

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE**



**EFFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL RENDIMIENTO DE MAÍZ
(*Zea mays*) VARIEDAD JAGUAN PARA CUATRO REGIONES DEL ESTADO
DE COAHUILA.**

POR:

GABRIEL ARIAS HERNÁNDEZ

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

MAYO DE 2016

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

Efecto del cambio climático en el rendimiento de maíz (*Zea mays*) variedad Jaguan para cuatro regiones del Estado de Coahuila.

POR:

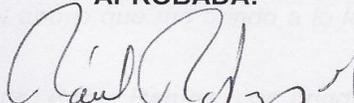
Gabriel Arias Hernández

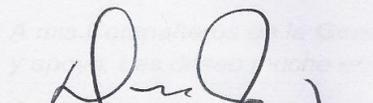
TESIS

Que somete a consideración del H. Jurado Examinador como requisito Parcial para obtener el título de:

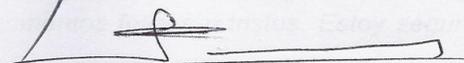
INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

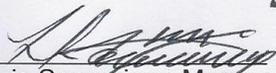
APROBADA:


Dr. Raúl Rodríguez García
Asesor Principal


Dra. Diana Jasso Cantú
Asesor


M.C. Fidel Maximiano Peña Ramos
Asesor


Ing. Oscar Lemus Ramírez
Asesor


Dr. Luis Samaniego Moreno
Coordinador de la División de Ingeniería

Universidad Autónoma Agraria
"ANTONIO NARRO"



MAYO DE 2016
BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA DE ZARAGOZA

División de
Ingeniería

AGRADECIMIENTOS

A mi **Alma Mater** por haberme dado la oportunidad de ser parte de esta gloriosa y noble institución, y convertirme en Ingeniero Agrónomo en Irrigación.

Al **Departamento de Riego y Drenaje** por haberme brindado las herramientas necesarias para mi formación académica y ser un lugar donde forje grandes amistades.

A mis **Profesores** porque todos y cada uno de ellos fueron participes en mi formación, gracias por haber compartido sus experiencias y conocimientos.

A mis **Asesores** por su apoyo y disponibilidad prestada en el procesamiento, interpretación y revisión de la información necesaria para realizar este trabajo que representa el fin de una etapa más en mi vida profesional.

Al **Dr. Raúl Rodríguez García** por haber sido un excelente profesor y un buen amigo, por darme la oportunidad de trabajar con usted, por la confianza brindada y por todo el apoyo que me proporciono en la realización de este proyecto de tesis.

A la **Dra. Manuela Bolívar Duarte** por darme su confianza y su amistad, gracias por su consejos y todo el apoyo que me brindo a lo largo de mi estancia en la universidad.

Al **M.C. Fidel Maximiano Peña Ramos** por brindarme su paciencia y su confianza, por compartirme sus conocimientos y ser un buen amigo.

A mis Compañeros de la **Generación CXX y Generación CXXI**, por su amistad y apoyo. Les deseo mucho éxito en su vida profesional y personal.

A mis amigos **Bambi, Jarocho, Ady, Laynes, Wicho, Calusha, Burro, Wero, Mosqueda, Yazmín y Doña**, sin duda conocerlos resulta ser algo muy grato para mí y han dejado huella, gracias por formar parte de mi vida, por aguantarme, y estar conmigo en momentos felices y tristes. Estoy seguro que seguiremos en contacto.

DEDICATORIAS

A mi padre **Gabriel Arias Mendoza** siempre te has esforzado por darnos todo lo que estuvo a tu alcance, has hecho tantos sacrificios por mis hermanos y por mí que no tengo palabras para agradecerte. Siempre has sido y serás mi modelo a seguir.

A mi madre **Hortensia Hernández Salazar**, tu que siempre estuviste al pie del cañón respetando a mi papa y apoyándolo, admiro tu fortaleza y tenacidad espero algún día recompensarte tantas noches de desvelo y las preocupaciones que algún día te hice y te sigo haciendo pasar.

En resumen este pequeño logro se los dedico a ustedes mi motor en la vida, no tengo palabras para agradecerles todo lo que han hecho por mí, porque a pesar de las adversidades de la vida nunca me faltó nada, porque sin ustedes no sería nada, les debo todo lo que hasta hoy he logrado, siempre han creído en mí y me han apoyado incondicionalmente a pesar de mis errores y tropiezos, siempre estuvieron a mi lado brindándome su amor y cariño.

A mis hermanos **Lucero, Brizeida y Alejandro** gracias por su apoyo y por su comprensión, le doy gracias a la vida por haberme dado unos hermanos tan maravillosos, espero nunca nos distanciamos y siempre convivamos de la mejor manera, nos tenemos el uno a otro y siempre será así lo quiero mucho hermanos.

A mis sobrinos **María José, Ángel, Edgar y Julio**, que me han dado muchos momentos de alegría recuerden que los quiero mucho y que a pesar de los obstáculos que les ponga la vida tratare de estar ahí para ustedes. Espero ser una inspiración y un ejemplo para ustedes. Recuerden que todo es posible cuando se lo proponen no importa cuántas veces fallen sean constantes y lo logran.

A mis abuelos **Nicolás Arias (†) y José Hernández (†)**, crecí escuchando de ustedes y de lo importante que son para sus hijos, y poco a poco se fueron volviendo importantes para mí me hubiera gustado conocerlos, sin embargo la vida no fue justa con ustedes, espero que donde se encuentren se sientan orgullosos de mí.

A mis abuelas **Águeda Mendoza, y María de Jesús Salazar**, dos mujeres admirables a las cuales quiero y admiro mucho, por su fortaleza y tenacidad para afrontar las difíciles pruebas que les ha puesto la vida porque gracias a sus consejos y apoyo esto es posible, espero que se sientan orgullosas de mí.

A mi tío **German (†)** espero que donde te encuentres estés de lo mejor gracias por ser un gran pilar en la familia, te fuiste muy joven y aun nos haces mucha falta, espero que tus sobrinos podamos honrar tu memoria siendo buenas personas y apoyando siempre a la familia como tú lo hiciste.

A mis tíos, primos y demás familia disculpen que no los mencione pero el espacio es muy pequeño, gracias por su apoyo y confianza espero, algún día retribuir todo el apoyo que me brindaron.

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|---|-----|
| AGRADECIMIENTOS..... | i |
| DEDICATORIAS..... | ii |
| ÍNDICE DE CONTENIDO..... | iii |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | v |
| ÍNDICE DE CUADROS..... | vi |
| RESUMEN..... | vii |
| 1 INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| OBJETIVOS..... | 3 |
| 2 REVISIÓN DE LITERATURA..... | 4 |
| 2.1 Modelos..... | 4 |
| 2.1.1 Antecedentes..... | 4 |
| 2.1.2 ¿Qué es un modelo?..... | 5 |
| 2.1.3 Modelo climático..... | 5 |
| 2.1.4 Modelo Agronómico..... | 6 |
| 2.1.5 Generalidades del DSSAT V.4.5..... | 7 |
| 2.1.5.1 Modelo CERES-Maize..... | 9 |
| 2.2 Cambio climático..... | 12 |
| 2.2.1 El clima y el cambio climático..... | 12 |
| 2.2.2 Modelos de circulación general..... | 15 |
| 2.2.3 Escenarios de cambio climático..... | 15 |
| 2.2.4 EL cambio climático en México..... | 18 |
| 2.3 El cultivo de maíz..... | 19 |
| 2.3.1 Descripción general..... | 19 |
| 2.3.2 Etapas fenológicas del maíz..... | 20 |
| 3 MATERIALES Y MÉTODOS..... | 23 |
| 3.1 Descripción de los sitios de estudio..... | 23 |
| 3.1.1 Localización geográfica..... | 23 |
| 3.1.2 Clima..... | 24 |
| 3.1.3 Actividad Agrícola..... | 25 |

| | | |
|-----|---|----|
| 3.2 | Base de datos climática | 27 |
| 3.3 | Simulación de escenarios en el Software DSSAT 4.5 | 29 |
| 3.4 | Evaluación de Escenarios..... | 32 |
| 4 | RESULTADOS Y DISCUSIONES | 33 |
| 5 | CONCLUSIONES | 40 |
| 6 | LITERATURA CITADA | 41 |

Correo electronico; **Gabriel Arias Hernández**, Gabriel.arias.hernandez@gmail.com

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 Resumen de los componentes y la estructura modular del DSSAT-CSM..... | 8 |
| Figura 2.2 Función de temperatura usada para calcular el factor reductor de la fotosíntesis (PRFT) en CERES-Maize v4.5. | 10 |
| Figura 2.3 Función de temperatura diaria usada para estimar el factor de llenado de grano (RGFILL) en CERES-Maize v4.5..... | 11 |
| Figura 2.4 Sistema climático del planeta y sus componentes..... | 12 |
| Figura 2.5 Vista esquemática de los componentes del sistema climático, sus procesos e interacciones | 13 |
| Figura 2.6 Ilustración esquemática de los escenarios del SRES. | 17 |
| Figura 3.1 Ubicación geográfica de los sitios de estudio en el estado de Coahuila..... | 23 |
| Figura 3.2 Tipos de clima predominantes en el estado de Coahuila..... | 24 |
| Figura 3.3 Distribución de la agricultura de riego y de temporal en el estado de Coahuila..... | 26 |
| Figura 4.1 Rendimiento de la línea base de las cuatro regiones para la fecha de siembra actual..... | 33 |
| Figura 4.2 Incremento medio de temperatura para cada región de los diferentes escenarios para el ciclo del cultivo de maíz actual. | 34 |
| Figura 4.3 Valor porcentual medio de incremento (+) o decremento (-) de precipitación para cada región en los diferentes escenarios, para el ciclo del cultivo de maíz actual. | 34 |
| Figura 4.4 Porcentaje de cambio de rendimiento promedio de maíz de las diferentes fechas de siembra con respecto al rendimiento actual (Línea Base) para el año 2030..... | 38 |
| Figura 4.5 Porcentaje de cambio de rendimiento promedio de maíz de las diferentes fechas de siembra con respecto al rendimiento actual (Línea Base) para el año 2050..... | 39 |

ÍNDICE DE CUADROS

| | |
|--|----|
| Cuadro 2.1 Descripción de coeficientes genéticos..... | 10 |
| Cuadro 2.2 Clasificación de las variedades de maíz de acuerdo al periodo de crecimiento..... | 19 |
| Cuadro 2.3 Partes de la Planta de maíz (Zea mayz) | 20 |
| Cuadro 2.4 Etapas fenológicas del maíz..... | 21 |
| Cuadro 2.5 Valores mínimos, máximos y óptimos en las diferentes etapas fenológicas del maíz | 22 |
| Cuadro 3.1 Coordenadas geográficas de las regiones de estudio..... | 24 |
| Cuadro 3.2 Descripción del clima El Sistema de Clasificación Climática utilizado es el de Köppen (1936), modificado por Enriqueta García (1973) y por INEGI (1976). | 25 |
| Cuadro 3.3 Estadísticas de la producción agrícola en cultivos cíclicos y perennes en el estado de Coahuila | 27 |
| Cuadro 3.4 Variables utilizadas para la elaboración de la base de datos climática..... | 27 |
| Cuadro 3.5 Manejo del cultivo en las cuatro regiones de estudio. | 31 |
| Cuadro 3.6 Coeficientes genéticos de los materiales utilizados en la simulación de las cuatro regiones..... | 31 |
| Cuadro 4.1 Por ciento de cambio de rendimiento de maíz en los diferentes escenarios comparados con el rendimiento actual (Línea Base) para la fecha de siembra actual..... | 35 |
| Cuadro 4.2 Ciclo de cultivo y evapotranspiración total de los diferentes escenarios para las cuatro regiones en la fecha de siembra actual..... | 36 |
| Cuadro 4.3 Por ciento de cambio de rendimiento de maíz en los diferentes escenarios comparados con el rendimiento actual (Línea Base) para la fecha de siembra adelantada y atrasada..... | 37 |
| Cuadro 4.4 Mitigación en por ciento del efecto de cambio de fecha de siembra en las cuatro regiones de estudio. | 37 |

Efecto del cambio climático en el rendimiento de maíz (*Zea mays*) variedad Jaguan para cuatro regiones del Estado de Coahuila.

Gabriel Arias Hernández

RESUMEN

Debido al impacto del cambio climático en las condiciones atmosféricas, principalmente temperatura, se esperan consecuencias negativas en muchos sectores uno de los más afectados es el sector agrícola, por tal motivo se vuelve indispensable generar alternativas que ayuden a mitigar sus efectos. En este trabajo se evaluó el efecto del cambio climático y el impacto en el rendimiento de Maíz Variedad Jaguan en cuatro regiones del estado de Coahuila, para el año 2030 y 2050, utilizando tres modelos de circulación general(GFDL 2.0.,UK-HADGEM1 y MPIECHAM5) para un escenario de emisiones medio moderado (A1B). La simulación del rendimiento de maíz se ejecutó para la fecha de siembra actual (línea base), con el fin de buscar una alternativa que mitigue los efectos del cambio climático se propusieron dos fechas de siembra adicionales (adelantada y retrasada con respecto a la fecha actual). El software que se utilizó para realizar las simulaciones fue el DSSAT v4.5. Se determinó que el incremento de temperaturas por efecto del cambio climático repercute de manera negativa en producción de maíz, ya que provoca un acortamiento en el ciclo del cultivo que se traduce en una reducción en los rendimientos del grano en comparación con el valor actual. Las regiones más afectas son la región Laguna, Centro y Norte con una reducción del rendimiento -23 a -45% para el 2030 y -28 a -54% en 2050. Los resultados de la simulación al cambiar la fecha de siembra muestran, que al atrasar esta en lugar de adelantarla es una mejor estrategia para las cuatro regiones, ya que se mitiga el efecto del cambio climático en todos los casos a tal grado que se incrementa el rendimiento para las proyecciones del año 2030, y en el año 2050, solo aumenta ligeramente para la región Laguna y Centro.

Palabras clave: Cambio climático, Reducción del Rendimiento y Escenarios

1 INTRODUCCIÓN

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático; IPCC, por sus siglas en inglés afirma que el calentamiento en el sistema climático global es inequívoco, las proyecciones señalan que la temperatura en la superficie de la tierra continuará aumentando a lo largo del siglo XXI (IPCC, 2014). De acuerdo a estas declaraciones se pronostica que en el estado de Coahuila se presentaran impactos negativos en el clima, provocando que la aridez se intensifique, las temperaturas aumenten y el promedio de lluvias disminuya en algunas regiones (Mendoza-Hernández *et al.*, 2013).

La agricultura es extremadamente vulnerable al cambio climático. Se prevé una reducción en la producción de los cultivos deseados, a la vez que provoca la proliferación de malas hierbas y pestes. Aumentaran las probabilidades de fracaso de las cosechas a corto plazo y se reducirá la producción a largo plazo. Aunque algunos cultivos en ciertas regiones del mundo puedan beneficiarse, en general se espera que los impactos del cambio climático sean negativos para la agricultura, amenazando la seguridad alimentaria mundial (Nelson *et al.*, 2009).

En un estudio realizado en el Distrito de Riego 075, Río Fuerte, Sinaloa por Ojeda-Bustamante *et al.*(2011), concluyó que el mayor impacto por incremento de la temperatura se apreciara en la reducción del ciclo fenológico de los cultivos anuales ocasionando una reducción en su rendimientos.

Dado que la mayor parte de la producción de maíz en México es de temporal y que está cultivado en el conjunto del territorio, este cultivo será el más afectado por el cambio climático, particularmente durante la temporada Primavera-Verano (P/V) (Greenpeace, 2010). Sin embargo Ahumada-Cervantes *et al.*(2014), sugieren que a corto plazo los efectos del cambio climático son mínimos; existen regiones donde la producción podría mantenerse o incrementarse (latitudes templadas y valles altos).

Contar con información para la toma de decisiones es primordial y el predecir los posibles efectos del cambio climático resulta una buena estrategia para poder emprender acciones que contrarresten efectos del cambio climático. El

uso de modelos desempeña una función importante en la investigación y planificación de manejo de los sistemas de producción agropecuaria (Candelaria-Martínez *et al.*, 2011). El DSSAT es considerado uno de los modelos más sólidos, especialmente por el tema de modelación de rendimientos en escenarios de cambio climáticos (Fernández, 2013).

Considerando que las regiones agrícolas de Coahuila se encuentran ubicadas en las zonas semiáridas, bajo condiciones limitantes de agua y elevadas temperaturas se requiere evaluar el posible futuro cambio en la producción de maíz en estas regiones, derivado de futuros cambios en la temperatura. Así mismo evaluar el cambio de fecha de siembra como una estrategia de adaptación, para ayudar a seleccionar estrategias apropiadas para prepararse para el cambio climático.

OBJETIVOS

- Evaluar el efecto del cambio climático en el rendimiento de Maíz Variedad Jaguan en cuatro regiones del estado de Coahuila, para los años 2030 y 2050, utilizando tres modelos de circulación general.
- Evaluar el cambio de fecha de siembra como una estrategia para mitigar el efecto del cambio climático.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Modelos

2.1.1 Antecedentes

La aparición de los modelos de simulación ocurre a partir de la década de los 50 con modelos descriptivos y matemáticos; luego a mediados de los 60 aparece el concepto de sistemas dinámicos, que incluyen el tiempo como variable independiente. Estos modelos representaban flujos como procesos e interacciones. En esta etapa dos importantes precursores fueron W. G. Duncan en la University of Kentucky y C. T. de Wit en la Agricultural University de Wageningen, que desarrollaron modelos como herramienta para explicaciones científicas, como por ejemplo, sintetizar y mejorar la comprensión de procesos tales como la interceptación de radiación y fotosíntesis, desarrollando modelos simples que consideraban únicamente la producción potencial relacionada con la radiación y la temperatura.

En la década del 70 se formaliza aquel concepto de dinámica de sistemas y en los 80 se refina mediante técnicas de computación la verificación, validación y evaluación de esos modelos. En esta última década aparecen los primeros modelos de simulación para los cultivos de maíz, soja, trigo y arroz, incluidos en el paquete DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) “Sistema de apoyo para las decisiones de transferencia agrotecnológica”. La simulación de sistemas agrícolas empezó entonces a ser una herramienta para la integración de los diferentes componentes productivos dentro de los sistemas agrícolas. Los avances en el conocimiento de las interacciones dentro del ecosistema, influenciado por el ambiente y por las prácticas de manejo, expandió la potencialidad de uso de esta herramienta como ayuda para la toma de decisiones (Hernández *et al.*, 2009).

La aparición a mediados de los 90 de la tecnología informática permitió una mayor utilización de estos modelos para el estudio y resolución de problemas específicos como: desarrollo y crecimiento de los cultivos, evaluación de respuesta a la fertilización, estrategias de riego, situaciones de estrés,

predicción de pérdidas por erosión, lixiviación de pesticidas, contaminación del ambiente, calentamiento global de la atmósfera, entre otros(Guevara, 2007).

Según Fernández (2013), en la última década se han publicado más de 40 estudios de impacto climático en la agricultura empleando modelos de simulación. Los modelos han ofrecido resultados bastante exactos, al compararlos con datos reales y señalan que entre los modelos más utilizados y convenientemente validados están los norteamericanos de DSSAT y los desarrollados en la Universidad de Wageningen, Holanda. Recientemente ha venido teniendo reconocimiento el modelo AquaCrop desarrollado por la FAO.

2.1.2 ¿Qué es un modelo?

Un modelo es la representación simplificada de un sistema, donde se describen las variables dependientes e independientes de interés, características y restricciones mediante símbolos, diagramas y ecuaciones (Candelaria-Martinez *et al.*, 2011).

La Real Academia Española (2016), lo define como un esquema teórico, generalmente en forma matemática, de un sistema o de una realidad compleja, como la evolución económica de un país, que se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento.

En un extremo tenemos los modelos globales que ayudan a simular procesos en detalle con la esperanza que el modelo pueda ser robusto en un rango amplio de ambientes; en el otro extremo tenemos los modelos simples que son utilizados con pocos parámetros, formalmente optimizados para que el modelo sea preciso en una región determinada o en un estrecho rango de situaciones de sistemas de cultivos.(Guevara, 2007)

2.1.3 Modelo climático

Aunque nuestros conocimientos de estos procesos puedan representarse en términos matemáticos, la complejidad del sistema significa que, en la práctica, estos efectos solo pueden calcularse con computadoras. Por lo tanto, la formulación matemática se realiza mediante un programa informático que se denomina modelo climático. También es importante tener en cuenta que estos

modelos climáticos son muy similares a los que se emplean para efectuar predicciones y pronósticos meteorológicos. Por último, hay amplio reconocimiento de que los modelos climáticos actuales simulan en forma creíble el clima actual observado, lo que sugiere que se comprende en gran medida cómo funciona el sistema climático.

Puesto que no se cuenta con un segundo planeta Tierra para realizar “experimentos climáticos”, ni se tiene el tiempo para esperar los resultados de los actuales “experimentos” con el planeta, los modelos climáticos, complementados con los escenarios sobre la emisión de gases de efecto invernadero, son la mejor herramienta para comprender cómo reaccionará el sistema climático a los forzamientos antropogénicos (Oglesby y Rowe, 2010).

2.1.4 Modelo Agronómico

Si definimos a los modelos de cultivos como la representación matemática de una síntesis de mecanismos y procesos, es erróneo pensar que podamos representar perfectamente los sistemas biológicos y por lo tanto la modelización está orientada generalmente a ver la respuesta a aspectos precisos como:

- Predicción de la producción
- Potencialidad de cultivares
- Manejo de la irrigación, entre otros.

Los modelos de simulación de cultivos contienen una gran variedad de niveles de detalle, el mínimo detalle necesario en modelos útiles para determinar el impacto del riesgo climático incluye la duración del crecimiento del cultivo, la tasa de crecimiento del cultivo (TCC), la fracción de la masa total que es particionada a los componentes del rendimiento, el balance de agua y nitrógeno. Una concepción de modelo ideal para determinar ese riesgo debería evaluar el desarrollo fásico de las plantas, para determinar la sensibilidad de las fases de crecimiento y la duración total del ciclo del cultivo; el desarrollo de la morfología de la planta para evaluar el número de hojas, el área foliar, tasa de crecimiento en biomasa y el tamaño potencial de los componentes del rendimiento, que nos permite definir con mayor precisión la incidencia de estos

procesos en la partición de la biomasa aérea y radicular. Como ejemplo, tenemos el tiempo térmico o suma de grados día para predecir el desarrollo de la planta, el uso de la radiación solar para predecir el crecimiento en biomasa y el uso de la evapotranspiración potencial para predecir transpiración de la planta y evaporación del suelo, que proveen conceptos para la simulación de cultivos, cuando disponemos de la información apropiada (Guevara, 2007).

Modificando la escala de espacio y tiempo, los modelos nos permiten además abordar fenómenos climáticos como el ENOS (El Niño Oscilación del Sur), analizando en forma interactiva el impacto de la variabilidad climática y las decisiones de manejo sobre la productividad de los cultivos, resultado difícil de obtener a partir de análisis estadísticos clásicos o experimentos agronómicos tradicionales (Hernández *et al.*, 2009).

2.1.5 Generalidades del DSSAT V.4.5

Desde 1983, un grupo internacional de científicos cooperantes han desarrollado modelos de simulación de cultivos, enfocados a proporcionar estimaciones realistas del comportamiento de los cultivos bajo diferentes estrategias de manejo y condiciones ambientales. Estos modelos se han combinado en un paquete, como parte de un programa de enlaces (software shell) conocido como Sistema de Apoyo para Decisiones de Transferencia de Agrotecnología (DSSAT, por sus siglas en inglés) (Hernández *et al.*, 2009).

Los modelos de simulación de cultivos del DSSAT utilizan archivos de datos para clima, suelo y manejo del cultivo. Estos archivos se utilizan para proveer en la simulación un ambiente parecido a donde crece el cultivo. El DSSAT, además, incluye varios programas de aplicación para análisis estacionales, rotación de cultivo y análisis secuencial, y análisis espacial a escala de campo o regional. Los modelos proveen una de las mejores aproximaciones del comportamiento de los cultivos, integrando nuestro entendimiento de los procesos complejos de las plantas influenciados por el clima, el suelo y las condiciones de manejo.

Ha estado en uso durante más de 20 años por investigadores, educadores, consultores, agentes de extensión, agricultores y tomadores de decisiones en más de 100 países en todo el mundo este paquete tiene incorporado 16 modelos de cultivos diferentes, con un software que facilita la evaluación y aplicación de estos modelos de cultivos para diferentes propósitos. Estos permiten simular el crecimiento de cultivos de importancia económica y han demostrado alta confiabilidad en distintas condiciones de clima, suelo y manejo. Con este modelo es posible organizar y archivar bases de datos sobre clima, suelos, cultivos, experimentos y precios; simular producciones de cultivo en una o varias épocas y en secuencias; analizar resultados y representar gráficamente simulaciones; analizar variabilidad espacial y evaluar diferentes prácticas de manejo específicas a una explotación o parte de ella (Hoogenboom *et al.*, 2015).

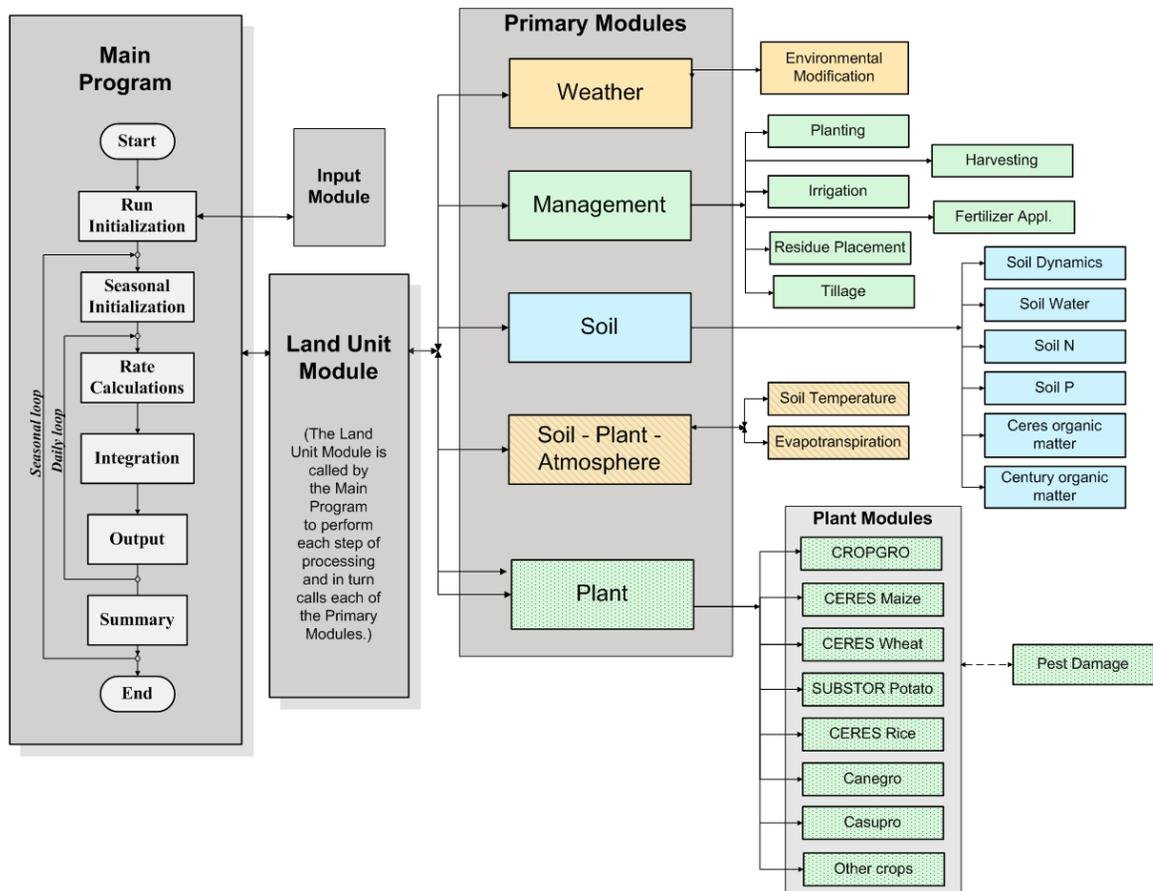


Figura 2.1 Resumen de los componentes y la estructura modular del DSSAT-CSM.
Fuente (Hoogenboom *et al.*, 2010)

2.1.5.1 Modelo CERES-Maize

El modelo CERES-Maize simula los incrementos diarios de crecimiento, desarrollo y producción del cultivo del maíz. Puede utilizarse para la toma de decisiones en el manejo de los cultivos y en el análisis de riesgo. Para simular el crecimiento, el desarrollo y la producción del maíz, el modelo considera los siguientes procesos:

- El desarrollo fenológico, especialmente la forma en que es afectado por las características genéticas y los factores climáticos.
- La extensión del crecimiento de hojas, tallos y raíces.
- La acumulación de biomasa, especialmente la manera en que el desarrollo fenológico afecta el desarrollo de los órganos vegetativos y reproductivos.
- El balance del agua del suelo y el uso del agua por el cultivo.
- Las transformaciones del nitrógeno del suelo y su incorporación por las diferentes partes de la planta.

Los datos de entrada necesarios para el funcionamiento del modelo CERES-Maize incluye información meteorológica diaria (temperatura máxima y mínima, precipitación y radiación solar); Los datos de caracterización del suelo (datos por estrato de nitrógeno y fósforo extraíble, constantes de humedad en el suelo); un conjunto de coeficientes genéticos que caracterizan el material genético que se cultiva. También información sobre el manejo del cultivo, fecha de siembra, densidad de población, distancia entre líneas, fertilización y programación de riegos (Rodríguez-García *et al.*, 2014)

El modelo caracteriza a las diferentes variedades de maíz, mediante cinco coeficientes genéticos (P1, P2, P5, G2, G3 y FILOCRONO), dos de ellos se pueden calcular a partir de los parámetros climáticos y los tres restantes se ajustan por medio de pruebas de ensayo y error, hasta obtener la fenología y rendimientos esperados para cada variedad (Conde *et al.*, 2015).

Cuadro 2.1 Descripción de coeficientes genéticos.

| COEFICIENTES GENÉTICOS | DESCRIPCIÓN |
|------------------------|--|
| P1 | Grados día con base 8 °C desde emergencia hasta el final de la fase juvenil. |
| P2 | Sensibilidad al fotoperiodo (días de retraso en la iniciación de la flor masculina por hora de incremento del fotoperiodo. O para cultivares no sensibles al fotoperiodo). |
| P5 | Grados día con base 8 °C desde 75% de emisión de sedas hasta madurez fisiológica. |
| G2 | Número potencial de granos por planta. |
| G3 | Tasa potencial de crecimiento de los granos (mg grano ⁻¹ d ⁻¹). |
| FILOCRONO | Intervalo del filocrono, Grados día con base 8 °C entre la aparición de dos hojas sucesivas. |

Una de las características es que el modelo asume que la tasa de desarrollo aumenta linealmente, en función de la temperatura base (8 °C) hasta los 34 °C, y decrece linealmente hasta cero cuando la temperatura se incrementa desde 34 a 44 °C. Así mismo, se considera que las tasas de iniciación de hojas y aparición de hojas cambian linealmente y de modo similar en estos dos rangos de temperaturas.

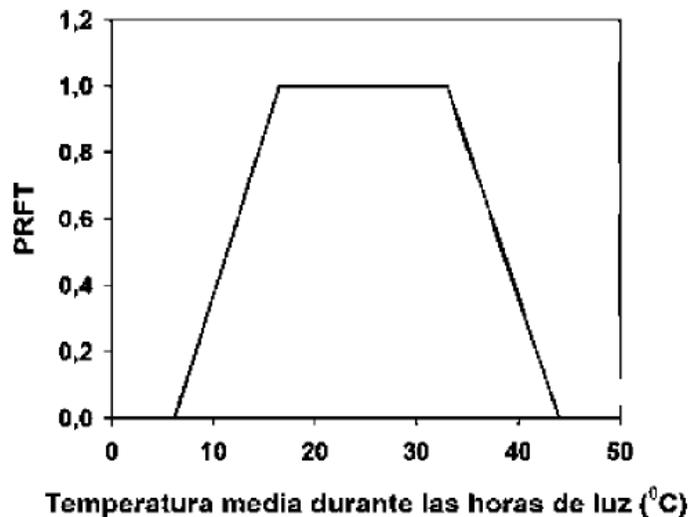


Figura 2.2 Función de temperatura usada para calcular el factor reductor de la fotosíntesis (PRFT) en CERES-Maize v4.5.
Fuente (Sau et al., 2010)

El efecto de la temperatura en el llenado de grano es una función que adopta valores comprendidos entre 0 y 1 y se calcula diariamente. Esta función afecta el crecimiento diario del grano. (Sau *et al.*, 2010)

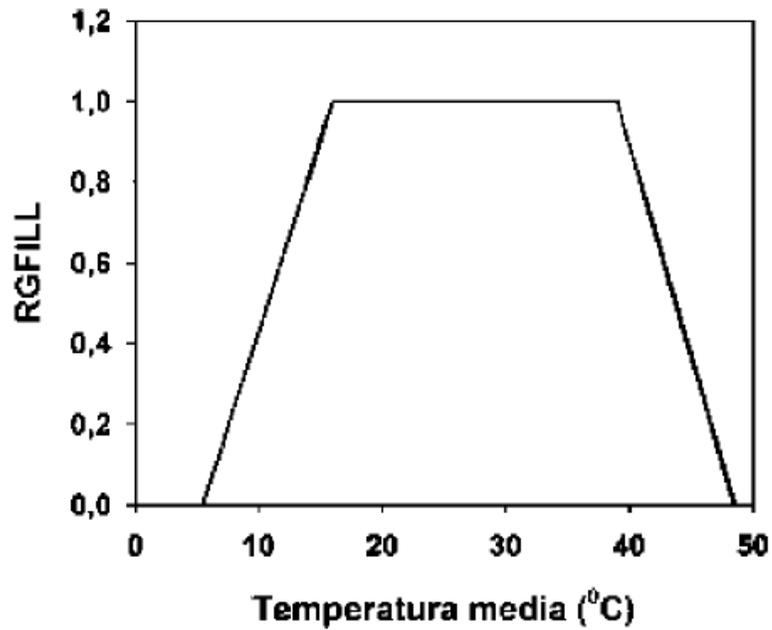


Figura 2.3 Función de temperatura diaria usada para estimar el factor de llenado de grano (RGFILL) en CERES-Maize v4.5.
Fuente (Sau *et al.*, 2010)

2.2 Cambio climático

2.2.1 El clima y el cambio climático

Hablar de clima no es lo mismo que hablar de tiempo. El tiempo se refiere al estado de la atmósfera durante un corto periodo de tiempo mientras que el clima hace referencia a los valores medios de las condiciones del tiempo para un lugar concreto durante un periodo de varios años. (National Geographic , 2016).

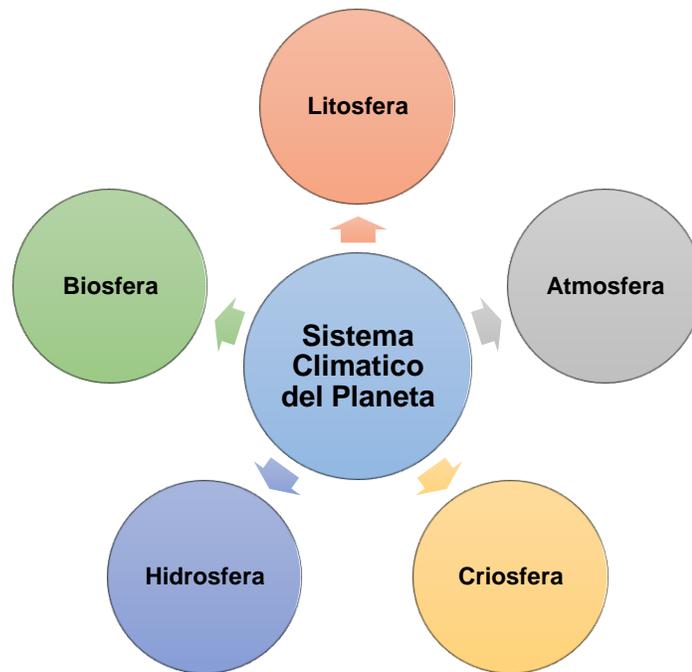


Figura 2.4 Sistema climático del planeta y sus componentes.

Para poder entender el comportamiento del clima y su variación temporal y espacial, es necesario entender el clima como un sistema que está integrado por una serie de componentes; Biosfera, Hidrosfera, Criosfera, Atmosfera y Litosfera, estos interactúan a través de una serie de procesos físicos, principalmente intercambios de calor, materia y tensión entre los componentes, para producir el clima de la tierra. A través de estas interacciones, un cambio en cualquiera de estos componentes puede ocasionar cambios en otros. Los cambios en los componentes antes mencionados son consecuencia de cambios los factores externos del clima, que pueden ser positivos o negativos ocasionando un calentamiento o enfriamiento respectivamente. Los factores

externos del clima pueden clasificarse como naturales o antropogénicos. Los ejemplos, de factores externos naturales incluyen la variabilidad solar y las erupciones volcánicas; los factores externos antropogénicos incluyen la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), la producción de aerosoles y los cambios en el uso del suelo. Siempre ha habido cambios en los factores naturales y han provocado cambios climáticos y variabilidad climática a lo largo de la historia del planeta; pero solo recientemente la magnitud de los factores naturales ha sido suficiente como para afectar considerablemente al sistema climático (IPCC., 2007).

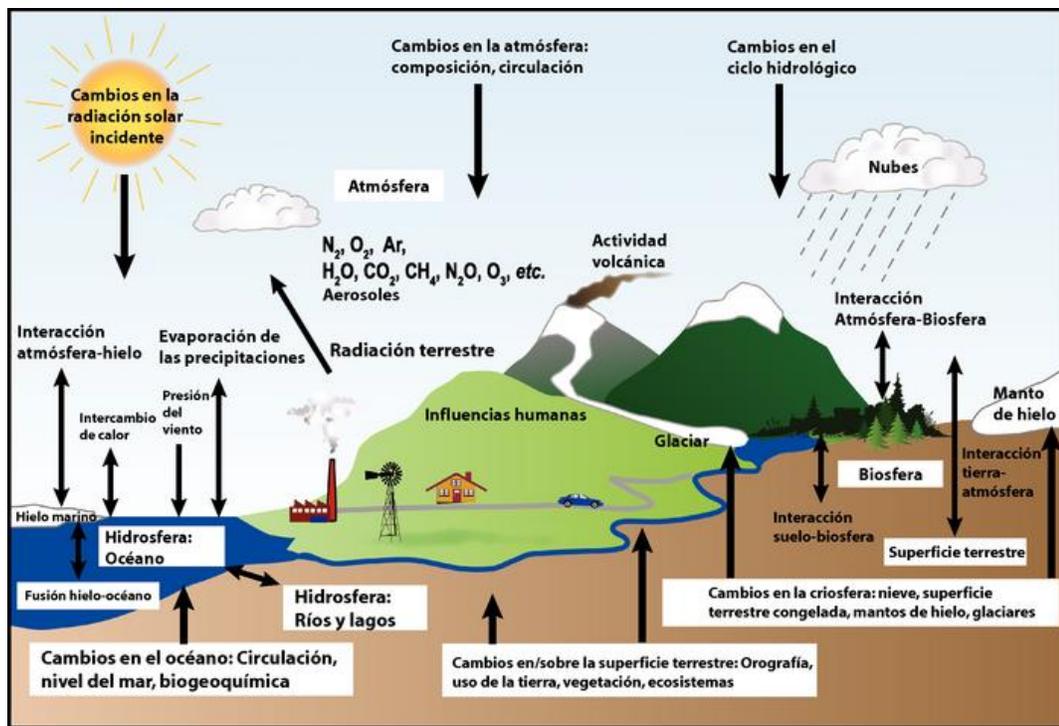


Figura 2.5 Vista esquemática de los componentes del sistema climático, sus procesos e interacciones
Fuente(IPCC, 2007)

Casi toda la energía en que se sustenta el sistema climático proviene del sol, pero si bien la energía que este emite ha variado a lo largo del tiempo, ocasionando cambios climáticos durante la historia geológica de la tierra, las variaciones de la radiación solar no explican el calentamiento observado en los últimos 30 años en que la energía del sol ha sido cuantificada con precisión. Si se descarta el forzamiento solar, podría sostenerse que el forzamiento climático

más importante se debe a cambios en la composición atmosférica, en particular, proveniente de los gases de efecto invernadero y de los aerosoles.

Los GEI son un fenómeno natural y las concentraciones preindustriales son el motivo por el cual la temperatura promedio de la tierra se mantiene casi 30⁰ C por encima del nivel que tendría en ausencia de dichos gases. Si no hubiera retroacción alguna, no cabe duda de que una mayor concentración de GEI atribuible a actividades humanas se traduciría en temperaturas más altas. Este efecto invernadero ampliado es el que preocupa hoy en día. Si bien el efecto básico es calentamiento atmosférico, este, a su vez, da lugar a otros efectos, como cambios en los patrones de precipitación, deshielo de glaciares y de mantos de hielo, y elevación del nivel del mar. (Oglesby y Rowe, 2010)

El cambio climático es considerado uno de los problemas medioambientales más importantes de nuestro tiempo, y puede definirse como todo cambio significativo en el sistema climático del planeta, que permanece por décadas o más tiempo.

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC, 1992), define el cambio climático como; el cambio del clima atribuido directa o indirectamente a actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera mundial, y que viene a añadirse a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables

A pesar de que el clima del planeta ha cambiado a lo largo del tiempo en forma natural, existen claras evidencias de que el cambio climático puede ser atribuido a efectos ocasionados por actividades humanas.

El calentamiento global es la manifestación más evidente del cambio climático, y se refiere al incremento promedio de las temperaturas terrestres y marinas a nivel global. En las tres últimas décadas la superficie de la Tierra se ha vuelto cada vez más cálida, y se han superado los registros de cualquier época precedente a 1850 (IPCC, 2014).

2.2.2 Modelos de circulación general

El recurso más avanzado del que se dispone para el estudio del clima es, sin lugar a dudas, el conjunto de Modelos de Circulación General (GCM por sus siglas en inglés) de Atmósfera y Océano Acoplados (AOGCMs), según el 4º Reporte de evaluación del IPCC sobre el cambio climático 2007 existen 23 MCG reportados.. Estos modelos, basados en las leyes fundamentales de física, simulan una variedad de los procesos que ocurren en un rango muy amplio de escalas espaciales y temporales, entre los diversos subsistemas climáticos. Dichos modelos poseen resoluciones espaciales variadas que se han venido refinando en el transcurso del tiempo que permiten su aplicación a escalas regionales. Las variables sobre las que se presenta más atención, por su indiscutible importancia, son la temperatura de superficie y la precipitación y, comúnmente, los horizontes proyectados se extienden hasta el 2100. (Conde y Gay, 2008)

Los resultados obtenidos de la simulación de los diferentes modelos no necesariamente deben ser idénticos, pero estos deben ser cotejados con datos observados, lo cual permite ponderar que tan eficaz es cada modelo.

2.2.3 Escenarios de cambio climático

Los escenarios de cambio climático son una representación plausible y a menudo simplificada del clima futuro, basados en un conjunto internamente coherente de relaciones climatológicas, que se construyen para ser utilizados de forma explícita en la investigación de las consecuencias potenciales del cambio climático antropogénico, y que sirven a menudo de insumo para las simulaciones de los impactos. Estos escenarios no son pronósticos climáticos, ya que cada escenario es una alternativa de cómo se puede comportar el clima futuro. (INECC, 2015)

Una proyección puede servir como material fuente para un escenario, pero los escenarios en general requieren de información adicional. Un conjunto de escenarios se adopta para reflejar, de la mejor manera posible, el rango de incertidumbre en las proyecciones. Los escenarios socioeconómicos pueden ser contruidos como lo ha hecho el IPCC en el Informe Especial de Escenarios

de Emisiones (Special Report on Emissions Scenarios o SRES). Estos escenarios se realizaron para explorar el desarrollo futuro del medio ambiente global, con especial énfasis en la producción de GEI. La emisión de estos gases a la atmósfera depende en gran medida del nivel de desarrollo de los países a futuro, de su población y del uso de hidrocarburos como fuente principal de abastecimiento de energía. Para poder hablar de escenarios, primero se debe conocer la terminología:

- Línea evolutiva (Storyline): Descripción narrativa de un escenario (o familia de escenarios) que resalta sus principales características, las relaciones entre las fuerzas determinantes fundamentales y la dinámica de su evolución.
- Escenario: proyecciones de un futuro potencial, con base en una lógica clara y una línea evolutiva cuantificada.
- Familia de escenarios: escenarios que tienen una línea evolutiva similar en lo que respecta a sus características demográficas, sociales, económicas y de cambio tecnológico. La serie de escenarios del SRES consta de cuatro familias: A1, A2, B1 y B2.

En el Informe Especial del IPCC sobre Escenarios de Emisiones se elaboraron cuatro líneas evolutivas (A1, A2, B1 y B2), donde se describen las fuerzas determinantes en las emisiones de gases de efecto invernadero y aerosoles, así como su evolución durante el siglo XXI tanto en términos globales como de distintas regiones.

Estas líneas evolutivas pueden resumirse de la siguiente forma.

- **Línea evolutiva y familia de escenarios A1:** presenta un mundo futuro con crecimiento económico muy rápido; la población mundial llega a su punto máximo a mediados del siglo y decrece desde entonces. Se asume una rápida introducción de tecnología nueva y más eficiente.
- **Línea evolutiva y familia de escenarios A2:** supone un mundo muy heterogéneo, con la población global en constante aumento y el

crecimiento económico orientado regionalmente; éste es más lento y fragmentado que en las otras líneas evolutivas.

- **Línea evolutiva y familia de escenarios B1:** muestra un mundo convergente con los mismos patrones de población que la familia A1, pero con cambios rápidos en las estructuras económicas hacia una economía de servicios e información. Esto supone una reducción en la intensidad del uso de materiales, y la introducción de tecnologías limpias y eficientes en el uso de recursos.
- **Línea evolutiva y familia de escenarios B2:** plantea un mundo en donde el énfasis se concentra en soluciones locales para la sustentabilidad económica, social y ambiental. Asume una población en continuo crecimiento (menor al de la familia A2) y un nivel de desarrollo económico intermedio.

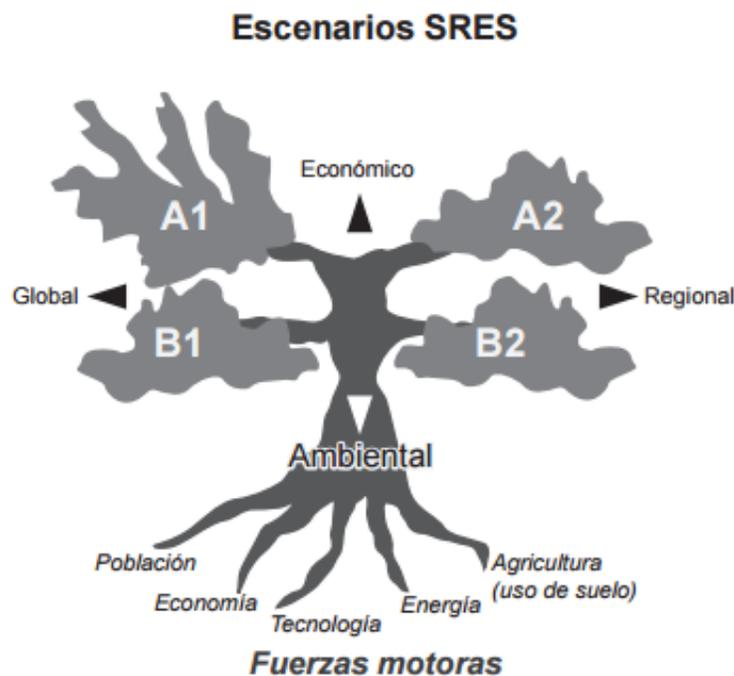


Figura 2.6 Ilustración esquemática de los escenarios del SRES.
Fuente (Nakicenovic et al., 2000)

A partir de estas líneas evolutivas se desarrollaron cuarenta escenarios que caben dentro de cada una de las cuatro familias. Es importante recalcar que todos los escenarios se consideran como válidos y no tienen asignada una

probabilidad de ocurrencia. De las cuatro familias se tomaron seis grupos de escenarios: uno para cada una de las familias A2, B1 y B2, y tres para la familia A1. Estos últimos caracterizan los desarrollos alternativos de tecnologías energéticas:

- **A1F1:** Uso intensivo de recursos fósiles.
- **A1T:** Uso predominante de recursos alternativos a los fósiles.
- **A1B:** Asume un balance de las fuentes energéticas.

Se puede decir, en resumen, que los escenarios del SRES consideran diferentes condiciones del desarrollo global para los próximos cien años y son, en un sentido más amplio, escenarios del estado, y crecimiento de la población y la economía. (Magaña-Rueda *et al.*, 2009).

2.2.4 EL cambio climático en México

A nivel nacional, en las investigaciones realizadas para medir las posibles consecuencias del cambio climático en México es posible encontrar una variedad de estudios que abordan el problema desde distintas perspectivas y sobre diversos sectores prioritarios para el país. Más de la mitad del territorio del país (entre el 50% y el 57%) cambiará sus condiciones de temperatura y precipitación, de manera que el clima actual podría ser clasificado en otro subtipo y los habitantes de los ecosistemas, incluida la población humana, deberán cambiar para adaptarse a las nuevas condiciones (SAGARPA, 2012). Los expertos han previsto que la temperatura promedio de México en el año 2020 podría ser entre 1.5 y 2.5°C mayor que la actual y llegaría hasta los 2 y 4°C para el año 2080, con variaciones regionales: la región norte sería la que registre los mayores incrementos en la temperatura.

En lo que se refiere a las lluvias, los estudios sugieren que podrían reducirse en el invierno hasta 15% en las zonas del centro de México y 5% en el Golfo, e incluso, es probable que se retrase su inicio en gran parte del país. Además, el número de tormentas severas podría aumentar, es decir, que esos eventos en los que llueve de manera torrencial y que causan inundaciones y deslaves, sean más frecuentes (SEMARNAT, 2009).

2.3 El cultivo de maíz

2.3.1 Descripción general

El maíz (*Zea mays*) es considerado un cultivo muy productivo debido a su considerable área foliar así como a la modificación de su ruta fotosintética. Esta modificación (la cual es compartida por otras especies tropicales adaptadas a sobrevivir bajo déficit hídrico), es conocida como el “síndrome C4”, y consiste en un eficiente mecanismo de intercambio de vapor de agua por dióxido de carbono atmosférico. Como resultado de este mecanismo. Las especies C4 pueden producir más materia seca por unidad de agua transpirada que la producida por aquellas especies que siguen la ruta fotosintética convencional C3 (Salvador, 2001).

El maíz se ha tomado como un cultivo muy estudiado para investigaciones científicas. Continuamente se está estudiando su genotipo y por tratarse de una planta monoica aporta gran información ya que posee una parte materna (femenina) y otra paterna (masculina) por lo que se pueden crear varias recombinaciones (cruces) y crear nuevos híbridos para el mercado. Los objetivos de esto cruzamientos van encaminados a la obtención de altos rendimientos en producción. Por ello, se selecciona en masa aquellas plantas que son más resistentes a condiciones climáticas adversas, plagas y que desarrollen un buen porte para cruzarse con otras plantas de maíz que aporten unas características determinadas de lo que se quiera conseguir como mejora de cultivo (CONACYT, 2014).

De acuerdo a la duración del ciclo del cultivo el maíz las variedades de maíz se clasifican Extra-temprana, Temprana, Intermedia y Tardía.

Cuadro 2.2 Clasificación de las variedades de maíz de acuerdo al periodo de crecimiento.

| Clases de madurez | Días a la madurez |
|--------------------------|--------------------------|
| Extra-temprana | 80 - 90 |
| Temprana | 90 - 100 |
| Intermedia | 100 - 110 |
| Tardía | 110 - 130 |

Cuadro 2.3 Partes de la Planta de maíz (*Zea mays*)

| Partes de la planta de maíz | |
|------------------------------------|---|
| Altura de la planta | El maíz comúnmente crece de 1.2 a 3 m de alto |
| Raíces | El maíz produce raíces tanto accidentales como refuerzos. Las raíces de refuerzo se forman sobre el suelo después de la emergencia de la planta. Las raíces de refuerzo son importantes en la reducción de Acame. Si la planta es desecada, estas raíces no pueden formarse de manera adecuada. |
| Tallos | El maíz tiene un solo tallo y raramente hijuelos. |
| Hojas | El maíz forma de 16 a 22 hojas por planta. Las hojas se forman en cada nodo y alternos (es decir, que aparecen en lados opuestos de la planta). |
| Espiga | La espiga se forma en la parte superior de la planta y proporciona el polen para fertilizar la mazorca (también conocida como elote). |
| Floración | El maíz suele formar una sola mazorca. El estigma es una colección de tubos que van desde el potencial de cada grano en la mazorca. Las tierras de polen en cada estigma fertilizan el grano, las mazorcas son generalmente de 15 a 39 cm de largo |
| Semilla | El grano del maíz generalmente pesa alrededor de 25 -40 g por 100 granos. |

Fuente (CIMMYT, 2016)

2.3.2 Etapas fenológicas del maíz

Para la normalización de las definiciones, los investigadores de maíz han elaborado una guía para identificar las diferentes etapas de crecimiento del maíz. No todas las plantas en el campo de llegan a una etapa en particular, al mismo tiempo. Por lo tanto, los investigadores asumen que el cultivo alcanza una etapa específica cuando al menos el 50% de las plantas presentan las características correspondientes.

La normalización de las definiciones permite que los investigadores se refieran a los problemas de las etapas de crecimiento específicas. Los investigadores también pueden comparar la fenología de maíz bajo diferentes condiciones ambientales y de tratamientos experimentales.

Cuadro 2.4 Etapas fenológicas del maíz

| Etapa | DAS* | Características |
|-------|------|---|
| VE | 5 | El coleoptilo emerge de la superficie del suelo |
| V1 | 9 | Es visible el cuello de la primera hoja. |
| V2 | 12 | Es visible el cuello de la segunda hoja. |
| Vn | | Es visible el cuello de la hoja número "n". ("n" es igual al número definitivo de hojas que tiene la planta; "n" generalmente fluctúa entre 16 y 22, pero para la floración se habrán perdido las 4 a 5 hojas de más abajo.) |
| VT | 55 | Es completamente visible la última rama de la panícula. |
| R0 | 57 | Antesis o floración masculina. El polen se comienza a arrojar. |
| R1 | 59 | Son visibles los estigmas. |
| R2 | 71 | Etapa de ampolla. Los granos se llenan con un líquido claro y se puede ver el embrión. |
| R3 | 80 | Etapa lechosa. Los granos se llenan con un líquido lechoso blanco. |
| R4 | 90 | Etapa masosa. Los granos se llenan con una pasta blanca. El embrión tiene aproximadamente la mitad del ancho del grano. |
| R5 | 102 | Etapa dentada. La parte superior de los granos se llena con almidón sólido y, cuando el genotipo es dentado, los granos adquieren la forma dentada. En los tipos tanto cristalinos como dentados es visible una "línea de leche" cuando se observa el grano desde el costado. |
| R6 | 112 | Madurez fisiológica. Una capa negra es visible en la base del grano. La humedad del grano es generalmente de alrededor del 35%. |

* DAS: número aproximado de días después de la siembra en tierras bajas tropicales, donde las temperaturas máxima y mínima pueden ser de 33°C y 22°C, respectivamente. En los ambientes más fríos, se amplían estos tiempos.

Fuente (CONACYT, 2014)

Los investigadores dividen las etapas de crecimiento en dos grandes categorías:

- Vegetativa (V)
- Reproductiva (R)

Además, las etapas de crecimiento se pueden agrupar en cuatro grandes períodos:

- Crecimiento de las plántulas (etapas VE y V1)
- Crecimiento vegetativo (etapas V2, V3... Vn)
- Floración y la fecundación (etapas VT, R0, y R1)

- Llenado de grano y la madurez (etapas R2 a R6)

Cuadro 2.5 Valores mínimos, máximos y óptimos en las diferentes etapas fenológicas del maíz

| Temperatura (°C) | | | |
|---|---------------|---------------|---------------|
| Fase | Mínima | Optima | Máxima |
| Germinación | 10 | 20-25 | 40 |
| Crecimiento vegetativo | 15 | 20-30 | 40 |
| Floración | 20 | 21-30 | 30 |
| Precipitación (mm) | | | |
| Total ciclo vegetativo | 400 | 500-800 | 1000 |
| Germinación | | 45 | |
| Crecimiento vegetativo | | 170 | |
| Floración | | 220 | |
| Formación del fruto estado lechoso y masoso | | 215 | |
| Madurez | | 90 | |

Fuente (Granados y Sarabia, 2013)

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Descripción de los sitios de estudio

3.1.1 Localización geográfica

El presente trabajo se desarrolló para el cultivo del maíz en cuatro regiones de importancia agrícola en el estado de Coahuila: Sureste, Laguna, Centro y Norte. Dentro de estas regiones se eligió un municipio que fuera representativo de cada región y que contara suficiente información para poder realizar las simulaciones y observar su comportamiento para diferentes escenarios futuristas de cambio climático.

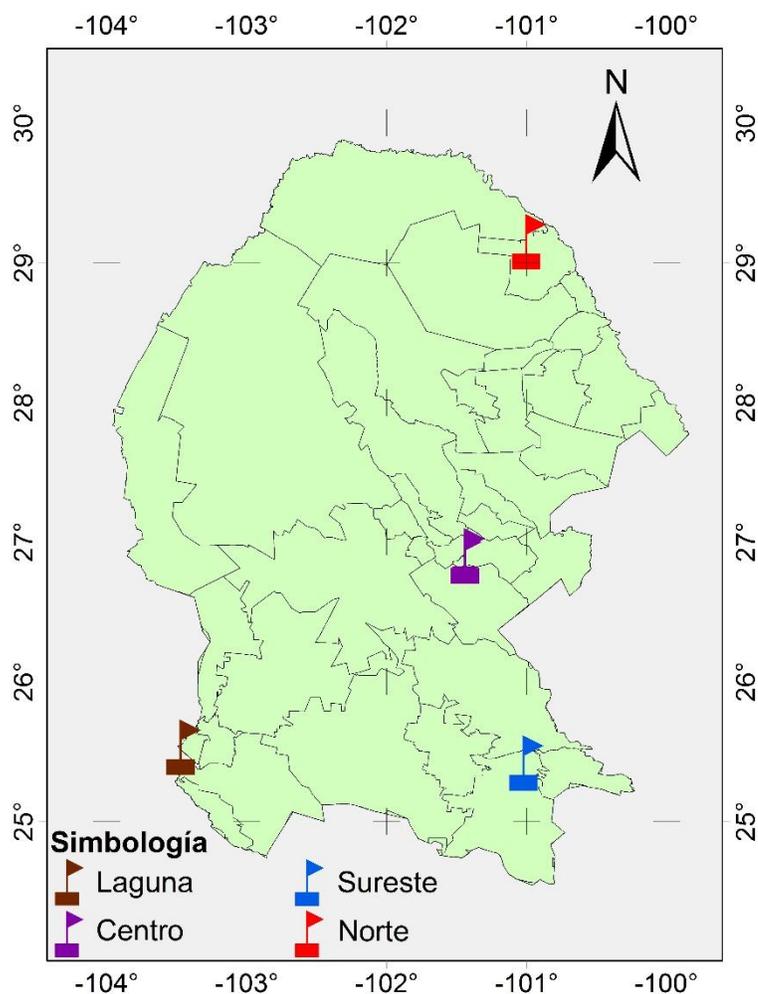


Figura 3.1 Ubicación geográfica de los sitios de estudio en el estado de Coahuila.

Cuadro 3.1 Coordenadas geográficas de las regiones de estudio

| REGIÓN | MUNICIPIO | LONGITUD | LATITUD | ALTITUD |
|---------|-----------|----------|---------|---------|
| | | o | o | msnm |
| SURESTE | Saltillo | -101.00 | 25.417 | 1589 |
| LAGUNA | Torreón | -103.45 | 25.53 | 1971 |
| CENTRO | Monclova | -101.417 | 26.90 | 586 |
| NORTE | Jiménez | -100.98 | 29.15 | 330 |

3.1.2 Clima

En el estado de Coahuila, la mitad de su territorio (49%) presenta clima seco y semiseco, el 46% tiene clima Muy seco y el 5% restante registra clima Templado subhúmedo, localizado en las partes altas de las sierras del sur, la temperatura media anual es de 18 a 22°C. Las lluvias son muy escasas, se presentan durante el verano; la precipitación total anual es alrededor de 400 mm (INEGI, 2016).

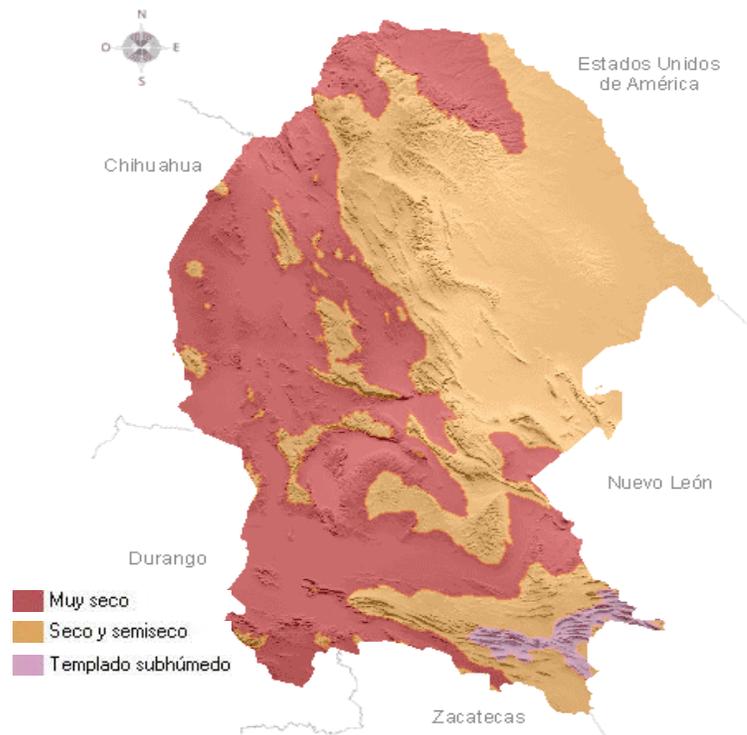


Figura 3.2 Tipos de clima predominantes en el estado de Coahuila

Fuente (INEGI, 2016)

Cuadro 3.2. Descripción del clima El Sistema de Clasificación Climática utilizado es el de Köppen (1936), modificado por Enriqueta García (1973) y por INEGI (1976).

| REGIÓN | MUNICIPIO | FORMULA | DESCRIPCIÓN |
|---------|-----------|---------|---|
| SURESTE | Saltillo | BS0kx' | Clima seco, seco templado, lluvias escasas todo el año, Porcentaje precipitación invernal > 18%. Verano cálido. |
| LAGUNA | Torreón | BWhw | Muy árido, semicálido, temperatura media anual entre 18 °C y 22 °C, temperatura del mes más frío menor de 18 °C, temperatura del mes más caliente mayor de 22 °C. |
| CENTRO | Monclova | BS0hx' | Árido, semicálido, temperatura entre 18 °C y 22 °C, temperatura del mes más frío menor de 18 °C, temperatura del mes más caliente mayor de 22 °C. |
| NORTE | Jiménez | BS1hx' | Semiárido, semicálido, temperatura media anual mayor de 18 °C, temperatura del mes más frío menor de 18 °C, temperatura del mes más caliente mayor de 22 °C. |

Fuente(INEGI, 1976)

3.1.3 Actividad Agrícola

El estado de Coahuila es el tercer estado más grande en el país, sin embargo no todas sus tierras son aptas para la agricultura debido a sus climas extremos y la escases de agua principalmente es por esto que solo una pequeña fracción de su vasto territorio se destina a la producción agrícola, de acuerdo al SIAP(Servicio De Información Agroalimentaria Y Pesquera)para el año 2014 se reportaron sembradas un total de 271,324.70 Ha de las cuales 155,728.70 Ha están establecidas bajo un régimen de riego y 115,596.00 bajo un régimen de temporal que equivalen al 53% y al 43%del total de la superficie sembrada respectivamente.

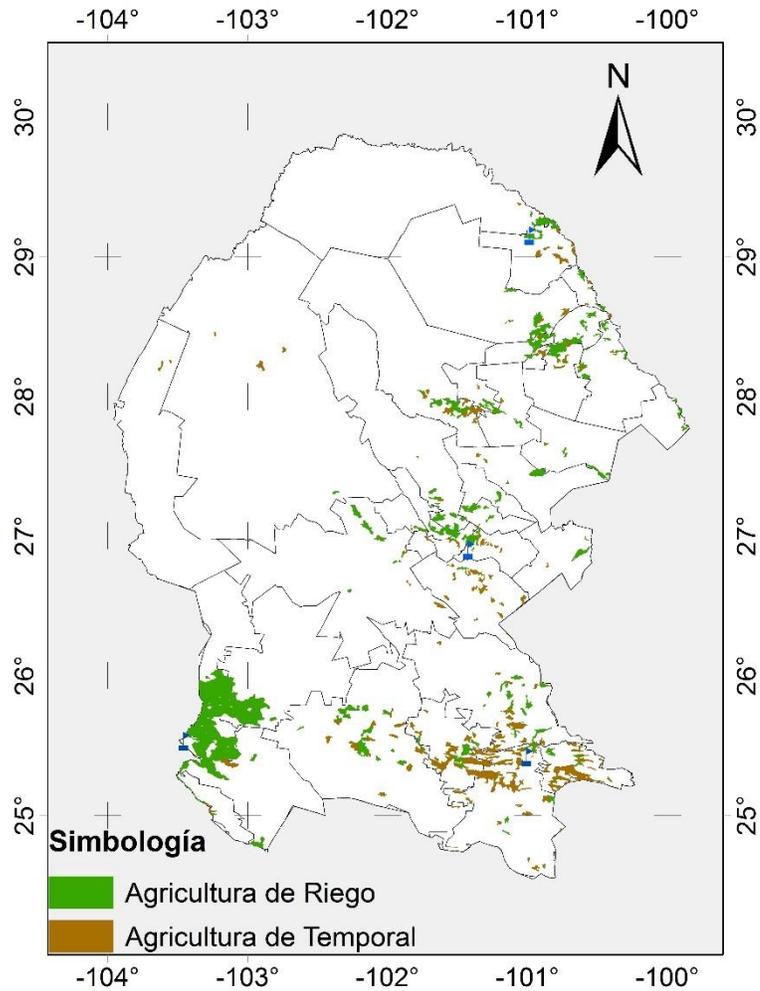


Figura 3.3 Distribución de la agricultura de riego y de temporal en el estado de Coahuila.

Dentro de los cultivos que tienen mayor superficie sembrada se encuentran; pastos, maíz grano, sorgo forrajeo, alfalfa y avena, es evidente que la mayoría de estos cultivos son forrajeros a excepción del maíz para grano y no es de extrañarse ya que este cultivo es base en la alimentación mexicana.

La superficie de maíz para grano que se siembra en el estado de Coahuila es de 32,583.49 Hade estas se distribuyen en el 83% temporal y el 17% en riego.

Cuadro 3.3. Estadísticas de la producción agrícola en cultivos cíclicos y perennes en el estado de Coahuila

| | CULTIVO | SUP. SEMBRADA (Ha) | PRODUCCIÓN (Ton) | VALOR PRODUCCIÓN (Miles de Pesos) |
|----|-----------------------|----------------------------------|----------------------------|---|
| 1 | Pastos | 61,907.01 | 972,672.19 | 517,412.99 |
| 2 | Maíz grano | 32,583.49 | 43,560.26 | 145,684.71 |
| 3 | Sorgo forrajero verde | 31,820.69 | 1,056,898.34 | 498,576.97 |
| 4 | Alfalfa verde | 23,187.39 | 1,788,118.52 | 1,030,025.47 |
| 5 | Avena forrajera | 20,206.61 | 550,009.08 | 263,181.40 |
| 6 | Maíz forrajero | 16,979.45 | 816,841.40 | 469,326.08 |
| 7 | Nuez | 16,356.74 | 14,644.07 | 655,161.66 |
| 8 | Algodón hueso | 15,967.50 | 74,518.49 | 680,531.22 |
| 9 | Nopal forrajero | 14,231.75 | 82,413.88 | 33,069.61 |
| 10 | Trigo grano | 8,276.12 | 28,578.16 | 101,057.18 |

Fuente (SIAP, 2014)

3.2 Base de datos climática

Para poder analizar las condición actuales del clima y los efectos del cambio climático se creó una base datos climática para cada región, conocida como Línea base, esta cuenta con una serie histórica de 32años (1983-2015) de lecturas diarias, esto con la finalidad de poder tener un registro amplio y contemplar en la simulación los posibles eventos periódicos, relacionados con el clima, que se presenten en las diferentes regiones en cuestión, las variables que se utilizaron se muestran en el Cuadro 3.4.

Cuadro 3.4 Variables utilizadas para la elaboración de la base de datos climática.

| VARIABLE | ABREVIATURA | UNIDADES |
|-----------------------------|--------------------|------------------------|
| Temperatura Máxima | TMAX | °C |
| Temperatura Mínima | TMIN | °C |
| Precipitación | P | mm |
| Velocidad del Viento | VV | m/s |
| Humedad Relativa | HR | % |
| Radiación Solar | R | W*h/m ² Dia |

Para elaborar la línea base de cada región se utilizaron fuentes rigurosamente seleccionadas para tener datos fiables que nos pudieran arrojar resultados

aceptables en el momento de realizar la simulación. Nuestra base de datos está constituida por datos observados como fuente principal, dos fuentes complementarias con datos estimados, a continuación se describe cada una de las fuentes utilizadas.

- Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC Versión 3), este software facilita la extracción de la información contenida en la base de datos CLICOM, el banco de datos histórico nacional del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)(Aparicio, 2012).
- El en Beaumont / Eagle Lake ofrece apoyo educativo para la producción de arroz, así como los cultivos alternativos asociados con arroz. El centro es parte del Sistema de la Universidad de Texas A & M y el Departamento de Agricultura Servicio de Investigación Agrícola de Estados Unidos, este instituto cuenta con una sitio en internet llamado iAIMS Climatic que contiene una base de datos climática estimada(Wilson *et al.*, 2007).
- La versión 6.0 Surface meteorology and Solar Energy (SSE) es un proyecto del The Atmospheric Science Data Center (ASDC) at NASA Langley Research este conjunto de datos está formulado a partir de los satélites de la NASA derivando datos meteorológicos y de radiación solar, formando una rejilla de 1 ° de latitud por 1 ° de longitud sobre el globo (NASA, 2016).

Como último procedimiento se utilizó el método de relaciones normales para poder estimar los datos faltantes y tener así cien por ciento completas nuestras líneas base, a continuación se muestra la fórmula utilizada para la estimación (Medina-Rivera, 2008).

$$D_{Xj} = \frac{1}{n} \left(\frac{\bar{D}_X \times D_{1j}}{\bar{D}_1} + \frac{\bar{D}_X \times D_{2j}}{\bar{D}_2} + \frac{\bar{D}_X \times D_{3j}}{\bar{D}_3} + \dots + \frac{\bar{D}_X \times D_{nj}}{\bar{D}_n} \right)$$

D_{Xj} = Dato faltante de la estación “X” en el día “j”.

D_{1j} = Dato observado en la estación “1” en el día “j”.

D_{2j} = Dato observado en la estación “2” en el día “j”.

D_{3j} = Dato observado en la estación “3” en el día “j”.

D_{nj} = Dato observado en la estación “n” en el día “j”.

\bar{D}_X = Media anual de los datos en la estación “X”.

\bar{D}_1 = Media anual de los datos en la estación “1”.

\bar{D}_2 = Media anual de los datos en la estación “2”.

\bar{D}_3 = Media anual de los datos en la estación “3”.

\bar{D}_n = Media anual de los datos en la estación “n”.

n = Número de estaciones con las que se realiza la estimación.

3.3 Simulación de escenarios en el Software DSSAT 4.5

La simulación del rendimiento del cultivo bajo los diferentes escenarios de cambio climático se realizó utilizando el software DSSAT versión 4.5 simulando condiciones controladas en el cultivo de maíz variedad Jaguan, que es una variedad criolla mejorada, adaptada a los ambientes de temporal del sureste de Coahuila, en áreas de transición entre 1800 a 2200 msnm, de ciclo biológico intermedio (83 a 90 días a floración) y porte de planta intermedio (2.5 m) (Rincón-Sánchez *et al.*, 2014). Para la simulación, el manejo del cultivo se consideró bajo condiciones óptimas de disponibilidad de agua y nutrientes y que las únicas variables que afectaran el desarrollo fueran las condiciones climatológicas de cada región y de cada escenario. Se eligió el cultivo del maíz por tener gran importancia en México y ser uno de los cultivos con mayor superficie sembrada en el estado de Coahuila.

Los incrementos promedio mensuales de temperatura y precipitación para los años 2030 y 2050 para las región; Sureste, Laguna, Centro y Norte se obtuvieron de la página del Grupo de Cambio Climático del Centro de Ciencias

de la Atmósfera de la UNAM (Bravo-Cabrera *et al.*, 2009) para un escenario de emisiones medio moderado (A1B) los modelos de circulación general (MCG) utilizados fueron:

- **GFDL 2.0.**
- **UK-HADGEM1**
- **MPIECHAM5**

La razón por la cual los modelos antes mencionados fueron seleccionados es porque representan mejor el clima regional, además fueron utilizados por otros países de la misma región geográfica de México (Conde y Gay, 2008). Otra de las bondades de usar estos tres modelos es que el modelo GFDL 2.0 representa una condición de menor incremento de temperatura, el modelo MPIECHAM5 muestra un mayor incremento y el modelo UK-HADGEM1 representa condición intermedia. Sin embargo la precipitación tiene la misma posibilidad de variación.

El crecimiento del cultivo fue simulado utilizando el modelo CERES-Maize con un intervalo de tiempo diario de la siembra a la madurez. Se propusieron 3 fechas de siembra para cada región; actual, retrasada y adelantada, con el fin de evaluar la mitigación del efecto del cambio climático.

Las condiciones atmosféricas necesarias para la simulación fueron proporcionadas con la base de datos climática generada para las cuatro regiones, conocida como línea base. Para las condiciones de cambio climático se consideraron los incrementos (negativos y positivos) de temperatura diarios y los cambios en precipitación para cada uno de los escenarios proporcionados por los MCG en 2030 y 2050.

La programación de riego se hizo de manera automática al llegar al 50% de la humedad disponible en el suelo como se muestra en la Cuadro 3.5.

Cuadro 3.5. Manejo del cultivo en las cuatro regiones de estudio.

| | SURESTE | LAGUNA | CENTRO | NORTE |
|-----------------|----------------|---------------|---------------|--------------|
| Cultivo | Maíz | Maíz | Maíz | Maíz |
| Variedad | Jaguan | Jaguan | Jaguan | Jaguan |
| DP | 80,000 | 80,000 | 80,000 | 80,000 |
| FSac | 01/05 | 01/04 | 01/04 | 01/04 |
| FSad | 01/03 | 01/03 | 01/03 | 01/03 |
| FSat | 01/06 | 01/06 | 01/06 | 01/06 |
| DF | 250-100-0 | 250-100-0 | 250-100-0 | 250-100-0 |
| AHD | 50 | 50 | 50 | 50 |

DP=Densidad de Población (Plantas/Ha); FSac= Fecha de Siembra actual (día/mes); FSad= Fecha de Siembra adelantada (día/mes); FSat= Fecha de Siembra atrasada (día/mes); DF= Dosis de Fertilización N-P-K (kg/Ha); AHD=Abatimiento de la Humedad en el Suelo (%).

Los coeficientes genéticos de la variedad Jaguan los cuales determinan el desarrollo del cultivo en la simulación, fueron obtenidos de investigaciones previas.

Cuadro 3.6 Coeficientes genéticos de los materiales utilizados en la simulación de las cuatro regiones.

| COEFICIENTES GENÉTICOS | |
|-------------------------------|-----|
| P1 | 320 |
| P2 | 0.8 |
| P5 | 685 |
| G2 | 607 |
| G3 | 9.9 |
| FILOCRONO | 60 |

Fuente (Peña-Ramos, 2011)

De acuerdo con la SEMARNAT (2009) la temperatura en los últimos cincuenta años coincide con el aumento en la concentración de CO₂ en la atmósfera tenido un valor promedio de 380 ppm, por esta razón las condiciones climáticas actuales en el modelo funcionan con esta concentración atmosférica de CO₂ de igual manera para los escenarios futuros fueron simulados con este mismo valor de CO₂, (sin incremento de CO₂ en el ambiente).

3.4 Evaluación de Escenarios

Para evaluar los efectos de los escenarios de cambio climático se utilizó la metodología propuesta por Rodríguez-García *et al.* (2014), para esto calculó el porcentaje de cambio del rendimiento promedio de los escenarios en relación al rendimiento promedio de la línea base.

$$\Delta R = \left(\frac{REsc - RAc}{RAc} \right) * 100$$

ΔR = Cambio del rendimiento promedio de los escenarios (%).

RAc = Rendimiento actual o de línea base ($kg\ Ha^{-1}$).

$REsc$ = Rendimiento del escenario correspondiente ($kg\ Ha^{-1}$).

De igual manera se calculó la mitigación provocada por el cambio de fecha de siembra y se evaluó si esta acción fue de útil o contraproducente

$$Mitg1 = \Delta R_{FSad} - \Delta R_{FSac}$$

$$Mitg2 = \Delta R_{FSat} - \Delta R_{FSac}$$

$Mit1$ = Mitigación por ciento debido al efecto de cambio de fecha adelantada (%).

$Mit2$ = Mitigación por ciento debido al efecto de cambio de fecha atrasada (%).

ΔR_{FSac} = Cambio del rendimiento promedio de los escenarios para la fecha de siembra actual (%).

ΔR_{FSad} = Cambio del rendimiento promedio de los escenarios para la fecha de siembra adelantada (%).

ΔR_{FSat} = Cambio del rendimiento promedio de los escenarios para la fecha de siembra atrasada (%).

4 RESULTADOS Y DISCUSIONES

De acuerdo a la simulación realizada con el DSSAT v4.5 los rendimientos promedio para la fecha de siembra actual a partir de una serie histórica de 32 años son 7,138 kg Ha⁻¹ para la región Sureste; 5,342 kg Ha⁻¹ para la región Laguna; 4,396 kg Ha⁻¹ para la región Centro; 4,371 kg Ha⁻¹ para la región Norte.

En la Figura 4.1 se muestran los rendimientos de la línea base, obtenidos para las cuatro regiones, de acuerdo a la simulación la región sureste cuenta con las mejores condiciones actuales para el cultivo bajo condiciones de riego.

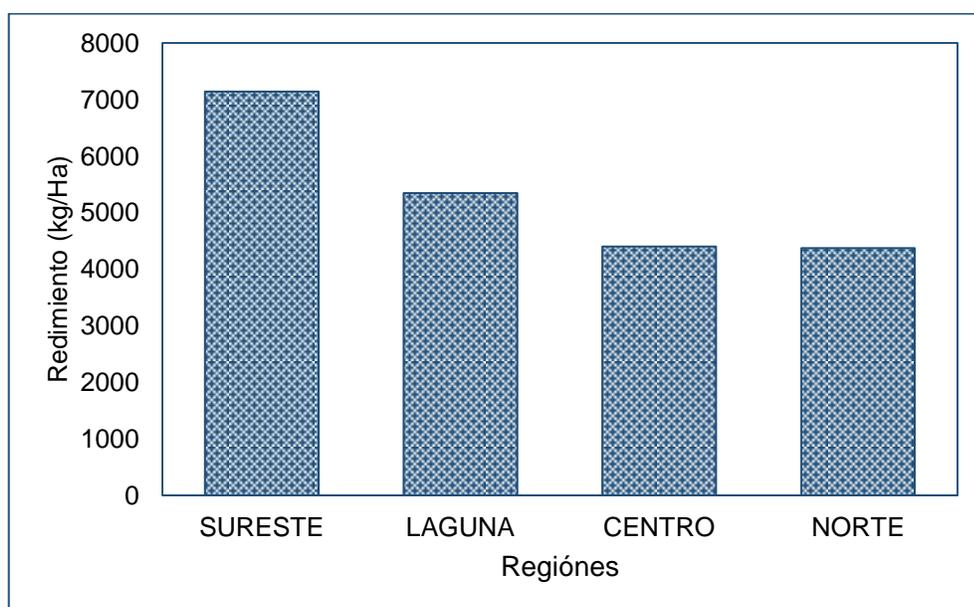


Figura 4.1 Rendimiento de la línea base de las cuatro regiones para la fecha de siembra actual.

Los incrementos de temperatura promedio para cada escenario correspondiente al ciclo del cultivo para las fechas de siembra actuales se muestran en la Figura 4.2, en esta podemos apreciar que los incrementos de temperatura para las cuatro regiones varían de 1.12 a 1.58 °C para el año 2030 y 1.62 a 2.42 °C para el año 2050.

En la Figura 4.3 observamos que el cambio climático tendrá efecto en la precipitación, predominado las reducciones, en la Región Sureste la reducción podría alcanzar hasta un -25%, en la región Centro hasta un -21% y en la Región Norte -23%.

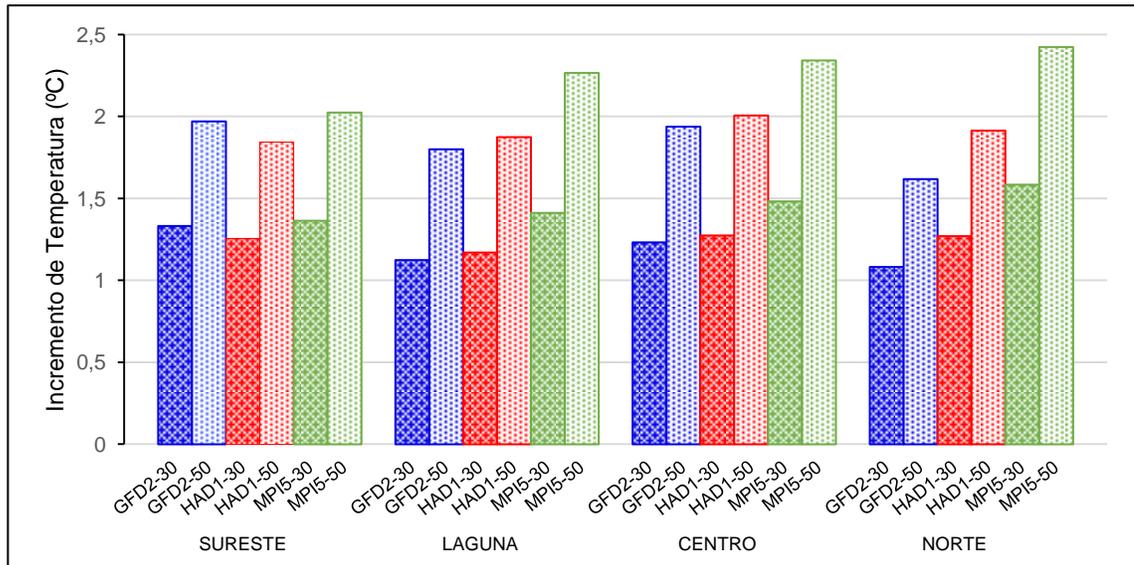


Figura 4.2 Incremento medio de temperatura para cada región de los diferentes escenarios para el ciclo del cultivo de maíz actual.
Fuente (Bravo-Cabrera et al., 2009)

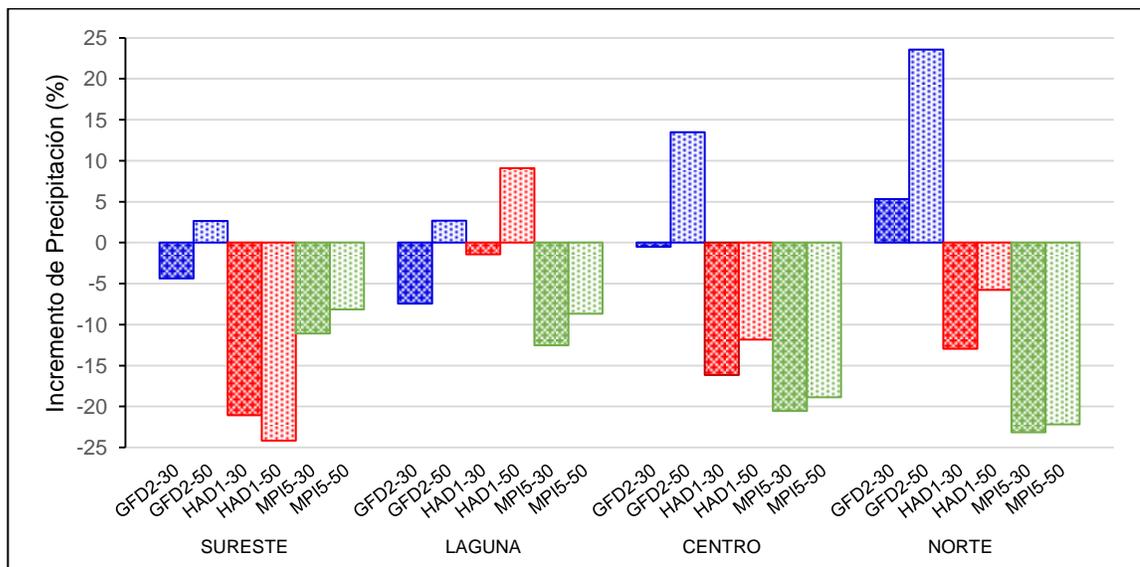


Figura 4.3 Valor porcentual medio de incremento (+) o decremento (-) de precipitación para cada región en los diferentes escenarios, para el ciclo del cultivo de maíz actual.
Fuente (Bravo-Cabrera et al., 2009)

De acuerdo a los escenarios de cambio climático propuestos para este trabajo podemos observar que la reducción del rendimiento con respecto a la línea base varía en diferente proporción, teniendo un rango para el región Sureste de -10 a -13% para el 2030 y de -14 a -17% en el 2050; en la región Laguna de -32 a -45% en 2030 y del -40 al 53% para el 2050; en la región Centro de -24 a -39% en 2030 y -31 a 53% en 2050; en la región Norte de -23 a -41% en 2030 y -28 a -54% en el 2050 (Cuadro 4.1).

De acuerdo a estos resultados es evidente que la región Sureste cuenta con un menor impacto en la reducción del rendimiento debido a que de las cuatro regiones evaluadas, esta región cuenta con temperaturas mínimas y máximas dentro de las óptimas para el ciclo del cultivo actual, sin embargo la agricultura de temporal es predominante en estas localidades y la simulaciones se realizaron bajo escenario de régimen de riego con condiciones óptimas de disponibilidad de agua, Mendoza-Hernández *et al.* (2013), afirma que la lluvia total anual será menor en la región Lagunera y Sur, y aumentará en la región Norte, por lo cual se prevé un mayor impacto en la reducción del rendimiento ocasionado por la adición del estrés hídrico al estrés térmico causado por el aumento de temperatura en etapas fenológicas clave para el desarrollo del cultivo.

Cuadro 4.1 Porcentaje de cambio de rendimiento de maíz en los diferentes escenarios comparados con el rendimiento actual (Línea Base) para la fecha de siembra actual.

| | Sureste ΔR_{FSac} | Laguna ΔR_{FSac} | Centro ΔR_{FSac} | Norte ΔR_{FSac} |
|---------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| GFD2-30 | -10 | -45 | -24 | -23 |
| GFD2-50 | -14 | -40 | -31 | -28 |
| HAD1-30 | -11 | -32 | -38 | -41 |
| HAD1-50 | -15 | -47 | -50 | -53 |
| MPI5-30 | -13 | -37 | -39 | -41 |
| MPI5-50 | -17 | -53 | -53 | -54 |

Las regiones Laguna, Centro y Norte muestran ser las más afectadas con cifras muy alarmantes con un rango de reducción del rendimiento que va desde -23 a -45% para el 2030 y -28 a -54% en 2050. Esto debido a que durante el ciclo del cultivo existen temperaturas por encima de los 34 °C causando un decremento

en la actividad fotosintética y en el llenado de grano y en ocasiones por encima de los 44 °C y en consecuencia se produce un cese total en estas actividades, que al ser muy prolongadas ocasionan la muerte del cultivo (Sau *et al.*, 2010).

Cuadro 4.2 Ciclo de cultivo y evapotranspiración total de los diferentes escenarios para las cuatro regiones en la fecha de siembra actual.

| | Sureste | | Laguna | | Centro | | Norte | |
|---------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|
| | CC días | ET _c mm |
| L.B. | 130 | 308 | 100 | 546 | 101 | 366 | 123 | 448 |
| GFD2-30 | 120 | 291 | 96 | 340 | 96 | 353 | 100 | 360 |
| GFD2-50 | 116 | 295 | 92 | 328 | 94 | 349 | 98 | 356 |
| HAD1-30 | 120 | 297 | 96 | 343 | 96 | 354 | 98 | 353 |
| HAD1-50 | 116 | 291 | 94 | 338 | 93 | 346 | 94 | 344 |
| MPI5-30 | 118 | 296 | 95 | 338 | 95 | 348 | 97 | 350 |
| MPI5-50 | 113 | 292 | 92 | 332 | 91 | 335 | 94 | 339 |

Otro efecto del aumento de temperatura es la reducción del ciclo del cultivo (CC) entre 10 y 17 días para la región Sureste; 4 y 8 días para la región Laguna; 5 y 10 días para la región Centro; 23 y 29 días para la región Norte, (Cuadro 4.2). Como consecuencia de la disminución en el CC, se espera una menor Evapotranspiración del cultivo (ET_c) (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2011) que a su vez impactaran directamente en los requerimientos de riego.

Aparentemente esto provocara un ahorro en el consumo de agua, sin embargo es un aspecto que se debería estudiar más afondo ya que la ocurrencia y la intensidad de los eventos de precipitación no se toman en cuenta en la simulación. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2014), afirma que los episodios de precipitación extrema serán más intensos y frecuentes en muchas regiones.

El cambio de fecha de siembra tuvo diferentes resultados en la variación de rendimiento que se muestran en la Cuadro 4.3, en general se aprecia que el para los escenarios con la fecha de siembra adelantada la región Laguna y Centro tienen mayor reducción del rendimiento con respecto al Sureste y al Norte.

Cuadro 4.3 Porciento de cambio de rendimiento de maíz en los diferentes escenarios comparados con el rendimiento actual (Línea Base) para la fecha de siembra adelantada y atrasada.

| | Sureste | | Laguna | | Centro | | Norte | |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | ΔR_{FSad} | ΔR_{FSat} |
| GFD2-30 | -19 | 2 | -36 | 25 | -26 | 22 | -14 | -2 |
| GFD2-50 | -23 | 2 | -49 | 14 | -42 | 8 | -20 | -20 |
| HAD1-30 | -21 | -1 | -28 | 21 | -15 | 20 | -20 | 8 |
| HAD1-50 | -26 | -10 | -31 | 7 | -17 | 2 | -23 | -6 |
| MPI5-30 | -22 | 1 | -38 | 30 | -30 | 35 | -27 | 12 |
| MPI5-50 | -28 | -5 | -49 | 24 | -43 | 27 | -38 | 2 |

Para los escenarios con la fecha de siembra atrasada se muestran resultados muy favorables principalmente en la región Laguna y Centro, la región Sureste tiene rangos en el cambio de sus rendimientos de -1 a 2% en 2030 y de -10 a 2% en 2050; región Laguna de 21 al 30% para el año 2030 y de 7 a 24% para el año 2050; región Centro de 20 a 35% en 2030 y de 2 a 27% para el año 2050; región Norte de -2 a 12% en 2030 y de -20 a 12% para el 2050.

En la Cuadro 4.4 se presentan los porcentajes de la mitigación para los diferentes escenarios por efecto del cambio de fecha de siembra. Para la mitigación por efecto del cambio de la fecha de siembra adelantada (Mit1) se observa que la región Sureste no es favorecida con esta acción, provocando que la disminución del rendimientos aumente con respecto a la fecha siembra actual, la región Laguna y Centro tienen un comportamiento aceptable para algunos escenarios y desfavorable para otros, por último la región Norte del estado muestra resultados muy favorables que ayudan a mitigar positivamente la disminución del rendimiento.

Cuadro 4.4 Mitigación en porciento del efecto de cambio de fecha de siembra en las cuatro regiones de estudio.

| | Sureste | | Laguna | | Centro | | Norte | |
|---------|---------|------|--------|------|--------|------|-------|------|
| | Mit1 | Mit2 | Mit1 | Mit2 | Mit1 | Mit2 | Mit1 | Mit2 |
| GFD2-30 | -9 | 13 | 9 | 70 | -2 | 46 | 9 | 21 |
| GFD2-50 | -9 | 16 | -9 | 54 | -12 | 39 | 9 | 8 |
| HAD1-30 | -10 | 10 | 5 | 53 | 22 | 58 | 21 | 49 |
| HAD1-50 | -11 | 5 | 16 | 54 | 33 | 52 | 30 | 47 |
| MPI5-30 | -10 | 14 | -1 | 67 | 9 | 74 | 14 | 53 |
| MPI5-50 | -2 | 15 | 6 | 41 | 7 | 37 | 13 | 27 |

La mitigación por efecto la fecha siembra atrasada muestra resultados favorables en todas las regiones y para todos los escenarios, lo cual nos dice que puede ser una buena opción para afrontar el cambio climático. Las regiones Centro y Laguna obtuvieron los mayores beneficios al adoptar esta técnica, seguidas por las regiones Norte y Sureste que también tienen un efecto positivo en la mitigación pero en menor proporción.

De acuerdo a la Figura 4.4 se observa que para el año 2030 habrá una disminución promedio del rendimiento para las cuatro regiones, si se mantienen las mismas fechas de siembra, siendo más afectadas las regiones Laguna, Centro y Norte, al adelantar la fecha de siembra se mitiga el efecto de la disminución del rendimiento para la región Centro y Norte sin embargo para la región Laguna y Sureste se agudiza el problema. Al utilizar una fecha adelantada a la actual resultaron incrementos en los rendimientos para las cuatro regiones siendo más favorecidas la regiones Laguna y Centro de igual manera las regiones Sureste y Norte muestran un ligero incremento en sus rendimientos que se pueden interpretar más como una preservación de los rendimientos actuales.

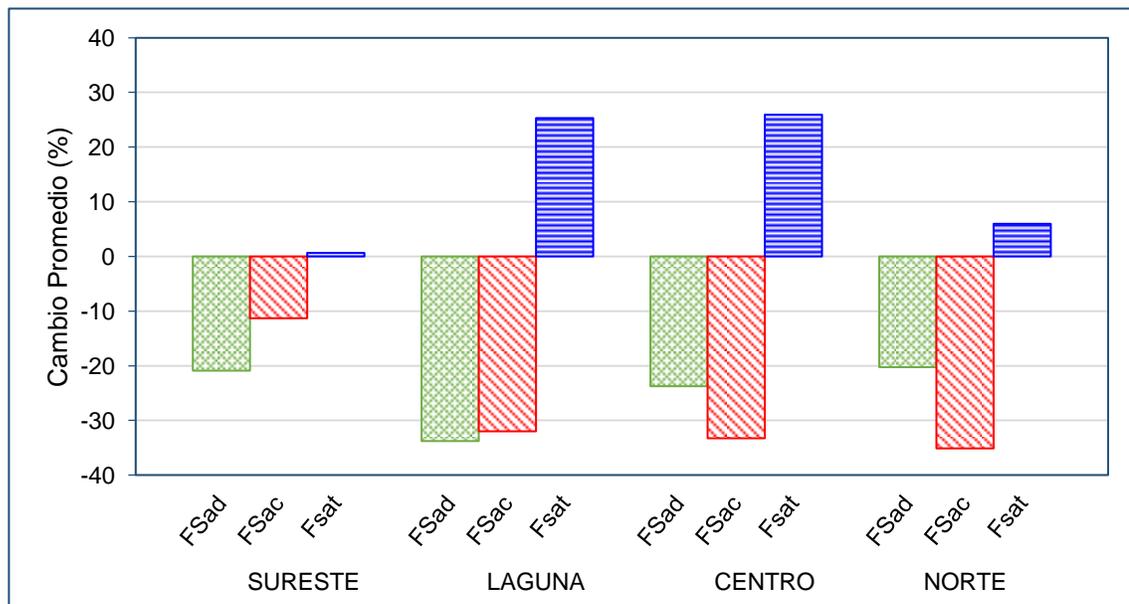


Figura 4.4 Porcentaje de cambio de rendimiento promedio de maíz de las diferentes fechas de siembra con respecto al rendimiento actual (Línea Base) para el año 2030.

En el año 2050 (Figura 4.5) se presentan condiciones un poco menos favorable en comparación con el 2030, mostrando que la tendencia de los rendimientos en el cultivo del maíz sigue a la baja, para este año el implementar un adelanto en las fechas de siembra mitiga ligeramente este problema en las regiones Laguna, Centro y Norte, sin embargo en la región Sureste sigue siendo contraproducente obtenido rendimientos aun menores que los de la fecha de siembra actual. El adelantar la fecha de siembra sigue siendo la mejor opción, si se utiliza esta estrategia, para este año solo se esperan incrementos en las regiones Laguna y Centro, por el contrario para las regiones Sureste y Norte se tienen más posibilidades de que se presente una disminución de los rendimientos con respecto a la fecha actual, sin embargo aún sigue mitigando de manera muy efectiva los efectos de cambio climático.

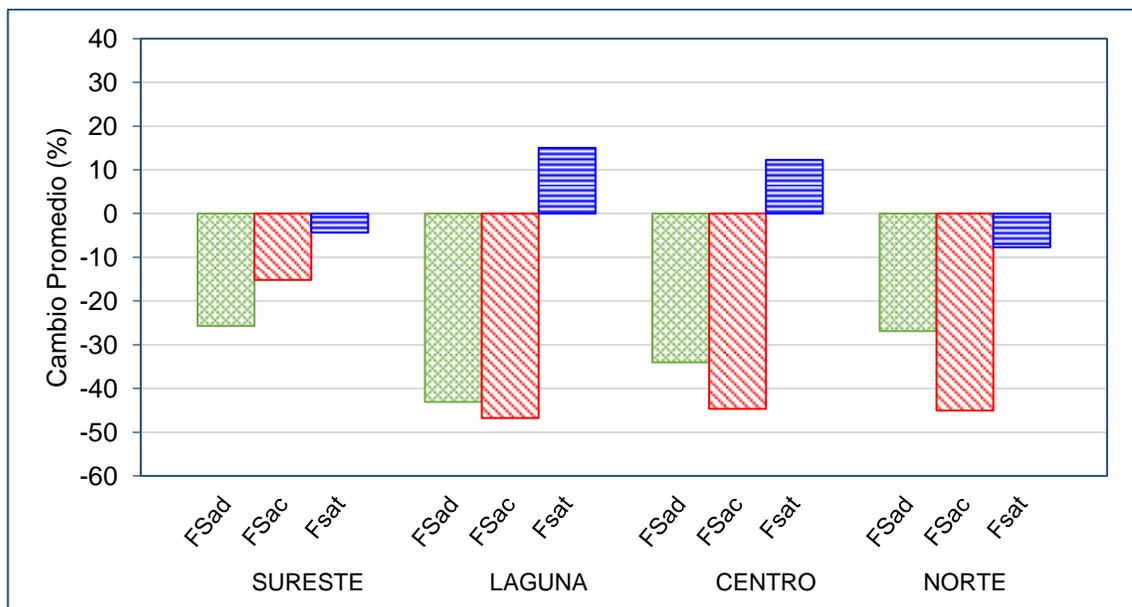


Figura 4.5 Porciento de cambio de rendimiento promedio de maíz de las diferentes fechas de siembra con respecto al rendimiento actual (Línea Base) para el año 2050.

5 CONCLUSIONES

De acuerdo a la simulación de los diferentes escenarios de cambio climático para el año 2030 y 2050, se mostró un aumento de temperatura que impacta de manera negativa la producción de maíz variedad Jaguan en las cuatro regiones, siendo las más afectadas las regiones Laguna, Centro y Norte y la menos afectada la región Sureste.

Los resultados de la simulación al cambiar la fecha de siembra muestran que al atrasar esta en lugar de adelantarla, es una mejor estrategia para las cuatro regiones, ya que se mitiga el efecto del cambio climático en todos los casos a tal grado que se incrementa el rendimiento para las proyecciones del año 2030, y en el año 2050.

6 LITERATURA CITADA

- Ahumada-Cervantes, R., Velázquez-Angulo, G., Flores-Tavizón, E., Romero-González. (2014). Impactos potenciales del cambio climático en la producción de maíz. *Investigación y Ciencia*, 22(61), 48-53.
- Aparicio, J. (2012). *Bases de datos hidrológicas*. México, DF: INEGI.
- Bravo-Cabrera, J. L., Martínez-López, B., Conde-Álvarez, A. C., Villers-Ruiz, M. L., Gay-García, C., Luyando-López, Estrada-Porrúa, F., Sánchez, Ó. (2009). *Centro de ciencias de la atmósfera, UNAM*. Obtenido de Grupo de cambio climático y radiación solar: <http://www.atmosfera.unam.mx/cclimat/index>.
- Candelaria-Martínez, B., Ruiz-Rosado, O., Gallardo-López, F., Pérez-Hernández, P., Martínez-Becerra, Á., 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.
- CIMMYT. (2016). *Doctor Maíz*. Recuperado el 06 de 04 de 2016, de Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo: <http://maizedoctor.org/es/>
- CMNUCC. (1992). *La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Obtenido de <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>
- CONACYT. (2014). *Maíz*. Recuperado el 06 de 04 de 2016, de El Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología: <http://www.conacyt.mx/cibiogem/index.php/maiz#page>
- Conde-Álvarez, A. C., Gay-García, C. (2008). *Guía para la Generación de Escenarios de Cambio Climático de Escala Regional*. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

- Conde, C., Ferrer, R. M., Liverman, D. (2015). *Estudio de la vulnerabilidad de la agricultura de maíz de temporal mediante el modelo CERES - maize*. Obtenido de Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM: http://www.atmosfera.unam.mx/cclimat/publicaciones/cambio_climatico/agricultura.pdf
- Fernández, M. E. (2013). *Diagnóstico de Modelos Agroclimáticos*. Colombia: IDEAM & FONADE.
- Guevara, E. (2007). *La simulación del desarrollo, crecimiento y rendimiento en maíz*. (INTA, Ed.) Obtenido de Fertilizando.com: <http://www.fertilizando.com/articulos/SimulacionDesarrolloCrecimientoyRendimientoEnMaiz.pdf>
- Granados-Ramírez, R., Sarabia-Rodríguez. (2013). Cambio climático y efectos en la fenología del maíz en el DDR-Toluca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(3), 435-446.
- Greenpeace. (2010). *La agricultura mexicana y el Cambio Climático*. Obtenido de Greenpeace: http://www.greenpeace.org/mexico/Global/mexico/report/2012/2/La_agricultura_mexicana_y_el_cambio_climatico_2012.pdf
- Hernández, N., Soto, F., Caballero, A. (2009). Modelos de Simulación de Cultivos Características y Usos. *Cultivos Tropicales*, 30(1), 73-82.
- Hoogenboom, G., Jones, J., Porter, C., Wilkens, P., Boote, K., Hunt, L., Tsuji, G. (2010). *DSSAT 4.5 Decision Support System for Agrotechnology Transfer* (Vol. I). Honolulu, HI: University of Hawaii.
- Hoogenboom, G., Porter, C., Jones, J., Boote, K., Singh, U., Caza, T., Lizaso, J., Blanco, J., Ogoshi, R., Koo, J., Shelia, V. (2015). *DSSAT*. Obtenido de DSSAT general: <http://dssat.net/about>

- INECC. (04 de Diciembre de 2015). *Cambio Climatico en México*. Obtenido de Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climatico: <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/escenarios-de-cambio-climatico>
- INEGI. (1976). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Obtenido de Climatología: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/ficha.aspx?upc=702825267568>
- INEGI. (2016). *Información para niños y no tan niños*. Obtenido de Coahuila de Zaragoza: <http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/coah/territorio/clima.aspx?tema=me&e=05>
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)] Cambridge University Press. Obtenido de https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/faq-1-2.html
- IPCC. (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo*. Ginebra, Suiza: [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC.
- Magaña-Rueda, V., Baldemar-Méndez, A., Caetano-dos Santos, E., Méndez-Pérez, J. M., Pérez-Pérez, E. (2009). *Adaptación a los impactos del cambio climático en los humedales costeros del Golfo de México* (Vol. II). (J. Buenfil Friedman , Ed.) México D.F.: SEMARNAT.
- Medina-Rivera, R. D. (2008). *Estimación estadística de valores faltantes en series históricas de lluvia*. Pereira.

- Mendoza-Hernández, M., Zermeño-González, A., Covarrubias-Ramírez, M., Cortés-Bracho, J. J. (2013). Proyecciones climáticas para el estado de Coahuila usando el modelo precis bajo dos escenarios de emisiones. *Agrociencia*, 47(6), 523-537.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Griibler, A., Yong Jung, T., Kram, T., Lebre La Rovere, E., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Riahi, K., Roehrl, A., Rogner, H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., van Rooijen., S, Victor, N., Dadi, Z., (2000). *Informe Especial sobre Escenarios de emisiones: Un Informe Especial del Grupo de Trabajo III del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático* ., Cambridge University Press. Cambridge, Reino Unido.
- NASA. (Enero de 2016). *The Atmospheric Science Data Center (ASDC)*. Obtenido de Surface meteorology and Solar Energy (SSE): https://eosweb.larc.nasa.gov/project/sse/sse_table
- National Geographic , S. (03 de Marzo de 2016). *National Geographic Society*. Obtenido de Clima: <http://www.nationalgeographic.es/ciencia/la-tierra/climate>
- Nelson, G., Rosegrant, M., Koo, J., Robertson, R., Sulser, T., Zhu, T., Ringler, C., Msangi, S., Palazzo, A., Batka, M., Magalhaes, M., Valmonte-Santos, R., Ewing, M., Lee, D. (2009). *Cambio Climático: El impacto en la agricultura y los costos de adaptación*. Washington, D.C: Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias IFPRI.
- Oglesby, R., Rowe , C. (2010). *La ciencia del cambio climático; Manual práctico para tomadores de decisiones en Mesoamérica*. Washington, Estados Unidos: Banco Interamericano de Desarrollo.
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., Íñiguez-Covarrubias, M., Montero-Martínez, M. (2011). Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos. *Agrociencia*, 45(1), 1-11.

- Paliwal, R., Granados, G., Violic, A. (2001). *EL MAÍZ EN LOS TRÓPICOS: Mejoramiento y producción*. (FAO, Ed.) Obtenido de FAO: <http://www.fao.org/docrep/003/x7650s/x7650s00.htm#toc>
- Peña-Ramos, F. (2011). *Predicción del crecimiento, desarrollo y producción de cultivos forrajeros con un modelo biofísico de simulación y el programa DSSAT, en el sur de Nuevo León, México*. Tesis de Maestría, UAAAN. Saltillo, Coahuila, México.
- Real Academia Española. (23 de Febrero de 2016). *Real Academia Española*. Obtenido de Diccionario de lengua española: <http://www.rae.es/obras-academicas/diccionarios/diccionario-de-la-lengua-espanola>
- Rincón-Sánchez, F., Ruiz-Torres, N., Cuellar-Flores, R., Zamora-Cancino, F. (2014). 'Jaguan', variedad criolla mejorada de maíz para áreas de temporal del sureste de Coahuila, México. *Revista Fitotécnica mexicana*, 37(4), 403 - 405.
- Rodríguez-García, R., Jasso-Cantú, D., Zermeño-González, A., Peña-Ramos, F., Lemus-Ramírez, O. (2014). El impacto potencial del cambio climático en el rendimiento de maíz en regiones agrícolas de Coahuila. Capítulo 15, *Cambio climático en la Zona Noroeste de México*. Editorial Pearson. 151-159
- SAGARPA. (2012). *México: el Sector Agropecuario ante el desafío del Cambio Climático*. México: FAO.
- Salvador, R. (2001). *Maíz*. Texcoco: Universidad Autónoma Chapingo.
- Sau, F., López-Cedrón, F., Confalones, A., Lizaso, J. (2010). Modelos de simulación del cultivo de maíz: Fundamentos y aplicaciones en España. *Pastos*, 40(10), 117-138.
- SEMARNAT. (2009). *Cambio climático; ciencia, evidencia y acciones*. México.
- SIAP. (2014). *Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera*. Recuperado el 29 de Marzo de 2016, de <http://www.siap.gob.mx/>

Wilson, L., Yang, Y., Lu, P., Wang, J., Nielsen-Gammon, J., Smith, N.,
Fernández, C. (August de 2007). *Integrated Agricultural Information and
Management System (iAIMS)*. Obtenido de World Climatic Data:
<http://beaumont.tamu.edu/ClimaticData/>