



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

**RENDIMIENTO POTENCIAL DEL MAÍZ EN EL DISTRITO DE RIEGO 063
GUASAVE, SINALOA BAJO DIFERENTES FECHAS DE SIEMBRA APLICANDO
EL MODELO HYBRID MAIZE**

JOSE ANASTACIO AGUIRRE ROJO

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2012

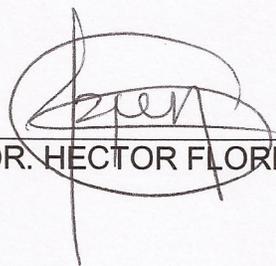
La presente Tesis, Titulada: **“Rendimiento potencial del maíz en el Distrito de Riego 063 Guasave, Sinaloa bajo diferentes fechas de siembra aplicando el modelo Hybrid Maize”**, realizada por el Alumno: **Jose Anastacio Aguirre Rojo**, bajo la dirección del consejo particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

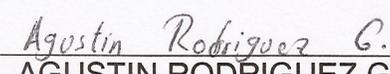
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO


DR. HECTOR FLORES MAGDALENO

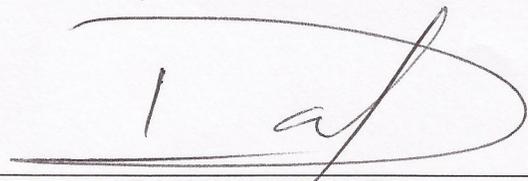
ASESOR:


DR. AGUSTIN RODRIGUEZ GONZALEZ

ASESOR:


M.C. ANA LAURA SANTOS HERNANDEZ

ASESOR:


DR. DAVID VASQUEZ SOTO

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Julio de 2012

RESUMEN

Rendimiento potencial del maíz en el Distrito de Riego 063 Guasave, Sinaloa bajo diferentes fechas de siembra aplicando el modelo Hybrid Maize

Gracias al desarrollo de herramientas de simulación, como medio de obtención de soluciones prácticas, aplicadas a problemas de ingeniería y partiendo de la modelación de procesos físicos del ciclo hidrológico, se ha logrado describir al menos en parte la complejidad de los fenómenos que ocurren en la naturaleza, como lo es la simulación del crecimiento de los cultivos, en este caso específico del maíz.

Debido a la importante producción anual de maíz que produce el Distrito de Riego 063 Guasave, Sinaloa y a las significativas pérdidas de cultivo de maíz sufridas a causa de las bajas temperaturas registradas en febrero de 2011 se decidió realizar la presente investigación que comprende la estimación de los rendimientos de maíz en la resiembra del mes de marzo de 2011 a partir de la validación del modelo Hybrid Maize desarrollado por la Universidad de Nebraska; haciendo hincapié en la relevancia de los resultados obtenidos ya que dicha resiembra se realizó fuera del período óptimo de siembra recomendado para esta región del país.

En el presente trabajó se estimó el rendimiento potencial del maíz para diferentes fechas de siembra, lo cual permitirá tomar algunas decisiones de manejo en caso de que se realicen resiembras de maíz fuera de las fechas óptimas.

De igual forma se estimó el requerimiento hídrico del cultivo de maíz para diferentes fechas de siembra.

Palabras Clave: Modelo de Simulación, Maíz, Distrito de Riego 063, Rendimiento Potencial, Requerimiento Hídrico.

ABSTRACT

Potential yield of maize in the Guasave 063 Irrigation District, Sinaloa under different planting dates using the Hybrid Maize model

Thanks to development of simulation tools as a means of obtaining practical solutions applied to engineering problems and based on the modeling of physical processes of the hydrological cycle, it has been described at least in part the complexity of the phenomena that occur in the nature, as is the simulation of crop growth, in this specific case of maize.

Due to the significant annual production of corn produces Guasave 063 Irrigation District, Sinaloa and the significant losses suffered maize because of the low temperatures recorded in February 2011 it was decided to conduct this research includes the estimated maize yields in the seeding of March 2011 from Hybrid Maize model validation developed by the University of Nebraska, emphasizing the relevance of the results obtained since that replanting took place outside the optimal planting period recommended for this region.

For this work we estimated the potential yield of maize for different planting dates, which will take some management decisions should be made out of corn replanting the optimal dates.

Similarly, we estimated the water requirement of maize for different planting dates.

Key words: Simulation Model, Corn, 063 Irrigation District, Yield Potential, Water Requirement.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por apoyarme en el financiamiento de mi posgrado.

Al Colegio de Postgraduados, en especial al Posgrado en Hidrociencias por darme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría.

Al personal Académico, administrativo y Trabajadores por contribuir en mi formación, por el tiempo brindado para que las actividades planteadas fueran realizadas.

Al Dr. Enrique Mejía Saenz por el apoyo, por la amistad y confianza brindada y las facilidades proporcionadas para iniciarse y culminarse este posgrado.

Al Dr. Héctor Flores Magdaleno por su invaluable apoyo para la culminación del presente trabajo.

Al Dr. Agustín Rodríguez González y M.C Emmanuel Roblero Méndez por la amistad, apoyo y confianza depositada en mí.

Al consejo: Dr. Héctor Flores Magdaleno, Dr. Agustín Rodríguez González, M.C. Ana Laura Santos Hernández y Dr. David Vásquez Soto que participaron en la revisión de esta tesis, por sus observaciones y colaboración para poder concluir este trabajo.

A la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) por las facilidades y apoyo brindado para la realización de la presente investigación.

DEDICATORIAS

A Dios por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos.

A mis padres: José Ramón Aguirre Reyes y María Teresa Rojo Pacheco, por darme la vida y estar siempre presente conmigo en todo momento, aunque hemos pasado momentos difíciles siempre han estado apoyándome y brindándome todo su amor, apoyo y confianza, por todo esto les agradezco de todo corazón el que estén conmigo a mi lado.

A mis hermanos: Ismael y Emilia Alejandra, quienes son parte de mí y de mis logros, gracias por estar siempre conmigo

A mis Amigos con quienes compartimos momentos de alegría, tristeza, enojo o desesperación. Quienes cerca o lejos están ahí.

A todos aquellos que participaron directa o indirectamente en la elaboración de esta tesis.

A todos ellos les dedico este logro, gracias por ser parte de él.

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE DE CUADROS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS	3
3. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
3.1. GENERALIDADES SOBRE EL CULTIVO DEL MAÍZ	4
3.1.1. <i>Origen del Maíz</i>	4
3.1.2. <i>Importancia del Maíz</i>	5
3.1.3. <i>Descripción del Maíz</i>	6
3.1.4. <i>Genética del Maíz</i>	7
3.1.5. <i>Producción mundial de Maíz</i>	9
3.1.6. <i>Producción de Maíz en México</i>	10
3.1.7. <i>Consumo de Maíz en el mundo</i>	11
3.1.8. <i>Usos del Maíz</i>	12
3.1.8.1. <i>Otros usos</i>	13
3.2. GENERALIDADES SOBRE MODELOS DE SIMULACIÓN	14
3.2.1. <i>Definición de modelo</i>	14
3.2.2. <i>Importancia de los modelos</i>	14
3.2.3. <i>Modelos matemáticos</i>	15
3.2.4. <i>Modelos análogos</i>	16
3.2.5. <i>Modelos físicos reducidos (hidráulicos)</i>	16
3.2.6. <i>Modelos de simulación de cultivos</i>	18
3.2.7. <i>Calibración y validación de modelos</i>	19
3.2.8. <i>Límites de aplicación</i>	20
3.3. GENERALIDADES SOBRE EL MODELO HYBRID MAIZE	20
3.4. GENERACIÓN DE SERIES SINTÉTICAS DE DATOS CLIMATOLÓGICOS.....	22
3.5. GENERALIDADES SOBRE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE REFERENCIA	23

4. MATERIALES Y MÉTODOS	26
4.1. CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO	26
4.1.1. <i>Generalidades</i>	26
4.1.2. <i>Localización y límites</i>	28
4.1.3. <i>Suelos</i>	30
4.1.4. <i>Clima</i>	39
4.1.5. <i>Hidrografía</i>	42
4.1.6. <i>Vegetación</i>	47
4.1.7. <i>Rendimientos históricos promedios de Maíz en el DR063 Guasave</i>	48
4.2. MATERIALES.....	49
4.2.1. <i>Información climatológica</i>	49
4.2.2. <i>Software utilizado</i>	49
4.3. MÉTODOS.....	50
5. RESULTADOS.....	53
5.1. CÁLCULO DE LAS CONSTANTES PARA ESTIMAR RADIACION SOLAR, LA TEMPERATURA DEL PUNTO DE ROCÍO Y LA VELOCIDAD DEL VIENTO.	53
5.2. VALIDACIÓN DEL MODELO HYBRID MAIZE	56
5.3. CALCULO DEL RENDIMIENTO POTENCIAL DEL MAÍZ UTILIZANDO EL PROGRAMA HYBRID MAIZE	57
5.4. ESTIMACION DE LOS REQUERIMIENTOS HIDRICOS DEL MAIZ PARA DIFERENTES FECHAS DE SIEMBRA.....	59
5.5. IMPACTO EN EL RENDIMIENTO DE MAIZ DEBIDO A LA RESIEMBRA REALIZADA EN MARZO DE 2011	62
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	64
7.1. CONCLUSIONES	64
7.2. RECOMENDACIONES.....	65
7. LITERATURA CITADA	66

ÍNDICE DE CUADROS

<i>Cuadro 4.1. Distribución de superficie por módulo en el Distrito de Riego 063 Guasave</i>	<i>27</i>
<i>Cuadro 4.2. Denominaciones regionales y su distribución en el Distrito de Riego 063 Guasave</i>	<i>32</i>
<i>Cuadro 4.3. Características principales de las series</i>	<i>34</i>
<i>Cuadro 4.4. Superficie cubierta por cada una de las clasificaciones texturales</i>	<i>36</i>
<i>Cuadro 4.5. Superficies con problemas de ensalitramiento</i>	<i>37</i>
<i>Cuadro 4.6. Clasificación Agrícola de suelos por Módulo</i>	<i>38</i>
<i>Cuadro 4.7. Valores medios mensuales de la estación climatológica Guasave</i>	<i>40</i>
<i>Cuadro 4.8. Incidencias de heladas registradas de 1963 a 1990.....</i>	<i>42</i>
<i>Cuadro 4.9. Vegetación predominante en el Distrito de Riego 063 Guasave</i>	<i>47</i>
<i>Cuadro 4.10. Rendimientos históricos promedios de maíz en el DR063 Guasave.....</i>	<i>48</i>
<i>Cuadro 5.1. Rendimiento potencial del maíz para cada estación climatológica seleccionada.</i>	<i>58</i>
<i>Cuadro 5.2. Lámina de riego requerida para alcanzar el rendimiento potencial del maíz en el DR063 Guasave, Sinaloa.....</i>	<i>59</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 3.1. Producción mundial de maíz en 2001, detallada por países</i>	9
<i>Figura 3.2. Tasa de consumo per cápita de maíz en el mundo</i>	11
<i>Figura 3.3. Clasificación de modelos (Ozga, 1976)</i>	18
<i>Figura 4.1. Superficie sembrada de riego en el Distrito de Riego 063 Guasave del periodo 1995 – 2004</i>	28
<i>Figura 4.2. Ubicación del Distrito de Riego 063 Guasave, Sinaloa.</i>	29
<i>Figura 4.3. Distribución mensual de la precipitación en el Distrito</i>	40
<i>Figura 4.4. Distribución de la temperatura media mensual</i>	41
<i>Figura 4.5. Distribución de la evaporación media mensual</i>	41
<i>Figura 4.6. Localización de la Región Hidrográfica No. 10</i>	43
<i>Figura 4.7. Localización del Distrito de Riego No. 063 Guasave, Sin., dentro de la Cuenca del Río Sinaloa</i>	44
<i>Figura 4.8. Localización de ríos, arroyos y corrientes más importantes de la Cuenca Río Sinaloa y la Subcuenca del Arroyo Ocoroni</i>	46
<i>Figura 4.9. Estaciones seleccionadas de ERIC con registros históricos mayores de 10 años</i>	49
<i>Figura 4.10. Generación de la serie sintética de la estación 25027 El Nudo, Guasave.</i>	50
<i>Figura 4.11. Estimación de la ET_0 para la estación climatológica 25027 El Nudo, Guasave.</i>	51
<i>Figura 4.12. Cálculo del rendimiento potencial del maíz para la estación climatológica 25027 El Nudo, Guasave</i>	52
<i>Figura 5.1. Estimación de la constante k_{RS} para el cálculo de Radiación Solar</i>	53
<i>Figura 5.2. Comportamiento de la radiación solar medida y estimada</i>	54
<i>Figura 5.3. Estimación de la ecuación para calcular la temperatura del punto de rocío.</i>	55
<i>Figura 5.4. Índice de estrés hídrico sufrido durante el desarrollo de la planta</i>	57
<i>Figura 5.5. Rendimiento potencial del maíz para cada estación climatológica seleccionada.</i>	58
<i>Figura 5.6. Lámina de riego requerida para alcanzar el rendimiento potencial del maíz en el DR063 Guasave, Sinaloa</i>	59
<i>Figura 5.7. Calendario de riego idóneo para alcanzar el rendimiento potencial del Maíz en el DR063 Guasave sembrando el 24 de noviembre</i>	60
<i>Figura 5.8. Calendario de Riego idóneo para lograr el rendimiento potencial de Maíz en el DR063 Guasave sembrando el 01 de octubre</i>	61
<i>Figura 5.9 Rendimiento potencial de maíz en el DR063 Guasave, Sinaloa.</i>	63

1. INTRODUCCIÓN

El maíz fue de gran importancia entre los pueblos de Mesoamérica. Constituyó su base alimenticia por ser uno de sus alimentos de mayor valor y era preparado en multitud de formas como los atoles, tamales, pozoles y tortillas que siguen siendo hasta nuestros días elementos indispensables en la alimentación del pueblo de México.

El cultivo de este cereal ya se encontraba plenamente implantado en América cuando llegaron los colonizadores europeos. Hoy en día se encuentra cultivado prácticamente en todas las zonas del mundo, con la condición de que tengan un sistema de riego o de lluvias primaverales necesarias para su crecimiento.

La superficie con infraestructura de riego en el país es de 6.3 millones de hectáreas, lo que lo coloca en el séptimo lugar mundial en cobertura de irrigación. Aproximadamente el 54% de esa superficie corresponde a 84 Distritos de Riego y el 46% restante a obras de pequeña irrigación, operadas, conservadas y mantenidas por los propios productores, a las cuales se les denomina Unidades de Riego para el Desarrollo Rural, (URDERALES).

El Distrito de Riego 063 Guasave, constituye una de las áreas de riego más importantes de la República Mexicana y se encuentra dentro de la Región Hidrológica No. 10 “Cuenca del Río Sinaloa”, en la porción norte del Estado de Sinaloa y comprende parte de los Municipios de Guasave y Sinaloa, dentro de la Región Pacífico Norte de México.

Gracias al desarrollo de herramientas de simulación, como medio de obtención de soluciones prácticas, aplicadas a problemas de ingeniería y partiendo de la modelación de procesos físicos del ciclo hidrológico, se ha logrado describir al menos en parte la complejidad de los fenómenos que ocurren en la naturaleza, como lo es la simulación del crecimiento de los cultivos, en este caso específico del maíz.

Un Modelo de Simulación del crecimiento de un cultivo permite interpretar, simular y predecir las respuestas ante distintas condiciones ambientales a través de la solución

de las ecuaciones que gobiernan el comportamiento de los indicadores que reflejan cuantitativamente las características del clima de un lugar, ayudando en la toma de decisiones y visualizando el problema en términos objetivos.

Debido a la importante producción anual de maíz que produce el Distrito de Riego 063 Guasave, Sinaloa y a las significativas pérdidas de cultivo de maíz sufridas a causa de las bajas temperaturas registradas en febrero de 2011 se decidió realizar la presente investigación que comprende la estimación de los rendimientos de maíz en la resiembra del mes de marzo de 2011 a partir de la validación del modelo Hybrid Maize desarrollado por la Universidad de Nebraska; haciendo hincapié en la relevancia de los resultados obtenidos ya que dicha resiembra se realizó fuera del período óptimo de siembra recomendado para esta región del país.

En el presente trabajo se estimó el rendimiento potencial del maíz para diferentes fechas de siembra, lo cual permitirá tomar algunas decisiones de manejo en caso de que se realicen resiembras de maíz fuera de las fechas óptimas.

Así como también, se estimaron los requerimientos hídricos del cultivo de maíz para diferentes fechas de siembra.

2. OBJETIVOS

- Validar el modelo Hybrid Maize para estimar rendimientos de maíz en el Distrito de Riego 063 Guasave, Sinaloa.
- Estimar los rendimientos potenciales de maíz bajo diferentes fechas de siembra en el Distrito de Riego 063 Guasave, Sinaloa.
- Estimar los requerimientos hídricos del maíz bajo diferentes fechas de siembra en el Distrito de Riego 063 Guasave, Sinaloa.
- Evaluar los impactos en el rendimiento de maíz debido a la resiembra realizada en Marzo de 2011 a consecuencia de las heladas presentadas en el Distrito de Riego 063 Guasave, Sinaloa

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. GENERALIDADES SOBRE EL CULTIVO DEL MAÍZ

3.1.1. Origen del Maíz

Maíz (*Zea mays* L.), o Maíz como es llamado en Estados Unidos de América, es uno de los tres granos de cereal en el cual se sustentó la civilización (Eubanks, 2001).

Aunque el Maíz (*Zea mays* L.) es uno de los más importantes cultivos del mundo, las teorías acerca de su domesticación siguen siendo controversiales. Muchos investigadores están de acuerdo en tres grandes cosas: (i) un pasto llamado teosinte (*Zea* spp.) es el ancestro no domesticado del maíz; (ii) la población que vive en lo que hoy es México lo domesticó y (iii) lo hicieron hace 5,000 a 10,000 años. Pero muchos desacuerdos permanecen concernientes a mecanismos, ubicación y tiempo del proceso de domesticación y por lo tanto, su relación a los procesos sociales mesoamericanos y ambientales, como el principio del sedentarismo y deforestación. Las dos hipótesis principales apuntan que el centro de la domesticación ocurrió en las tierras altas hacia el sur, alrededor de Tehuacán y Oaxaca, en una elevación de 1,200 a 2000 m, contra la domesticación en elevaciones inferiores, en la Depresión del Balsas que delimita las tierras altas sureñas en el norte (Sluyter y Dominguez, 2006).

El centro geográfico de origen y dispersión se ubica en el Municipio de Coxcatlán en el valle de Tehuacán, Estado de Puebla, en la denominada Mesa Central de México a 2.500 m sobre el nivel del mar. En este lugar el antropólogo norteamericano Richard Stockton MacNeish encontró restos arqueológicos de plantas de maíz que, se estima, datan del 7.000 a. C. Teniendo en cuenta que ahí estuvo el centro de la civilización Azteca es lógico concluir que el maíz constituyó para los primitivos habitantes una fuente importante de alimentación. Aun, se pueden observar en las galerías de las pirámides (que todavía se conservan) pinturas, grabados y esculturas que representan al maíz. Las grandes civilizaciones mesoamericanas no habrían

surgido sin la agricultura, y sin un sistema de medición del tiempo que organizaba sus actividades cotidianas y rituales de los pueblos mesoamericanos. El calendario determinaba los momentos en que se cultivaba, se comerciaba o se hacía la guerra y también decía el destino de los seres humanos. El desarrollo de distintos centros de variabilidad en América, ha sido paralelo al desarrollo de las civilizaciones indígenas y se piensa que los colonizadores españoles y europeos que vinieron al nuevo mundo no tuvieron influencia. Los dentados de México y América central están asociados a la cultura Maya, mientras que los maíces cónicos de la parte central de México (2.500 msnm) lo están con la civilización Azteca (en línea 2).

3.1.2. Importancia del Maíz

El cultivo del maíz es uno de los más diversificados en el mundo y ocupado tanto para la alimentación humana como en la alimentación de animales de todo tipo, desde aves hasta vacunos de carne o leche, se encuentra a nivel mundial después del trigo y el arroz que cobra gran importancia en la alimentación tanto humana como animal. Incluso se ha cultivado desde antiguas culturas centroamericanas es conocido el uso que le dieron los mayas a terrenos boscosos que transformaron en cultivables para sembrar maíz que era su principal fuente de alimentación.

A partir de la llegada de los españoles a América, el maíz se dio a conocer a Europa y de ahí a todo el mundo, por lo que en la actualidad es cosmopolita. Actualmente su cultivo y comercio son universales y su consumo y aprovechamiento revisten las más variadas formas según los países. Por su amplia capacidad de adaptación y su elevado rendimiento, así como las posibilidades futuras de mejora por vía genética, hacen de este uno de los cultivos más prometedores para afrontar la amenaza del hambre en el mundo. México es uno de los más importantes consumidores de maíz, producto base de la alimentación de la población, pero desafortunadamente es deficitario de maíz en grano por lo que se debe importar gran cantidad para satisfacer la demanda.

El maíz es el cultivo más importante de México por varias razones: se producen alrededor de 18.2 millones de toneladas en una superficie de 8.5 millones de

hectáreas y es el que presenta un mayor número de productores, 3.2 millones, en su mayoría ejidales (solo existen 4 millones de productores agrícolas en el país).

3.1.3. Descripción del Maíz

El Maíz (*Zea mays* L.) es una planta monoica; sus inflorescencias masculinas y femeninas se encuentran en la misma planta. Si bien la planta es anual, su rápido crecimiento le permite alcanzar hasta los 2,5 m de altura, con un tallo erguido, rígido y sólido; algunas variedades silvestres alcanzan los 7 m de altura.

El tallo está compuesto a su vez por tres capas: una epidermis exterior, impermeable y transparente, una *pared* por donde circulan las sustancias alimenticias y una *médula* de tejido esponjoso y blanco donde almacena reservas alimenticias, en especial azúcares.

Las hojas toman una forma alargada íntimamente arrollada al tallo, del cual nacen las espigas o *mazorcas*. Cada mazorca consiste en un tronco u *olote* que está cubierta por filas de granos, la parte comestible de la planta, cuyo número puede variar entre ocho y treinta.

Es una planta de noches largas y florece con un cierto número de días grados > 10 °C (50 °F) en el ambiente al cual se adaptó. Esa magnitud de la influencia de las noches largas hace que el número de días que deben pasar antes que florezca está genéticamente prescripto y regulado por el sistema-fitocromo. La fotoperiodicidad puede ser excéntrica en cultivos tropicales, mientras que los días largos (noches cortas) propios de altas latitudes permiten a las plantas crecer tanto en altura que no tienen suficiente tiempo para producir semillas antes de ser aniquiladas por heladas. Esos atributos, sin embargo, pueden ser muy útiles para usar maíces tropicales en biocombustibles.

Planta monoica, absolutamente capaz de reproducirse por sí sola, al poseer flores masculinas y femeninas en el mismo pie. En apariencia el grueso recubrimiento de brácteas de su mazorca, la forma en que los granos se encuentran dispuestos y están sólidamente sujetos, impedirían que la planta pueda hacer germinar sus granos. Su simbiosis con la especie humana aparentaría ser total, a tal punto que algunos investigadores lo llaman un "artefacto cultural", aunque estos son conceptos mágicos, alejados de la realidad. Cuando una espiga cae al suelo, las brácteas son consumidas por hongos, y no lo son sus cariopses que logran germinar, generándose una competencia fortísima, que hará solo sobrevivir a unos pocos de cada espiga. Cualquier sujeto rural lo ha experimentado, por lo que se trata por todos los medios de no dejar espigas sin cosechar, para que no se autogenera el maíz "guacho".

Existen maíces en estado silvestre, y su negación es otra de las afirmaciones mágicas, sin contraste científico, de que el maíz se resiembraba sin la intervención humana. Las plantas caídas y con sus espigas en contacto con la tierra, y condiciones de humedad, aseguran la perpetuación de esta especie anual.

Por su gran masa de raíces superficiales, es susceptible a las sequías, intolerancia a suelos deficientes en nutrientes, y a caídas por severos vientos.

3.1.4. Genética del Maíz

Tiene 10 cromosomas ($n = 10$). Su longitud combinada es de 1500 cm. Algunos de sus cromosomas están altamente repetidos, en dominios heterocromáticos que producen razas de granos oscuros. Esas "alteraciones" individuales son polimórficas tanto entre razas de maíz como teosinte. Barbara McClintock ha usado esas alteraciones como marcadores para probar su teoría del transposón de "genes saltadores", con la que ganó en 1983 el Premio Nobel en Fisiología o Medicina.

El maíz sigue siendo un importante organismo modelo para la genética y la biología del desarrollo.

Hay un centro concentrador de mutaciones de maíz, en el *Centro de Stock de Cooperación Genética de Maíz*, con fondos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, localizado en el Departamento de Ciencias de Cultivos, en la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign. Tiene una colección de cerca de 80.000 muestras. El núcleo de esa colección consiste de varios centenares de genes nombrados, más combinaciones adicionales de genes y otras variantes significativas. Hay cerca de 1.000 aberraciones cromosómicas (e.g., translocaciones, inversiones) y muestras con números cromosómicos anormales (e.g., tetraploides). Los datos genéticos descriptores de las muestras de maíz mutantes poseen miríadas de otras informaciones acerca de su genética, y pueden verse en MaizeGDB: database de Genética de Maíz y Genómica.

En 2005, la estadounidense National Science Foundation (NSF), el Departamento de Agricultura USDA, y el Departamento Estatal de Energía (DOE) formaron un consorcio para secuenciar el genoma del maíz. Los datos resultantes de las secuencias de ADN fueron depositados inmediatamente en GenBank, un repositorio para datos de secuencias genómicas. El secuenciado del genoma del maíz ha sido considerado dificultoso debido a su gran tamaño y complejos arreglos genéticos. Su genoma tiene 50.000–60.000 genes entre 2.500 millones de bases – moléculas que forman la estructura de su ADN – que hacen a sus 10 cromosomas. (Por comparación, el genoma humano contiene cerca de 2.900 millones de bases y 26.000 genes.)

El 26 de febrero de 2008 se anunció la obtención de la secuencia completa del genoma del maíz. La única otra planta de cultivo cuyo genoma completo se ha conseguido hasta ese momento es el arroz.

3.1.5. Producción mundial de Maíz

La producción mundial de estas semillas alcanzó los 880 millones de toneladas en el año 2007 contra 706 millones de t el año anterior. Comparando con los 600 millones de toneladas de trigo o los 650 millones de arroz, se comprende la importancia básica a nivel mundial del maíz, no sólo económicamente sino a todos los niveles. Estos datos pueden consultarse en las estadísticas de la FAO (Food and Agricultural Organization, una división de la O.N.U., ver figura 3.1).

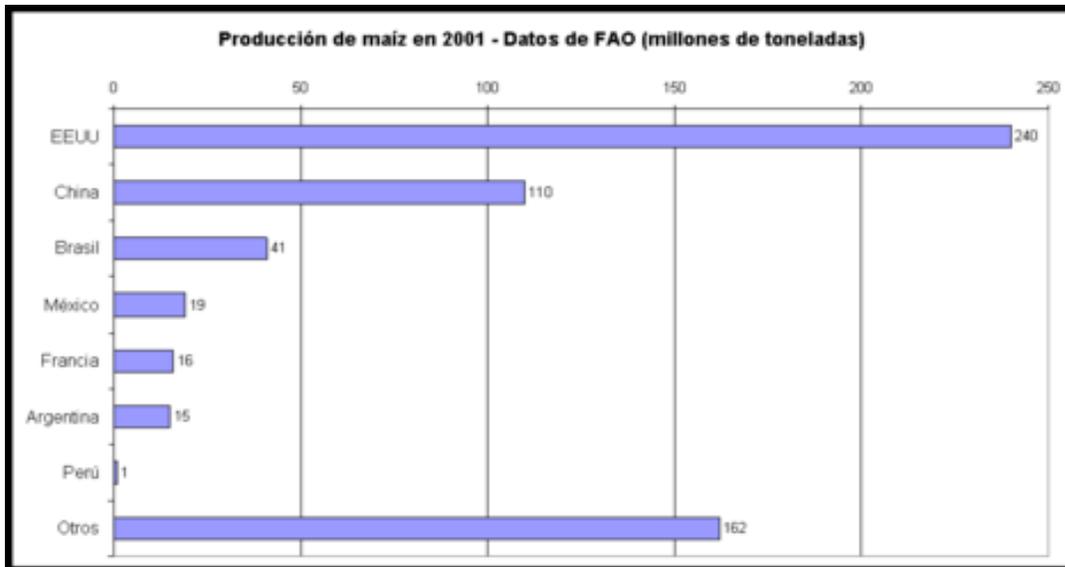


Figura 3.1. Producción mundial de maíz en 2001, detallada por países

Sin embargo, hay que considerar que el consumo humano en todo el mundo es bastante inferior al del trigo, no por su calidad como cereal sino porque el maíz es un alimento fundamental de los animales, especialmente, porcinos, y también es básico en la producción de aceite comestible y hasta etanol. De hecho, el llamado Corn Belt en los Estados Unidos es la región de producción de carne más importante del mundo, conjuntamente con el sureste del Brasil, cuya ganadería de cerda es la más importante del mundo por el valor de su exportación y está fundamentada en la rica producción de maíz brasileña, como alimento para el ganado.

Estados Unidos es el mayor productor con cerca del 45% de la producción total mundial. La productividad puede ser significativamente superior en ciertas regiones del mundo, así en 2009 el rendimiento en Iowa fue de 11.614 kg/ha. Así también en 2002 el potencial genético de rendimiento se sigue incrementando como en los últimos 35 años".

Actualmente el maíz es sembrado en todos los países de América Latina. Este constituye, con el frijol, calabaza y chile, un alimento fundamental en toda América. La productividad del maíz latinoamericano es, sin embargo, bastante inferior a la de los Estados Unidos, lo cual está fundamentado en las características ecológicas y sobre todo, climáticas, que diferencian las dos zonas de producción. El maíz es un cereal de muy rápido crecimiento pero que necesita una provisión abundante de insolación, mucho mayor en el Corn Belt, donde las noches del verano son muy cortas, que en las zonas equinocciales latinoamericanas. También en los países europeos se cultiva una gran cantidad de maíz con fines alimenticios para el ganado estabilizado. Su consumo humano nunca llegó a generalizarse: el refrán "a falta de pan, buenas son tortas" hace referencia a la situación existente en España durante la Guerra Civil, cuando algunos países latinoamericanos (México, en especial) enviaron grandes cantidades de maíz a la zona republicana para suplir la falta de harina de trigo.

3.1.6. Producción de Maíz en México

El maíz (*Zea mays* L.) es un grano primordialmente para consumo animal en el mundo. En México, el maíz ocupa la mayor superficie cultivada anualmente: 7 a 8.5 millones de ha cultivadas mayoritariamente en temporal (85%), y el 15% restante con riego en el ciclo otoño-invierno (Muñoz y Hernández, 2004). Sinaloa es el principal estado productor de maíz con riego (65% de la producción nacional) durante el ciclo otoño-invierno. A pesar de ser un país maicero, México enfrenta un grave problema de autosuficiencia de maíz, importando anualmente 3 a 7 millones t de las 20 a 26 millones t que consume (periodo 1995-2003). Los rendimientos de maíz son bajos con respecto a los potenciales: los mayores rendimientos con riego son 9 t ha⁻¹ en

Sinaloa, y en temporal 5 t ha^{-1} en Jalisco; el rendimiento promedio nacional para riego es 5.2 t ha^{-1} y 2 t ha^{-1} para temporal (Muñoz y Hernández, 2004). Esto muestra las diferencias tecnológicas, edáficas y ambientales de las zonas maiceras de México.

3.1.7. Consumo de Maíz en el mundo

La dependencia de México acerca del maíz como base alimenticia es significativa, esto se debe a que desde épocas precolombinas fue la base de la alimentación, junto con el cacao, chile y calabaza.

En la figura 3.2 se muestra la tasa de consumo de maíz per cápita a nivel mundial; como se ve en el mapa México, Guatemala, Honduras, El Salvador, y los países del Sur de África, encabezan la lista de los principales consumidores de maíz.

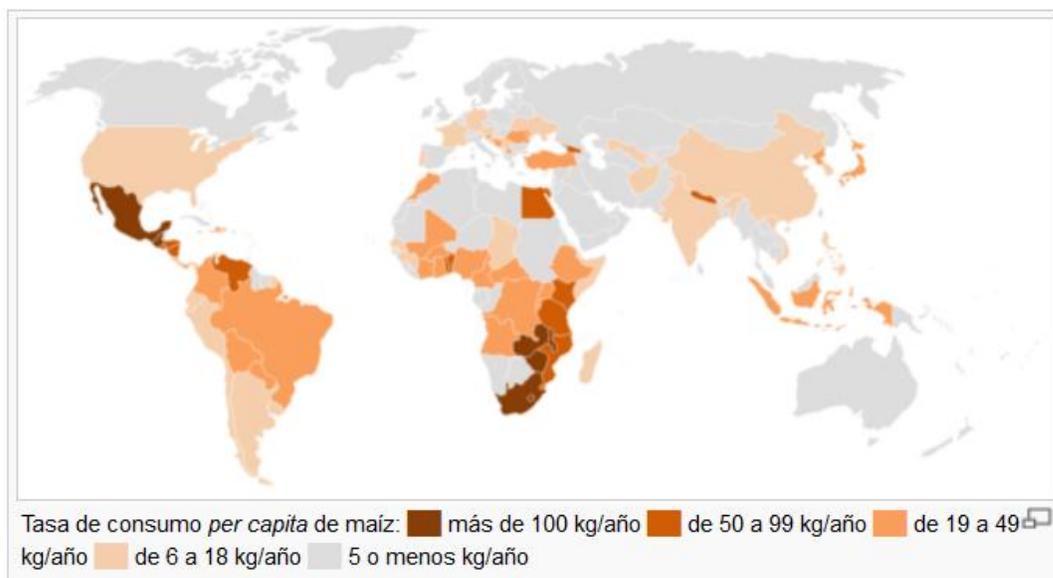


Figura 3.2. Tasa de consumo per cápita de maíz en el mundo

3.1.8. Usos del Maíz

Existen variedades de maíz forrajero y para producción de grano. El maíz para grano se puede clasificar como: granos de color blanco para la elaboración de cereales; granos con alto contenido de azúcar para la alimentación humana; granos con alto contenido de aceite para la industria aceitera; granos con alto contenido de proteína y de lisina para la industria y la alimentación humana, y granos con mayor proporción de almidón duro o cristalino que se utilizan para elaborar rosetas o palomitas. El maíz tiene una enorme cantidad de usos y en la actualidad se conocen cerca de 300 productos que, en un u otra forma, son derivados del maíz o incluyen en su composición alguno de ellos.

El grano se cosecha y se almacena y puede destinarse al consumo humano o para la siembra. En nuestro país se utiliza principalmente para alimento humano, para lo cual es necesario que los granos se sometan a un proceso conocido como nixtamalización, que consiste en su cocción con agua de cal, moliéndose posteriormente en molino para obtenerse la masa que se destina para la elaboración de tortillas, tlacoyos, sopas, tlayudas, tamales y atoles, entre otros. En algunos lugares se recogen las mazorcas incipientes llamadas jilotes y hervidas o crudas se consumen, también se preparan en salmuera. La mazorca ya desarrollada se puede preparar a la brasa. La molienda del grano en seco produce hojuelas de harina de maíz, frituras, botana y aguardientes para fabricación de bebidas alcohólicas no fermentadas.

El almidón (fécula de maíz) se obtiene de la industrialización del grano y sus aplicaciones son muy variadas, puede ser parte integrante de pastas y sémolas para sopas, mermeladas, confituras, maicena, goma de mascar, relleno de carnes, fabricación de salchichas, espesado de zumos de frutas, refrescos, cervezas y licores. También se extrae aceite, el cual tiene un valor nutritivo y es de fácil digestión. Se utiliza asimismo para la fabricación de productos de panadería, mayonesas y margarinas. Los derivados de la industrialización del maíz para hacer pegamentos y tienen numerosos usos en las industrias: farmacéuticas, de

cosméticos, textiles, de pinturas, papelería, tenería y petrolera, entre muchas otras (en línea 1).

3.1.8.1. Otros usos

A partir los restos de alcohol anhidro que, mezclado con gasolina, se emplea como carburante. A principios de 2003 la empresa DuPont ha presentado el primer polímero que se ha conseguido obtener a partir del maíz; este polímero se comercializa como Sorona® y con él se pretende sustituir al petróleo como fuente de polímeros por un recurso renovable. El proceso utiliza la bacteria *Escherichia coli* para obtener un polímero del 1,3 propanodiol, que se podrá utilizar para fibras textiles.

La hoja seca del maíz (llamada totomoxtle) sirve como fibra para tejidos, de los cuales se producen canastas, sombreros, bolsas y tapetes. También los artesanos producen flores artificiales, coronas, muñecos con la hoja de maíz pintada a mano. La misma hoja seca se puede incluir en la materia seca del compost, o bien como papel para fumar.

Los olotes, o mazorcas desgranadas de maíz, se usan con fines decorativos y para realizar artesanías.

La hoja del maíz también se usa como envoltorio para preparar tamales. Las hojas se usan frescas o secas, dependiendo del tipo de tamal.

Las *barbas*, *cabellos* o *pelos* de la mazorca de maíz se usan en herbolaria para el tratamiento de diversas enfermedades, por ejemplo del riñón.

3.2. GENERALIDADES SOBRE MODELOS DE SIMULACIÓN

3.2.1. *Definición de modelo*

Un modelo es "una descripción física o matemática de un sistema físico, incluyendo la interacción con el mundo que lo rodea, que puede utilizarse para simular el efecto de los cambios en el sistema mismo, o el efecto de los cambios en las condiciones impuestas sobre él" (Verwey, 1995).

3.2.2. *Importancia de los modelos*

Aunque los modelos matemáticos no son herramientas nuevas, con el auge de la computación, los modelos han tenido un impresionante desarrollo en todas las áreas del conocimiento humano y del quehacer cotidiano, como es la economía, ecología, agricultura, planeación, manejo de bosques, manejo de recursos naturales, astronomía, hidrología, erosión y manejo de cuencas entre muchos otros. Por lo tanto, se encuentran modelos en todas las ramas del conocimiento humano y algunos con una aplicación muy eficiente.

La importancia de los modelos radica, entre otros aspectos, en la predicción de fenómenos a largo plazo en un tiempo relativamente corto, también permiten obtener relaciones de causa-efecto, sin haber realizado cambios en los sistemas reales, (Benavides, 1998).

Además se tiene una infinidad de usos sobre todo de los modelos matemáticos, como menciona Rodríguez (2010) sobre las ventajas de esos modelos:

- ✓ Se tienen respuestas cuantitativas de los fenómenos
- ✓ Dan idea de los puntos en los cuales no se tiene información
- ✓ Ayudan a definir metodologías

- ✓ Ayudan a la investigación debido a que categorizan variables
- ✓ Estimulan la participación o colaboración en equipo
- ✓ Ayudan a interpolar y predecir
- ✓ Ayudan a sugerir prioridades en la investigación y desarrollo

3.2.3. Modelos matemáticos

El conjunto de hipótesis y relaciones de las variables que describen un fenómeno, constituyen un modelo matemático (ecuaciones), que conduce a un problema matemático que es necesario resolver mediante apropiadas técnicas.

En la mayoría de los casos las ecuaciones que rigen los fenómenos físicos a considerar no pueden resolverse analíticamente, por lo que es necesario utilizar métodos aproximados mediante un proceso de computación, siendo los más utilizados los métodos de elementos finitos y el de diferencias finitas. El primero hace discreto el medio en que tiene lugar el fenómeno en estudio utilizando comúnmente una red de triángulos, mientras que el segundo utiliza una red de rectángulos, que es menos complicada, y proporciona una descripción suficiente de los contornos. La esencia de éste método de diferencia finitas, es sustituir los sistemas de ecuaciones diferenciales parciales que rigen el fenómeno en estudio, por sistemas de ecuaciones algebraicas proporcionando valores en los puntos de la malla mediante la solución de métodos explícitos e implícitos.

La precisión de los modelos matemáticos está íntimamente ligada a su costo de explotación, por lo que deben tomarse en cuenta los siguientes factores: exactitud de los datos iniciales, tipo de fenómeno a estudiar, exactitud de las ecuaciones que rigen el fenómeno, forma de aproximar las ecuaciones y evolución del modelo.

3.2.4. Modelos análogos

Dos fenómenos físicos de diferente naturaleza se llaman análogos si las ecuaciones que los describen se expresan con formas matemáticas idénticas, aún cuando los símbolos de cada una de ellas tengan significado diferente. Es común que uno de los dos fenómenos sea de menor dificultad, por lo que éste se emplea para resolver el otro. Lo anterior ofrece una posibilidad de resolver problemas hidráulicos a base de mediciones hechas sobre un fenómeno análogo, siendo los más comunes:

- Analogía entre un flujo a través de medios permeables y flujo laminar en capas delgadas (modelos de Hele-Shaw)
- Analogía entre flujo laminar y flujo turbulento
- Analogía entre un flujo a través de medios permeables y la deformación de una placa elástica bajo carga
- Analogía eléctrica y otros fenómenos físicos (como hidráulicos, mecánicos, entre otros)

3.2.5. Modelos físicos reducidos (hidráulicos)

El uso de modelos físicos a escala reducida, llamados simplemente *modelos hidráulicos*, implica que éstos deben ser semejantes al prototipo, para lo cual debe satisfacerse las leyes de similitud Geométrica, Cinemática y Dinámica, que en conjunto relacionan magnitudes físicas homólogas definidas entre ambos sistemas.

Cuando se va a realizar una comparación con respecto a la similitud geométrica se definen puntos homólogos sobre los cuales se definen magnitudes tales como velocidad, presión, etc.; de igual manera se definen lados, superficies y volúmenes homólogos. La similitud geométrica implica una relación constante para cualquier longitud L , esta relación es denominada escala de líneas de longitudes.

Cuando la comparación entre el prototipo y modelo es con respecto a un movimiento, se establece entonces la similitud cinemática; ésta se cumple cuando los patrones la forma de los patrones de flujos homólogos son iguales en cualquier tiempo, es decir, hay similitud en el movimiento de los sistemas. Es por esto que la relación de velocidades entre estos puntos debe ser constante y es denominada escala de velocidades. Es un requisito que se cumpla con la similitud geométrica para que se cumpla la similitud cinemática.

El movimiento de un fluido en el modelo y en el prototipo, para que sea similar en forma completa, no es suficiente con que se cumpla con las similitudes geométrica y cinemática, también es necesario tomar en consideración la acción de fuerzas sobre las partículas de un fluido, tales como fricción, tensión superficial, gravedad o peso, fuerzas de inercia, de Coriolis, entre otras. Lo anterior implica que la relación de fuerzas homólogas también debe ser constante, estableciéndose así la escala dinámica de fuerzas.

En el diseño de estructura hidráulicas comunes se ha determinado cuales son los factores típicos que gobiernan su comportamiento y por lo tanto su modelación y diseño. Algunos de los modelos usados en cualquier disciplina, pueden ser clasificados según se muestra en la Figura 3.3.

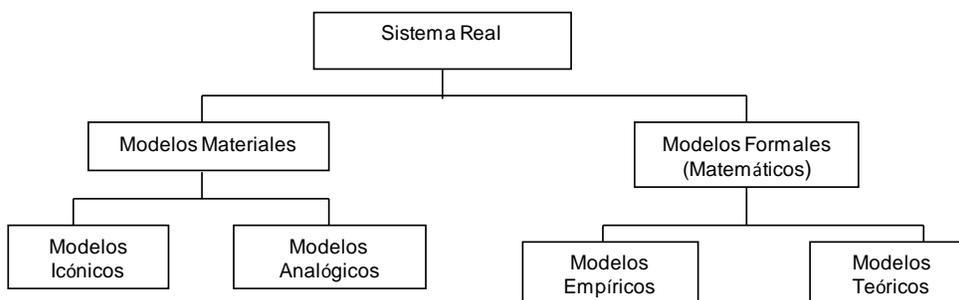


Figura 3.3. Clasificación de modelos (Ozga, 1976)

3.2.6. Modelos de simulación de cultivos

La respuesta de los cultivos a las diferentes fechas de siembra depende de la variabilidad del clima en la región, varía mucho entre los años y la región. Realizar experimentos en campo para obtener información multianual y en diferentes regiones es casi imposible. Por esta razón, los modelos de simulación del crecimiento, bien validados y calibrados con datos experimentales de campo, mantienen la promesa de extrapolar los resultados experimentales de campo de corta duración a otros años y otras regiones haciendo uso de varios años de datos climatológicos e información de suelo (Mathews *et al.*, 2002).

El conocimiento adecuado de la ventana de plantación de algún híbrido en particular, en una región específica es crítico cuando se está seleccionando una semilla híbrida para sembrar cuando la fecha de siembra normal es retardada o replantar cuando la fecha de siembra no es óptima o después de una estación fría (Benson, 1990).

Los modelos de simulación de cultivos integran el conocimiento interdisciplinario e innovaciones tecnológicas en el campo de la biología, física y ciencias químicas relacionadas al sistema productivo agrícola. Por lo tanto, estos modelos pueden aumentar la comprensión y manejo de los sistemas agrícolas de manera integral (Nielsen *et al.* 2005).

Debido a la distribución mundial del maíz y su importancia como cereal para alimento, varios modelos han sido desarrollados para predecir el desarrollo del maíz y el rendimiento de grano en una variedad de ambientes. Por ejemplo: CERES-Maize

(Jones and Kiniry, 1986), SIMAIZ (Duncan, 1975), CORNF (Stapper and Arkin, 1980), RZWQM (Ahuja *et al.*, 2000), ALMANAC (Kiniry *et al.*, 1992), APSIM (McCown *et al.*, 1996), y HYBRID MAIZE (Yang *et al.* 2006).

3.2.7. Calibración y validación de modelos

Según Palacios (1987), frecuentemente los datos disponibles $X_i, Y_i \ i = 1, 2, \dots, n$, deben servir tanto para calibrar como para validar al modelo seleccionado o desarrollado. Estos dos procesos son complementarios pero excluyentes, en cuanto a la información que utilizan. Cabe mencionar algunos comentarios al respecto, ya que lamentablemente no es raro que estos procesos se confundan, cuando se le da el mismo uso a la información disponible.

La calibración es la obtención de valores numéricos de los parámetros supuestamente conocidos o desconocidos del modelo, mientras que *la validación* es una medición de la capacidad predictiva del modelo; por ejemplo, comparando valores calculados y observados, siempre y cuando estos últimos no hayan sido tomados en cuenta en el proceso de calibración, puesto que de otra forma solo se estaría midiendo la bondad de dicha calibración y no el poder predictivo del modelo.

Para evitar estas confusiones, una forma de proceder es dividiendo los valores disponibles en dos grupos, utilizando un subgrupo para encontrar los valores de los parámetros desconocidos, y utilizando el segundo subgrupo para comparar los valores calculados con los observados y de esta forma, medir el poder predictivo del modelo.

3.2.8. Límites de aplicación

En todo modelo matemático se debe especificar claramente el marco dentro del cual fue desarrollado; su jerarquía, los objetivos considerados (generales, particulares). Con esta información, el usuario podrá conocer el campo de aplicación real y los límites físicos y analíticos más allá de los cuales el uso del modelo puede ser inadecuado.

Como límites físicos se pueden citar por ejemplo, las condiciones climáticas extremas bajo las cuales el modelo fue validado, de otra manera no podría ser usado en regiones tropicales o templadas, ya que existe el riesgo de tener diferencias y errores. Como límites analíticos se pueden considerar el número máximo de observaciones requeridas, la precisión considerada, el coeficiente de eficiencia necesario para comparar los valores observados y calculados, entre otros.

3.3. GENERALIDADES SOBRE EL MODELO HYBRID MAIZE

Los productores de maíz necesitan establecer una meta realista del rendimiento del maíz para tomar decisiones acertadas sobre los híbridos de maíz, densidad de siembra, aplicación de fertilizantes y la necesidad de riego. El objetivo debe ser el rendimiento más rentable que se puede esperar de un conjunto particular de suelo, clima y prácticas de manejo. Los objetivos de rendimiento deben de aumentar gradualmente en el tiempo, pero no puede exceder el rendimiento potencial teórico (Dobermann y Shapiro, 2004).

El uso de modelos de simulación de cultivos se ha incrementado en los últimos años teniendo en cuenta las ventajas que presenta para el desarrollo de estrategias de manejo de cultivo utilizando series climáticas históricas (Manlla y Salvagiotti, 2011).

Una de las limitantes más generalizadas en la simulación de cultivos, es la necesidad de contar con coeficientes genéticos, parámetros necesarios para caracterizar el comportamiento diferencial de cada genotipo (5 coeficientes en el caso del maíz) calibrados a partir de experimentos en condiciones óptimas de crecimiento. Teniendo

en cuentas estas dificultades Yang et al. (2006) desarrollaron el modelo Hybrid-Maize tomando principios del modelo CERES, INTERCOM y WOFOST, con el objetivo de simular el crecimiento y rendimiento de maíz en condiciones de producción potenciales. Una de las principales ventajas de este modelo es que utiliza pocos parámetros genéticos, ya que solamente se caracterizan los genotipos por su fenología.

Los parámetros genéticos se derivan de relaciones lineales entre la duración de la etapa emergencia-R1 y emergencia-R6 cuantificada en grados día. No existen coeficientes genéticos específicos para crecimiento ya que las funciones de fotosíntesis y respiración son derivadas de modelos genéricos de producción (INTERCOM y WOFOST). Hybrid-Maize ha mostrado excelentes resultados para simular rendimientos potenciales del cultivo de maíz en el área maicera de USA (Yang *et al.*, 2006).

Hybrid-Maize es un modelo de simulación de cultivo que utiliza fórmulas matemáticas para describir los procesos del crecimiento y desarrollo del maíz (*Zea mays* L.) en relación con el clima, las propiedades del suelo y factores de manejo. Al igual que todos los modelos de simulación, que representan una simplificación del sistema del “mundo real”, las predicciones de los modelos pueden diferir de los resultados reales. Por lo tanto, los resultados de las simulaciones del modelo deben ser considerados aproximaciones y no tomarse como un hecho.

La finalidad de este modelo de simulación es permitir a los productores de maíz, consultores de cultivos e investigadores explorar hipotéticamente el impacto del clima y los factores de manejo sobre el desarrollo de los cultivos con el objetivo de comprender mejor el rendimiento potencial del sitio, la variación del rendimiento potencial año con año y posibles opciones de manejo que afectan el rendimiento y su estabilidad (Yang, *et al.*, 2006).

Hybrid-Maize simula el crecimiento de un cultivo de maíz bajo condiciones limitativas o no limitativas de agua (de temporal o de riego) basado en datos climatológicos diarios. Permite al usuario:

1. Evaluar el rendimiento potencial del sitio y su variabilidad
2. Evaluar los cambios en el rendimiento potencial utilizando diferentes fechas de siembra, híbrido de maíz y densidad de siembra
3. Analizar el crecimiento del maíz en años específicos.
4. Explorar opciones para el manejo del agua de riego
5. El comportamiento de simulaciones por temporadas para evaluar el crecimiento actual y las previsiones del rendimiento final a partir de las diferentes etapas de crecimiento.

3.4. GENERACIÓN DE SERIES SINTÉTICAS DE DATOS CLIMATOLÓGICOS

Según Rivera (1994), los datos o valores faltantes de un registro de datos climatológicos son bastante frecuentes y se deben a una gran variedad de causas. Por ejemplo, debido a desperfectos del aparato, enfermedad o sustitución del encargado de las observaciones, etc.

Debido a lo anterior, en la actualidad existen diversos programas de cómputo que nos permiten estimar datos climatológicos faltantes o generar series sintéticas a partir de un número de años con observaciones, tal es el caso del generador climático estocástico Lars-WG v5 (Semenov y Barrow, 2002).

Un generador climático estocástico es un modelo numérico que produce una serie sintética a nivel diario de variables climáticas, tales como precipitación, temperatura y radiación solar, con ciertas propiedades estadísticas similares a las presentes en el grupo de años con observaciones registradas. Existen varias razones para el desarrollo de los generadores climatológicos estocásticos y para el uso de datos climatológicos sintéticos en lugar de los observados. La primera es la obtención de una serie de datos climatológicos lo suficientemente larga para ser utilizada en

modelos hidrológicos o agrícolas. El registro diario del tiempo es una de las principales entradas de los modelos matemáticos de hidrología, agricultura y uso de suelo, pero la longitud de las series de tiempo es a menudo insuficiente para permitir una buena estimación de la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos. Además, las series de tiempo observadas representan solo una “realización” del clima, mientras que un generador climático puede simular muchas “realizaciones”, proporcionando así una amplia gama de situaciones posibles. La segunda razón es proporcionar los medios para ampliar la simulación del clima a lugares donde no se cuenta con información climatológica disponible. Un tercer ámbito de aplicación ha surgido recientemente en estudios de cambio climático. Un generador climático puede servir como una herramienta computacional de bajo costo para generar escenarios de cambio climático en un sitio específico a nivel diaria con el paso del tiempo (Semenov, *et al.*, 1998).

3.5. GENERALIDADES SOBRE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE REFERENCIA

La evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0) es un componente clave en estudios hidrológicos. ET_0 se utiliza para la planificación agrícola y urbana, planificación del riego, estudios regionales de balance hídrico y zonificación agroclimáticas.

Existen varias ecuaciones para calcular ET_0 . Estas ecuaciones van desde las ecuaciones de balance de energía más complejas que requieren datos climatológicos detallados (Penman-Monteith, Allen, 1989) hasta las ecuaciones más simplificadas que requieren pocos datos (Blaney y Criddle, 1950 y Hargreaves y Samani, 1985). Aunque los parámetros más importantes para estimar ET_0 son la temperatura y la radiación solar. Según Samani (2000), por lo menos 80 por ciento de ET_0 puede ser explicado por la temperatura y la radiación solar.

La ecuación de Penman-Monteith se recomienda ampliamente por su detallada base teórica y su alojamiento en los períodos de tiempo cortos. Sin embargo, los detallados datos climatológicos requeridos por el modelo Penman-Monteith, no suelen estar disponibles, especialmente en los países en desarrollo. Por ejemplo en el continente africano, hay una estación climatológica por cada tres millones de hectáreas. Incluso en los países mas desarrollados, los datos climatológicos son a menudo limitados. En el estado de Texas hay una estación climatológica por cada 40,000 ha de suelo irrigado (Samani , 2000).

Por otro lado los instrumentos que se utilizan para medir los parámetros del clima, específicamente, la radiación solar y la humedad con frecuencia están sujetos a errores de estabilidad. Es común encontrarse con errores de hasta un 10 por ciento en piranómetros (Sammis, 1998, citado por Samani, 2000). Henggeler *et al.* (1996) citado por Samani (2000) observaron que los sensores de humedad relativa están perdiendo alrededor de 1 por ciento en la precisión por mes instalado. Teniendo en cuenta la escasez de estos datos climatológicos y el impacto de microclimas en los parámetros del tiempo es deseable ser capaz de estimar ET_0 para lugares donde el amplio rango de variables climatológicas no esta actualmente disponible.

El programa de cómputo Ref-ET v3.1 desarrollado en la Universidad de Idaho por el Dr. Richard G. Allen proporciona cálculos estandarizados de la evapotranspiración de referencia (ET_0) para quince de los métodos mas comunes actualmente usados. Los dos propósitos de Ref-ET son:

1. Proveer cálculos de la evapotranspiración de referencia (ET_0) que puedan ser comparados con otros programas computacionales de ET_0 para varios conjuntos de datos climatológicos.
2. Proveer cálculos de ET_0 estandarizados usando distintos tipos de archivo de datos, tipos de unidades y series de tiempo.

El programa Ref-ET v3.1 se basa en las guías y procedimientos recomendadas en los Manuales y Reportes de Ingeniería Práctica No. 70 de la ASCE (American Society of Civil Engineers) y también provee cálculos que son compatibles con el

Manual de Riego No. 56 de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y con las ecuaciones estandarizadas de la ASCE Penman-Monteith recomendadas en el año 2000 por el Comité Técnico de la ASCE sobre Cálculos de Evapotranspiración Estandarizados (Allen, 2001).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

4.1.1. Generalidades

El Distrito de Riego 063 Río Sinaloa, Sinaloa, se creó mediante Acuerdo Presidencial publicado en el Diario Oficial de la Federación en tres diferentes fechas:

El 23 de Octubre de 1958, que establece la zona de riego de la margen izquierda del Río Sinaloa.

El 9 de Diciembre de 1974, que establece la zona de riego de la margen derecha del Río Sinaloa.

El año de 1978, que establece la zona de riego del Arroyo Ocoroni.

Así, la fecha de inicio de operación del Distrito se dio en el año de 1958, aprovechando la derivación de las aguas del Río Sinaloa, además de la explotación de mantos subterráneos mediante un considerable número de pozos profundos (450), que en su mayoría dejaron de operar, en virtud de que en 1982 se registró la terminación de la primera etapa de la construcción de la presa de almacenamiento Gustavo Díaz Ordaz (Conagua-Colpos, 2005).

La infraestructura del Distrito de Riego cubre una superficie física de 116,615 ha, aunque la superficie regable asciende a 111,941 ha y la superficie con derecho a riego es de 109,104 ha. El desglose por módulo de la información anterior, se presenta en el cuadro 4.1.

Cuadro 4.1. Distribución de superficie por módulo en el Distrito de Riego 063 Guasave

MÓDULO	SUPERFICIE DOMINADA (ha)	SUPERFICIE CON DERECHO A RIEGO (ha)
I-1 Bamoá	30,857	30,514
I-2 Las Milpas	24,205	23,620
II-1 Petatlán	23,823	23,285
II-2 Tetameche	21,821	21,771
III-1 El Sabinal	11,235	9,914
TOTAL	111,941	109,104

La superficie sembrada de 1995 a 2004 ha mostrado que el promedio es de 110,535 ha, con una máxima de 135,777 ha en el año de 1994 y mínima de 103,031 ha en el año de 2000. Lo anterior se ve reflejado en el comportamiento de la superficie sembrada en todo el Distrito, de acuerdo como se puede apreciar en la figura 4.1.

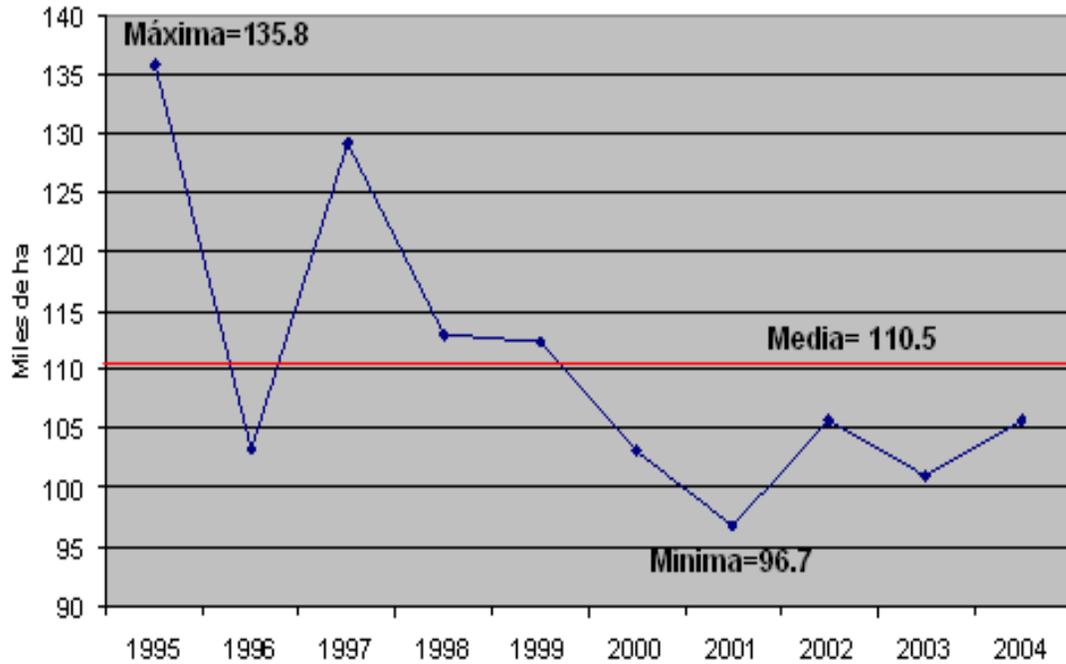


Figura 4.1. Superficie sembrada de riego en el Distrito de Riego 063 Guasave del periodo 1995 – 2004

Las mayores superficies sembradas se registraron durante los años de 1989 y 1990 con más de 160,000 ha y en 1986 con más de 141,000 ha bajo riego (Conagua-Colpos, 2005).

4.1.2. Localización y límites

La zona de interés constituye una de las áreas de riego más importantes de la República Mexicana; el Distrito de Riego 063 Guasave, se encuentra localizado en la Región Pacífico Norte de México, en la porción centro-norte del Estado de Sinaloa y comprende parte de los Municipios de Guasave y Sinaloa (ver figura 4.2).

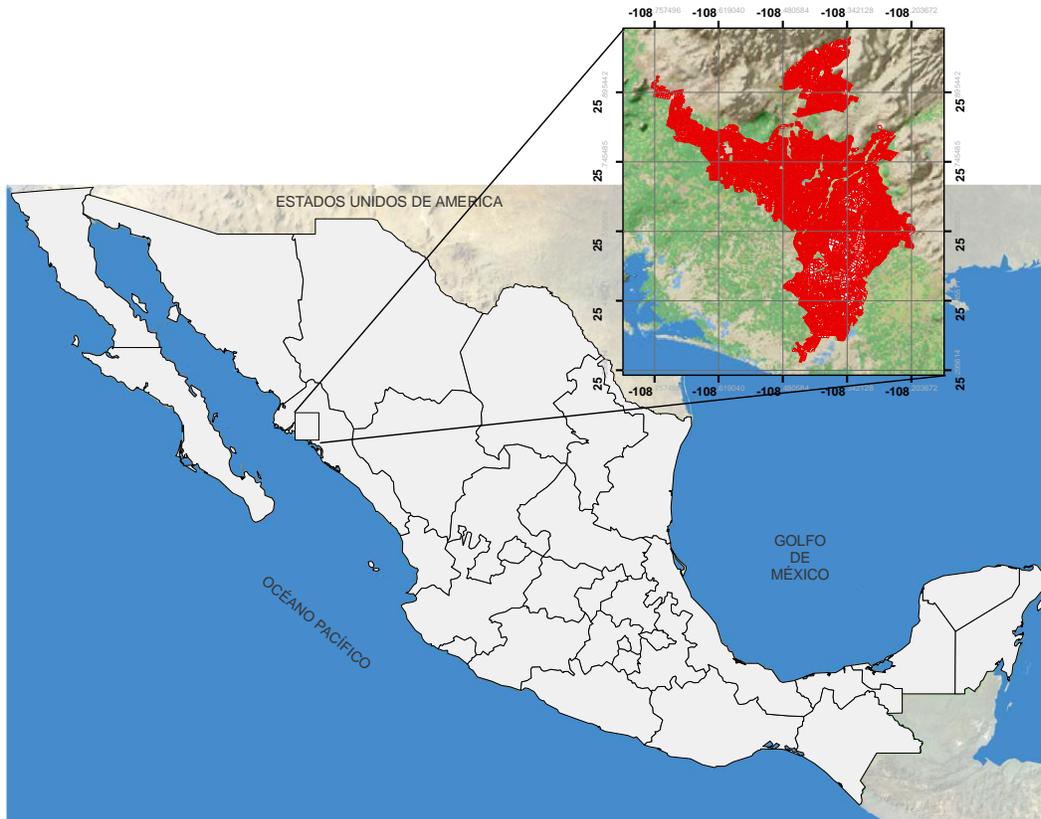


Figura 4.2. Ubicación del Distrito de Riego 063 Guasave, Sinaloa.

Las coordenadas geográficas medias del Distrito de Riego son los 25° 35' de Latitud Norte y los 108° 30' de Longitud Oeste y registra una altitud media de 20 m.s.n.m; cuenta con vías terrestres de comunicación principales, las cuales lo comunican a la Ciudad de Culiacán, Los Mochis y con el resto del estado y de la república.

Las corrientes que benefician al Distrito de Riego 063 Guasave, Sin, son el Río Sinaloa y el Arroyo Ocoroni. Sobre cada una de las corrientes se ubica una presa de almacenamiento, contando a su vez aguas abajo cada una de estas, con una presa derivadora que abastece a sendos canales.

El Distrito de Riego cuenta dos sistemas de riego independientes y cinco Módulos, de los cuales cuatro se encuentran hacia ambas márgenes del Río Sinaloa, y constituyen el Sistema Bacurato ó Río Sinaloa, en tanto que otro se ubica en ambas márgenes del Arroyo Ocoroni, conformando al Sistema Sabinal. Los Módulos que se ubican hacia ambas márgenes del Río Sinaloa se riegan con aguas de la presa de

almacenamiento “Lic. Gustavo Díaz Ordaz” (Bacurato) y la presa derivadora “Sinaloa de Leyva”, en tanto que el Módulo localizado hacia ambas márgenes del Arroyo Ocoroni se beneficia de la presa de almacenamiento “Guillermo Blake Aguilar” (El Sabinal) y la presa derivadora Santa Martha.

Los Módulos localizados en la Margen izquierda del Río Sinaloa corresponden a los de Bamoa y Las Milpas, que se identifican con los números I-1 y I-2, que cuentan con 12 y 10 secciones respectivamente y que constituyen la Unidad El Burrión, en tanto que en la margen derecha se ubican los Módulos de Petatlán y Tetameche, identificados con los números II-1 y II-2, que cuentan con 10 y 8 secciones respectivamente y que constituyen la Unidad La Trinidad. El quinto Módulo identificado como III-1, corresponde a El Sabinal, y cuenta con 5 secciones, que se ubican hacia ambas márgenes del Arroyo Ocoroni, mismo que posteriormente descarga sus caudales al propio Río Sinaloa. Ambos sistemas se ven complementados con varias plantas de bombeo ubicadas sobre las propias corrientes señaladas, así como sobre un dren principal, y la operación de algunos pozos (Conagua-Colpos, 2005).

4.1.3. Suelos

Los suelos de esta zona se originaron de los materiales producto de la descomposición ocasionada por el intemperismo de las distintas rocas que constituyen el macizo rocoso de la Sierra Madre Occidental; posteriormente fueron arrastrados por las avenidas del río y depositados en zonas bajas según el tamaño de las partículas, considerando por su formación a estos suelos de tipo aluvial.

Los suelos que constituyen el área del Distrito, tienen en su mayoría una topografía y conformación uniforme, con ligera pendiente y en su generalidad hacia el litoral, caracterizándose estos suelos por sus texturas arcillosas, pesadas al laboreo, de consistencias duras cuando están secos y plásticos cuando están húmedos, sus coloraciones son café rojizos claros y parduscos.

Solamente los suelos localizados cercanos a la ribera del río y en los bajos dominados por las inundaciones poseen texturas franco-limosas, de buena permeabilidad y livianos al laboreo agrícola.

Agrológicamente se identifican 11 series de suelos, predominando fundamentalmente la denominada “Gatos” y en segundo término la conocida como “Vados”, que en conjunto representan casi el 55% de la superficie del Distrito de Riego.

La superficie física sobre la que se realizó el estudio agrológico corresponde prácticamente a la superficie dominada por las obras, aunque cubre una área ligeramente mayor a esta.

Las denominaciones regionales y su distribución, se detallan en el cuadro 4.2.

Cuadro 4.2. Denominaciones regionales y su distribución en el Distrito de Riego
063 Guasave

Series de Suelos	Superficie (Ha.)	% que representa	Series de Suelos	Superficie (Ha.)	% que representa
1.- Gatos	40,812	35.99%	9.- Alhuey	8,160	7.20%
2.- Vados	18,311	16.15%	10.- Laureles	220	0.19%
3.- Serrano	3,547	3.13%	11.- Higuera	2,764	2.44%
4.- Reforma	686	0.61%	12.- Cerril	1,584	1.40%
5.- Potreros	6,567	5.79%	Subtotal (1)	105,401	92.97%
6.- Tigre	8,228	7.26%	13.- Vados fase ensalitrada	3,955	3.49%
7.- Brasiles	12,531	11.05%	14.-Gatos fase ensalitrada	4,020	3.54%
8.- Valencia	1,991	1.76%	Subtotal (2)	7,975	7.03%
TOTAL		113,376 ha			

Por otra parte, la distribución asociada de las series de suelos y la clasificación agrícola de los mismos en este Distrito de Riego, se describen enseguida: La Serie Gatos cubre una superficie de 40,812 ha., siendo la más importante en cuanto a

superficie que cubre; abarca suelos de segunda clase principalmente en una franja que se ubica hacia la parte central de los módulos de riego Bamoa y Las Milpas, en la margen izquierda del Río Sinaloa; otra fracción importante se localiza en la parte central del módulo de riego Tetameche.

La Serie Vado cubre una superficie de 18,311 ha., abarca suelos de primera y segunda clase en una franja que se ubica hacia la parte central del distrito que colinda con el Río Sinaloa.

La Serie Brasiles cubre una superficie similar de 12,531 ha., abarca suelos de segunda clase en un área que se ubica en los módulos de riego Petatlan y Tetameche, en la margen derecha del Río Sinaloa.

La Serie Alhuey se extiende en un área de 8,160 ha., comprende suelos de tercera clase y se localiza en dos áreas al norte de los Módulos Petatlan y Tetameche y la mayor parte del Módulo de Riego El Sabinal.

En el caso de los suelos del distrito, solo los que se localizan en la parte baja del distrito de riego en las cercanías y colindancia con la cota cinco y en áreas bajas con recarga fuerte, como son las series Vado y Gatos, son las que con el transcurso del tiempo han presentado cambios graduales significativos al presentar fases ensalitradas.

De las series de suelos presentes en el área de este Módulo de Riego, dada la importancia de las mismas, en el cuadro 4.3 se describen las características principales de las Series.

Cuadro 4.3. Características principales de las series

Características Principales	Serie Gatos	Serie Vado
Textura	Arcillosa	Franco arcillosa
Estructura	Columnar	Granular
Profundidad	Profundos	Profundos
Color	Café rojizo opaco (seco) Café rojizo opaco (húmedo)	Café amarillento (seco) Café oscuro (húmedo)
Porosidad	Mediana	Buena
Fertilidad	Pobre en Nitrógeno	De buena a pobre en Nitrógeno
Micro relieve	Ligeramente plano con pendiente al mar.	Ligeramente plano con pendiente al río
Sales	No Salino - No Sódico	No Salino - No Sódico
Drenaje Superficial	Regular	Bueno
Drenaje Interno	Deficiente	Eficiente
Penetración del sistema radicular Agrietamiento	Profunda Grietas profundas hasta de 60 cm. (seco).	Profunda Negativo
Características Principales	Serie Alhuey	Serie Tigre
Textura	Franco arcillo arenosa	Franco Arcillosa

Estructura	Granular	Columnar muy Gruesa
Profundidad	Delgados	Profundos
Color	Café opaco (seco), Café oscuro (húmedo)	Café rojizo (seco) Café rojizo opaco (húmedo)
Porosidad	Buena (poros grandes)	Fina
Fertilidad	Pobre en Nitrógeno	De buena a pobre en N.
Micro relieve	Ligeramente ondulado pendiente del 1 al 10 %	Ligeramente plano con pendiente al mar
Sales	No Salino - No Sódico	No Salino - No Sódico
Drenaje Superficial	Moderado	Bueno
Drenaje Interno	Moderado	Moderado a lento
Penetración radicular.	Profunda	Profunda
Agrietamiento	Negativo	Negativo

En este Distrito de Riego, predominan las texturas pesadas entre las que se encuentran los suelos arcillosos (R), arcillo limosos (RI), franco arcilloso (Mr) y franco arcillo-limoso (Mrl) principalmente. Estos suelos se han clasificado en su mayor parte como suelos de segunda clase aun y cuando pueden dar buenos rendimientos en las cosechas de los cultivos adaptados climáticamente a esta región. En el cuadro 4.4 se puede observar la superficie que cubre cada una de las clasificaciones texturales agrupadas en tres grandes grupos.

Cuadro 4.4. Superficie cubierta por cada una de las clasificaciones texturales

Clasificación / Grupo Textural	Superficie (Ha.)	% del Área
Suelo Pesado (R, RI, Mr, Mrl, Ra, Mra)	75,146	66.28%
Suelo Medio (FI, F, L)	32,573	28.73%
Suelo Ligero (A, Am, Ma)	5,657	4.99%
T o t a l :	113,376	100

En cuanto a problemas de ensalitramiento, conviene mencionar que en general estos no son significativos, adicionalmente de que casi el 7.3% de la superficie total del Distrito presenta en alguna medida ésta situación, aunque el Módulo I-2 Las Milpas es el que presenta una mayor afectación en este sentido, dado que en éste se concentra el 68% de la superficie con ésta problemática a nivel del D.R.; se estima que estas situaciones son debidas principalmente al mal uso del agua e inadecuado manejo de suelos y cultivos, así como a la presencia de mantos freáticos relativamente someros (< 1.50 m), y a el insuficiente ó deficiente drenaje agrícola existente y en determinados casos por la falta de conservación de las obras.

El cuadro 4.5 indica la superficie con algún problema de ensalitramiento a nivel de cada módulo.

Cuadro 4.5. Superficies con problemas de ensalitramiento

Módulo	Superficie con derecho a riego (ha)	Problemas de ensalitramiento ha	% superficie ensalitrada	% respecto al módulo
Modulo I-1 Bamoa	30,514	384	4.82%	1.26%
Modulo I-2 Las Milpas	23,620	5,423	68.00%	22.96%
Modulo II-1 Petatlán	23,285	1813	22.73%	7.79%
Modulo II-2 Tetameche	21,771	355	4.45%	1.63%
Modulo III-1 El Sabinal	9,914	--	0.00%	0.00%
Totales	109,104	7,975	100.00%	7.31%

Finalmente con relación a la clasificación agrícola de los suelos, resulta que casi el 68% de los suelos son de 1a y 2a clase, y un 25% adicional corresponde a 3a clase, con lo que el prácticamente el 93% de la superficie del distrito se encuentra en estos suelos.

El Módulo con mejores suelos agrícolas es el I-1 Bamoa, ya que sus suelos de 1a y 2a clase cubren el 95% de su superficie; es seguido por los Módulos I-2 Las Milpas y II-1 Petatlán que cubren aproximadamente el 75% de sus superficies; teniéndose que el Módulo III-1 El Sabinal cuenta con casi el 67% dentro de estas dos primeras clases de suelos. Los suelos de menor calidad corresponden al Módulo II-2 Tetameche ya que solo el 8.44% de su superficie cae dentro de las clase de 1a y 2a y el 86.12% corresponde a suelos de 3a. A continuación se presenta una tabla con la clasificación agrícola de suelos a nivel de módulo de riego, misma que resume los comentarios sobre el particular:

Cuadro 4.6. Clasificación Agrícola de suelos por Módulo

Clasificación Agrícola de Suelos	% de la superficie del Módulo VS la del DISTRITO					
	I-1 BAMOA	I-2 LAS MILPAS	II-1 PETATLAN	II-2 TETAMACHE	III-1 EL SABINAL	DISTRITO DE RIEGO
Primera	18.62%	1.17%	22.77%	6.41%	37.36%	15.21%
Segunda	75.91%	73.67%	54.04%	2.03%	29.45%	52.72%
Tercera	5.47%	19.94%	10.16%	86.12%	15.59%	25.04%
Cuarta	----	5.22%	12.01%	5.44%	15.22%	6.55%
Sexta	----	----	1.02%	----	2.38%	0.48%
Superficie Total en ha	31,253 ha	24,515 ha	24,128 ha	22,101 ha	11,379 ha	113,376 ha

Por otra parte y al respecto, conviene recordar la descripción de las clases de suelos a que se ha hecho referencia:

Primera Clase: Suelos con ninguna o muy pocas limitaciones para la irrigación, son productivos y con un mínimo manejo pueden producir cosechas de alto rendimiento en la mayor parte de los cultivos adaptados climáticamente.

Segunda Clase: Suelos que tienen de ligeras a moderadas limitaciones para fines de riego, son moderadamente productivos y requieren de un mejor manejo para producir cosechas de alto rendimiento.

Tercera Clase: Suelos que tiene de moderadas a severas restricciones para fines de riego, son de productividad restringida para la mayor parte de los cultivos adaptados climáticamente son suelos que requieren un manejo de alto nivel para obtener cosechas de moderados a altos rendimientos.

Cuarta Clase: Suelos que tienen muy severas limitaciones para fines de riego y generalmente son adecuados para ciertos cultivos adaptados climáticamente, que pueden crecer y producir bajo un nivel muy alto de manejo.

Sexta Clase: No irrigables (Conagua-Colpos, 2005).

4.1.4. *Clima*

Aunque existen varias estaciones climatológicas en la zona de interés, se consideró como representativa la estación “Guasave” para describir los parámetros relativos a temperatura, precipitación y evaporación, entre otros; Lo anterior considerando su ubicación respecto a la zonas de riego de los cinco módulos del Distrito. Se ubica en los 25° 26’ de Latitud Norte y los 108° 18’ de Longitud Oeste y a 18 m.s.n.m.

El clima en la zona del Distrito de Riego, de acuerdo al segundo sistema del Dr. C. W. Thornthwaite, resultó ser D (d) A’ (a’) que se interpreta como: Seco sin excedente de humedad durante el año; cálido con régimen normal de calor.

La temperatura media anual es de 23.9 °C; teniéndose que las temperaturas máximas históricas anuales han oscilado entre 38°C y 45°C, con una media de 41.5 °C; con relación a las temperaturas medias mínimas se han registrado entre -1 °C y 9 °C, con una media mínima de 4.4 °C. La precipitación media anual es de 401.4 mm; en donde en promedio el 71% de la lluvia se precipita entre julio, agosto y septiembre; Ocasionalmente ocurren las equipatas (lluvias invernales que comprenden de diciembre a enero). La evaporación media anual es de 2,200 mm, y el fenómeno de las heladas es de baja incidencia y cuando llega a ocurrir, acontece a fines del periodo invernal (meses de enero y febrero) y causa daños a cultivos del ciclo otoño-invierno sensibles a las bajas temperaturas como el maíz, frijol, garbanzo, frijol ejotero y hortalizas en general, principalmente. En el cuadro 4.7 se presentan los valores medios mensuales.

Cuadro 4.7. Valores medios mensuales de la estación climatológica Guasave

MES	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	ANUAL
Temperatura °C	27.3	23.2	20	19.1	19.5	20.8	23.1	25.1	29	30.4	30.3	29.5	23.9
Evaporación mm	183	149	113	110	125	175	214	253	261	233	207	177	2200
Precipitación mm	43	22	19	14	8	3	1	2	5	72	110	102	401

El comportamiento medio mensual, en cada caso, se aprecia en la figura 4.3.

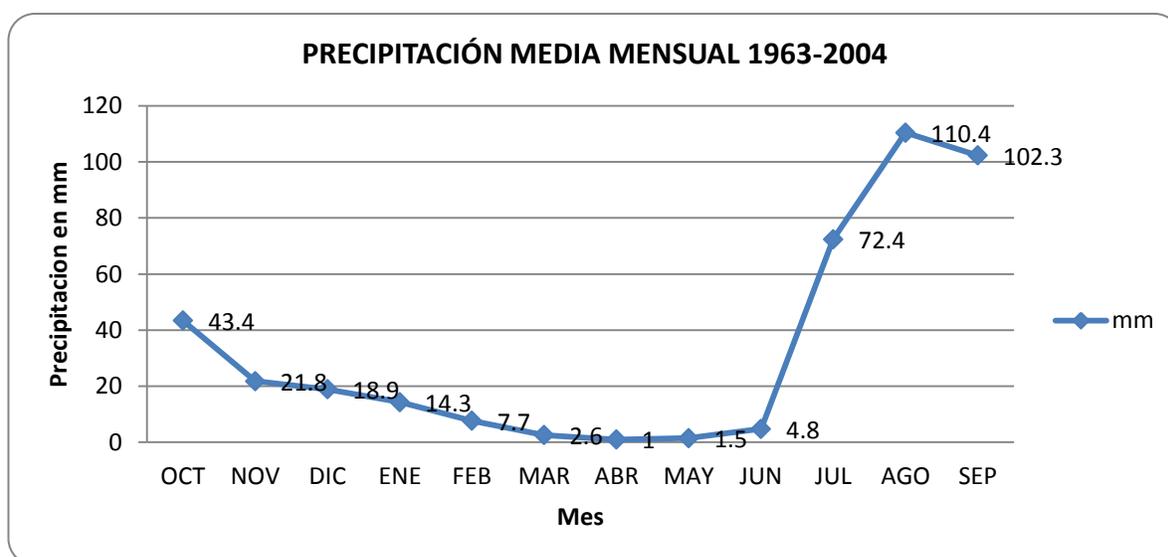


Figura 4.3. Distribución mensual de la precipitación en el Distrito

En cuanto a las temperaturas registradas durante el periodo, correspondientes también a la estación climatológica “Guasave”, se aprecia el siguiente comportamiento:

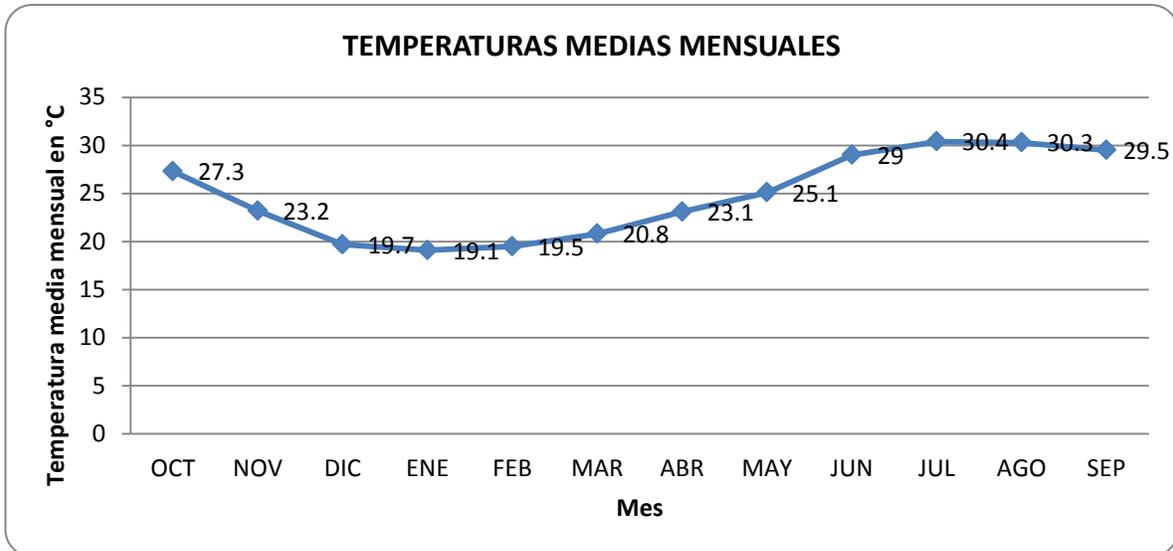


Figura 4.4. Distribución de la temperatura media mensual

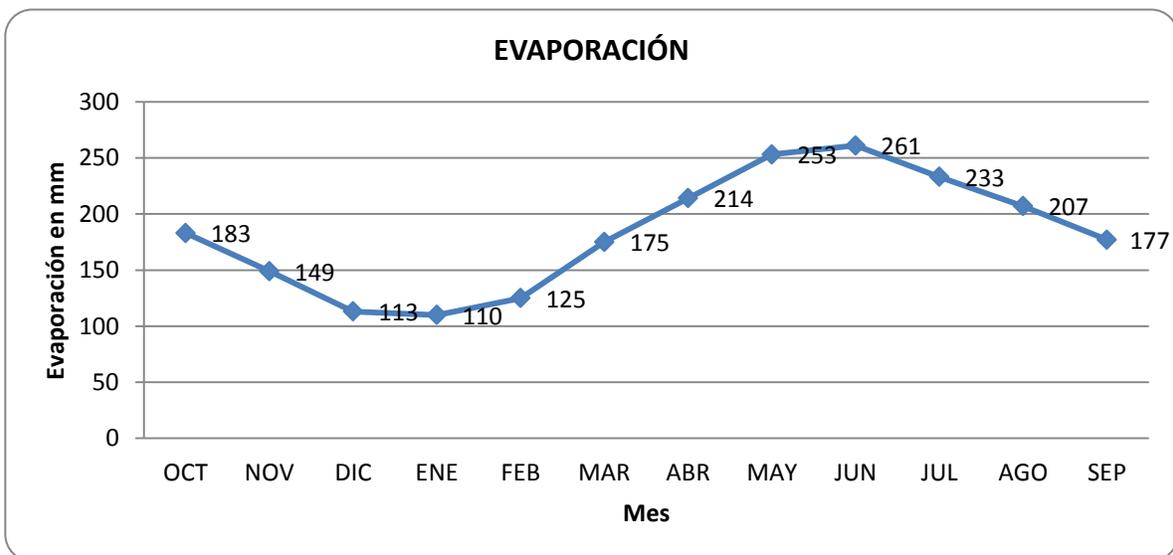


Figura 4.5. Distribución de la evaporación media mensual

Se tienen registradas algunas heladas ocasionales que se presentan en todo los casos solamente durante el invierno, con una periodicidad de tres de cada 10 años. En la siguiente tabla se resumen los números de días que se han registrado en un periodo de 27 años, que va de 1963 a 1990, con la ocurrencia de tal fenómeno meteorológico (Conagua-Colpos, 2005).

Cuadro 4.8. Incidencias de heladas registradas de 1963 a 1990.

MES	OCURRENCIA
Diciembre	2
Enero	2
Febrero	3
Marzo	1
Total Periodo	8

4.1.5. Hidrografía

Durante la década de los 60's la entonces Secretaría de Recursos Hidráulicos realizó la regionalización de las cuencas del país, encontrándose agrupadas en 37 Regiones Hidrológicas, para la realización de estudios hidrológicos y de calidad del agua.

Las Regiones Hidrológico-administrativas están formadas por la agrupación de regiones hidrológicas, conservando municipios completos. En éste caso la Región Hidrológico-Administrativa de interés es la No. III "Pacífico Norte".

Dentro de esta Región Pacífico Norte, el Distrito de Riego No. 063 Guasave, Sin., se encuentra específicamente en la cuenca del Río Sinaloa. Esta cuenca está comprendida a su vez en la Región Hidrológica Número 10, también denominada "Sinaloa".

La región hidrográfica número 10, "Sinaloa", cuenta con una extensión territorial de 10,483 Km² y una precipitación media anual de 729 mm. Considerando el período de 1941 al 2002 y un escurrimiento natural medio superficial interno de 13,915 hm³ (Estadísticas del agua en México; Edición 2004).

La figura 4.5 ilustra la localización de la Región Hidrográfica No. 10, “Sinaloa”; así como su colindancia con otras, en esta parte de la República Mexicana.

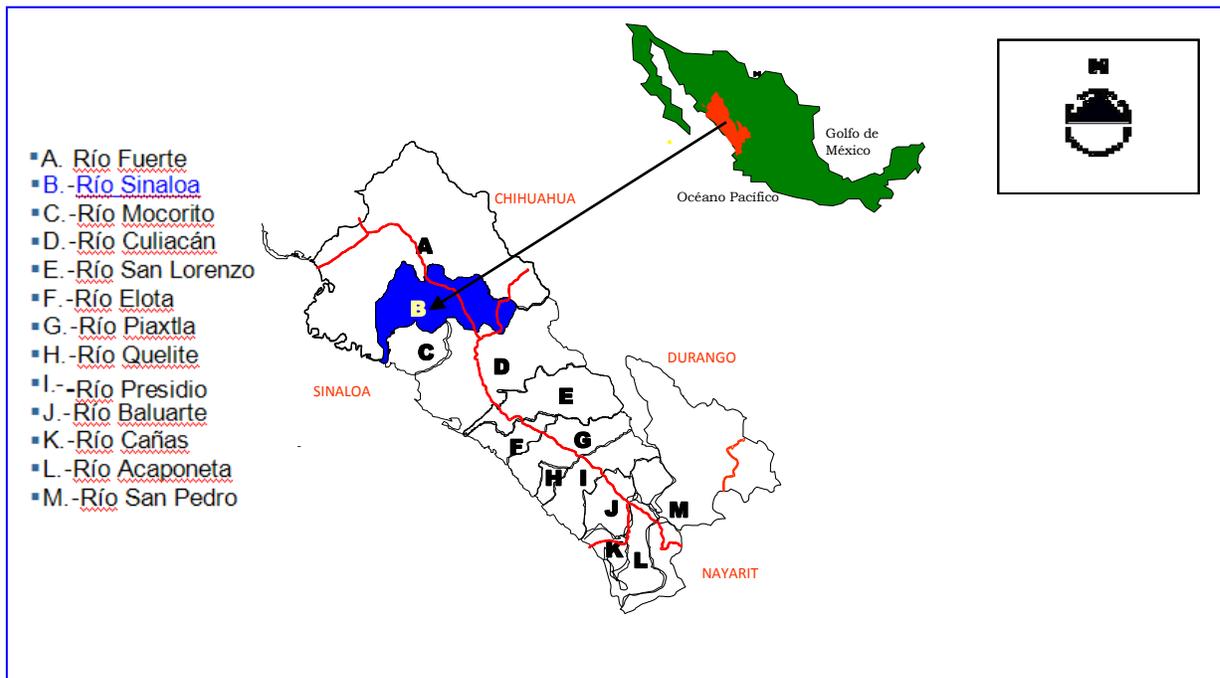


Figura 4.6. Localización de la Región Hidrográfica No. 10

En cuanto a la cuenca en que se ubica el Distrito de Riego 063 Guasave, se tiene que forma parte de la cuenca del Río Sinaloa, la cual colinda por el lado norte con la cuenca del Río fuerte, al oriente con la cuenca del río Culiacán y río Mocorito, la parte inicial del río Sinaloa se ve rodeado por los orígenes del río Fuerte y Culiacán. El recorrido máximo a lo largo del cauce principal del río es de aproximadamente 400 km., y el área total de su cuenca hasta su desembocadura es de 12,678 Km² (ver figura 4.7).



Figura 4.7. Localización del Distrito de Riego No. 063 Guasave, Sin., dentro de la Cuenca del Río Sinaloa

La cuenca de captación del almacenamiento del Río Sinaloa abarca una superficie de 7,549 km², la mayor área de la cuenca se encuentra dentro del Estado de Sinaloa, otra parte en el Estado de Durango y una mínima parte en el Estado de Chihuahua, y la cuenca baja se ubica en el Estado de Sinaloa. El nacimiento del Río Sinaloa lo

constituyen varios torrentes situados al suroeste de la Población Guadalupe y Calvo, Chihuahua. En una serranía llamada Mohinora que alcanza altitudes de unos 2,800 m.s.n.m. La trayectoria inicial de estas fuentes tienen rumbo sur; a unos 26 km de su nacimiento estos afluentes ya se han reunido en una sola corriente conocida como Río Mohinora. La unión del río Mohinora con el río Basonopita da origen al Río Sinaloa, ya que después de esa confluencia empieza la denominación de Río Sinaloa, dado como el efluente principal de esta cuenca. La principal obra hidráulica que se localiza sobre el Río Sinaloa es la Presa de Almacenamiento Gustavo Díaz Ordaz (Bacurato)

La cuenca de captación del almacenamiento de la subcuenca del Arroyo Ocoroni abarca una superficie de 1,450 km², la mayor área de la cuenca se encuentra dentro del Estado de Sinaloa, y una mínima parte en el Estado de Chihuahua, y la cuenca baja se ubica en el Estado de Sinaloa. El afluente más importante del Río Sinaloa, aguas abajo de la presa Gustavo Díaz Ordaz, lo es el Arroyo Ocoroni. El nacimiento de este arroyo lo constituyen varios pequeños afluentes situados al sureste del Municipio de Choix, Sinaloa; en la serranía que limita con el estado de Chihuahua que alcanza altitudes de 1,000 m.s.n.m. La trayectoria inicial de estas fuentes tienen rumbo sur; A su vez los afluentes más relevantes de esta corriente son el arroyo Cofradía y el Talayote, que una vez reunidos en un solo cauce, se le conoce como Arroyo Ocoroni, sobre el cual está construida La Presa de almacenamiento Guillermo Blake Aguilar (El Sabinal).

El Arroyo Ocoroni después de que almacena sus aguas en el vaso de la presa El Sabinal, a la altura de la Ciudad de Guasave (en su parte norte), sigue su trayecto y antes de su desembocadura al Río Sinaloa, a esta corriente también se le unen dos afluentes importantes, el Arroyo Cabrera, y otro conocido como Laguna de Piedra. Dichas corrientes descargan al Arroyo Ocoroni aguas abajo de la presa Guillermo Blake Aguilar, a una distancia de 7 y 11 kilómetros, antes de unirse al Río Sinaloa. Otro afluente importante que descarga al Río Sinaloa, aguas debajo de la presa Gustavo Díaz Ordaz, frente al poblado de Bacubirito es el arroyo que tiene ese mismo nombre; este arroyo no cuenta con ninguna obra de captación y cuando las

lluvias se localizan sobre su cuenca y estas son de buena intensidad genera escurrimientos importantes, los cuales se aprovechan mínimamente y regularmente se descargan al mar.

Es conveniente indicar que estos últimos arroyos a los que se ha hecho mención, no cuentan con obras de aprovechamiento ni de control, teniéndose que, cuando son de consideración los caudales que arrastran en sus avenidas, ya han dañado parte de la infraestructura de riego que opera el Modulo de Riego No. II-1 "Petatlán".

En la siguiente figura se ilustran los ríos, arroyos y corrientes más importantes que conforman en su conjunto la Cuenca Río Sinaloa y la Subcuenca del Arroyo Ocoroni; que son parte el Distrito de Riego, las fuentes de aguas superficiales que actualmente se vienen aprovechando, mediante el uso de la infraestructura hidroagrícola para el riego agrícola y en otros usos, como el uso doméstico principalmente (Conagua-Colpos, 2005).

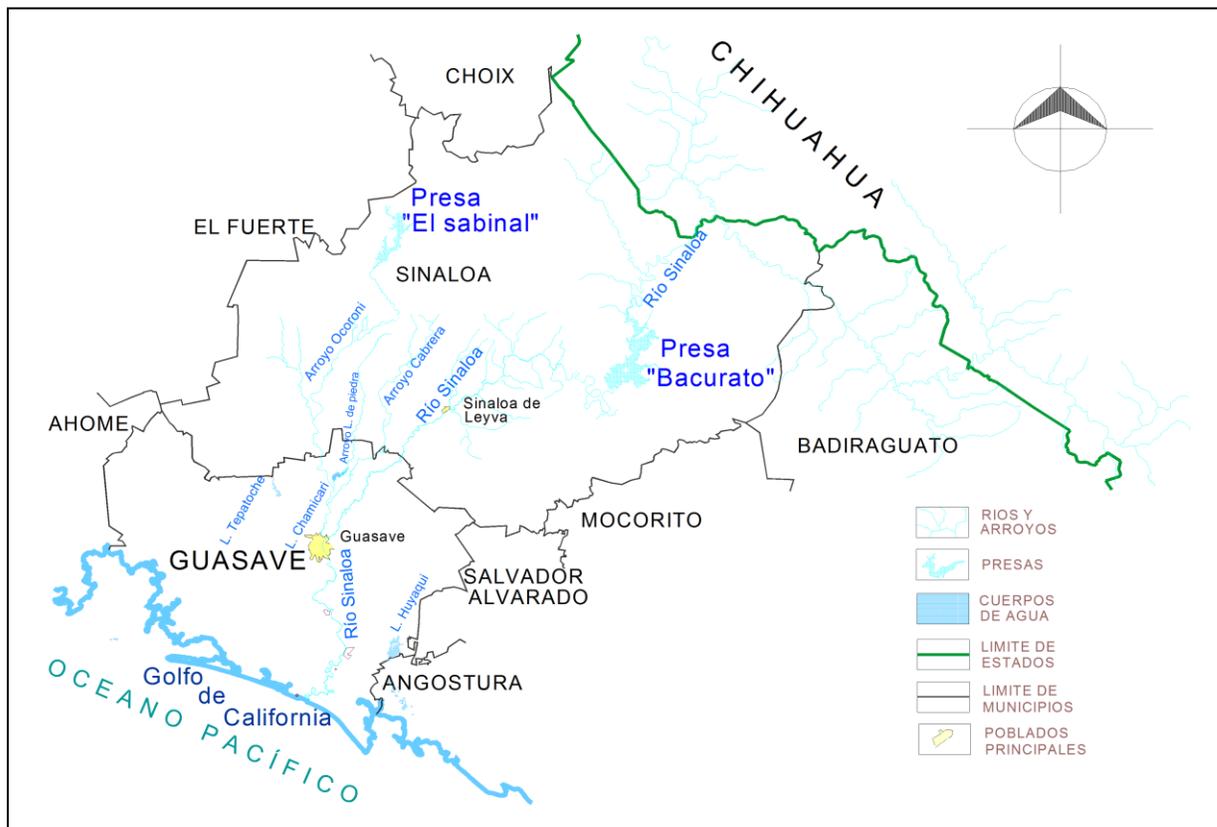


Figura 4.8. Localización de ríos, arroyos y corrientes más importantes de la Cuenca Río Sinaloa y la Subcuenca del Arroyo Ocoroni

4.1.6. Vegetación

La vegetación original de la zona pertenece a la selva baja caducifolia, que se caracteriza porque todos o la mayoría de los árboles tiran sus hojas en la temporada de secas. Presentan numerosas variantes y abundan las especies de leguminosas espinosas y en menor escala las cactáceas y burseráceas. Esta vegetación que se describe con anterioridad, con el paso del tiempo fue sustituida paulatinamente al realizar los desmontes agrícolas para dar paso a la agricultura de riego.

Todos los suelos del Distrito actualmente se encuentran desmontados y en plena explotación agrícola; sin embargo, en la actualidad siempre persiste cierto tipo de vegetación de las especies descritas como las que se detallan en el cuadro 4.9.

Cuadro 4.9. Vegetación predominante en el Distrito de Riego 063 Guasave

Nombre común	Nombre Técnico	Familia
Guamúchil	Pítesellobium Dulce	Leguminosa
Mezquite	Prosopis Juliflora	Leguminosa
Huinolo	Acacia Macrocantha	Leguminosa
Palo Colorado	Genipa Onblongifolia	Rubiáceas
Pitahaya	Heliocereus Undatus	Cactáceas

Estas especies que aún persisten de manera diseminada en el área del distrito que actualmente se destina a la agricultura bajo riego, se encuentran principalmente en forma colindante con los canales, drenes, caminos vecinales y carreteras. También los podemos encontrar en terrenos baldíos de zonas urbanas, rurales y campos agrícolas (Conagua-Colpos, 2005).

4.6.7. Rendimientos históricos promedios de Maíz en el DR063 Guasave

Cuadro 4.10. Rendimientos históricos promedios de maíz en el DR063 Guasave

Ciclo Agrícola	Superficie (ha)		Rendimiento
	Sembrada	Cosechada	(ton ha ⁻¹)
2002-2003	37,586	37,586	8.7
2003-2004	66,039	66,029	9.4
2004-2005	64,881	64,869	10.4
2005-2006	62,906	62,686	9.6
2006-2007	72,259	72,253	9.7
2007-2008	74,729	74,729	10.2
2008-2009	68,206	68,205	9.6
2009-2010	65,823	65,822	10.2
2010-2011	72,709	339	6.4
PROMEDIO	64,053	64,022	9.7

Fuente: Jefatura de Operación del DR063 Guasave

En el cuadro 4.10 se pueden observar los rendimientos promedios del Distrito de Riego 063 Guasave de los últimos 9 años, donde el promedio general del periodo es de 9.7 ton ha⁻¹, también se hace evidente que el fenómeno de las heladas registradas en febrero de 2011 disminuyó notoriamente el rendimiento promedio a 6.4 ton ha⁻¹.

4.2. MATERIALES

4.2.1. Información climatológica

Se obtuvo información climatológica a nivel diario, correspondiente a la temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación del programa ERIC III elaborado por el IMTA (2006). Se seleccionaron 5 estaciones (ver figura 4.8) con registros mayores a 10 años cubriendo el área de influencia del Distrito de Riego 063 Guasave.

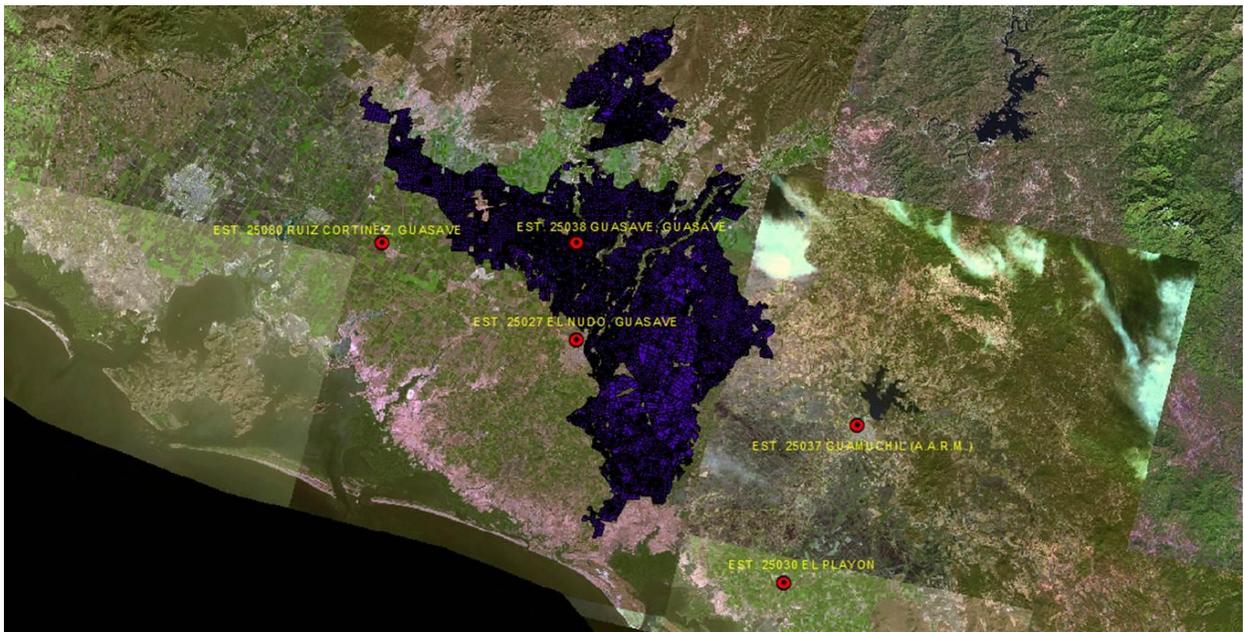


Figura 4.9. Estaciones seleccionadas de ERIC con registros históricos mayores de 10 años

4.2.2. Software utilizado

- ✓ Microsoft Excel 2010
- ✓ LARS-WG v5
- ✓ RefET v3.1
- ✓ Hybrid Maize v2006
- ✓ ArcView 3.2
- ✓ Microsoft Word 2010

4.3. MÉTODOS

- i. Se seleccionaron cinco estaciones climatológicas, la selección basó en la cantidad y periodicidad de los datos, así como su distribución espacial a lo largo de toda el área de estudio.
- ii. Se procesaron los datos de temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación en el programa de computo Lars-WG v5 para generar una serie sintética de 100 años para cada estación climatológica. Dicha serie es similar estadísticamente a la información de los registros medidos (ver figura 4.10).

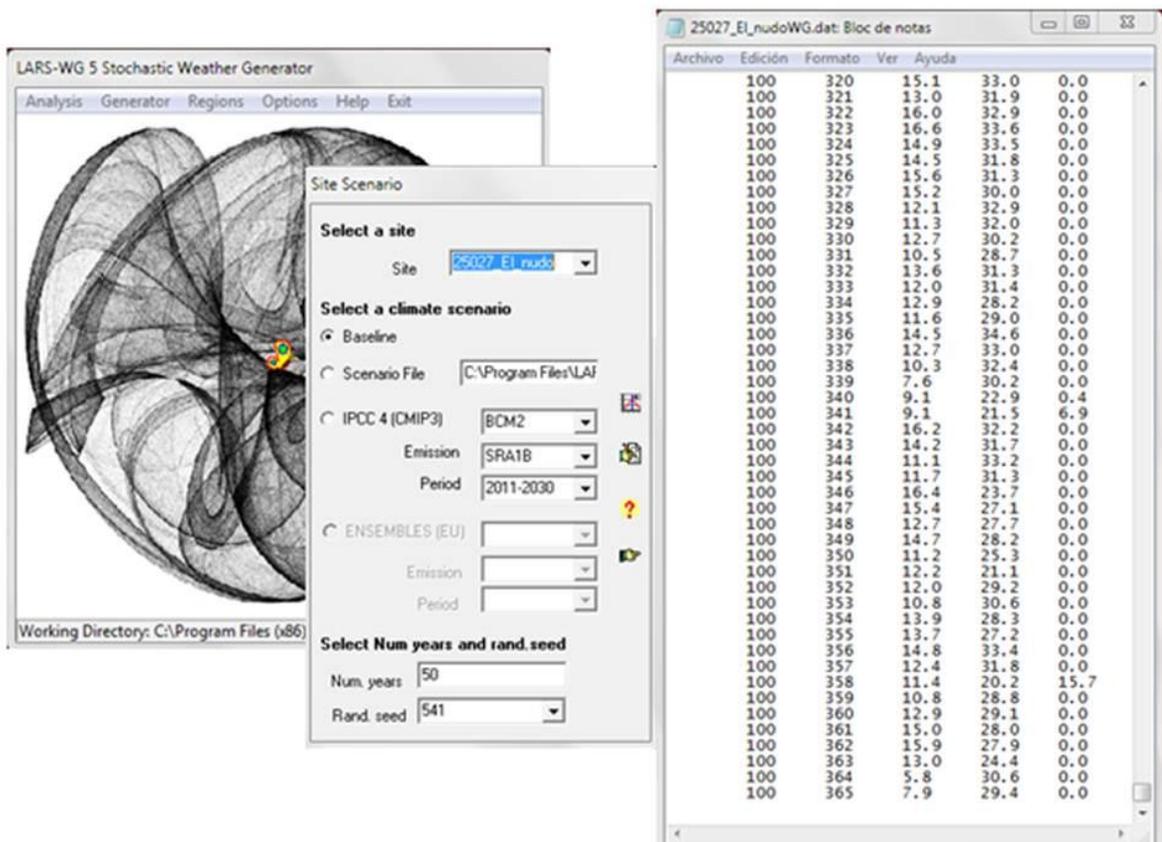


Figura 4.10. Generación de la serie sintética de la estación 25027 El Nudo, Guasave.

- iii. La estimación de la evapotranspiración utilizando el método de Penman Monteith requiere de las variables de temperatura máxima, temperatura mínima, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento. Sin embargo las ultimas tres variables no se tienen en la base de datos climatológica por lo que se probaron métodos para estimarlas. Se calcularon las constantes para estimar radiación solar y humedad relativa con datos medidos de la estación meteorológica automatizada Buaysiacobe de la red de Agroson (en línea 4).
- iv. Se introdujeron en el programa de computo Ref-ET v3.1 las series sintéticas generadas para estimar la ET_0 y la radiación solar, utilizando las constantes obtenidas en el paso anterior, usando la forma estandarizada por la ASCE de la ecuación Penman-Monteith (ver figura 4.11)

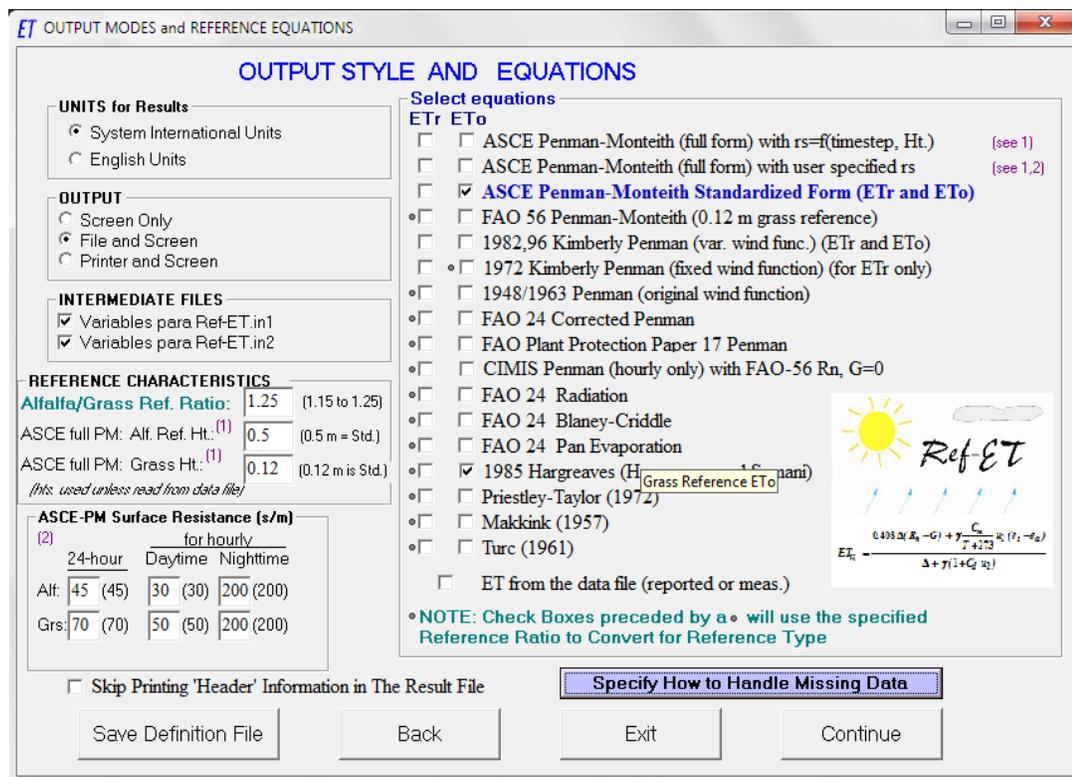


Figura 4.11. Estimación de la ET_0 para la estación climatológica 25027 El Nudo, Guasave.

- v. Se usó el programa Hybrid-Maize v2006 para estimar el rendimiento potencial del maíz para cada una de las cinco estaciones climatológicas utilizando fechas de siembra que van desde el 01 de octubre hasta el 16 de marzo (ver figura 4.12).

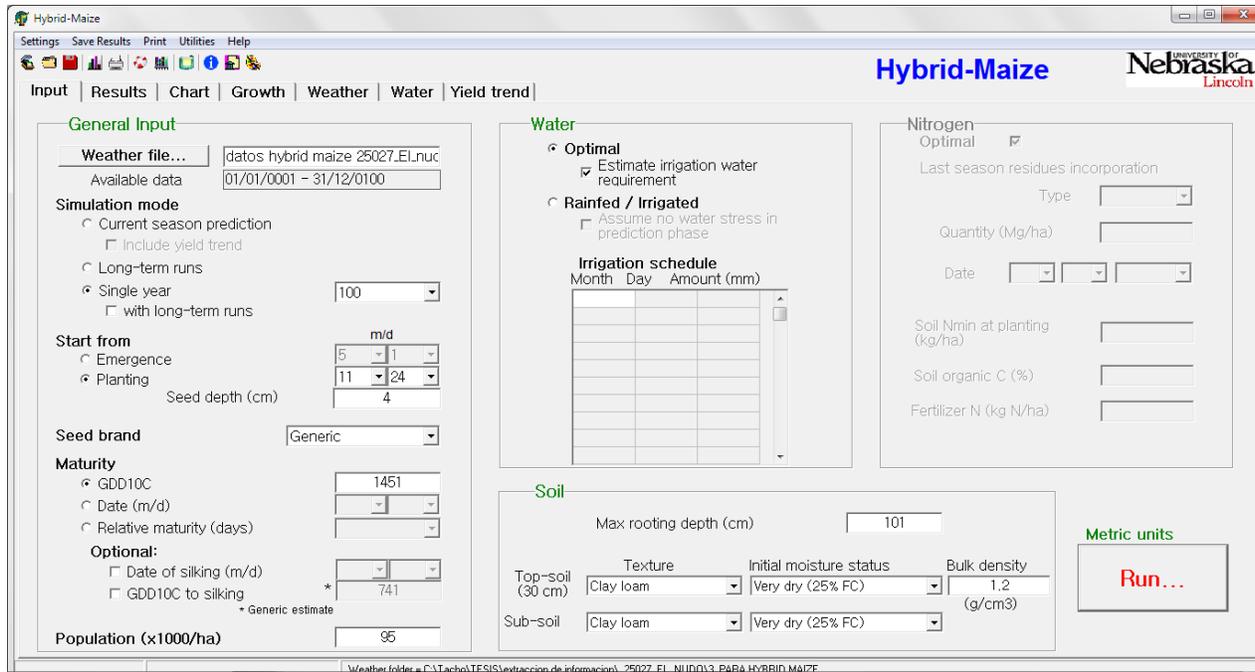


Figura 4.12. Cálculo del rendimiento potencial del maíz para la estación climatológica 25027 El Nudo, Guasave.

5. RESULTADOS

5.1. CÁLCULO DE LAS CONSTANTES PARA ESTIMAR RADIACION SOLAR, LA TEMPERATURA DEL PUNTO DE ROCÍO Y LA VELOCIDAD DEL VIENTO.

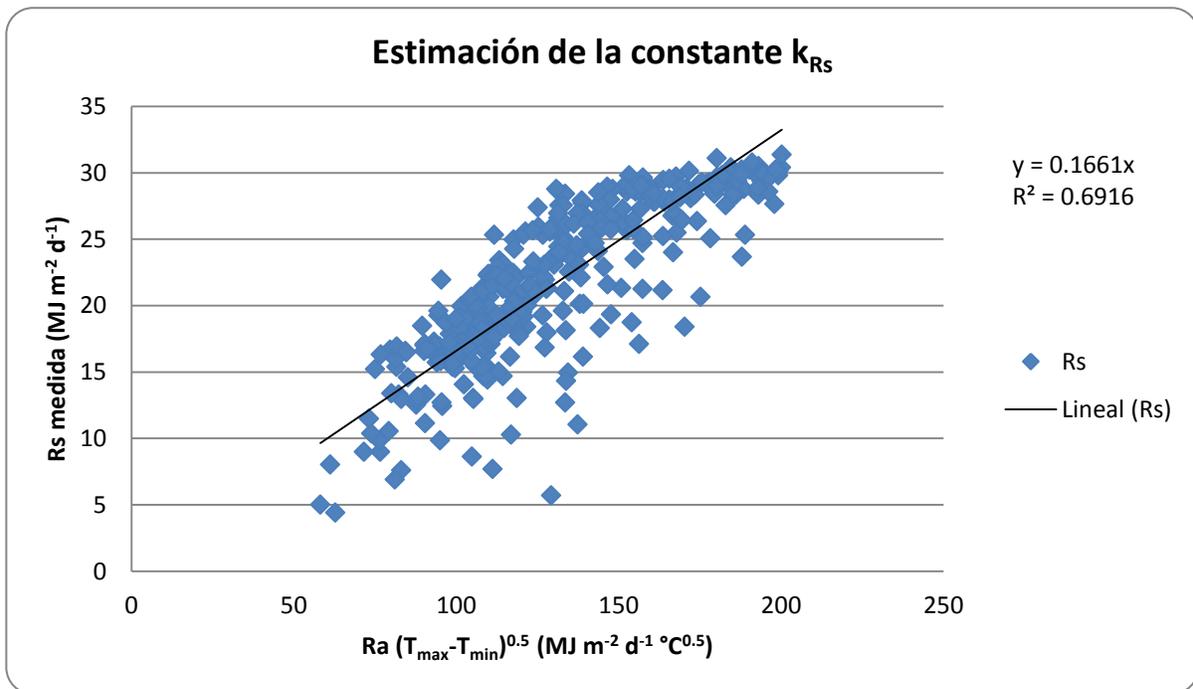


Figura 5.1. Estimación de la constante k_{Rs} para el cálculo de Radiación Solar

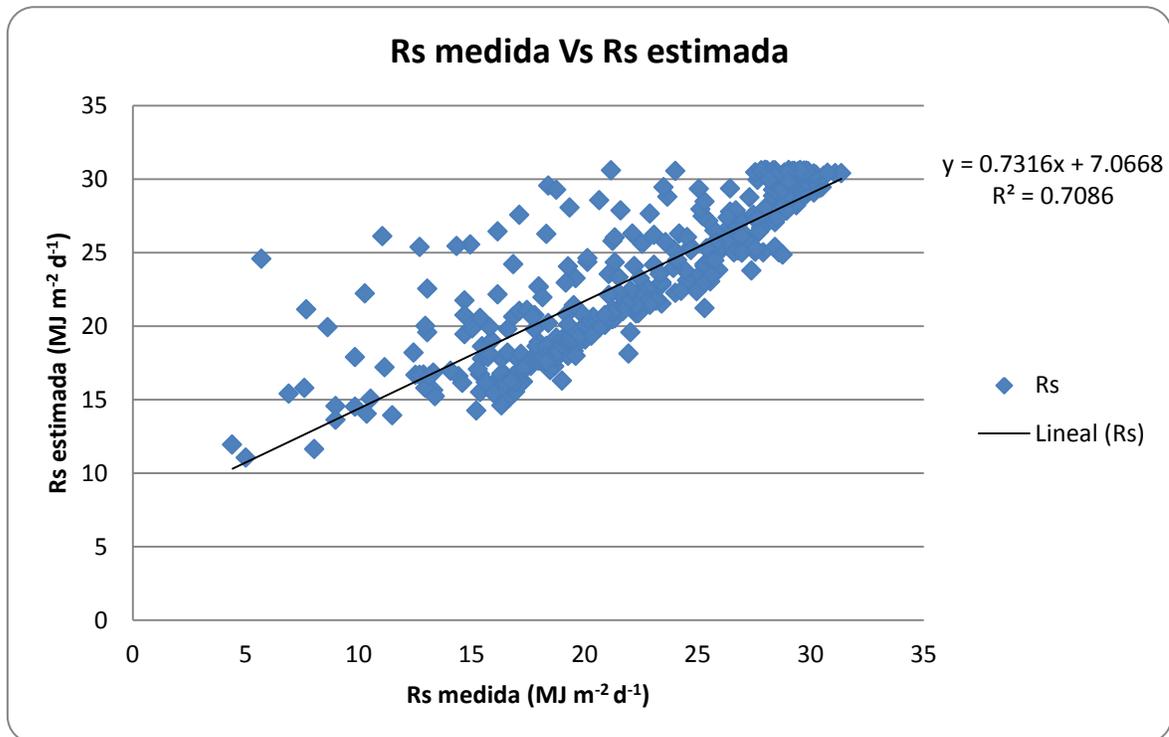


Figura 5.2. Comportamiento de la radiación solar medida y estimada

Para el cálculo del coeficiente k_{Rs} de radiación solar se procedió a graficar la radiación solar medida con los datos calculados con la fórmula de Hargreaves y Samani:

$$R_s = k_{Rs} \sqrt{T_{max} - T_{min}} R_a$$

Donde:

R_s = Radiación solar, en $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$

k_{Rs} = Coeficiente de ajuste, en $(0.16..0.19)$ en $^{\circ}\text{C}^{0.5}$

T_{max} = Temperatura máxima del aire, en $^{\circ}\text{C}$

T_{min} = Temperatura mínima del aire, en $^{\circ}\text{C}$

R_a = Radiación extraterrestre $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$

Encontrando con ello el valor de $k_{RS}=0.1661$ como se muestra en la figura 5.1, lo cual se apega a lo recomendado por Samani, 2000.

Para estimar las constantes de radiación solar y temperatura del punto de rocío, se comparó tanto la radiación solar medida en la estación meteorológica automatizada Buaysiacobe de la red de Agrosón (en línea 4), con la radiación solar estimada con el programa Ref-ET, en base a la temperatura máxima y temperatura mínima. En la figura 5.2 se puede observar que los datos de radiación tienden a una línea recta con una $R^2 = 0.7$.

Para la estimación de la ecuación de la temperatura del punto de rocío se procedió a graficar la temperatura mínima observada contra la temperatura del punto de rocío observada de la estación meteorológica automatizada de Buaysiacobe (ver figura 5.3). Encontrando la ecuación: $T_{dew} = 0.7673T_{min} + 2.01$, con la cual se estimó la temperatura del punto de rocío para las series sintéticas generadas con el software de LARS-WG v5.

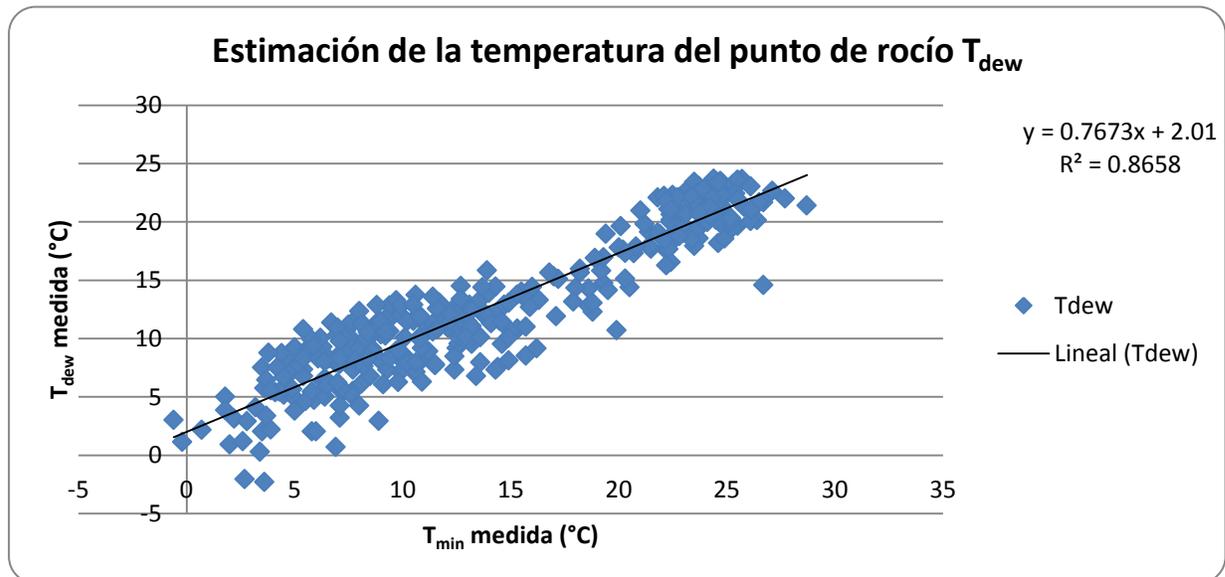


Figura 5.3. Estimación de la ecuación para calcular la temperatura del punto de rocío.

Para la velocidad de viento se tomó la velocidad de viento promedio de los datos medidos de la estación meteorológica automatizada Buaysiacobe, la cual fue de 1.3 m/s como lo recomienda Allen, 2001.

5.2. VALIDACIÓN DEL MODELO HYBRID MAIZE

En cuanto a la validación del modelo Hybrid Maize se utilizaron datos de la Estación Meteorológica Automatizada Santa Rosa de la Red Nacional de Estaciones Estatales Agroclimatológicas del INIFAP (en línea 5) por ser la estación mas cercana al lugar de experimento de Ojeda *et al.*, 2006, la cual se sembró el 24 de noviembre del año 2003, en el cual se obtuvo un rendimiento de 10.8 ton ha⁻¹ al 13.7% de humedad y, el modelo estima un rendimiento de 11.97 ton ha⁻¹ al 13.7% de humedad. Debido a los datos anteriores se puede decir que el modelo sobrestima en 11.9% el rendimiento normal (con las prácticas de manejo convencionales de la zona agrícola) ya que incluso el cultivo de maíz establecido en la parcela demostrativa del estudio de Ojeda *et al.*, 2006 con la que se validó el presente trabajo sufrió estrés hídrico en el desarrollo de su ciclo vegetativo como se puede observar en la figura 5.4.

Es importante mencionar que para llevar a cabo el proceso de validación, se introdujeron en el modelo parámetros tales como densidad de siembra, grados días a jiloteo, grados días a madurez, riegos y láminas aplicadas, T_{max} , T_{min} , precipitación, ET_0 , así como capacidad de campo del suelo, punto de marchitez permanente, textura del suelo y estado inicial de humedad del suelo. Dicha información fue obtenida del experimento reportado por Ojeda *et al.*, 2006 como se mencionó anteriormente.

En cuanto a la validación de los requerimientos hídricos netos del cultivo, el modelo estima 413 mm mientras que Ojeda *et al.*, 2006 reportan 440 mm medido en campo por el método de Bowen, por lo que se puede decir que el modelo subestima en 6.1% el requerimiento hídrico del maíz aplicando los riegos de manera convencional para la zona de estudio.

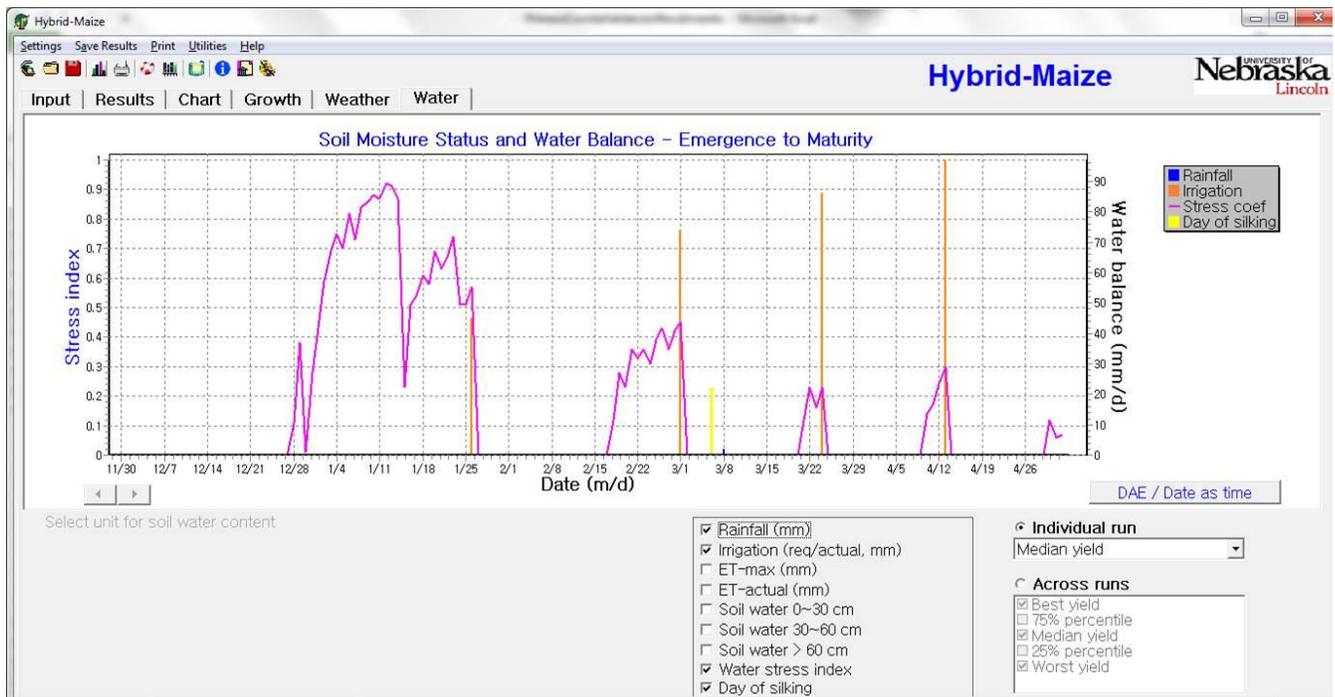


Figura 5.4. Índice de estrés hídrico de la planta sufrido durante el experimento de Ojeda *et al.*, 2006

5.3. CALCULO DEL RENDIMIENTO POTENCIAL DEL MAÍZ UTILIZANDO EL PROGRAMA HYBRID MAIZE

Se procedió al cálculo del rendimiento potencial del maíz en cada una de las cinco estaciones climatológicas seleccionadas utilizando el programa de cómputo Hybrid Maize, seleccionando diferentes fechas de siembra (ver figura 5.5 y cuadro 5.1).

En la figura 5.5 y el cuadro 5.1 se aprecian los rendimientos potenciales de maíz para cada estación climatológica trabajada en el área de estudio. Dichos rendimientos representan el rendimiento promedio estimado para cada uno de los 100 años de la serie sintética de cada una de las estaciones.

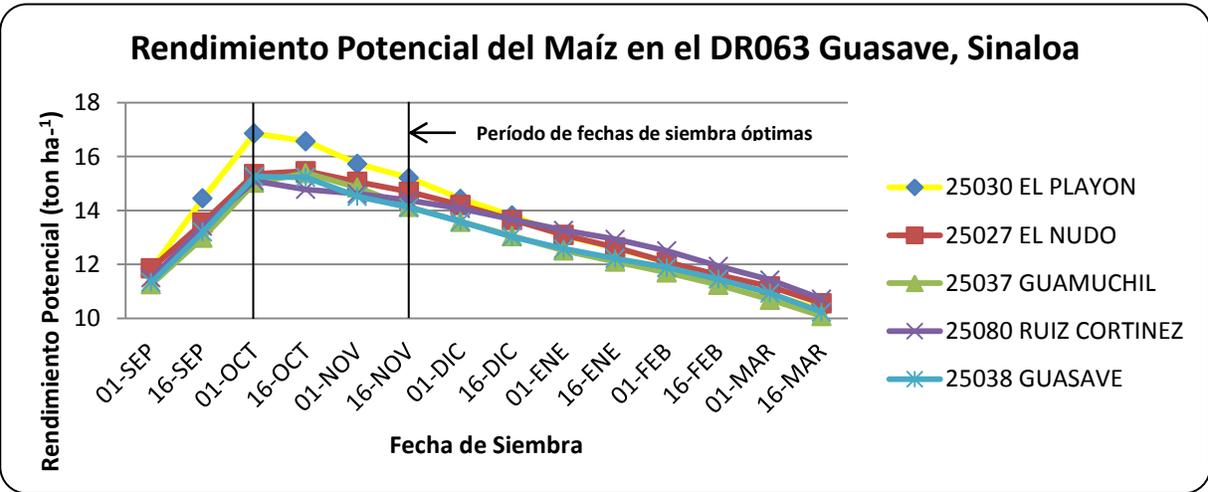


Figura 5.5. Rendimiento potencial del maíz para cada estación climatológica seleccionada.

Cuadro 5.1. Rendimiento potencial del maíz para cada estación climatológica seleccionada.

RENDIMIENTO POTENCIAL DE MAIZ (ton ha ⁻¹) EN EL DR063 GUASAVE, SINALOA														
ESTACION CLIMATOLOGICA	FECHA DE SIEMBRA													
	01-SEP	16-SEP	01-OCT	16-OCT	01-NOV	16-NOV	01-DIC	16-DIC	01-ENE	16-ENE	01-FEB	16-FEB	01-MAR	16-MAR
25030 EL PLAYON	11.83	14.45	16.86	16.57	15.73	15.21	14.43	13.81	13.07	12.6	12.07	11.46	10.88	10.33
25027 EL NUDO	11.85	13.55	15.35	15.46	15.06	14.69	14.2	13.65	13.09	12.63	12.09	11.6	11.18	10.55
25037 GUAMUCHIL	11.26	12.99	15.03	15.39	14.85	14.13	13.58	13.05	12.51	12.1	11.7	11.24	10.69	10.08
25080 RUIZ CORTINEZ	11.5	13.41	15.1	14.78	14.62	14.38	14.07	13.67	13.26	12.93	12.5	11.93	11.42	10.71
25038 GUASAVE	11.33	13.2	15.26	15.23	14.52	14.11	13.58	13.02	12.58	12.22	11.88	11.45	10.93	10.23
PROMEDIO	11.55	13.52	15.52	15.49	14.96	14.5	13.97	13.44	12.9	12.5	12.05	11.54	11.02	10.38

Cabe señalar que estos rendimientos potenciales de maíz son considerando el contenido de humedad del grano al 15.5% y condiciones óptimas para su desarrollo del cultivo, es decir, una vez establecido el cultivo de maíz nunca va a sufrir por estrés hídrico, ni plagas y enfermedades y nunca le harán falta los nutrientes necesarios para su desarrollo. Si este rendimiento potencial promedio de 15.52 ton ha⁻¹ sembrando el 01 de octubre (ver cuadro 5.1) se ajusta al 13.7% de humedad del grano (valor típico de la zona de estudio) da un valor de 13.72 ton ha⁻¹ que comparado con la media histórica del Distrito de Riego de 9.7 ton ha⁻¹ (ver cuadro 4.10) existe un margen de 29.29% para incrementar los rendimientos con un mejor manejo de cultivo. Cabe mencionar que el rendimiento potencial para el 01 de

octubre de 13.72 ton ha⁻¹ representa el promedio de 500 simulaciones realizadas por el modelo para esa fecha.

Por lo tanto, de la figura 5.5 y el cuadro 5.1 se puede obtener el promedio de rendimiento potencial para la fecha de siembra en la que se logra obtener el mejor rendimiento, que en este caso fue de 15.52 ton ha⁻¹ al 15.5% de humedad de grano para la fecha de siembra 01 de octubre, recalcando que esto concuerda con Ojeda *et al.*, 2006 quien menciona que el periodo típico de siembra en el norte de Sinaloa va de mediados de octubre al 20 de noviembre.

5.4. ESTIMACION DE LOS REQUERIMIENTOS HIDRICOS DEL MAIZ PARA DIFERENTES FECHAS DE SIEMBRA

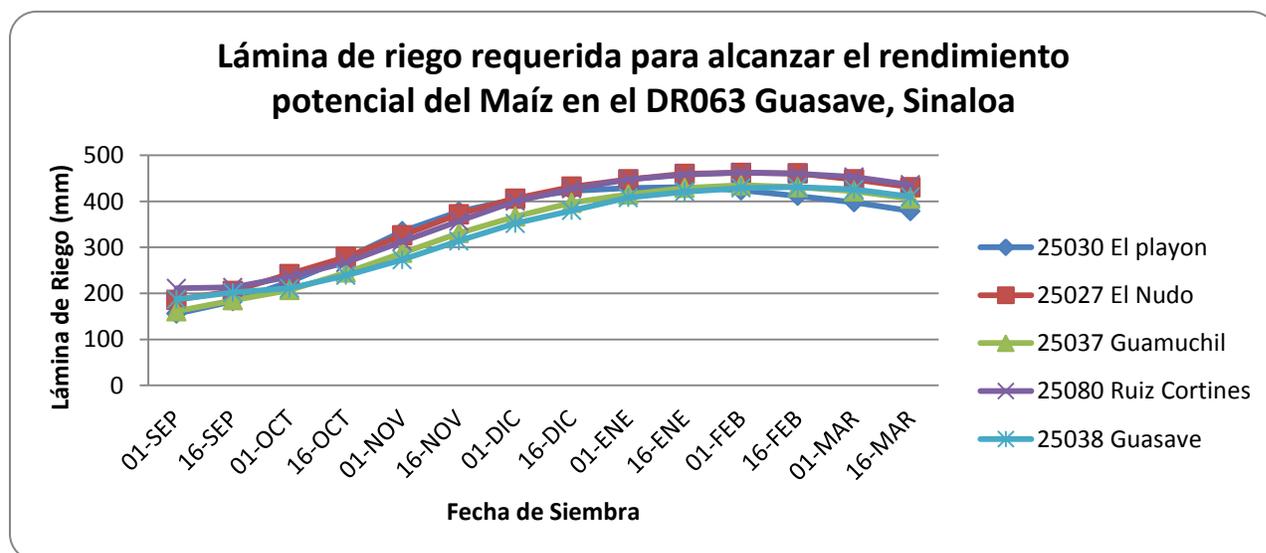


Figura 5.6. Lámina de riego requerida para alcanzar el rendimiento potencial del maíz en el DR063 Guasave, Sinaloa

Cuadro 5.2. Lámina de riego requerida para alcanzar el rendimiento potencial del maíz en el DR063 Guasave, Sinaloa

LAMINA DE RIEGO (mm) NECESARIA PARA ALCANZAR EL RENDIMIENTO POTENCIAL DEL MAIZ EN EL DR063 GUASAVE, SINALOA														
ESTACION CLIMATOLOGICA	LAMINA DE RIEGO EN mm, EN FUNCION DE LA FECHA DE SIEMBRA													
	01-SEP	16-SEP	01-OCT	16-OCT	01-NOV	16-NOV	01-DIC	16-DIC	01-ENE	16-ENE	01-FEB	16-FEB	01-MAR	16-MAR
25030 EL PLAYON	156	183	225	276	335	378	405	423	429	431	424	412	398	379
25027 EL NUDO	186	205	242	279	326	372	406	432	448	460	462	461	448	431
25037 GUAMUCHIL	161	185	207	245	288	331	367	397	415	429	435	431	422	406
25080 RUIZ CORTINEZ	211	213	236	267	313	357	400	427	448	458	463	460	453	436
25038 GUASAVE	187	202	211	239	273	314	352	380	408	421	429	431	426	410
PROMEDIO	180.2	197.6	224.2	261.2	307	350.4	386	411.8	429.6	439.8	442.6	439	429.4	412.4

En la figura 5.6 y cuadro 5.2 se puede observar que para la fecha de siembra 01 de octubre (fecha en la que se obtiene el rendimiento potencial mas alto, ver figura 5.5) se requiere una lámina de riego de 224.2 mm y para el 24 de noviembre (fecha de siembra del trabajo de Ojeda *et al.*, 2006) se requiere 370.2 mm, recordando que son requerimientos hídrico óptimos.

En la figura 5.6 se puede observar como varían los requerimientos hídricos del cultivo dependiendo de la fecha de siembra, para las fechas de siembra del 01 de octubre al 16 de marzo los requerimientos hídricos varían de 180 mm hasta 442 mm respectivamente. Es importante mencionar que con esta información se puede seleccionar la fecha de siembra que presente el mejor rendimiento potencial así como la mejor eficiencia en el uso del agua.

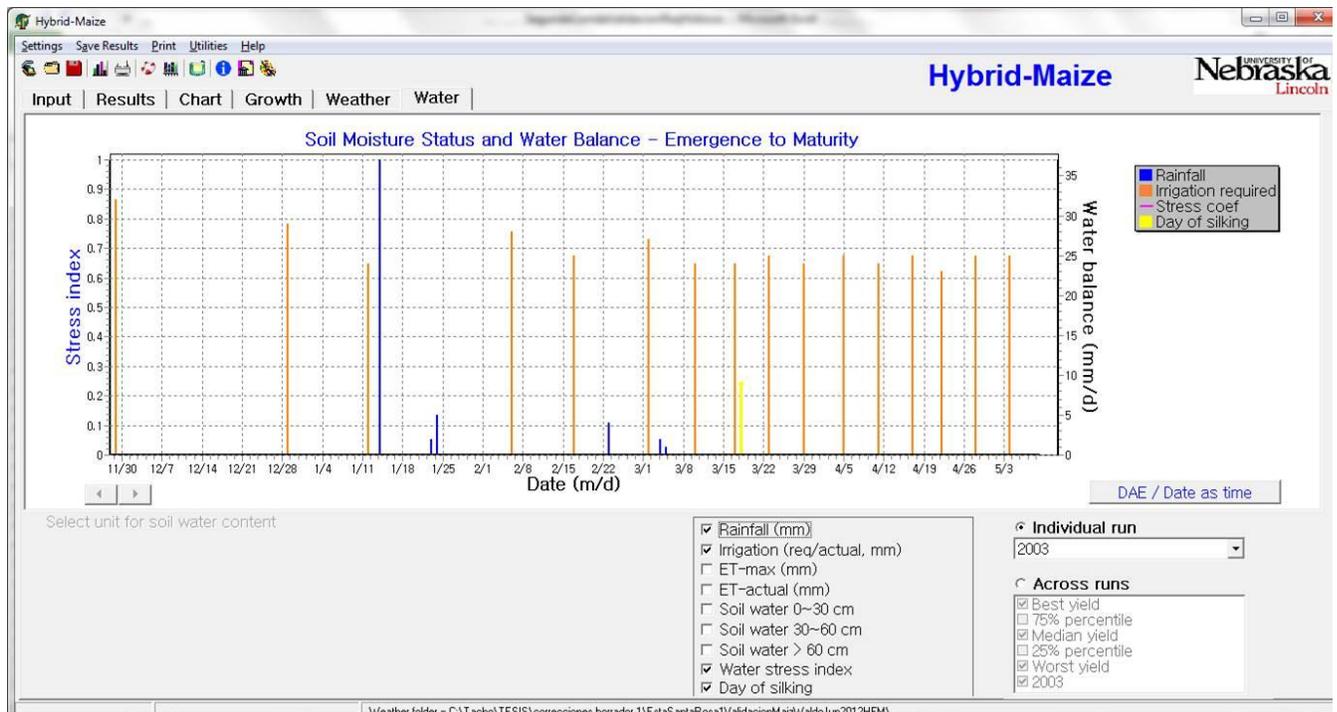


Figura 5.7. Calendario de riego idóneo para alcanzar el rendimiento potencial del Maíz en el DR063 Guasave sembrando el 24 de noviembre

En la figura 5.7 se presenta el calendario de riego idóneo para alcanzar el rendimiento potencial del Maíz en el DR063 Guasave para la fecha de siembra de Ojeda *et al.*, 2006, pudiéndose observar que no se llegaría a estresar el cultivo de Maíz aplicando una lámina de riego de 413 mm.

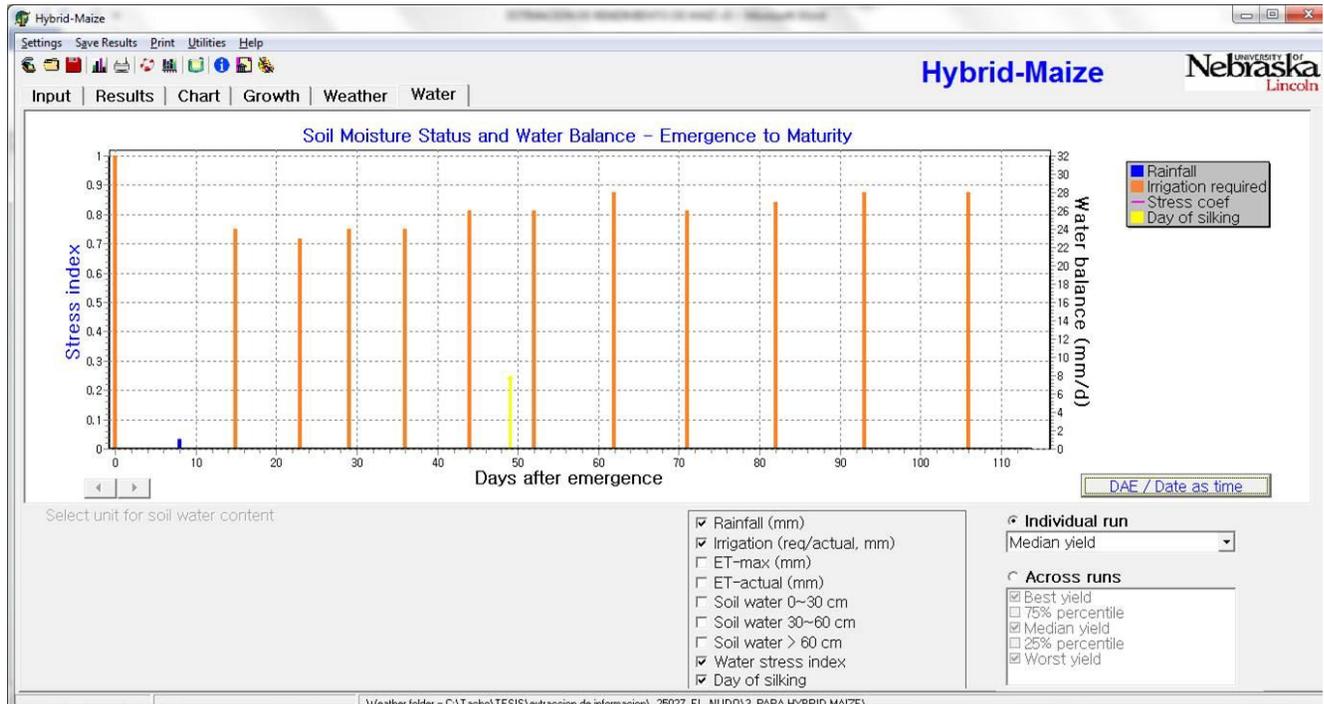


Figura 5.8. Calendario de Riego idóneo para lograr el rendimiento potencial de Maíz en el DR063 Guasave sembrando el 01 de octubre

En la figura 5.8 se presenta el calendario de riego idóneo para alcanzar el rendimiento potencial del Maíz en el DR063 Guasave para la fecha de siembra 01 de octubre (fecha en la que se encontró el máximo de 15.52 ton ha⁻¹) aplicando una lámina de riego de 242 mm. Cabe mencionar que esta aplicación de riego solo puede ser posible por algún método de riego presurizado como pivote central o riego por goteo.

5.5. IMPACTO EN EL RENDIMIENTO DE MAÍZ DEBIDO A LA RESIEMBRA REALIZADA EN MARZO DE 2011

En la figura 5.9 se puede observar que el rendimiento potencial promedio de maíz para la fecha de siembra del 16 de marzo es de $10.38 \text{ ton ha}^{-1}$, que bajando el contenido de humedad al 13.7 (que es lo usual en la zona) nos da un rendimiento potencial de 9.17 ton ha^{-1} . Si al dato anterior le restamos el 29.29% (para obtener el rendimiento normal, ver apartado 5.3) resultaría 6.48 ton ha^{-1} , muy cercano al rendimiento promedio obtenido en el ciclo agrícola 2010-2011 que fue de 6.4 ton ha^{-1} de acuerdo a lo reportado por la Jefatura de Operación del Distrito de Riego 063 Guasave (ver cuadro 4.10). Por lo tanto, de acuerdo al modelo el rendimiento promedio de la zona se vio disminuido en un 34%.

Es importante mencionar la utilidad de conocer el rendimiento potencial para tomar decisiones de manejo del cultivo, por ejemplo, para el caso particular de la resiembra del 16 de marzo, si se hubiera contado con la información de que el rendimiento potencial disminuiría en un 34%, en la misma cantidad se hubiera reducido las dosis de aplicación de fertilizantes, por ejemplo para el caso del maíz en Sinaloa se recomienda aplicar 350 kg de N, para un rendimiento de 10 ton ha^{-1} , por lo que en este caso se hubieran aplicado solo 231 kg de N representando un ahorro de 119 kg de N que multiplicado por las 70,000 ha de maíz que se siembran en el Distrito de Riego se hubieran ahorrado alrededor de 8,380 ton de N. Así mismo se tendrían que ajustar las necesidades hídricas del cultivo para obtener el rendimiento potencial para la fecha de la resiembra, en este caso 412 mm.

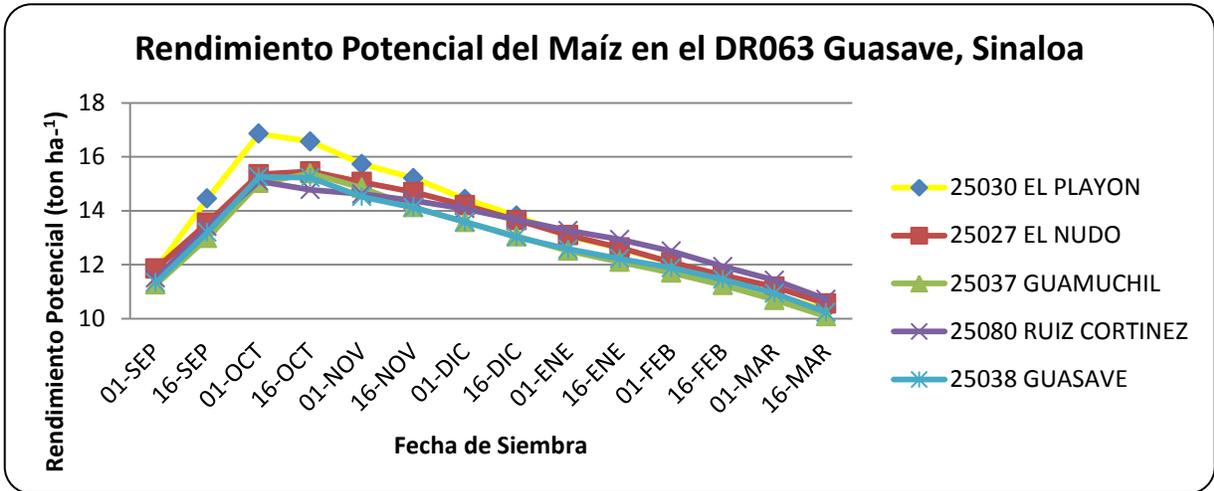


Figura 5.9. Rendimiento potencial de maíz en el DR063 Guasave, Sinaloa.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede llegar a la conclusión que los métodos utilizados para la estimación de la radiación solar y la temperatura del punto de rocío son muy buenas aproximaciones a la realidad ya que las simulaciones de crecimiento y rendimiento del maíz fueron muy similares a las obtenidas con el experimento de Ojeda *et al.*, 2006.

El rendimiento potencial de maíz promedio para el Distrito de Riego 063 Guasave puede alcanzar las 15.52 ton ha⁻¹ al 15.5% o 13.72 ton ha⁻¹ al 13.7% de humedad del grano.

El período de siembra ideal para alcanzar los máximos rendimientos potenciales de maíz en el Distrito de Riego 063 Guasave, Sinaloa va desde el 01 de octubre al 16 de noviembre.

Los requerimientos hídricos para el período de siembra óptimo antes mencionado oscila entre los 224.2 y 350.4 mm

A consecuencia del fenómeno de la helada registrada en febrero de 2011, generalizada en prácticamente todo el estado y las resiembras realizadas en marzo de 2011, se puede concluir que los rendimientos disminuyeron en un 24%, disminución que puede ser pronosticada con el uso de este tipo de herramienta.

Se puede concluir que en general el rendimiento potencial del maíz en el Distrito de Riego 063 Guasave, Sinaloa es de un 29.29% superior a los rendimientos actuales que se cosechan por lo que hay un margen para incrementar los rendimientos del Distrito si se lleva a cabo un mejor manejo del cultivo.

7.2. RECOMENDACIONES

Los datos obtenidos en el presente trabajo son para el área bajo riego que domina el Distrito de Riego 063 Guasave, Sinaloa, aunque también se pueden extrapolar para los distritos de riego vecinos.

Es conveniente que este trabajo de investigación sea complementado en años posteriores con datos medidos de suelo y dosis de fertilización, que según los autores del programa Hybyd-Maize esta próximo a salir la versión del programa con estos nuevos módulos.

Realizar experimentos en campo que permitan validar y recalibrar algunos parámetros del modelo para los híbridos utilizados en la región de estudio.

Realizar simulación de crecimiento del cultivo y rendimiento para una estación de crecimiento en tiempo real con información climática medida en tiempo real.

Es necesario probar otras bondades del modelo como lo es el análisis del uso de híbridos de diferente duración para evaluar la posibilidad de usar híbridos de ciclo corto por ejemplo.

El modelo también puede ser utilizado en la evaluación de diferentes densidades de siembra.

El programa Hybrid Maize es una herramienta que se puede utilizar en la evaluación de la introducción de nuevas variedades a una región o en la planeación de realizar riegos deficitarios para disminuir en lo mayor posible los impactos en el rendimiento de cultivo bajo condiciones de escasez de agua.

7. LITERATURA CITADA

- Aguirre, R. J. A. 2007. *Relaciones intensidad – duración – frecuencia de la precipitación en la ciudad de México*. Tesis profesional. Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Ahuja, L.R; Hanson, J.D; Rojas, K.W; Shaffer, M.J. 2000. *Modeling management effects on water quality and crop production*. Water Resour. Publ., LLC, Highlands Ranch, CO.
- Allen, R.G. 1989. *A penman for all seasons*. J. Irrig. and Drain Engr., ASCE, Vol. 112. No. 4., pp. 349-368.
- Allen, R.G. 2001. *Ref-ET: Reference Evapotranspiration Calculation Software for FAO and ASCE Standardized Equations*. University of Idaho. U.S.A.
- Benson, G.O. 1990. *Corn replant decisions: A review*. J. Prod. Agric. 3:180–184.
- Blaney, H.F. y Criddle, W.D. 1950. *Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data*. USDA/SCS, SCS-TP. 96 p.
- Campos, A. D. F. 1998. *Procesos del ciclo hidrológico*. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, México.
- Comisión Nacional del Agua-Colegio de Postgraduados. 2010. *Desarrollo de un Modelo de Sistema de Información Geográfica y Revisar e Identificar las parcelas que requieren actualización en el padrón de usuarios del Distrito de Riego 063 Guasave, Sinaloa*.

- Comisión Nacional del Agua-Colegio de Postgraduados. 2005. *Plan director para la modernización integral del riego, del Distrito de Riego No. 063 Guasave, Sinaloa.*
- Dobermann A. y Shapiro C. 2004. Setting a Realistic Corn Yield Goal. Institute of Agriculture and Natural Resources. University of Nebraska-Lincoln Extension.
- Duncan, W.G. 1975. SIMAIZ: *A model simulating growth and yield in corn.* In D.N. Baker, P.G. Creech, and F.G. Maxwell (ed.) An application of system methods to crop production. Mississippi Agric. and Forestry Exp. Stn., Mississippi State.
- Eubanks, Mary W. 2001. *The Mysterious Origin Of Maize.* Vol. 55, No. 4 (Oct. - Dec., 2001), pp. 492-514. The New York Botanical Garden Press, Bronx, NY U.S.A. 10458-5126 pp.
- Hargreaves, G.H. y Samani, Z.A. 1985. *Reference crop evapotranspiration from temperature.* Transaction of ASAE. Vol. 1. No. 2, 96-99 pp.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 2006. *Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC V3.0).* Jiutepec, Morelos, México.
- Jones,C.A. y Kiniry J.R. 1986. CERES-Maize: *A simulation model of maize growth and development.* Texas A&M Univ. Press, College Station.
- Kiniry, J.R; Williams J.R; Gassman, P.W; Debaeke. P. 1992. *A general process-oriented model for two competing plant species Trans. ASAE 35:801–810 pp.*

- Manlla, A. y Salvagiotti F. 2011. Validación del modelo Hybrid maize en condiciones óptimas de crecimiento. IX Congreso Nacional de Maíz, Simposio Nacional Sorgo 2010.
- Mathews, R.; W. Stephens, T; Hess, T; Middleton; Graves A. 2002. *Applications of crop/soil simulation models in tropical agricultural systems*. Adv. Agron. 76:31–124 pp.
- McCown, R.L; Hammer, G.L; Hargreaves, J.N.G; Holzworth; D.P; Freebairn, D.M. 1996. APSIM: A novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural system research. Agric. Syst. 50:255–271 pp.
- Muñoz, P.D. y Hernández R.G. 2004. Situación actual y perspectiva del maíz. 2004. Sistema de información y estadística agroalimentaria y pesquera (SIAP). SAGARPA. México, D.F. 136 p.
- Nielsen, D. C; Saseendran, S. A; Ma, L; Vigil, M. F; Ahuja, L.R. 2005. *Simulating Planting Date Effects on Corn Production Using RZWQM and CERES-Maize Models*. Agronomy Journal, Vol 97, January-February.
- Ojeda, B. W; Sifuentes, I. E; Unland, W. H. 2006. Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa, México. Agrociencia, enero-febrero 2006. Vol. 40. Num. 001. Pp. 13-25.
- Rivera, U. N. J. 1994. Estudio hidrológico de la cuenca del río Tonalá: caracterización física y análisis estadístico de las precipitaciones máximas. Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma chapingo. Chapingo, México. 185 p.

- Rodríguez, R. J. 2010. *Modelación hidrológica y análisis de factibilidad técnica y económica del proyecto de temporal tecnificado de ampliación del bajo papaloapan-tesechoacán, estado de Veracruz*. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 251 p.
- Samani Z. 2000. *Estimating Solar Radiation and Evapotranspiration Using Minimum Climatological Data*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 126, No. 4, July/August 2000.
- Semenov, M; Brooks, R.; Barrow, E; Richardson C. 1998. *Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates*. Vol. 10 (August 14, 1998), pp. 95-107. Department of Agricultural Sciences, University of Bristol. Bristol BS41 9AF, United Kingdom.
- Semenov M.A. y Barrow E.M. 2002. *LARS-WG A Stochastic Weather Generator for Use in Climate Impact Studies*. User's Manual. Rothamsted Research, Harpenden, Hertfordshire, AL5 2JQ, UK
- Sluyter, A; Dominguez, G. 2006. *Early Maize (Zea mays L.) Cultivation in Mexico: Dating Sedimentary Pollen Records and Its Implications*. Vol. 103, No. 4 (Jan. 24, 2006), pp. 1147-1151. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.
- Stapper, M. y Arkin. G.F. 1980. *CORNF: A dynamic growth and development model for maize (Zea mays L.)*. Res. Cent. Progr. And Model Documentation 80-2. Backland Res. Cent., Texas Agric. Exp. Stn., Temple.
- Verwey A. 1995. Introducción a los modelos. *Curso Nacional de Drenaje Agrícola y Control de Inundaciones al nivel de Postgrado*. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.

- Yang, H.S; Dobermann, A; Cassman, K.G; Walters, D. 2006. *User's Manual*. Department of Agronomy & Horticulture. Nebraska Cooperative Extension CD 9, University of Nebraska-Lincoln.

PÁGINAS CONSULTADAS DE INTERNET:

En línea 1.

http://redescolar.ilce.edu.mx/educontinua/conciencia/biologia/acertijos_biologicos/acertijos00-01/solucion17.htm

En línea 2.

http://es.wikipedia.org/wiki/Zea_mays

En línea 3.

<http://www.botanical-online.com/maiz.htm>

En línea 4.

<http://www.infoagro.com/herbaceos/cereales/maiz.htm>

En línea 4.

<http://www.agroson.mx>

En línea 5.

<http://clima.inifap.gob.mx/redclima/>