con 2 repeticiones y riego completo (WW) con 2 repeticiones, teniendo 238 variedades nativas de origen subtropical y 30 variedades testigos, obteniendo 1,072 parcelas experimentales. Cada parcela experimental consistió en un surco de 5 m de largo y 0.80 m entre surcos y una densidad de población de 22 plantas por parcela.

3.4 Manejo agronómico del experimento

3.4.1 Barbecho

Esta actividad se realizó con un arado de discos con el fin de romper la capa de suelo en los primeros 30 centímetros (cm^{-1}), con el fin para una mejor aireación y eliminar algunas plagas del suelo. El barbecho se realizó el día 30 de diciembre de 2014.

3.4.2 Rastreo

El rastreo se realizó con una rastra para minimizar los terrones grandes y tener los surcos con buena uniformidad. Para esta actividad se realizó doble rastreo el día 03 de enero de 2015.

3.4.3 Nivelación

El objetivo de esta actividad fue para nivelar y llenar los espacios sin suelo por el paso de la rastra. La actividad se realizó con una niveladora y se realizó el día 05 de enero de 2015.

3.4.4 Marca o surcado

El surcado se realizó con una surcadora provista de vertederas para crear surcos lo más uniforme posible donde se depositará la semilla. El surcado se realizó el día 06 de enero de 2015.

3.4.5 Fertilización

Se fertilizó el día 07 de enero de 2015 incorporada al lomo del surco al momento previo a la siembra, utilizando una dosis en unidades por hectárea de 90-60-30.

3.4.6 Siembra

La siembra se realizó en seco en forma manual el 07 de enero de 2015 en seco depositando la semilla en el lomo del surco con una densidad de 2 semillas por golpe a una distancia de 18 cm^{-1} (6 plantas m^{-1}).

3.4.7 Control de malezas

El día 08 de enero de 2015 se aplicó el herbicida Atrazina con una dosis de 3 L ha^{-1} para prevenir la emergencia de diversas malezas.

El día 04 de febrero de 2015 se aplicó el herbicida Bentazona con una dosis de 1 L ha⁻¹ para el control de Correhuela; *Convolvulus arvensis* L.

Se realizó deshierbes manuales y aplicación del herbicida Nicosulfuron con una dosis de 750 ml ha⁻¹ para el control del Zacate Johnson; *Sorghum halepense* L.

3.4.8 Riegos

Se instaló un sistema de riego por goteo para asegurar la uniformidad y distribución homogénea de los riegos en cada tratamiento y repeticiones.

Se utilizó un sistema de riego por goteo con lo cual se aplicaron láminas de riego para cada tratamiento. La programación del riego se realizó con el apoyo de la plataforma **IRRIMODEL** (Sifuentes *et al.*, 2015). Este software se desarrolló en el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) Campo Experimental Valle del Fuerte (CEVAF) que ofrece a productores una alternativa científica, confiable y practica para la programación integral del riego a través de internet, bajo condiciones normales y variables del clima, que interactúe con el personal técnico de módulos de riego para garantizar una adecuada gestión del recurso agua (Sifuentes *et al.*, 2015).

La plataforma computacional opera se integra por tres elementos: 1) enlace climático en tiempo real con la red agroclimática que se integró del estado de Sinaloa (administrada por el CIAD-Culiacán), 2) un portal electrónico administrado en el CEVAF, y 3) Software **IrriModel 2.0**, el cual procesa modelos de programación integral del riego, bases de datos climáticos históricos y en tiempo real, bases de datos de suelo, cultivos, sistemas de riego e imágenes.

El programa **IrriModel 2.0**, opera bajo la plataforma computacional que ofrece los siguientes beneficios:

- Calcula la demanda hídrica del cultivo aún bajo condiciones variables del clima.
- Elabora planes de riego bajo diferentes escenarios climáticos, de disponibilidad de agua y sistemas de riego.
- Pronostica el riego con alto nivel de precisión de acuerdo al desarrollo del cultivo, determinado por la acumulación de grados día ($^{\circ}D$).
- Ayuda a mejorar la administración de las actividades de las unidades de producción.
- Envía recomendaciones de riego vía correo electrónico.
- Evalúa el manejo del riego de una o un grupo de parcelas al final de un ciclo agrícola.
- Consulta bases de datos climáticos en tiempo real e histórico.

3.4.9 Muestreo de humedad

Se seleccionaron y colocaron banderas en puntos estratégicos de cada repetición para la toma de muestras de suelo. Se colectaron muestras de suelo de 0-30 y 30-60 cm^{-1} de profundidad y se insertó en el suelo el sensor TDR 300, se tomaron lecturas en cada profundidad para tener los datos de humedad volumétrica (HV) y asegurar una mayor precisión en la toma de decisiones y programación de los próximos riegos.

Los sensores de humedad TDR 300 genera y mide el regreso de una señal de alta energía que viaja hacia abajo y de regreso, por el suelo, a lo largo de una guía compuesta por las dos barras intercambiables de acero inoxidable y el contenido volumétrico de agua medido por el TDR es un promedio a lo largo de la guía (<http://www.specmeters.com/>).

Para la toma de muestra de suelo se utilizaron los siguientes instrumentos:

- Barrena de caja
- Botes de aluminio
- Estufa de secado (Yamato DX402)
- Báscula de precisión (Traveler TA501).

Las muestras de suelo se llevaron inmediatamente al laboratorio para pesarlas y meterlas a la estufa de secado a 105°C hasta peso constante durante 48 a 72 horas en promedio. Después, se volvían a pesar las muestras para obtener el peso seco de las muestras y tener una estimación de la humedad del suelo en cada repetición. La estimación del contenido de humedad se determinó por el método gravimétrico mediante la siguiente fórmula:

$$\theta_m = \frac{(P_{sh} - P_{ss})}{P_{ss}} \times 100$$

Donde θ_m es el porcentaje de humedad de un suelo al momento del muestreo (%), P_{sh} el peso de suelo húmedo (g) y P_{ss} es el peso de suelo seco (g).

$$Hv = \theta_m \times Da$$

Donde Hv es la humedad volumétrica expresada en porcentaje, θm es el porcentaje de humedad del suelo y Da es la densidad de un suelo más el volumen ocupado por los poros.

Con los datos de HV del suelo obtenidos en cada tratamiento y las lecturas del sensor TDR 300 se calcularon los promedios de las lecturas de HV en cada repetición y programar el siguiente riego con las láminas netas y el volumen requerido por el cultivo.

3.4.10 Control de plagas

Durante las primeras etapas se presentó Gusano Cogollero; *Spodoptera frugiperda* (Smith) y se controló con la aplicación del insecticida Spinetoram con la dosis de 75 ml ha⁻¹. Se presentó Trips; *Caliothrips phaseoli* (Hood), para el control de esta plaga se aplicaron los insecticidas (Betacyflutrina + Imidacloprid) con la dosis de 200 ml ha⁻¹. Además, Gusano Elotero; *Helicoverpa zea* (Boddie) por lo tanto se aplicó el insecticida Spinetoram con la dosis de 75 mL ha⁻¹.

3.4.11 Conteo de plántulas

El día 12 de febrero de 2015 se realizó el conteo del total de plantas en cada parcela experimental para determinar la densidad de población del ensayo.

3.5 Variables medidas

Se etiquetaron las unidades experimentales para su identificación, seleccionando las 5 mejores plantas en cada parcela experimental para toma de datos posteriores.

3.5.1 Días a floración Masculina o Antesis (♂)

En días anteriores se realizaron visitas al experimento para ver la separación de la hoja bandera y la aparición de la inflorescencia masculina (panícula). Se observaron las espiguillas de la espiga principal de la mitad hacia arriba y el engrosamiento de las mismas que es la cubierta que protege las anteras. Se observó la salida de las anteras y se tomó la decisión de iniciar de la toma de datos de las floraciones.

La floración masculina se definió cuando se observó que las anteras iniciaron la emisión de polen (gametos masculinos). El día 18 de marzo de 2015 se inició la captura de datos de floración masculina en las parcelas experimentales y el criterio para la fecha de la floración masculina fue el número de días transcurridos desde la fecha de siembra hasta el día que las anteras iniciaron la liberación de polen en 2 o más de las 5 plantas etiquetadas en cada parcela experimental.

3.5.2 Días a floración femenina o Jiloteo (♀)

Durante las visitas en las parcelas para ver los cambios en la espiga en las plantas etiquetadas, se observó el engrosamiento en la punta del jilote (mazorca).

La floración femenina se definió cuando se observó la aparición de unos pelos (estigmas) de 2 centímetros en la punta del jilote. Considerando que los estigmas crecen en promedio 2 centímetros diarios, El día 18 de marzo de 2015 se inició la captura de datos de floración masculina en las parcelas y el criterio para la fecha de floración femenina fue el número de días transcurridos desde la fecha de siembra hasta el día en que los estigmas tenían aproximadamente 2 centímetros de longitud en 2 o más de las 5 plantas etiquetadas para cada parcela experimental.

Consideraciones: Cuando la planta se somete a estrés hídrico severo hay anomalías fisiológicas por ejemplo: poca apertura de la espiga, las hojas nuevas se quedan cerradas; en la flor femenina se puede observar que el jilote no abrió completamente, además los estigmas son cortos.

Los días a floración se capturaron en el día en que se presentó la floración independientemente del sexo (masculino o femenino) de las plantas etiquetadas. El día 24 de marzo de 2015 se concluyó la toma de datos de floración masculina y femenina.

3.5.3 Intervalo polen-estigma (ASI)

El intervalo polen-estigma se calculó basándose en la diferencia en número de días a la emisión de polen y la emergencia del estigma en cada parcela experimental.

3.5.4 Altura de planta

El día 21 de abril de 2015 se inició la toma de datos de altura de planta y mazorca en las parcelas experimentales

Se midió la altura de planta de las 5 plantas etiquetadas en centímetros desde la superficie del suelo hasta el nudo de la última hoja (hoja bandera).

3.5.5 Altura de mazorca

Se midió la altura de la mazorca de las 5 plantas etiquetadas desde la superficie del suelo hasta el nudo de mazorca productiva

El día 21 de abril se inició la toma altura de planta y se concluyó el día 30 de abril de 2015. La altura de planta y mazorca se contaron el mismo día.

3.5.6 Acame de raíz

Se contaron todas las plantas inclinadas que formaban un ángulo de 45° o más en cada parcela experimental. El acame de raíz se contó 2 semanas antes de la cosecha.

3.5.7 Acame de tallo

Se contaron todas las plantas en cada parcela experimental que presentaban tallos quebrados por debajo de la mazorca.

Consideraciones: En algunas plantas se presentaron acame de tallo y raíz en la misma planta; estas plantas se contaron en ambos acames. El acame de tallo y raíz se contó el mismo día.

El día 30 de abril de 2015 se inició la toma de datos de acame de tallo y raíz en las parcelas experimentales y se concluyó el día 07 de mayo de 2015.

Las variables descritas anteriormente se capturaron en una bitácora electrónica a través de una tableta con la aplicación KDSmart.

3.5.8 Tiempo térmico

La acumulación de $^{\circ}D$ está relacionada con la aparición o desaparición en cada fase de desarrollo, las cuales difieren para cada variedad (Jefferies and Lawson., 1991), esto significa que los estados de desarrollo casi siempre se presentan porque se acumulan independientemente de la fecha de siembra y del año. La estimación diaria de la temperatura media ambiental diaria (T_a) de acuerdo con las siguientes ecuaciones (Ojeda *et al.*, 2004).

$$^{\circ}D = T_a - T_{cmin}, si T_a < T_{cmax}$$

$$^{\circ}D = T_c - \max T_c - \min, si T_a \geq T_c - \max$$

$$^{\circ}D = 0, si T_a \leq T_c - \min$$

Donde $T_c - \min$ y $T_c - \max$ es la temperatura mínima y máxima crítica del maíz que es 10 y 30 °C.

3.5.9 Estimación del rendimiento

Durante la etapa de grano dentado se realizaron visitas en las parcelas para la toma de decisión sobre el inicio de toma de muestras para determinación del % de humedad de grano en el ensayo.

Se localizaron los surcos bordos representativos y se consideraron como: bordo 1, bordo central y Bordo 2 en cada tratamiento (DR y WW). Se colectaron 2 mazorcas del surco bordo, cada muestra se colocó en una bolsa de papel y fueron etiquetadas. Las muestras de mazorca se deshojaron y se desgranaron. Las muestras se colocaron en bolsas de papel previamente etiquetadas y pesadas con una báscula de precisión. Las muestras se llevaron a una estufa de secado programada a 65 °C durante 72 horas y posteriormente se pesaron las muestras.

Para el cálculo del % de humedad de grano se utilizó la siguiente fórmula:

$$\% \text{ HUMEDAD DE GRANO} = \frac{(PGH - PR) - (PGS - PR)}{(PGS - PR)} \times 100$$

Donde *PGH* es el peso de grano húmedo al momento de desgranar, *PR* es el peso del recipiente y *PGS* es el peso de grano seco a peso constante.

Con él % de humedad se puede determinar el promedio del % de humedad de grano de los bordos en cada tratamiento, y el resultado obtenido se consideró como una referencia de humedad de grano.

Los muestreos de humedad de grano se realizaron semanales y cuando el promedio del % de humedad de grano fue aproximadamente de 18 a 16%, se consideró que era el momento indicado para la cosecha del ensayo.

3.5.10 Clasificación de genotipos de acuerdo a los requerimientos de tiempo térmico.

Al final de la evaluación de campo en una hoja de trabajo en el programa Excel, se calculó los °D, de las cinco plantas de la parcela experimental, tanto para

la floración masculina como para la femenina. Posteriormente se definieron rangos de valores para ASI y clasificar las variedades en: cortos, intermedios y largos. Esta información es parte fundamental para el manejo del estrés hídrico.

3.5.11 Elaboración de bases de datos climática

Con el fin de contar con bases de datos climáticas robustas para la metodología se concentraron datos diarios de los últimos ocho años de las variables: Temperatura máxima (T_{Max}), Temperatura mínima ($T_{min.}$), Temperatura media (T_{med}), Evapotranspiración de referencia (ET_0) y precipitación (PP). Los datos anteriores se obtuvieron de una estación climática de la Red de Estaciones Agroclimáticas Automatizadas INIFAP ubicada en el CEVAF. Los datos de las estaciones climáticas del país se pueden consultar en la siguiente dirección: <http://clima.inifap.gob.mx/Inmysr/Principal/Index>.

3.5.12 Generación de la metodología

Con la información de las variables medidas, se generó una metodología sistematizada que integra los siguientes componentes:

- 1. Plataforma IRRIMODEL:** Esta plataforma se utilizó desde el establecimiento del ensayo, se descargó e instaló el programa IRRIMODEL ver. 2.0 en una computadora de escritorio, para posteriormente capturar el lote experimental y los tratamientos. Los riegos del tratamientos WW se manejaron de acuerdo a IRRIMODEL durante todo el ciclo, mientras que y los de DR se suspendieron antes de la floración, reanudándose al término de ésta. Para

descargar el programa IRRIMODEL la dirección electrónica es: cevaf.redirectme.net/userContent/Irrisetup.exe.

- 2. Constantes hídricas del suelo:** Las constantes hídricas (CC y PMP) se estimaron utilizando los modelos empíricos de (Rawls and Brakensiek., 1989):

$$CC = 0.3486 - 0.0018 (A) + 0.0039 (R) + 0.0228 (MO) - 0.0738 (Da)$$

$$PMP = 0.0854 - 0.0004 (A) + 0.0044 (R) + 0.0122 (MO) - 0.0182 (Da)$$

Donde CC es la capacidad de campo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), PMP es punto de marchitez permanente ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), el contenido de arena (A) y arcilla (R) se expresan en % y la *Da* es la densidad aparente expresada en g cm^{-3} . En el trabajo experimental se utilizó un valor de *Da* de 1.15 g cm^{-3} y 1% de MO.

Para demostrar la validez de este modelo se determinó CC con el método de campo, mencionado por Narro (1994).

- 3. Fenología del cultivo, profundidad de raíz y coeficiente de cultivo (Kc) para cada fase fenológica.** A partir de las observaciones de campo de fenología se determinaron los $^{\circ}D$ con la metodología de Ojeda *et al.* (2006) dentro del programa IRRIMODEL para las fases monitoreadas. Del mismo autor se utilizaron los valores de profundidad de raíz (Pr) y coeficiente de cultivo (Kc) para cada fase. Con estas tres variables se generó un cuadro de consulta rápida.
- 4. Promedios decenales de ET_0 y T_{med} y $^{\circ}D$.** Los datos diarios de ET_0 y T_{med} se descargaron de la estación Juan José Ríos en la página del INIFAP y se

calcularon los promedios de 8 años, los cuales se ordenaron en un cuadro para consulta rápida.

- 5. Contenido volumétrico de la humedad del suelo (HV).** La humedad del suelo (HV) se monitoreó con el sensor de humedad portátil TDR 300 previamente calibrado gravimétricamente para el suelo de la parcela experimental.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Plataforma IRRIMODEL

Los riegos pronosticados y aplicados de acuerdo a la plataforma IRRIMODEL en cada sección del tratamiento (WW) con fechas de aplicación, tiempo requerido para aplicar el volumen de agua pronosticado, la superficie de la repetición a aplicar, los volúmenes requeridos y las láminas necesarias por aplicar en el cultivo.

En total se aplicaron 10 riegos con una lámina neta acumulada 40.69 cm y una lámina bruta acumulada de 42.84 cm con intervalo máximo de 14 días y un intervalo mínimo de 6 días. La fecha de inicio de riego fue el 7 de enero de 2015 y el último riego se aplicó el día 14 de abril de 2015 a los 98 días después de la siembra (dds). De acuerdo con el programa IRRIMODEL, el último riego en el tratamiento (WW) cuando el cultivo tenía acumulado 975 °D aproximadamente y en etapa de grano acuoso (R2).

Los riegos pronosticados y fecha de aplicación de acuerdo con el programa IRRIMODEL para cada sección del tratamiento (DR), los datos capturados incluyen: fecha de aplicación, tiempo requerido para aplicar el volumen de agua pronosticado, la superficie de la repetición a aplicar, el volumen requerido y las láminas necesarias por aplicar en el cultivo.

En el tratamiento (DR) se aplicaron 5 riegos con una lámina neta acumulada de 22.29 cm y una lámina bruta acumulada de 23.47 cm con intervalo mínimo de 8 días y un intervalo máximo de 13 días. La fecha de inicio de riego fue el día 7 de enero de 2015 y el último riego se aplicó el día 3 de marzo de 2015 a los 56 dds. De

acuerdo con el programa IRRIMODEL, el último riego se aplicó cuando el cultivo acumuló 498.3 °D durante la etapa de 6 hojas (V6).

4.2 Constantes hídricas del suelo

Las constantes de humedad (CC y PMP) para las 12 clases de textura de suelo estimadas con los modelos empíricos de Rawls y Brakensiek (1989), los cuales mostraron buen nivel de precisión con los valores observados en campo.

La validez de los modelos anteriores se verificó comparando la determinación de CC mediante el método de campo (Narro, 1995).

El valor de CC se alcanza de 3 a 4 días después del riego (zona horizontal), que es de 48% ($0.48 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) similar al estimado con el modelo de Rawls y Brakensiek (1989).

4.3 Parámetros del cultivo indicadores

El **Cuadro 4** presenta el análisis de 2 grupos de los 6 grupos de variedades subtropicales evaluados: TM15DRSTE1 y TM15DRSTM2 sometidos en los tratamientos (DR y WW). De acuerdo a los datos observados en las variables como días a floración, se logró identificar tres tipos de división en función de los días a madurez: 1) precoz, 2) intermedio y 3) tardío.

El primer grupo (TM15DRSTE1) se observaron diferencias significativas en relación a la clasificación y entre tratamientos, por ejemplo, la clasificación tipo intermedio en el tratamiento (DR), la FM fluctuó de 67 a 71 días, mientras que el tratamiento (WW) la FM se presentó de 68 a 70 dds. En el tratamiento (DR) en

ambos grupos en los tipos precoces el ASI son iguales (3), en los intermedios no hay diferencias significativas (3 y 2), y en el tipo tardío se presentó diferencia significativa entre el grupo TM15DRSTE1 y el TM15DRSTM2, siendo el primero de (8) y el segundo de (0) días. Los resultados muestran que los dos grupos en el tipo intermedio para ser pueden ser candidatos con posible tolerancia a sequía, debido a la poca variación en días entre floraciones (FM y FF) por tanto, cumplen con el objetivo del mejoramiento genético de ensayos con inducción de estrés hídrico.

Cuadro 4. Clasificación de dos grupos de variedades de maíz de acuerdo a los días a floración (FM y FF) y ASI durante el ciclo primavera-verano 2015. INIFAP/CIRNO/CEVAF.

CLAVE	TIPO	FLORACIÓN MASCULINA		FLORACIÓN FEMENINA		ASI
		DFM	$\Sigma^{\circ}D$ FM	DFF	$\Sigma^{\circ}D$ FF	
TM15DRSTE1 (DR)	P	62	550.0	65	579.6	3
	I	67	599.6	66	589.6	1
	T	70	630.9	78	721.3	8
TM15DRSTM2 (DR)	P	63	559.2	66	579.6	3
	I	71	609.7	73	609.7	2
	T	80	721.3	80	721.3	0
TM15DRSTE1 (WW)	P	63	599.2	65	589.6	2
	I	68	641.7	68	663.8	0
	T	78	744.9	78	744.9	0
TM15DRSTM2(WW)	P	62	550.0	65	579.6	3
	I	70	630.9	72	653.0	2
	T	79	732.5	79	732.5	0

DFM-días a floración masculina, DFF-días a floración femenina, $\Sigma^{\circ}DFM$ -grados día acumulados a floración masculina, $\Sigma^{\circ}DF$ -grados día acumulados a floración femenina, ASI (Intervalo en número de días entre la emisión de polen de la FM y la emergencia los estigmas de la FF).

El análisis detallado entre grupos necesario tener registro de los dds, $\Sigma^{\circ}D$, fase fenológica para la programación del ultimo riego en ensayos de sequía y

generar información relevante para la identificación de las variedades subtropicales con posible tolerancia a sequía como se puede observar en el **Cuadro 5**

Cuadro 5. Tipo, dds, ΣD , Kc y Pr en el último riego para el tratamiento (DR) en la fase de prefloración. Además, se indica los dds, ΣD , Kc, Pr durante la fase de floración (FM y FF) en los 2 tratamientos y los grupos.

CLAVE	TIP O	PREFLORACIÓN				FLORACIÓN MASCULINA				FLORACIÓN FEMENINA			
		Dds	ΣD	Kc	Pr	dds	ΣD	Kc	Pr	dds	ΣD	Kc	Pr
TM15DRSTE1 (DR)	P	56	498.3	0.82	70	62	550.0	0.83	75	65	579.6	0.98	80
	I	57	507.0	0.85	71	67	599.6	0.88	88	66	589.6	0.98	81
	T	58	514.9	0.83	76	70	630.9	1.10	93	78	721.3	1.13	98
TM15DRSTM2 (DR)	P	57	498.3	0.80	70	63	599.2	0.88	88	66	589.6	0.98	81
	I	58	514.9	0.85	76	71	641.7	1.11	90	73	663.8	1.11	90
	T	59	524.4	0.87	73	80	744.9	1.14	100	80	744.9	1.14	100
TM15DRSTE1 (WW)	P	56	498.3	0.82	70	63	559.2	0.98	80	65	579.6	0.98	83
	I	57	507.0	0.85	71	68	609.7	0.88	88	68	609.7	0.88	88
	T	58	514.9	0.83	76	78	721.3	1.13	98	78	721.3	1.13	98
TM15DRSTM2 (WW)	P	57	498.3	0.80	70	62	550.0	0.83	75	65	579.6	0.98	80
	I	58	514.9	0.85	76	70	630.9	1.10	93	72	653.0	1.11	90
	T	59	524.4	0.87	73	79	732.5	1.13	99	79	732.5	1.13	99

Tipo-Clasificación en función de los dds a madurez fisiológica, dds-Días después de siembra, ΣD -Suma de $^{\circ}D$ durante una fase fenológica, Kc-Coeficiente de cultivo, Pr-Profundidad de raíz.

4.4 Datos climáticos promedios (decenales y diarios)

Los datos de la estación agroclimática se descargaron las siguientes variables T_{med} y ET_0 diarios y se clasificaron en anuales, mensuales y decenales. Con los datos se sacaron los promedios de 8 años y se generó una tabla con los datos que aparecen en el **Cuadro 6**.

Cuadro 6. Datos de la estación (Juan José Ríos) INIFAP-CEVAF. 25° 45' 49.0" + 108° 48' 48.0"

Mes	Decena	T _{-med} (°C)	(°D)	ET ₀ (mm/día)	ET ₀ -acum decenal (mm)	ET ₀ -acum mensual (mm)
ENERO	1	16.1	6.1	3.40	33.98	103.11
	2	15.4	5.4	3.30	33.01	
	3	16.8	6.8	3.28	36.12	
FEBRERO	1	16.3	6.3	3.63	36.30	117.53
	2	18.0	8.0	4.31	43.14	
	3	17.7	7.7	4.76	38.08	
MARZO	1	18.4	8.4	4.89	48.85	167.05
	2	19.5	9.5	5.47	54.67	
	3	20.4	10.4	5.78	63.53	
ABRIL	1	20.9	10.9	5.96	59.64	184.90
	2	21.1	11.1	6.15	61.52	
	3	22.5	12.5	6.37	63.74	
MAYO	1	23.7	13.7	6.57	65.71	212.73
	2	25.2	15.2	6.86	68.55	
	3	25.3	15.3	7.13	78.47	
JUNIO	1	27.5	17.5	6.35	63.53	192.73
	2	29.0	19.0	6.27	62.71	
	3	30.1	20.0	6.65	66.49	
JULIO	1	30.1	20.0	6.35	63.52	192.45
	2	30.1	20.0	6.30	62.98	
	3	30.1	20.0	6.00	65.95	
AGOSTO	1	30.4	20.0	6.13	61.26	169.98
	2	29.3	19.3	5.17	51.68	
	3	29.4	19.4	5.19	57.05	
SEPTIEMBRE	1	29.5	19.5	5.01	50.07	155.82
	2	29.4	19.4	5.37	53.75	
	3	29.2	19.2	5.20	52.01	
OCTUBRE	1	28.6	18.6	5.49	54.91	160.70
	2	27.5	17.5	5.10	51.03	
	3	26.4	16.4	4.98	54.76	
NOVIEMBRE	1	24.1	14.1	4.41	44.11	116.26
	2	22.5	12.5	3.76	37.64	
	3	20.6	10.6	3.45	34.51	
DICIEMBRE	1	18.3	8.3	3.45	34.51	103.27
	2	17.5	7.5	3.29	32.89	
	3	16.8	6.8	3.26	35.87	

4.5 Desarrollo de algoritmo

El conjunto de algoritmos generado para la programación del último riego consideran los datos históricos de clima, el factor suelo y planta. En los datos históricos se utiliza la T_{-min} , T_{-max} y ET_0 . El factor suelo está integrado por los siguientes parámetros: $Hini$, $Hfin$, $ETrprom$ y $DHfin$. El factor planta se integra de: $Fact$, $\Sigma^{\circ}Dact$, $Ffin$, $\Sigma^{\circ}Dfin$, ${}^{\circ}Dprom$ y $DFfin$. El monitoreo de la humedad del suelo y el acceso en tiempo real de las variables climáticas con la plataforma IRRIMODEL permite pronosticar $\Sigma^{\circ}D$, fase fenológica actual del cultivo, generar modelos de contenido de humedad de suelo actual y fecha del próximo riego con alto nivel de precisión de acuerdo al crecimiento y desarrollo del cultivo.

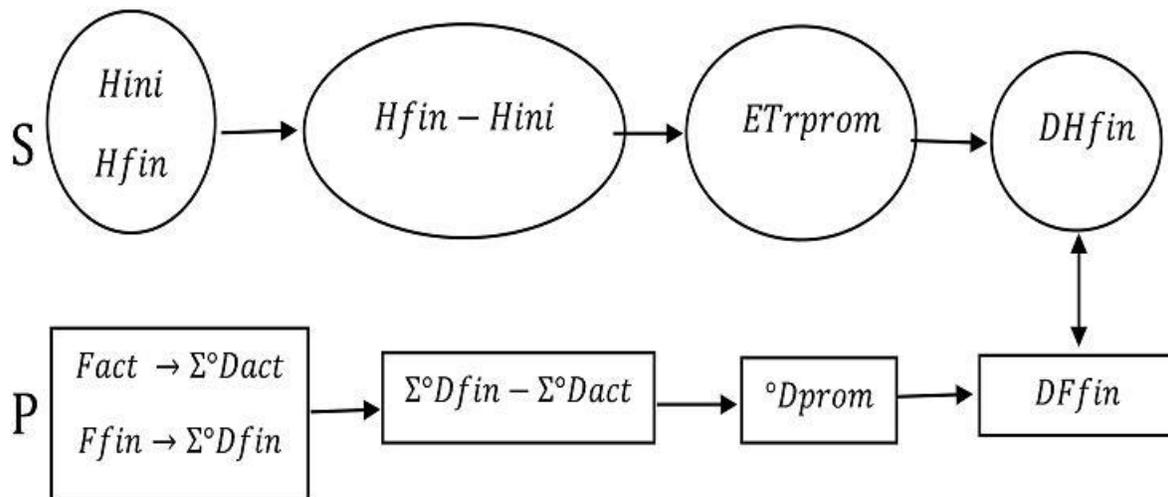


Figura 2. Algoritmo para el manejo del estrés hídrico en ensayos de sequía.

Especificaciones:

Cuadro 7. Descripción de los algoritmos para la programación del último riego en ensayos de sequía.

	Suelo (S)		Planta (P)
<i>Hini</i>	Humedad inicial	<i>Fact</i>	Fase actual del cultivo
<i>Hfin</i>	Humedad final	$\Sigma^{\circ}Dact$	Suma de $^{\circ}D$ actual del cultivo.
<i>ETrprom</i>	Evapotranspiración real promedio del cultivo	<i>Ffin</i>	Fase final del cultivo
<i>DHfin</i>	Días a la humedad final	$\Sigma^{\circ}Dfin$	Suma de $^{\circ}D$ al final del cultivo
		$^{\circ}Dprom$	$^{\circ}D$ promedio diario
		<i>DFfin</i>	Día de la fase final del cultivo

Si *DFfin* es \approx *DHfin*, se acepta la metodología generada.

Si *DFfin* \ll o *DHfin* \gg cambiar el momento de inducción de estrés hídrico.

5. CONCLUSIONES

1. Se cuenta con la clasificación de los genotipos de acuerdo a la acumulación de °D en la etapa de floración y en cada grupo de variedades nativas de maíz.
2. Se generó una base de datos de clima históricos promedios que se utilizó para consulta rápida de las variables climáticas.
3. Se definieron los parámetros del algoritmo generado para el manejo del estrés durante la floración en ensayos de sequía.
4. Los algoritmos usados para la generación de la metodología para el manejo del estrés hídrico se puede integrar a la plataforma IRRIMODEL como una herramienta para el pronóstico de riegos y programación del último riego en futuros ensayos de sequía en maíz.

6. LITERATURA CITADA

- Adhikari, N.R, Ghimirem, S.K, Sah, S.K, Koirala, K.B. 2015. Flowering, reproductive behaviors and their effects on grain yields of newly bred single cross hybrids of yellow maize (*Zea mays* L.) in winter in subtropical Nepalese Himalayan foot plain. Floral traits: grain yield determinants. PeerJ. PrePrints. 3: 1108.
- Altunar A., C. 2014. Caracterización de maíz tropical de ciclo tardío en riego deficitario. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Torreón, Coahuila, México. 37 p.
- Alqudah M, A., Samarah H, N. and Mullen E. R. 2011. Drought Stress Effect on Crop Pollination, Seed Set, Yield and Quality. Jordan University of Science and Technology. Irbid, Jordan. 193-213.
- Aminu, D., Mohammed, S.G and Kabir, B.G. 2014. Estimates of combining ability and heterosis for yield traits in maize populations (*Zea mays* L.), under drought conditions in the Northern Guinea and Sudan Savanna Zones of Borno State, Nigeria. International Journal of Agricultural Innovations and Research. 2(5): 2319-1473.
- Araus., J.L., Sanchez., C and Edmeades O, G. 2010. El cultivo de maíz temas selectos II. Maíz tropical: fisiología del rendimiento y adaptación a sequía. Mundi-Prensa México. México, D. F. 67p
- Aslam, M., Zamir, M.S.I., Azfal, I., Yaseen, M., Mubben, M. and Shoaib, A. 2013. Drought stress, its effect on maize production and development of drought

tolerance through potassium application. *Cercetări Agronomice în Moldova*. 46: 99-114.

Avendaño A, C.H., Molina G, J.D., Trejo L, C., López C, C. y Cadena I, J. 2008. Respuesta a altos niveles de estrés hídrico en maíz. *Agronomía Mesoamericana*. 19(1):27-37.

Bedoya S, C.A. 2012. Estudios de diversidad genética en poblaciones de maíz (*Zea mays* L.) evaluadas con microsatélites. Tesis doctoral. Universidad de las Islas Baleares, Brasil. 209 p.

Belfield, S and Brown, C. 2008. *Field Crop Manual: Maize. A guide to Upland Production in Cambodia*. NSW Department of Primary Industries. Tamworth, Australia. 3, 5, 6 p.

Blanc, E and Sultan, B. 2015. Emulating maize yields from global gridded crop models using statistical estimates. MIT. *Science and Policy of Global Change*. Report N° 279. Cambridge, Massachusetts, USA. 39 p.

Bolaños, J y Edmeades, G.O. 1990. La importancia del intervalo de floración en el mejoramiento para la resistencia a sequía en maíz tropical. *Agronomía Mesoamericana*. 1:45-50.

Bänziger, M., G.O. Edmeades, D. Beck, and M. Bellon. 2000. *Breeding for Drought and Nitrogen Stress Tolerance in Maize: From Theory to Practice*. Mexico, D.F.: CIMMYT. p. 24.

- Bänziger, M., G.O. Edmeades, D. Beck y M. Bellon. 2012. Mejoramiento para aumentar la tolerancia a sequía y a deficiencia de nitrógeno en el maíz: De la teoría a la práctica. México, D.F. 22 p.
- Catalán V, E.A., Sánchez C, I., Villa C, M., Inzunza I, M.A. y Mendoza M, S.F. 2007. Programa para calcular las demandas de agua y calendarizar el riego de los cultivos. Folleto técnico 7. INIFAP-CENID-RASPA. Gómez Palacio, Dgo. México. 26 p.
- Catalán E, A., Villa C, M.M., Inzunza I, M.A., Román L, A., y González B, J.L. 2012. Calculo de demandas de agua y programación del riego de cultivos en Coahuila. Educación y asistencia técnica-Agrofaz. 12: 123-131.
- Corcuera R, V. 2012. Desarrollo y evaluación de nuevo germoplasma de maíz (*Zea mays* L.) para uso especial en Argentina. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, Argentina. 355 p.
- Çakir, R. 2004. Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. *Field Crops Research*. 89: 1-16. Kirklareli, Turkey.
- Csajbók, J., Kutasy, E and Pepó, P. 2014. The water use efficiency of maize depending of abiotic stress factors in field experiments. *Columella-Journal of Agricultural and Environmental Science*.1: 23-28.
- De Souza, L.V. Miranda, G.V. Galvao, J.C.C. Guimarães, L.J.M. Santos, I.C. dos. 2009. Combining ability of maize grain yield under different levels of environmental stress. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 44: 1297-1303.

- Dağdelen, N., Gürbüz, T., Erdem, Y., Sezgin, F., Yilmaz, E., Akçay, S. and Yeşilirmak, E. Determination of Crop Water Stress Index (CWSI) of Second Crop Corn in a Semiarid Climate. International Meeting on Soil Fertility Land Management and Agroclimatology. Turkey. 805-814.
- Durães F, O.M., Magalhães, P.C., de Oliveira, A.C., dos Santos, M.X., Gama and G, E.E. and Guimarães T, C. 2002. Combining ability of tropical maize inbred lines under drought stress conditions. Crop Breeding and Applied Biotechnology. Sete Lagoas, M.G, Brazil. 2: 291-298.
- Fallas., R., Berstch., F., Echandi., C y Henríquez., C. 2011. Caracterización de desarrollo y absorción de nutrimentos del híbrido de maíz HC-57. Agronomía Costarricense. 35: 33-47.
- Flores G., H., Flores M., H. y Ojeda B., W. 2014. Predicción fenológica del cultivo de papa mediante tiempo térmico. Revista Mexicana de Fitotecnia. 37: 149-157.
- Flores G, H., Sifuentes I, E., Flores M, H., Ojeda B, W. y Ramos G, C.R. 2014. Técnicas de conservación de agua en riego por gravedad a nivel parcelario. INIFAP-CIRNO-CEVAF. Juan José Ríos, Guasave, Sinaloa, México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 5. 241-252p.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2012. Crop Yield Response to Water. Rome, Italy. 66:1-489.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAOSTAT). 2014. Food and Agriculture Data. <http://www.fao.org/faostat/en/#home>. Fecha de consulta: 24 de enero de 2017.

Global Biodiversity Information Facility (GBIF). 2016. GBIF Backbone Taxonomy. <http://www.gbif.org/species/5290052/classification>. Fecha de consulta: 24 de enero de 2017.

Gómez C. J.M. 2015. Evaluación de rendimiento de híbridos de maíz (*Zea mays* L.) en diferentes niveles de sequía en relación con rasgos secundarios. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Unidad Laguna. Torreón, Coahuila, México. 95 p.

Harrison, L., Michaelsen, J., Funk, C. and Husak, G. Effect of temperature changes on maize production in Mozambique. *Climate Research*. 46: 211-222.

Iowa State University. 1986. How a Corn Plant Develops. Iowa State University of Science and Technology. Special Report N° 48. Cooperative Extension Service. p. 3.

Izquierdo B., R.A. 2012. Evaluación del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) como complemento a la alimentación de bovinos de leche en épocas de escasez. Cayambe-Ecuador. Tesis de Licenciatura. Universidad Politécnica Salesiana. Quito, Ecuador. 103 p.

Jaleel, C.A., P, Manivannan., A, Wahid., M, Farooq., Juburi-Al, H.J. R, Somasundaram and R, Panneerselvam. 2009. Drought Stress in Plants: A

Review on Morphological Characteristic and Pigments Composition. International Journal of Agriculture & Biology. 11:100-105.

Kumara, J.B.D.P., Suriyagoda, L.B.D., De Costa, W.A.J.M and Mallaviarachchi, M.A.P.W.K. 2014. Modelling Canopy Development, Biomass and Yield of Maize (*Zea mays* L.) Under Optimal Management. Tropical Agricultural Research. 25: 214-227.

Kumudini, S., Andrade, F.H., Boote, K.J., Brown, G.A., Dzotsi, K.A., Edmeades, G.O., Gocken, T., Goodwin, M., Halter, A.L., Hammer, G.L., Hatfield, J.L., Jones, J.W., Kemanian, A.R., Kim, S.-H., Kiniry, J., Lizaso, J.I., Nendel, C., Nielsen, R.L., Parent, B., Stöckle, C.O., Tardieu, F., Thomison, P.R., Timlin, D.J., Vyn, T.J., Wallach, D., Yang, H.S., Tollenaar, M. 2014. Predicting Maize Phenology: Intercomparison of Function for Developmental Response to Temperature. Agronomy Journal. 106: 2087-2097.

Levin, S.B., and Zarriello, P.J. 2013. Estimating irrigation water use in the humid eastern United States: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 5066. Reston, Virginia. 2 p. <http://pubs.usgs.gov/sir/2013/5066/>.

Li, X-H., Liu, X-D., Li, M-S., Zhang, S-H. 2003. Identification of Quantitative Trait Loci for Anthesis-Silking Interval and Yield Components Under Drought Stress in Maize. Acta Botanica Sinica. Beijing, China. 45:852-857.

Maazou, A.-R.S., Tu, J.L., Qiu, J. and Liu, Z.Z. 2016. Breeding for Drought Tolerance in Maize (*Zea mays* L.). American Journal of Plant Science. 7: 1858-1870.

- Mendoza P. C., Sifuentes I, E., Ojeda B, W. y Macías C, J. 2016. Response of surface-irrigated corn to regulated deficit irrigation. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*. 8: 29-40.
- Mera O., L.M y Caballero N., J. 2010. El cultivo de maíz-Temas selectos II. Importancia del maíz en Mesoamérica a partir de las representaciones prehispánicas. Mundi-Prensa México. México, D. F. 1, 2 p.
- Narro, F. E. 1995. Física de suelos con enfoque agrícola. Ed. Trillas. 1ª edición. Mexico, D.F, México.
- Ngugi, K., Cheserek, J., Muchira, C and Chemining'wa, G. 2013. Anthesis to Silking Interval Usefulness in Developing Drought Tolerant Maize. *Journal of Renewable Agriculture*. 1:84-90.
- Ngugi, K, Collins O, J and Muchira, S. 2013. Combining, earliness, short anthesis to silking interval and yield based selection indices under intermittent water stress to select for drought tolerance maize. *Australian Journal of Crop Science*. 7: 2014-2020.
- Ojeda B., W., Sifuentes I., E y Unland W, H. 2006. Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa, México. *Agrociencia*. 40: 13-25.
- Perales, H and Golicher, D. 2014. Mapping the Diversity of Maize Races in Mexico. *PLoS ONE*. 9:12. 1-20.
- Ojeda, B. W., Sifuentes, I. E., Slack C, D. and Carrillo, M. 2006. Generalization of irrigation scheduling parameters using the growing degree days concept: application to a potato crop. *Irrigation and Drainage*. 53: 251-261.

- Oluwaranti, A., Morakinyo A B.F., Menkir, A and Baffour, B.A. 2015. Climatic conditions requirements of maize germplasm for flowering in the rainforest Agro-ecology of Nigeria. *Journal of Plant Breeding and Crop Science*. 7: 170-176.
- O'Keefe, K. 2009. Maize growth & development. Reproductive development. NSW Department of Primary Industries. New South Wales, Australia. pp. 34-36.
- Osorio G., K.V. 2012. Estimación de parámetros genéticos en cultivares de maíz (*Zea mays* L.), con tolerancia a sequía y pudrición de mazorca. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia. Palmira, Colombia. 87 p.
- Parthasarathi, T., Velu, G. and Jeyakumar, P. 2013. Impact of Crop Heat Units on Growth and Developmental Physiology of Future Crop Production: A Review. *Journal of Crop Science and Technology*. 2(1):1-8.
- Ramos G., C.R. 2007. Evaluación de tres técnicas de conservación del agua en riego por superficie a nivel parcelario. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Sinaloa. Escuela Superior de Agricultura del Valle del Fuerte. 81 p.
- Ranum, P., Peña R, J.P., García C, M.N. 2014. Global maize production, utilization and consumption. *Annals of the New York Academy of Science*. 1312: 105–112.
- Rawls, W. J. and Brakensiek, D. L. 1989. Estimation of soil water retention and hydraulic properties. *Mathematical and physical science*. 275:275-300.

- Sainio P, P. Jauhiainen, L., Hakala, K and Ojanen, H. 2009. Climate change and prolongation of growing season: changes in regional potential for field crop production in Finland. *Agricultural Food and Science*. 18: 171-190.
- Sánchez O, I. y Pérez U, E.C 2014. Maíz I (*Zea mays* L). *Reduca (Biología)*. 7: 151-171.
- Serratos H., J.A. 2009. El origen y la diversidad del maíz en el continente americano. Universidad Autónoma de la Ciudad de México. Greenpeace México. Ciudad de México, México. p. 5.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). Anuario Estadístico de la producción agrícola. http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/ientidad/index.jsp. Fecha de consulta: 24 de enero de 2017.
- Servín P, M. 2015. Sistema para programar y calendarizar el riego de los cultivos en tiempo real. Tesis de maestría. Colegio de postgraduados. Texcoco, Edo. De México, México. 72 p.
- Sifuentes I, E. Mendoza P, C. Macías C, J. Ojeda B, W. Ruelas I, J.R. y González S, D.A. 2013. Riego por goteo en el cultivo de maíz manejado con TIC'S en Sinaloa: Sustentabilidad y rentabilidad. *Researchgate*. 1-9 p.
- Sifuentes I, E. Macías C, J. Ojeda B, W. Soto F, J.J. Mendoza P, C. Talamantes C, I. y Ruelas I, J.R. 2014. Estrategia integral para el uso eficiente del agua en módulos de riego del distrito 075, Río Fuerte, Sinaloa. Congreso Nacional de Irrigación. 1-8 p.

- Sifuentes I, E. y Macías C, J. 2015. "IRRIMODEL" Programación Integral y Gestión del Riego a Través de Internet. Manual de Usuario. Versión 2.0. Folleto Técnico N° 42. INIFAP-CIRNO-CEVAF. Juan José Ríos, Guasave, Sinaloa. 39p.
- Sifuentes I, E., Ojeda B, W y Macías C, J. 2015. Calendarización del riego: Teoría y práctica. La calendarización del riego del cultivo de maíz. Instituto Mexicano de Tecnología del agua. 2 ed. Jiutepec, Morelos, México. p. 272, 280.
- Tacker, P., Vories, E. and Huitink, G. Corn production handbook. Drainage and Irrigation. University of Arkansas. Cooperative Extension Service. Little Rock, Arkansas. MP437-250-6-08R.16 p.
- Umar U, U., Ado G, S., Aba A, D and Bugaje M, S. 2015. Studies on genetic variability in maize (*Zea mays* L.) under stress and nonstress environmental conditions. International Journal of Agronomy and Agricultural Research. 7: 70-77.
- University of Illinois. 1991. Illinois Agronomy Handbook. University of Illinois. Vol.1311. Cooperative Extension Service. Champaign, Illinois, USA. p. 2.
- Zarazúa V., P., Ruíz C., J.A., González E., D.R., Flores L., H.E., y Ron P., J. 2011. Impactos del cambio climático sobre la agroclimatología del maíz en Ciénega de Chapala, Jalisco. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. Pub. Esp. 2. 351-363.