



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas

**CARACTERIZACIÓN DEL RIESGO CLIMÁTICO EN
ZONAS DE TEMPORAL EN EL NORTE DE MÉXICO**

TESIS

Que como requisito parcial
para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN
RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE
EN ZONAS ÁRIDAS**

PRESENTA:

JOSE JUAN ESCOBAR PEDRAZA



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

Bermejillo, Durango. Junio de 2014

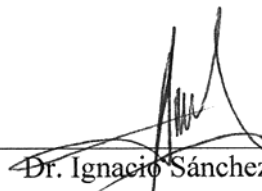


CARACTERIZACIÓN DEL RIESGO CLIMÁTICO EN ZONAS DE TEMPORAL EN EL NORTE DE MÉXICO

Tesis realizada por **José Juan Escobar Pedraza** bajo la dirección del Comité
Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener
el grado de:

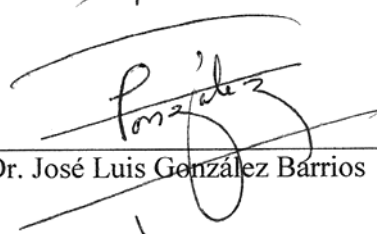
MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS

DIRECTOR:



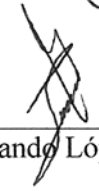
Dr. Ignacio Sánchez Cohen

CO-DIRECTOR:



Dr. José Luis González Barrios

ASESOR:



Dr. Armando López Santos

Con todo mi cariño y mi amor para las personas que hicieron todo en la vida para que yo pudiera lograr mis sueños, por motivarme y darme la mano cuando sentía que el camino se terminaba, a ustedes por siempre mi corazón y mi agradecimiento.

A José Humberto Pedraza Vázquez, quien ha pasado a mejor vida, con mucho cariño para tí tío Beto.

Por tu amor durante estos años, ahora puedo decir que esta tesis lleva mucho de tí, gracias por estar siempre a mi lado, Mariana.
¡Te amo!

AGRADECIMIENTOS

A dios por darme la oportunidad de vivir, por ser mi guía y mi amigo en los buenos y en los malos momentos, gracias también por darme a una familia tan maravillosa.

*Infinitamente a mi Alma Mater, la **Universidad Autónoma Chapingo** y en especial a la **Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas**, por darme la oportunidad de culminar mis estudios profesionales y de posgrado; siendo mi hogar y en donde tuve la oportunidad de adquirir conocimientos y experiencias para fortalecerme como profesionista y como persona.*

Al personal que labora en el INIFAP CENID-RASPA, gracias por abrirme las puertas de su institución brindándome nuevas experiencias y habilidades para mi vida profesional.

Al Ph.D. Ignacio Sánchez Cohen, Dr. José Luis González Barrios y Dr. Armando López Santos, por su apoyo y el tiempo que dedicaron a la conclusión de este trabajo.

A los profesores y al personal administrativo de esta Unidad Regional que estuvieron presentes durante mis años de formación académica, gracias por sus conocimientos, destrezas y consejos.

A mis compañeros de generación por todos los momentos que compartimos juntos: Alondra, Nancy, Karla, Adriana, Héctor, Luis y Josafath.

A mis amigos y amigas con quienes compartí muchas cosas durante mi estancia en esta casa de estudios, que aunque no los menciono saben que los llevo en la mente y en el corazón, ¡gracias por estar ahí cuando más los necesite!

DATOS BIOGRÁFICOS

El C. José Juan Escobar Pedraza originario de Texcoco en el Estado de México, obtuvo en noviembre de 2011 el grado de Ingeniero Agrónomo en Sistemas Agrícolas de Zonas Áridas por la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas de la Universidad Autónoma Chapingo con la tesis “Análisis de la información climática reciente para el estudio de la precipitación pluvial en la cuenca alta del Río Nazas en el contexto del cambio climático global” bajo la codirección del Dr. Ignacio Sánchez Cohen y el Dr. José Luis González Barrios.

De igual forma en 2011, estudió una diplomatura de nombre “Toma de Decisiones para el Manejo Integral del Agua en Cuencas Hidrológicas” en el Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Atmosfera-Suelo-Planta-Agua (CENID-RASPA) perteneciente al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)

Su línea de investigación actual va encaminada a la climatología y la modelación de procesos por ello, ha participado en los VIII y IX Congresos Nacionales sobre Recursos Bióticos de Zonas Áridas con ponencias orales. Además cuenta con un artículo publicado en la Revista Chapingo – Serie Zonas Áridas.

Bajo esta tesitura, logró terminar la presente tesis titulada “Caracterización del riesgo climático en zonas de temporal en el norte de México” bajo la supervisión directa de su tutor y asesor Dr. Ignacio Sánchez Cohen.

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE CUADROS.....	xiv
RESUMEN.....	xvi
SUMMARY	xvi
1.- INTRODUCCIÓN.....	1
2.- OBJETIVO.....	3
3.- HIPÓTESIS.....	3
4.- REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
4.1 Cambio Climático.....	4
4.1.1 Cuarto Reporte de Evaluación del IPCC (AR4)	6
4.2 Modelación y Simulación de Procesos.....	8
4.2.1 Modelos Climatológicos.....	10
4.2.2 Modelos Hidrológicos.....	11
4.3 SICTOD	16
5.- MATERIALES Y MÉTODOS	22
5.1 Área de estudio.....	22
5.2 Materiales.....	26
5.3 Metodología	27
5.3.1 Descripción del enfoque metodológico.....	27
5.3.2 Selección de estaciones meteorológicas.....	27
5.3.3 Proceso de reducción de escala.....	33
5.3.4 Cálculo de probabilidades	36
5.3.5 Calibración del generador de lluvia	38
5.3.6 Sistema para cuantificar riesgo hidrológico en agricultura de temporal, SICTOD	41

5.3.7 Generación de mapas de superficie. Técnicas de interpolación	59
6.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	62
6.1 Fecha de Siembra 10 de Abril.....	62
6.1.1 Temperatura Máxima	62
6.1.2 Temperatura Mínima.....	64
6.1.3 Precipitación	66
6.1.4 Rendimiento.....	70
6.2 Fecha de Siembra 20 de Mayo	73
6.2.1 Temperatura Máxima	73
6.2.2 Temperatura Mínima.....	75
6.2.3 Precipitación	77
6.2.4 Rendimiento.....	80
6.3 Fecha de Siembra 30 de Junio.....	83
6.3.1 Temperatura Máxima	83
6.3.2 Temperatura Mínima.....	85
6.3.3 Precipitación	87
6.3.4 Rendimiento.....	89
7.- CONCLUSIONES.....	93
8.- LITERATURA CITADA	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Agrupación de modelos acorde a su estructura y objetivo (Sanchez Cohen, 2005).	13
Figura 2. Modelo conceptual y variables del balance diario de agua del suelo (Sánchez Cohen, <i>et al.</i> , 2013).....	17
Figura 3. Ejemplo de la función de producción de agua para el cultivo maíz	20
Figura 4. Localización geográfica del estado de Durango (Esquivel Arriaga, 2011).....	22
Figura 5. Climas del estado de Durango (Esquivel Arriaga, 2011).....	24
Figura 6. Regiones hidrológicas del estado de Durango (Esquivel Arriaga, 2011).	25
Figura 7. Enfoque metodológico considerado en el estudio.	28
Figura 8. Distribución espacial de nodos que corresponden a Durango de la malla de ECRM con equidistancias de 0.5° (50 x 50 km).	30
Figura 9. Diagrama de flujo para el control de calidad y selección de las EM-SMN	32
Figura 10. Estaciones Meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional (EMSMN) empleadas para el análisis climático del Estado de Durango.	33
Figura 11. Formato de un archivo *.sr	35
Figura 12. Formato de un archivo *.st	36
Figura 13. Interfaz de PARAMETROS2.	37
Figura 14. Interfaz de WXPARM.....	37

Figura 15. Archivo creado en WXPARM.....	38
Figura 16. Comparación de la precipitación media mensual observada del periodo 1961-2003 contra precipitación media mensual obtenida a partir de la simulación de 30 años con LARS-WG y posterior síntesis con WXPARM para la EM Ceballos, Mapimí.	39
Figura 17. Comparación de los parámetros PWD y PWW creados por WXPARM. Datos observados en el periodo 1961-2003 contra datos re-escalados usando una serie de 30 años para la EM de Ceballos en Mapimí.	39
Figura 18. Comparación de PWW obtenido a partir de valores diarios observados en el periodo 1961-2003, contra PWW obtenidos a partir de una serie de 30 años simulado en el LARS-WG, estación Ceballos, Mapimí.	40
Figura 19. Comparación de PWD obtenido a partir de valores diarios observados en el periodo 1961-2003, contra PWD obtenidos a partir de una serie de 30 años simulado en el LARS-WG, estación Ceballos, Mapimí.	40
Figura 20. Visualización del archivo MEXICOCC.txt usado por SICTOD cuyos datos provienen de la rutina con WXPARM.	41
Figura 21. Pantalla de inicio de la aplicación computacional.	42
Figura 22. Pantalla para introducir información necesaria para correr el modelo.	43
Figura 23. Pantalla para indicar lugar y cultivo de interés.....	43
Figura 24. Hipervínculos que contienen tecnología disponible para el cultivo de interés.	44
Figura 25. División del estado de Durango en tres diferentes periodos de crecimiento de maíz.....	46
Figura 26. Precipitación modal anual del estado de Durango.....	46

Figura 27. Selección del municipio de interés. El ejemplo muestra que el municipio “Santa María del Oro” cuenta con dos estaciones climatológicas (General Escobedo y Santa María del Oro) de donde se deberá seleccionar una.....	48
Figura 28. Mapa de la localización de la estación climatológica elegida (arriba) y vista satelital (abajo).	49
Figura 29. Triángulo de texturas para la obtención de la capacidad de retención de humedad del suelo.	52
Figura 30. Pantalla de salida para la visualización de resultados.....	54
Figura 31. Pantalla para visualización de la probabilidad de ocurrencia de variables implícitas en el modelo.	56
Figura 32. Estadísticos de las variables simuladas e interface para la consulta de la tecnología disponible.	57
Figura 33. Impacto en el balance de humedad del suelo al cambiar a condición de cambio climático.....	58
Figura 34. Impacto en la probabilidad de ocurrencia de lluvia al cambiar a condición de cambio climático.....	58
Figura 35. Impacto en el rendimiento del cultivo al cambiar a condición de cambio climático.....	59
Figura 36. Distribución espacial de temperatura máxima cuatrimestral promedio actual (izquierda) y futura (derecha) durante un periodo de crecimiento del cultivo 10 de Abril - 7 de Agosto.	63
Figura 37. Distribución espacial de temperatura mínima cuatrimestral promedio actual (izquierda) y futura (derecha) durante un periodo de crecimiento del cultivo 10 de Abril - 7 de Agosto.	65

Figura 38. Distribución espacial de la precipitación cuatrimestral promedio actual (izquierda) y futura (derecha) durante un periodo de crecimiento del cultivo 10 de Abril - 7 de Agosto.	68
Figura 39. Probabilidad de ocurrencia de lluvia en la estación Tamazula para un periodo simulado de 10 años por SICTOD 1. En línea naranja, la probabilidad bajo un escenario climático actual y en azul, bajo un escenario A2 de cambio climático.	69
Figura 40. Probabilidad de ocurrencia de lluvia en la estación El Salto para un periodo simulado de 10 años por SICTOD 1. En línea naranja, la probabilidad bajo un escenario climático actual y en azul, bajo un escenario A2 de cambio climático.	69
Figura 41. Distribución espacial del rendimiento actual (izquierda) y futuro (derecha) durante un periodo de crecimiento del cultivo 10 de Abril - 7 de Agosto.....	71
Figura 42. Probabilidad de rendimiento en la estación Tamazula para un periodo simulado de 10 años por SICTOD 1. En línea naranja, la probabilidad bajo un escenario climático actual y en azul, bajo un escenario A2 de cambio climático.	72
Figura 43. Probabilidad de rendimiento en la estación Canelas para un periodo simulado de 10 años por SICTOD 1. En línea naranja, la probabilidad bajo un escenario climático actual y en azul, bajo un escenario A2 de cambio climático.....	72
Figura 44. Distribución espacial de temperatura máxima cuatrimestral promedio actual (izquierda) y futura (derecha) durante un periodo de crecimiento del cultivo 20 de Mayo – 17 de Septiembre.	74
Figura 45. Distribución espacial de temperatura mínima cuatrimestral promedio actual (izquierda) y futura (derecha) durante un periodo de crecimiento del cultivo 20 de Mayo – 17 de Septiembre.	76
Figura 46. Distribución espacial de la precipitación cuatrimestral promedio actual (izquierda) y futura (derecha) durante un periodo de crecimiento del cultivo 20 de Mayo – 17 de Septiembre.	78

Figura 47. Probabilidad de ocurrencia de lluvia en la estación Narciso Mendoza para un periodo simulado de 10 años por SICTOD 1. En línea naranja, la probabilidad bajo un escenario climático actual y en azul, bajo un escenario A2 de cambio climático.	79
Figura 48. Probabilidad de ocurrencia de lluvia en la estación Peñoles para un periodo simulado de 10 años por SICTOD 1. En línea naranja, la probabilidad bajo un escenario climático actual y en azul, bajo un escenario A2 de cambio climático.	79
Figura 49. Distribución espacial del rendimiento actual (izquierda) y futuro (derecha) durante un periodo de crecimiento del cultivo 10 de Abril - 7 de Agosto.....	81
Figura 50. Probabilidad de rendimiento en la estación El Pino para un periodo simulado de 10 años por SICTOD 1. En línea naranja, la probabilidad bajo un escenario climático actual y en azul, bajo un escenario A2 de cambio climático.....	82
Figura 51. Probabilidad de rendimiento en la estación Narciso Mendoza para un periodo simulado de 10 años por SICTOD 1. En línea naranja, la probabilidad bajo un escenario climático actual y en azul, bajo un escenario A2 de cambio climático.	82
Figura 52. Distribución espacial de temperatura máxima cuatrimestral promedio actual (izquierda) y futura (derecha) durante un periodo de crecimiento del cultivo 30 de Junio – 28 de Octubre.....	84
Figura 53. Distribución espacial de temperatura mínima cuatrimestral promedio actual (izquierda) y futura (derecha) durante un periodo de crecimiento del cultivo 30 de Junio – 28 de Octubre.....	86
Figura 54. Distribución espacial de la precipitación cuatrimestral promedio actual (izquierda) y futura (derecha) durante un periodo de crecimiento del cultivo 30 de Junio – 28 de Octubre.....	88
Figura 55. Probabilidad de ocurrencia de lluvia en la estación Tlahualilo para un periodo simulado de 10 años por SICTOD 1. En línea naranja, la probabilidad bajo un escenario climático actual y en azul, bajo un escenario A2 de cambio climático.	89

Figura 56. Probabilidad de ocurrencia de lluvia en la estación Mapimí para un periodo simulado de 10 años por SICTOD 1. En línea naranja, la probabilidad bajo un escenario climático actual y en azul, bajo un escenario A2 de cambio climático.	89
Figura 49. Distribución espacial del rendimiento actual (izquierda) y futuro (derecha) durante un periodo de crecimiento del cultivo 30 de Junio – 28 de Octubre.....	91
Figura 58. Probabilidad de rendimiento en la estación Mapimí para un periodo simulado de 10 años por SICTOD 1. En línea naranja, la probabilidad bajo un escenario climático actual y en azul, bajo un escenario A2 de cambio climático.....	92
Figura 59. Probabilidad de rendimiento en la estación El Derrame para un periodo simulado de 10 años por SICTOD 1. En línea naranja, la probabilidad bajo un escenario climático actual y en azul, bajo un escenario A2 de cambio climático.	92

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Coeficientes de regresión de las funciones de producción del agua para los cultivos considerados en el modelo.	20
Cuadro 2. Estaciones Meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional (EMSMN) empleadas para el análisis climático del Estado de Durango.....	34
Cuadro 3. Valores de la curva numérica según tipo de ecosistema, porcentaje de cobertura del suelo y potencial de escurrimiento.	51
Cuadro 4. Variables de entrada del modelo SICTOD 1 por estación meteorológica.	55
Cuadro 5. Comparación de temperatura máxima cuatrimestral promedio actual y futura por municipio y estación meteorológica	64
Cuadro 6. Comparación de temperatura mínima cuatrimestral promedio actual y futura por municipio y estación meteorológica.	66
Cuadro 7. Comparación de la precipitación cuatrimestral promedio actual y futura por municipio y estación meteorológica para un periodo simulado de 10 años por SICTOD.	67
Cuadro 8. Comparación del rendimiento actual y futuro por municipio y estación meteorológica para un periodo simulado de 10 años por SICTOD.....	70
Cuadro 9. Comparación de temperatura máxima cuatrimestral promedio actual y futura por municipio y estación meteorológica	73
Cuadro 10. Comparación de temperatura mínima cuatrimestral promedio actual y futura por municipio y estación meteorológica.	75

Cuadro 11. Comparación de la precipitación cuatrimestral promedio actual y futura por municipio y estación meteorológica para un periodo simulado de 10 años por SICTOD.	77
Cuadro 12. Comparación del rendimiento actual y futuro por municipio y estación meteorológica para un periodo simulado de 10 años por SICTOD.....	80
Cuadro 13. Comparación de temperatura máxima cuatrimestral promedio actual y futura por municipio y estación meteorológica	83
Cuadro 14. Comparación de temperatura mínima cuatrimestral promedio actual y futura por municipio y estación meteorológica.	85
Cuadro 15. Comparación de la precipitación cuatrimestral promedio actual y futura por municipio y estación meteorológica para un periodo simulado de 10 años por SICTOD.	87
Cuadro 16. Comparación del rendimiento actual y futuro por municipio y estación meteorológica para un periodo simulado de 10 años por SICTOD.....	90

CARACTERIZACIÓN DEL RIESGO CLIMÁTICO EN ZONAS DE TEMPORAL EN EL NORTE DE MÉXICO

CLIMATIC RISK ASSESSMENT IN ARID LANDS IN NORTHERN MEXICO

José Juan Escobar Pedraza*, Ignacio Sánchez Cohen

Universidad Autónoma Chapingo – Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas

*Autor para correspondencia (josejuan.escobarpedraza@gmail.com)

RESUMEN

Las pérdidas de cosecha en los cultivos de zonas de temporal en el país plantean la necesidad de contar con herramientas robustas de planeación agrícola en zonas con escaso y errático régimen pluvial. En el presente estudio se aborda la problemática del estado de Durango. La estrategia planteada se fundamenta en el balance de humedad en el suelo bajo condiciones actuales de clima y bajo un escenario de cambio climático. Para este último se realizó un proceso de reducción de escala estadístico para obtener la información climática que pudiera prevalecer bajo esta condición. El algoritmo usado está integrado en el modelo de simulación "sictod 1" el cual contempla la generación aleatoria de la variable precipitación mediante un esquema matemático de cadenas de markov de primer orden fundamentado en las probabilidades condicionales de precipitación para las distintas estaciones climáticas consideradas en el estudio. Los resultados del modelo en términos del rendimiento del cultivo fueron comparados bajo las dos condiciones ensayadas concluyendo que en el 100% de las estaciones climáticas, las temperaturas máximas y mínimas tienden a incrementarse (1 - 1.4 °C) y en el 71% de las estaciones climáticas la precipitación tiende a decrecer. Este tipo de alteraciones climáticas, son factor de cambio en el rendimiento del cultivo incrementando en promedio 0.282 ton ha⁻¹ en 42% de las estaciones y decreciendo en promedio 0.272 ton ha⁻¹ en 48% de las estaciones. El modelo de simulación "sictod 1" promete ser un modelo robusto, confiable y de fácil manejo para la toma de decisiones en la agricultura de temporal.

Palabras clave: Cambio Climático, Reducción de Escala, Temperatura, Precipitación.

SUMMARY

Crop losses in arid lands crops in the country raise the need for robust tools for agricultural planning in areas with low and erratic rainfall regime. In this research the variation of the rainfall regime of the state of Durango is addressed. The proposed strategy is based on the soil water balance under current climate conditions and under a climate change scenario. For the latter, the process was performed using statistical downscaling for climate information that might prevail under this condition. The algorithm used is built into the simulation model "sictod 1" which includes the random generation of the precipitation variable using a mathematical scheme of first order markov chains based on the conditional probabilities of precipitation for different seasons considered in the study. The model results in terms of crop yield were compared under both conditions tested concluding that 100 % of the seasons, the maximum and minimum temperatures are likely to increase (1 - 1.4 °C) and in 71 % of seasons rainfall tends to decrease. Such climate changes are a factor of change in crop yield, increasing crop yield averaged 4.492 bu.acre⁻¹ in 42% of stations and decreasing on average 4.333 bu.acre⁻¹ in 48% of the stations. The simulation model "sictod 1" promises to be a robust, reliable and easy to use for decision making in arid lands model.

Keywords: Climate Change, Downscaling, Temperature, Precipitation.

1.- INTRODUCCIÓN

La investigación en la ciencia del clima incluye: 1) medición, estimación y monitoreo de las concentraciones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en la atmósfera; 2) la sensibilidad y los forzamientos radiativos: que comprende el desarrollo de escenarios y evaluaciones a través de modelos para la simulación del sistema tierra - océano - atmósfera para modelar las respuestas a estímulos externos; 3) procesos de reducción de escala (Downscaling) de las salidas de los Modelos de Circulación General (GCMs) que son usados para proyectar el cambio climático global, y 4) la descripción y la traducción de los datos climáticos a futuro para los profesionales y tomadores de decisiones en todas las escalas (Ziervogel, *et al.*, 2008).

Con base en los informes del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) a escala global y regional los efectos del cambio climático se verán reflejados en muchos sectores de nuestra sociedad. Una de las herramientas para evaluar el impacto del clima en la producción agrícola, es mediante la modelación de cultivos. Además de su importancia científica, la simulación de rendimientos en las plantas tiene una aplicación práctica en el manejo de los sistemas de cultivo, en el establecimiento de asentamientos humanos, comercialización de productos agrícolas, elaboración de políticas agrícolas, zonificación de zonas agrícolas y en muchas otras ramas de la actividad agrícola (Krishnan *et al.*, 2009).

Los factores climáticos son algunos de los principales limitantes de la producción agrícola, mientras que la agricultura tiene un historial de responder a las cambiantes condiciones, ya sean económicas, sociales, políticas o relacionadas con el clima. El posible aumento en la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos y otros desafíos que plantea el cambio climático ahora da lugar a la necesidad de volver a evaluar la capacidad de adaptación de los sistemas agrícolas (Wreford *et al.*, 2010).

Las pérdidas de cosecha por eventos extremos de sequía es una situación recurrente en las zonas áridas y semi áridas del país. Es en ésta porción del territorio nacional en donde habitan los productores más vulnerables a las condiciones cambiantes del clima. De aquí, la necesidad de contar con herramientas de planeación que permitan evadir el riesgo climático al realizar análisis de balance de agua ex ante como un valor indicativo de déficit o excesos de humedad, y así minimizar y/o prever el riesgo de pérdidas de cosecha y actuar en consecuencia mediante el uso de la modelación climática y la modelación de cultivos.

Si bien ambas técnicas son usadas indistintamente, en el presente estudio se propone una metodología la cual, permite unir las y modelar el riesgo de la producción agrícola en dos escenarios: condiciones actuales del clima y bajo el escenario A2 del IPCC. Para fines de calibración del método se consideró al cultivo maíz en Durango, México.

2.- OBJETIVO

El objetivo esencial del presente estudio ha sido estimar el riesgo agro climático para el cultivo de maíz en el estado de Durango bajo dos condiciones de clima: escenario actual y condición de cambio climático del escenario A2 del panel intergubernamental de cambio climático

3.- HIPÓTESIS

El cultivo de maíz en el estado de Durango se verá afectado por el cambio en los patrones del clima en el futuro cercano

4.- REVISIÓN DE LITERATURA

4.1 Cambio Climático

El cambio climático es uno de los problemas ambientales más importantes a nivel global que enfrenta el mundo hoy en día. Un fuerte consenso científico ha determinado que la tendencia que se observó de un gran calentamiento en el siglo XX seguirá su curso en los próximos decenios y que las actividades humanas son el motor más importante para muchos de los cambios observados (The National Academies, 2009).

Cuando un elemento o variable meteorológica como la precipitación o la temperatura es diferente al valor medio de muchos años, se habla de una anomalía climática ocasionada por forzamientos internos, como inestabilidades en la atmósfera y/o el océano o por forzamientos externos, como puede ser algún cambio en la intensidad de la radiación solar recibida o incluso cambios en las características del planeta resultado de la actividad humana (IPCC, 2007). Las formas de variabilidad del clima son muchas y, por tanto, pronosticarlo a largo plazo no es fácil. Es por ello que, distinguir qué produce cambios en el clima de un año a otro o en escalas mayores de tiempo, constituye un reto científico (The National Academies, 2010; IPCC, 2007).

El cambio climático agrava las preocupaciones sobre la producción agrícola y seguridad alimentaria en todo el mundo. La agricultura es cada vez más una fuente importante de gases que contribuyen al efecto invernadero (Xiong y Khalil, 2009), así como una posible vía para la mitigación del cambio climático mediante el

almacenamiento de carbono en los suelos y en la vegetación; sin embargo la agricultura mundial ha de hacer frente a muchos problemas en los próximos decenios, entre ellos está la degradación de los suelos y los recursos hídricos la cual ha de crear grandes presiones en la consecución de la seguridad alimentaria para las poblaciones en pleno crecimiento. Estas condiciones pueden verse agravadas por el cambio climático (FAO, 2002; Adhya *et al.*, 2009).

Los efectos potenciales directos del cambio climático en la agricultura se refleja en los cambios estacionales de temperatura y precipitación en las condiciones agroclimáticas (Qaderi y Reid, 2009), lo cual altera las estaciones de crecimiento, de los cultivos, así como las fechas de siembra y cosecha; la disponibilidad de agua, y la aparición de poblaciones de plagas y enfermedades. La evapotranspiración, fotosíntesis y producción de biomasa se verían alteradas, así como la aptitud del suelo (Rosegrant *et al.*, 2008).

Dentro del marco de la productividad de los sistemas agrícolas, estos dependen principalmente de la distribución temporal y espacial de la precipitación y de las temperaturas, así como de la disponibilidad de agua. Los sistemas de producción de áreas marginales en términos hídricos están sujetos a una mayor vulnerabilidad climática y a un mayor riesgo debido a factores como: la degradación de los suelos, la sobreexplotación de las aguas subterráneas y la consiguiente salinización, o el pastoreo excesivo en tierras secas (FAO, 2002; Pimentel, 2009; Bruinsma, 2003).

El desarrollo de investigación científica en la agricultura es necesaria para: (i) la adquisición de conocimientos, (ii) el orden y desarrollo del conocimiento para la comprensión de ese conocimiento, y (iii) la aplicación y/o entendimiento de los conocimientos para la solución de problemas prácticos. En esta tesitura, los modelos matemáticos pueden ser utilizados de diferentes maneras en cada una de estas tres actividades. Básicamente, una descripción simplificada de un sistema, un modelo matemático ayuda a comprender mejor el funcionamiento de un sistema real y las interacciones de sus componentes principales (Krishnan *et al.*, 2009; Tebaldi & Knutti, 2010).

4.1.1 Cuarto Reporte de Evaluación del IPCC (AR4)

El cuarto reporte del IPCC, utiliza el Informe Especial de Escenarios de Emisiones (SRES, por sus siglas en inglés) (Nakicenovic *et. al.*, 2000), en donde a partir de dichos escenarios de emisiones se calculan las concentraciones de emisiones y el forzamiento radiativo correspondiente, lo que lleva a una proyección del incremento de la temperatura global. Estos escenarios consideran una gama de posibles condiciones del desarrollo global para los próximos 100 años y son, en un sentido más amplio, escenarios del estado y crecimiento de la población y la economía (Conde *et al.*, 2008).

En el Informe especial de escenarios de emisión se plantean 4 líneas evolutivas (A1, A2, B1, B2), en donde cada una de ellas representa un cambio (o tendencia) demográfico, social, económico, tecnológico, y medioambiental.

Los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero a partir de los cuales se desarrollan y presentan los MCG (Modelos de Circulación Global) del IPCC, están basados en criterios bajo los cuales podría darse la convivencia socioeconómica en el mundo, por lo cual se establecieron familias o líneas evolutivas, las cuales Nakicenovic *et al.*, (2000) las describe de la siguiente manera:

Línea evolutiva y familia de escenarios A1: Describe un mundo futuro con un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y disminuye posteriormente, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes.

Línea evolutiva y familia de escenarios A2: Supone un mundo muy heterogéneo, con la población global en constante aumento y el crecimiento económico orientado regionalmente; éste es más lento y fragmentado que en las otras líneas evolutivas

Línea evolutiva y familia de escenarios B1: muestra un mundo convergente con los mismos patrones de población que la familia A1, pero con cambios rápidos en las estructuras económicas hacia una economía de servicios e información. Esto supone una reducción en la intensidad del uso de materiales y la introducción de tecnologías limpias y eficientes en el uso de recursos.

Línea evolutiva y familia de escenarios B2: plantea un mundo en donde el énfasis se concentra en soluciones locales para la sustentabilidad económica, social y ambiental.

Asume una población en continuo crecimiento (menor al de la familia A2) y un nivel de desarrollo económico intermedio.

Las dos grandes familias de escenarios conllevan a estimar las emisiones globales de gases de efecto invernadero. Los escenarios “A” describen un mundo futuro con alto crecimiento económico (siendo llamados escenarios pesimistas), mientras que en los escenarios “B” ese crecimiento es más moderado (siendo llamados escenarios optimistas). Los escenarios A1 y B1 suponen que habrá una globalización tal que las economías convergerán en su desarrollo. En los A2 y B2 se considera que el desarrollo se dará más en un nivel regional (Martínez, 2013).

Tanto a nivel mundial como para México, el escenario futuro A2, es el más consistente con las tendencias de crecimiento socioeconómicas (SEMARNAT-SHCP, 2009).

4.2 Modelación y Simulación de Procesos

La acción de “modelar” y “simular” cualquier evento que ocurra en la naturaleza es una herramienta que prácticamente empezó su auge durante la Segunda Guerra Mundial, y ha alcanzado su máxima expresión durante la última década con el advenimiento de las supercomputadoras. En este periodo se ha tratado de representar matemáticamente (modelación) fenómenos naturales en los que, si las relaciones que componen al fenómeno son simples, se usan métodos matemáticos para la solución al problema planteado a lo que se denomina “solución analítica” (Sanchez Cohen, 2005).

Sin embargo, la mayoría de los sistemas encontrados comúnmente en la naturaleza son demasiado complejos para poder evaluarse analíticamente, por lo que las técnicas de simulación ofrecen como mejor opción la solución numérica (Law y Kelton, 1982).

Las razones del porque utilizar la simulación de procesos para la solución de problemas se pudieran agrupar en dos grandes categorías: 1) como herramienta de investigación y 2) como herramienta para el soporte de decisiones. En el primer caso, la simulación de procesos asiste en el entendimiento (y quizás cuantificación) *ex-ante* de las relaciones funcionales entre variables de interés, con la finalidad de dirigir el esfuerzo y los recursos de investigación de manera certera. En el segundo caso, la simulación de procesos pretende auxiliar al tomador de decisiones en cuanto a la evaluación del efecto de una determinada acción sobre el sistema en estudio (Sanchez Cohen, 2005).

Muchos modelos han sido desarrollados para auxiliar a los modeladores y tomadores de decisiones a entender la operación de diversos sistemas y proveer un pronóstico de comportamiento futuro bajo ciertas condiciones de manejo; tal pronóstico puede realizarse con respecto a tiempo real o sin ningún tiempo específico de referencia. Esta jerarquización ubica el problema en el tiempo, mientras que una segunda jerarquización sería ubicar al problema en el espacio al considerar la variabilidad espacial y la regionalización. En hidrología, las relaciones matemáticas que describen a un fenómeno son frecuentemente dependientes de la escala en el sentido de que diversas relaciones se manifiestan en diversas escalas de espacio y tiempo. La ciencia se ocupa

actualmente de identificar y formular relaciones apropiadas a las escalas de interés práctico, probarlas experimentalmente y buscar conexiones analíticas consistentes entre estas relaciones y otras a diferentes escalas (Sanchez Cohen, 2005).

En el sector agrícola a nivel mundial diversos modelos han sido desarrollados de acuerdo a su necesidad y otros de forma más integral para cultivos específicos, por ejemplo: Agricultural Production Systems sIMulator (APSIM), Model of Agricultural Adaptation to Climatic Variation (MAACV), General-Purpose Atmospheric Plant Soil Simulator (GAPS 3.1), Erosion Productivity Impact Calculator (EPIC), Alfalfa 1.4, AFRC-Wheat, RICEMOD, GOSSYM/COMAX y GLYCIM, entre otros (Esquivel, 2011).

4.2.1 Modelos Climatológicos

Estos modelos son representaciones matemáticas del sistema climático, expresados como códigos computacionales, los cuales se basan en la termodinámica, movimiento de los fluidos, reacciones químicas, y transferencia de radiación del clima de la Tierra, lo más completo según lo permita la viabilidad de cómputo y la comprensión científica de su formulación (IPCC, 2010; 2007; The National Academies, 2008; 2006).

Su objetivo es calcular el estado de evolución de la atmósfera global, del océano, la superficie de la tierra, y el hielo marino en respuesta a forzamientos externos tanto de causas naturales (como la actividad solar y volcánica) como de causas humanas (como

las emisiones de gases de invernadero y cambios de uso de suelo) (The National Academies, 2008; 2001).

Tales modelos han sido usados durante varias décadas. Se están continuamente mejorando para aumentar su amplitud con respecto a la resolución espacial, duración temporal, la complejidad biogeoquímica, y la representación de importantes efectos de los procesos que no pueden prácticamente ser calculados sobre la escala global (Li y Qi, 2010, Chen *et al.*, 2010; Hashmi *et al.*, 2010; NSF, 2009; The National Academies, 2001).

En la actualidad, los resultados de los modelos climáticos constituyen la base para las proyecciones futuras de cambio climático (IPCC, 2010; Lobell y Burke, 2010; Ziervogel *et al.*, 2008).

4.2.2 Modelos Hidrológicos

Ciertas aplicaciones de la ingeniería hidrológica pueden requerir análisis complejos que involucran variaciones temporales y-o espaciales de precipitación, abstracciones hidrológicas y escurrimiento. Típicamente, estos análisis encierran un gran número de cálculos y por ello pueden realizarse con una computadora digital. El uso de computadoras en todos los aspectos de la ingeniería hidrológica ha llevado a incrementar el énfasis en la modelación hidrológica (Ponce, 1989).

Un modelo hidrológico tiene un grupo de abstracciones matemáticas con el objetivo de describir fases relevantes del ciclo hidrológico. En principio, las técnicas de modelación hidrológica son aplicables a diferentes escalas ya sean pequeñas (pocas hectáreas), de tamaño medio (cientos de kilómetros cuadrados) o grandes (miles de kilómetros cuadrados) (Ponce, 1989).

En hidrología, existen diversas clasificaciones que agrupan a los modelos hidrológicos acorde a su estructura matemática y objetivo (Figura 1). Sin embargo, se pudiera establecer dos aproximaciones fundamentalmente diferentes en el arte del modelaje: 1) aproximación física, basada en proceso y 2) aproximación empírica o procesos de caja negra. La aproximación física se fundamenta en el requerimiento para describir los sistemas en términos de leyes fundamentales o principios teóricos de la ciencia. Esta aproximación científica provee el potencial para describir los mecanismos relevantes que controlan el sistema, la naturaleza de sus interacciones y su variabilidad temporal y espacial (Singh & Kumar, 1993).

La aproximación empírica trata de describir el sistema en términos de relaciones estadísticas o relaciones empíricas. Estos modelos pueden variar en complejidad, desde simples ecuaciones a ecuaciones más complejas que involucran más parámetros. A diferencia de los modelos físicos, los modelos empíricos proveen poca o nula información relacionada a los mecanismos internos del sistema (Singh, 1996; Sanchez Cohen, 2005).

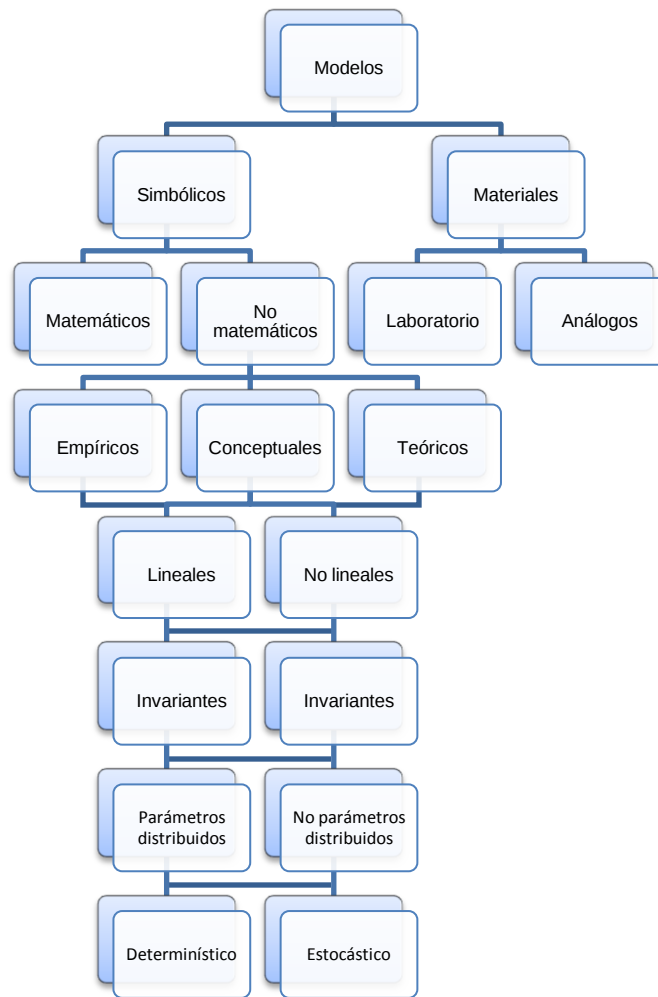


Figura 1. Agrupación de modelos acorde a su estructura y objetivo (Sanchez Cohen, 2005).

La aplicación de modelos empíricos está limitada por dos condiciones: 1) su aplicabilidad se restringe a las condiciones en las que los parámetros fueron calibrados y 2) no pueden utilizarse para explorar la operación interna del sistema físico que tratan de describir. Los modelos físicos y los modelos empíricos pueden subdividirse en: modelos deductivos (determinísticos) o inductivos (probabilísticos). Se dice que el proceso y su modelo son determinísticos si se ignora la probabilidad de ocurrencia de las variables que describen el proceso y el modelo sigue una ley definida de certidumbre (pero no una ley probabilística). En cambio, si se considera la probabilidad de ocurrencia

de las variables y los conceptos de probabilidad se consideran cuando se formula el modelo, el proceso y su modelo son descritos como estocásticos (dependientes del tiempo) ó probabilísticos (no dependientes del tiempo) (Sanchez Cohen, 2005).

Para procesos probabilísticos no dependientes del tiempo, la secuencia de ocurrencia de las variables involucradas en el proceso se ignora y se asume que la probabilidad de su ocurrencia sigue una distribución definida de probabilidad en la cual las variables se consideran puramente aleatorias (Haan, 1982).

Para procesos estocásticos dependientes del tiempo se toma en cuenta la secuencia de ocurrencia de las variables, las cuales pueden ser puramente aleatorias o no aleatorias y su distribución de probabilidad puede variar o no en el tiempo (condición de estacionalidad o no estacionalidad). En las variables puramente aleatorias los miembros de las series de tiempo son independientes, constituyendo por esto una secuencia aleatoria. En las variables no aleatorias los miembros de las series de tiempo son dependientes entre ellos y poseen un componente determinístico y un componente aleatorio, constituyendo una secuencia no aleatoria (Sanchez Cohen, 2005).

Un método intermedio entre modelos estocásticos y determinísticos lo constituye la aproximación paramétrica, la cual se define como el desarrollo y análisis de relaciones funcionales entre parámetros físicos involucrados en eventos hidrológicos para su uso en la generación o sintetización de información hidrológica (Gottfried, 1984).

El caso real entre estas dos posiciones contrastantes lo constituye el hecho de que frecuentemente se posee “alguna” noción de la relación causa-efecto de tal manera que no se está en una posición netamente estocástica. Sin embargo, tampoco se posee la totalidad de la información requerida como para someterse a lo riguroso del determinismo quedando entonces en la posición de la hidrología paramétrica (Sanchez Cohen, 2005).

En la práctica, el modelador hidrológico debería (1) seleccionar un modelo disponible, con conocimiento de su estructura, operación, capacidades, y limitaciones, o (2) desarrollar un modelo o modificar uno ya existente, basado en necesidades percibidas, disponibilidad de datos, y restricciones presupuestarias (Ponce, 1989).

La mayoría de las aplicaciones rutinarias son del primer tipo, en cuyo caso es necesario familiarizarse con las características del modelo y su composición. Los modelos probados tienen manuales que describen la interacción entre el usuario y el modelo. Además, algunos modelos pueden tener manuales de referencia que proveen información adicional sobre la estructura interna del modelo (Ponce, 1989).

Para investigación y proyectos de desarrollo, la construcción de un nuevo modelo podría estar garantizada. En este caso, el modelador hidrológico tiene una amplia variedad de métodos y técnicas, pero los costos del desarrollo de un modelo son comparativamente más altos (Ponce, 1989).

Algunos de los modelos hidrológicos usados actualmente son: WiMMed (Herrero *et al.*, 2011); FLDWAV (Reyna *et al.*, 2010); SSHH-I (Riccardi, 2000; Rentería y Stenta, 2003); Cuencador (Scioli, 2009); HEC-HMS (Al-Abed *et al.*, 2005; McColl & Agget, 2007; Jenièek, 2007) WEAP (Purkey *et al.*, 2007; Yates *et al.*, 2005a, 2005b, y 2006).

4.3 SICTOD

El sistema de ayuda para la toma de decisiones en agricultura de temporal (SICTOD), ha sido diseñado para auxiliar en el proceso de decidir la fecha de siembra óptima de diferentes cultivos acorde al balance de humedad en el suelo diario esperado para zonas de temporal. La disponibilidad de agua depende del sitio, las características del suelo y las condiciones de lluvia (Sánchez Cohen, *et al.*, 2013).

El balance diario se realiza a partir de conocer la humedad antecedente o inicial en el suelo (ΔS_{i-1}) en un punto de control, añadiendo las entradas al sistema debido a precipitación (Pp), escurrimiento (Q_i), ascenso capilar (δ), y descontando las pérdidas por evapotranspiración (Et), percolación profunda (Z) y escurrimiento fuera del área de cultivo (Q_o) (Sánchez Cohen, 1994; Martín de Santa Olalla, 2005). El término pérdidas, en el caso de la evapotranspiración se refiere a la cantidad de agua que el suelo “pierde” por este concepto. El diagrama conceptual del balance de humedad en el suelo es representado en la Figura 2.

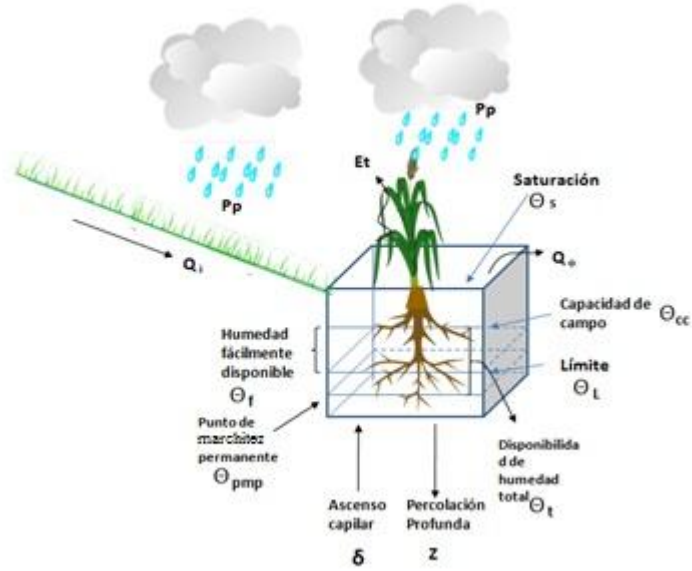


Figura 2. Modelo conceptual y variables del balance diario de agua del suelo (Sánchez Cohen, *et al.*, 2013).

La ecuación del balance diario de agua en el suelo que actúa sobre el modelo conceptual descrito anteriormente es representado por:

$$\Delta S_i = \Delta S_{i-1} + [Pp + Q + \delta]_i - [Et + Qo + Z]_i \quad (1)$$

Donde:

ΔS_i = Cambio en el contenido de humedad en el suelo (mm) en el día i .

ΔS_{i-1} = Contenido de humedad en el suelo en el día anterior (mm).

Pp_i = Precipitación en el día i en mm.

Q_i = Escurrimiento superficial que se queda en el área de cultivo (mm) en el día i .

δ_i = Ascenso capilar (mm) en el día i .

Et_i = Evapotranspiración del cultivo (mm) en el día i .

Qo_i = Escurrimiento superficial que sale del área de cultivo (mm) en el día i .

Z_i = Percolación profunda (mm) en el día i .

El modelo incluye un generador de datos de lluvia con base diaria de donde calcula la evapotranspiración actual, la cantidad de agua que se queda en el suelo y la que se percola mas allá del sistema de raíces del cultivo. El sistema contempla la opción de añadir una obra de captación de donde calcula el escurrimiento hacia el área de cultivo.

El programa contiene una base de datos de varias estaciones climatológicas del país pre analizadas. En este análisis se obtuvieron las probabilidades condicionales mensuales de la matriz de transición de la precipitación de donde se genera la lluvia diaria mediante un proceso Markoviano de primer orden. Para generar los días secos y los días húmedos, son utilizadas las probabilidades PWD (probabilidad de que en un día determinado llueva dado que el día anterior no llovió) y PWW (probabilidad de que en un día determinado llueva dado que el día anterior también llovió). De esta manera, si existe un evento lluvioso dado que el día anterior fue seco, PWD es la probabilidad de precipitación; si existe un evento de lluvia dado que el día anterior fue húmedo PWW es la probabilidad de precipitación.

Existen otras dos probabilidades complementarias para PWW y PWD y estas son calculadas a partir de:

$$PDW = 1 - PWW \quad (2)$$

$$PDD = 1 - PWD \quad (3)$$

Donde PDW, es la probabilidad de ocurrencia de lluvia en un día seco, dado que el día anterior fue húmedo y PDD es la probabilidad de ocurrencia de un día seco, dado que el día anterior fue seco.

Los parámetros PWD y PWW necesarios para simular la ocurrencia de la precipitación son generados a partir de valores diarios de precipitación, y agrupados en valores mensuales, utilizando el modelo WXPARM (Williams *et al.*, 1992).

El programa también puede hacer el balance de agua en el suelo si se considera cubierta de mulch orgánico ó si existen problemas de salinidad en el suelo. Por otra parte se puede simular “n” número de ciclos del cultivo para conocer el rendimiento que se pudiera esperar en el sitio de interés y calcula el riesgo implícito por déficit de humedad en el suelo.

El cálculo del rendimiento del cultivo se fundamenta en el balance de humedad actual en el suelo y en este caso, cuando cambian las condiciones del sitio, el rendimiento cambiará en consecuencia. Para estimar el rendimiento mediante éste método, el modelo hace uso de las funciones de producción de agua del cultivo, mismas que han sido obtenidas bajo condiciones controladas de aprovisionamiento de agua al suelo en diferentes etapas del crecimiento del cultivo. Así el rendimiento es función de la evapotranspiración del cultivo, la cual depende del contenido de humedad del suelo y de la demanda de la atmósfera. Las funciones de ajuste son como lo muestra la ecuación 4. Véase Cuadro 1 y Figura 3.

$$Rnd = a + b(Et) + cEt^2 \quad (4)$$

Donde Rnd es el rendimiento en toneladas por hectárea y Et es la evapotranspiración actual en centímetros; a, b y c son parámetros de regresión.

Cuadro 1. Coeficientes de regresión de las funciones de producción del agua para los cultivos considerados en el modelo.

CULTIVO	a	b	c	R ²
Maíz	-8.923	0.413	-0.0026	0.66
Frijol	-0.8823	0.118	-0.0010	0.73
Cebada	-0.255	0.020	-0.00002	0.80
Avena	-2138.0	30.6	-	0.85
Trigo	-2.4969	0.016	-	0.85
Sorgo	-1.305	0.085	0.001	0.86

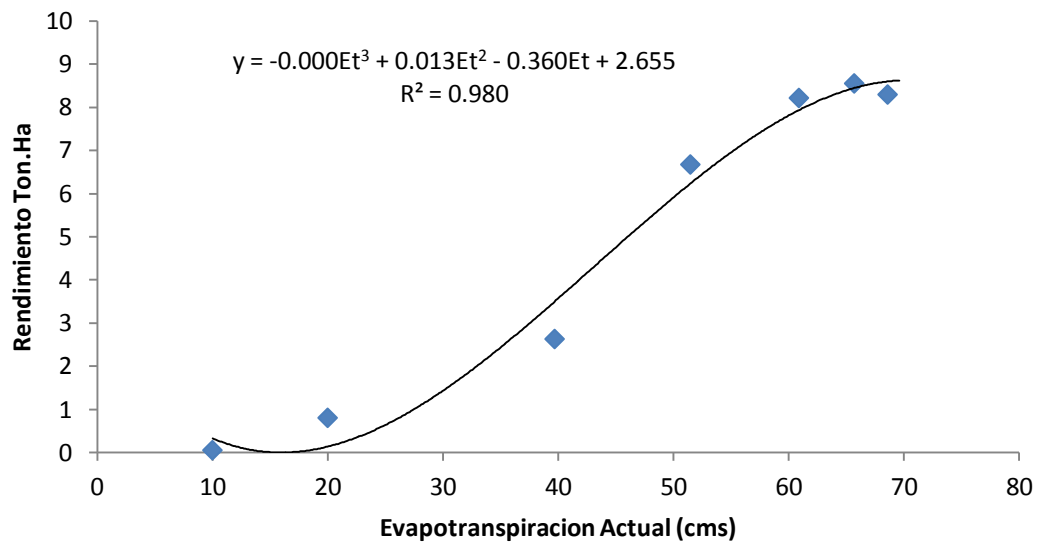


Figura 3. Ejemplo de la función de producción de agua para el cultivo maíz

Si bien es cierto, el sistema solicita el valor máximo de rendimiento referido al máximo rendimiento que se puede esperar acorde al historial en condiciones ideales de cultivo bajo temporal. En ocasiones puede suceder que no se conoce en forma confiable este valor, por lo que se puede recurrir a los anuarios estadísticos que presenta SAGARPA. En internet se encuentra la página del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) <http://www.siap.gob.mx/> donde se encuentran los rendimientos medios de varios cultivos por entidad y más aún por municipio, el valor se expresa en ton ha^{-1} .

5.- MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Área de estudio

Geográficamente el estado de Durango se encuentra en el Noroeste de la República Mexicana, en las coordenadas geográficas extremas al Norte 26° 53', al Sur 22° 16' de Latitud Norte; al este 102° 29' y al Oeste 107° 16' de Longitud Oeste (Figura 3). Respecto al porcentaje territorial en el país representa el 6.3 % de la superficie con una extensión de 123 181 Km², lo cual lo sitúa en el cuarto sitio de la clasificación estatal por extensión territorial, la altitud promedio es de 1775 msnm. Colinda al norte con el estado de Chihuahua y Coahuila de Zaragoza; al este con Coahuila de Zaragoza y Zacatecas; al sur con el estado de Zacatecas, Nayarit y Sinaloa; y al oeste con Sinaloa y Chihuahua (INEGI, 2008).

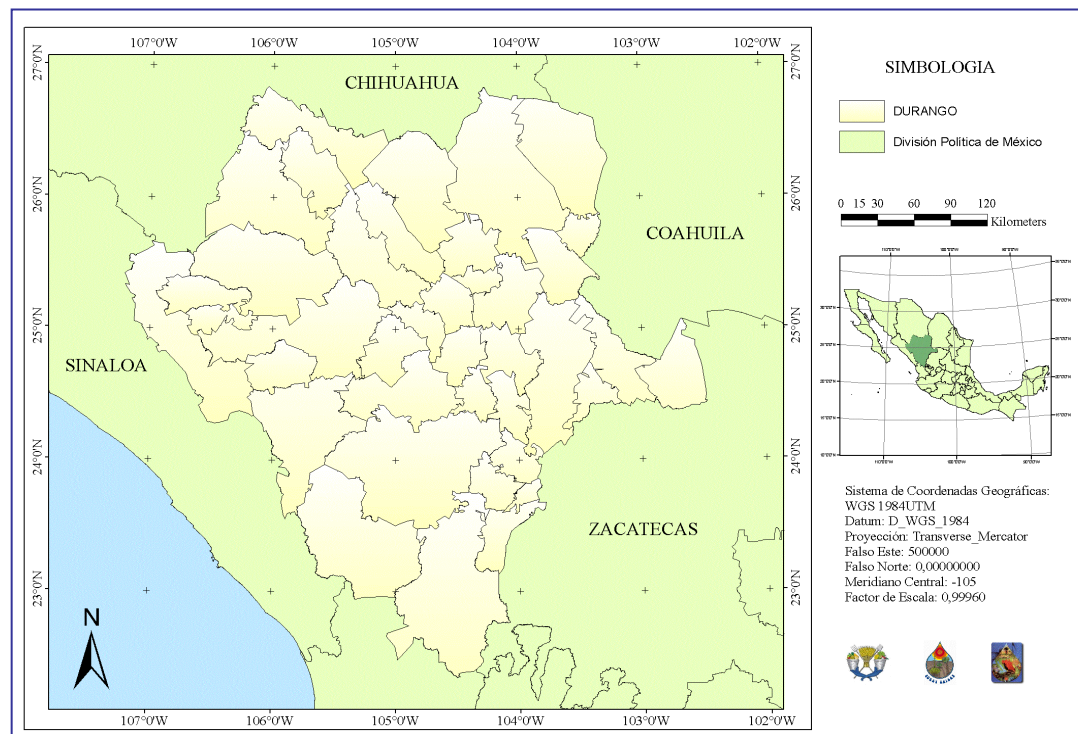


Figura 4. Localización geográfica del estado de Durango (Esquivel Arriaga, 2011).

En el estado de Durango se localizan cuatro provincias fisiográficas: La Sierra Madre Occidental que se extiende en dirección noroeste-sureste, y ocupa el 71.3 % de la superficie estatal y está constituida principalmente por rocas ígneas y sedimentarias del periodo Terciario correspondientes a la era Cenozoica. Las Sierras y Llanuras del Norte que involucra la subprovincia del Bolsón de Mapimí, lo que la define como una provincia árida y semiárida, con sierras bajas y abruptas, se compone principalmente por rocas sedimentarias, ígneas y suelos originados en el periodo Cuaternario y Terciario de la era Cenozoica. La Sierra Madre Oriental se extiende en la parte Noreste del estado, constituida fundamentalmente por rocas sedimentarias de la era mesozoica. Por último, la Mesa del Centro situada entre las sierras Madre Oriental y Occidental en la parte oriental del estado, caracterizada por la presencia de llanuras y lomeríos aluviales, y geológicamente el tipo de roca dominante es de tipo sedimentaria (INEGI, 2008).

Con respecto al clima el grupo B o seco cubren la mayoría de la superficie del estado sobre todo en la parte oriental y en la parte correspondiente a la región de los valles, el clima semiseco templado (BS1k) ocupa el 27.34 % de la superficie estatal, con una precipitación de 200 a 500 mm. Los climas del grupo C (templados húmedos) dominan ampliamente en la Sierra Madre, siendo el C (w) templado subhúmedo con lluvias en verano, con una extensión del 22.55 % del territorio estatal (Figura 4). En esta parte del estado se presenta inviernos con heladas y nevadas debido a las bajas temperaturas y los vientos húmedos procedentes del pacífico. La precipitación media es de 800 mm y la temperatura promedio es de 16 °C (INEGI, 2008).

Dentro del estado existen siete regiones hidrológicas; la RH 10 de nombre Sinaloa, RH11 Presidio-San Pedro, RH12 Lerma-Santiago, RH24 Bravo-Conchos, RH35 Mapimí, RH36 Nazas-Aguanaval, y la RH37 correspondiente al Salado (Figura 5). Respecto a las aguas superficiales, la hidrografía está representada por las corrientes principales de los ríos: Sextin-Nazas, la Saucedá-Mezquital, Santiago-Ramos, Tepehuanes, Aguanaval, Los Remedios, Colorado-Humaya, Galindo-San Diego, San Lorenzo-San Gregorio, Piaxtla y el Tunal (INEGI, 2008).

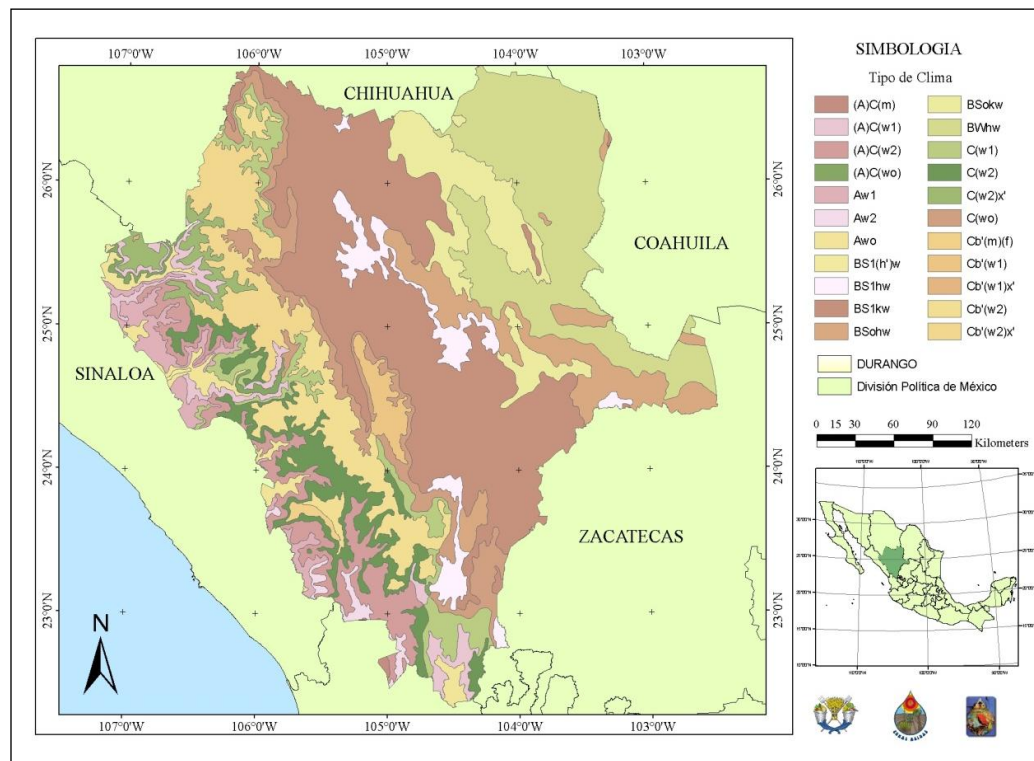


Figura 5. Climas del estado de Durango (Esquivel Arriaga, 2011).

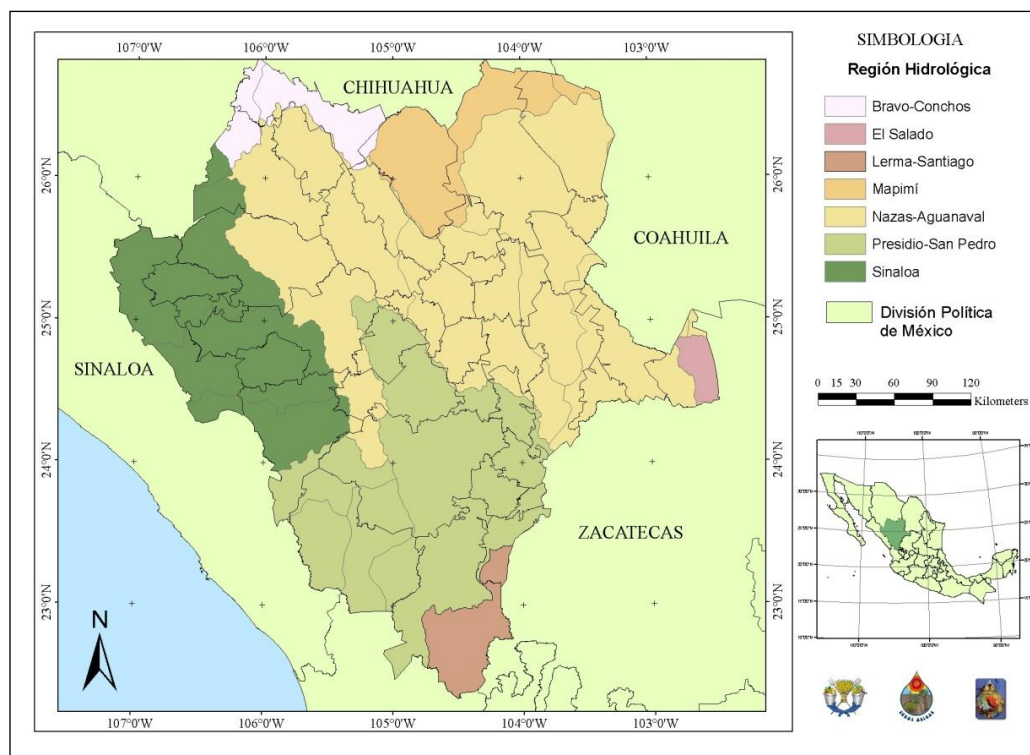


Figura 6. Regiones hidrológicas del estado de Durango (Esquivel Arriaga, 2011).

Sobre las corrientes principales se ubican los siguientes aprovechamientos: Presas: Lázaro Cárdenas (El Palmito), Francisco Zarco; estas dos cuerpos de almacenamiento son lo que sostienen en gran parte la actividad agrícola de riego en la Región Lagunera, presa Guadalupe Victoria, San Bartola, Canoas, Francisco Villa, Santiago Bayacora y Federalismo Mexicano (INEGI, 2008).

Existen cuatro principales tipos de suelo que predominan en el estado, siendo el de mayor relevancia el de tipo Litosol con 29.54% de la superficie estatal, Regosol con 20.07 %, Xerosol con 13.05%, Feozem con 12.64% y otros tipos de suelo con un 24.7% del territorio del estado. Respecto a la distribución de la vegetación se encuentra la presencia de pastizal; bosque de pino y encino, y de matorral.

El uso potencial de la tierra en el aspecto agrícola es cercano al 44.77%, y presenta características de tipo mecanizado y de tracción animal continua y estacional; a su vez, 55.23% de la superficie estatal no es apto para la agricultura; en el aspecto pecuario se tiene un 80.42% destinado a las praderas cultivadas, aprovechamiento de la vegetación de pastizal y de la vegetación natural diferente al pastizal, entre otros; y solo el 19.58% de la superficie estatal no es apta para el uso pecuario (INEGI, 2008).

5.2 Materiales

Los programas computacionales utilizados en el estudio fueron:

- Microsoft Office Excel 2007. Para procesamiento de información climática y elaboración de gráficos
- SICLIMA: Sistema de Consulta y Procesamiento de Información Climatológica de México (Díaz y Sánchez, 2007).
- LARS-WG 5.0: Long Ashton Research Station Weather Generator. Como modelo estadístico de reducción de escala.
- PARAMETROS2. Como una subrutina para adecuar los datos climáticos e ingresarlos al WXPARM.
- WXPARM: Weather Parameter Generating Utility – PC (Williams *et al.*, 1992). Como generador de parámetros climáticos.
- SICTOD1: Sistema para Cuantificar Riesgo Hidrológico en Agricultura de Temporal (Sánchez Cohen, *et al.*, 2013).
- ARCMAP 10.1. Como herramienta de sistema de información geográfica.

5.3 Metodología

5.3.1 Descripción del enfoque metodológico

Esta investigación se efectuó en diferentes fases (Figura 7): 1) La selección de las Estaciones Meteorológicas (EM) consideradas en el estudio a partir de la base de datos del sistema de información SICLIMA, 2) Proceso de re-escalado mediante el Generador de Tiempo Estocástico LARS-WG, 3) Síntesis y generación de parámetros climáticos (cálculo de probabilidades) con los programas PARAMETROS2 y WXPARM respectivamente para los datos observados y calculados, 4) Integrar la generación de las probabilidades observadas y calculadas del proceso anterior en el Sistema Computarizado para Toma de Decisiones (SICTOD), y finalmente; 5) Elaboración de mapas de zonificación del riesgo considerando los efectos del cambio climático usando ARCMAP 10.1.

5.3.2 Selección de estaciones meteorológicas

Los criterios recomendados (Magaña, 2010) para llevar a cabo dicha selección se basa en tres criterios a saber:

- 1) *Longitud de la serie.*- la longitud de la serie se refiere a los años de registro para las variables Tmax, Tmin y Pp, para lo cual, se seleccionaron las EM-SMN con al menos 30 años de información.
- 2) *Calidad de datos.*- la calidad de datos es un proceso de control estadístico y gráfico para decidir que EM serán usadas como parte del estudio cuya información sea lo más consistente y homogénea posible.

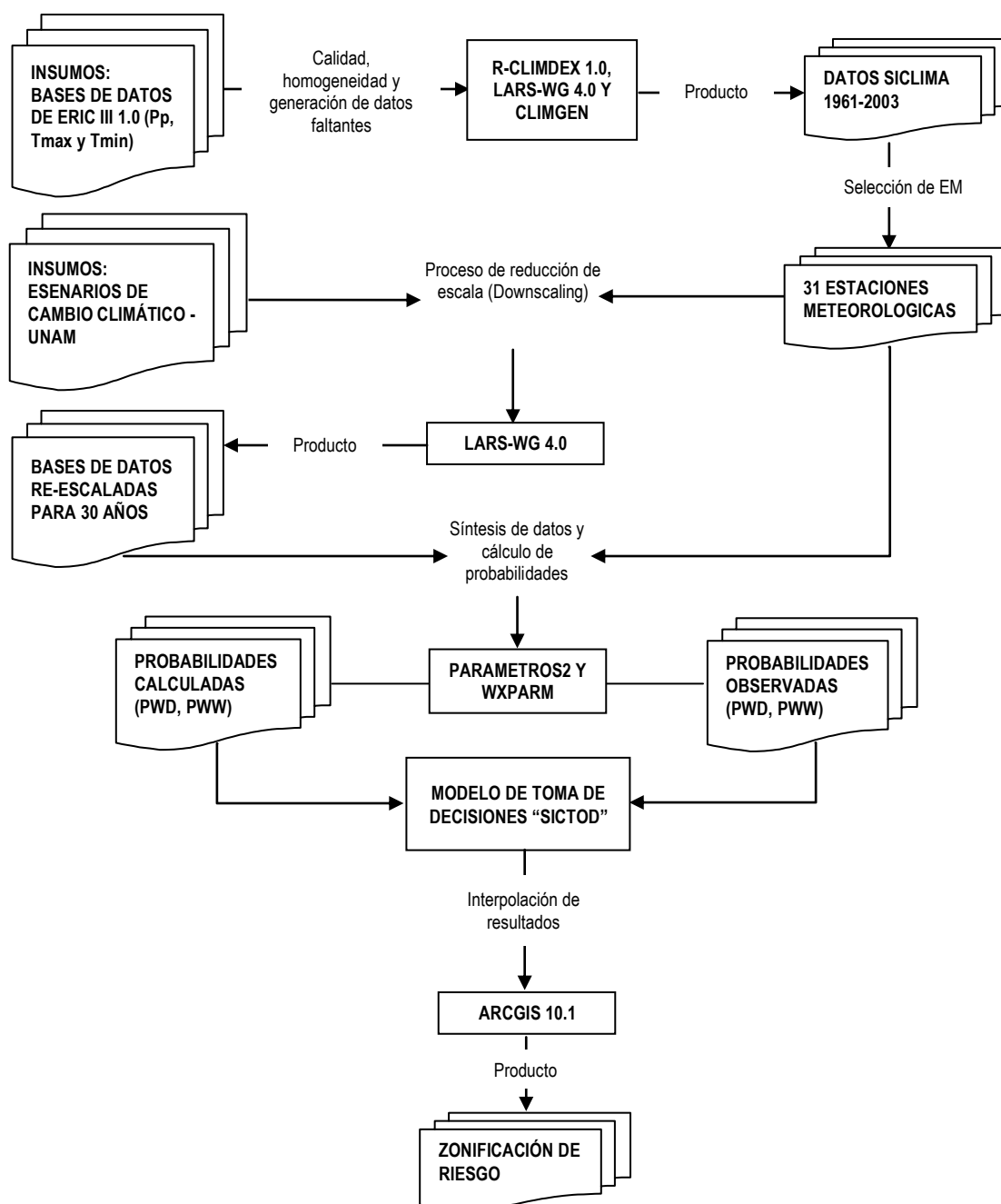


Figura 7. Enfoque metodológico considerado en el estudio.

A nivel nacional la antigüedad, consistencia y homogeneidad de la información respecto a las estaciones meteorológicas es relativamente deficiente; ya que muchas estaciones presentan una gran carencia de datos los cuales son originados por razones técnicas y/o humanas; lo que da como resultado que pocas estaciones tengan el 100 % de la información climatológica.

Sin embargo este problema puede ser solventado mediante el uso de esquemas como el propuesto por Díaz y Cortina (2005) quienes desarrollaron un sistema con funciones específicas, distribuidas en distintos módulos, cuya tarea es procesar la información climática contenida en archivos con formato DBF y lleva como nombre al Sistema de Consulta y Procesamiento de Información Climatológica de México, la cual es una herramienta automatizada que procesó y analizó información en periodos diarios, mensuales, anuales e históricos, bajo un ambiente computacional accesible que integra módulos de visualización grafica de los datos de cada una de las 2,271 estaciones climáticas repartidas en todo el país. Usando un periodo de información de 1961 a 2003. Por lo que este criterio queda cubierto.

- 3) *Proximidad al nodo de los MCG del SEMARNAT-INE.*- la proximidad de las EM-SMN a los Nodos de la malla de resolución de 2,500 km² (50 x 50 km) se refiere a la selección de las EM que presentan la menor distancia al Nodo (Figura 8).

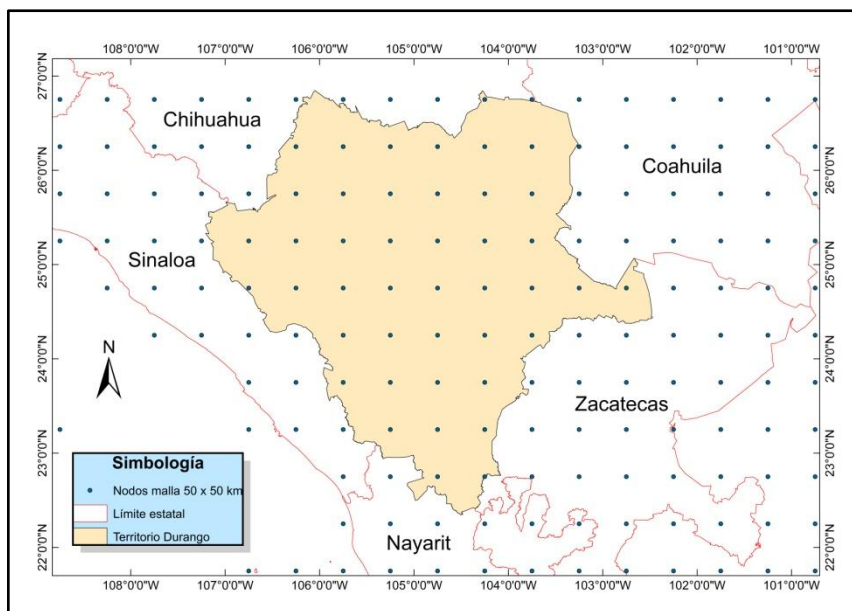


Figura 8. Distribución espacial de nodos que corresponden a Durango de la malla de ECRM con equidistancias de 0.5° (50 x 50 km).

Además de estos criterios, se incluyó un criterio más de selección:

- 4) *Altitud de las EM.*- para aquellas EM que presentaron una distancia al Nodo similar o igual, se aplicó este criterio usando como base el Modelo Digital de Elevación (MDE) del estado de Durango ya que el Nodo posee un sistema de coordenadas geográfico que lo ubican en un lugar determinado y sobreponiendo el MDE en un Sistema de Información Geográfica se puede observar la altitud del lugar donde se encuentra el Nodo. Así que se seleccionaron las EM que tuviesen una altitud afín al lugar donde se ubica el Nodo.

La aplicación de estos cuatro criterios se ilustra gráficamente en la Figura 9, cuya descripción es la siguiente: Se hizo acopio de información de las 106 EM enclavadas en el estado de Durango, de acuerdo con los datos que maneja el programa SICLIMA.

Después de analizarlas se encontró, que en su historial tienen años sin datos representando la ausencia de información con -9999.

Con base en su longitud (criterio 1) se eligieron solo las EM que tenían a lo menos 30 años de registro. Como resultado de este proceso se hizo una primera selección de 45 EM.

Con respecto a la proximidad a un Nodo (criterio 3), se logró por sobreposición de mapas bajo un SIG, empleando para ello los mapas estatales del área de estudio (polígonos shp), y archivos de puntos tipo “.shp” de los nodos con resolución de 2,500 km² (50 x 50 km) así como de las EM seleccionadas a partir del criterio 1. Todos estos archivos en un sistema de coordenadas cartográficas mundial (WGS84).

Para el cuarto criterio correspondiente al gradiente altitudinal ya que esta variable explica en cierta medida la repartición espacial de las precipitaciones (Nouvelot *et al.*, 2004). Para aquellas EM que compartieran una distancia al Nodo similar se aplicó este criterio usando como base el MDE del estado de Durango ya que el Nodo posee un sistema de coordenadas geográfico que lo ubican en un lugar determinado y sobreponiendo el MDE en un SIG se puede observar la altitud del lugar donde se encuentra el Nodo. Así que se seleccionaron las EM que tuviesen una altitud afín al lugar donde se ubica el Nodo.

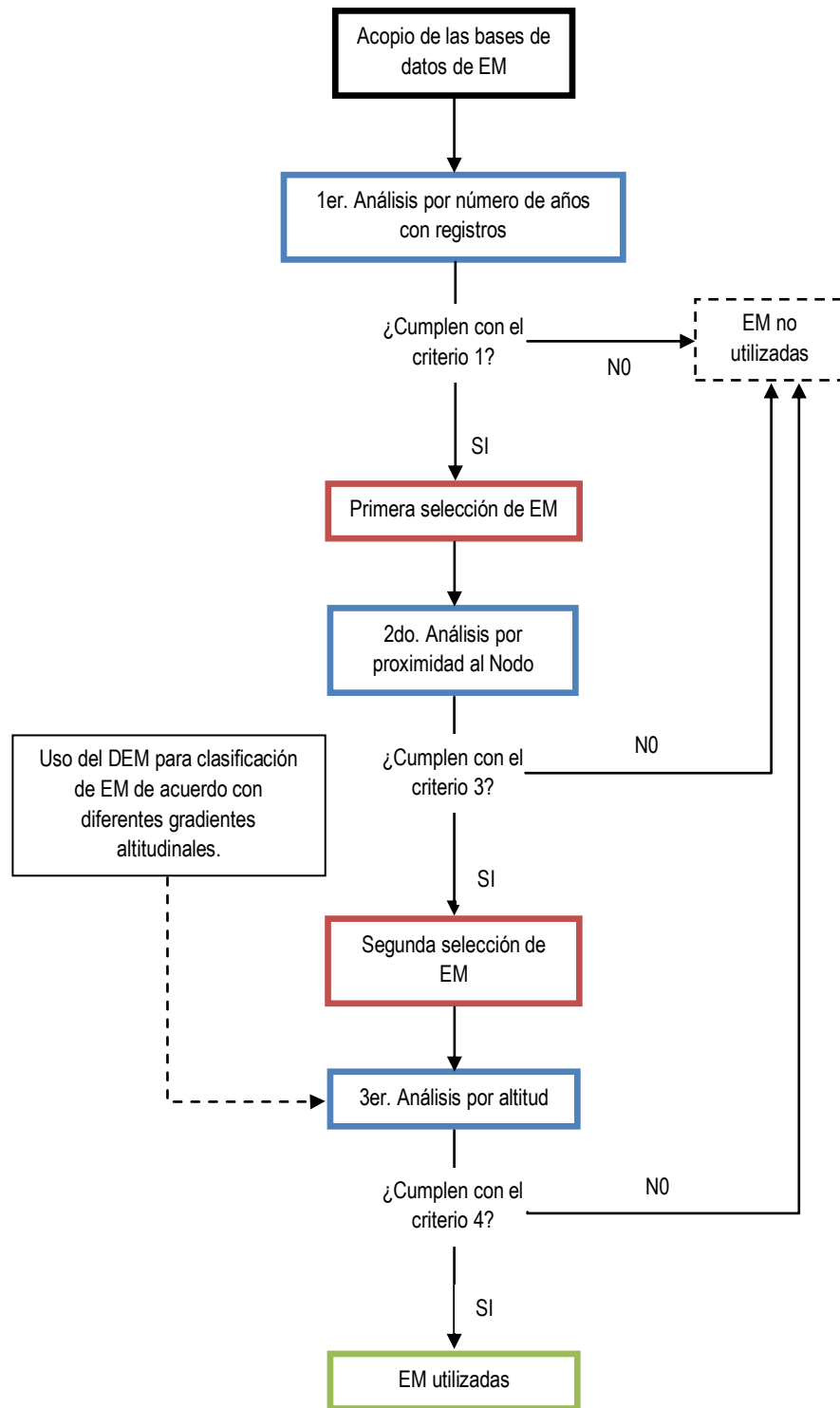


Figura 9. Diagrama de flujo para el control de calidad y selección de las EM-SMN

Finalmente se eligieron 38 EM-SMN de las cuales 31 son del estado de Durango, y con el fin de representar de mejor manera las variables que caracterizan el clima en todo el territorio se agregaron 2 de Chihuahua, 1 de Coahuila, 1 de Sinaloa, 2 de Nayarit y 1 de Zacatecas, cuya relación se muestra en la Figura 10 y el Cuadro 2.

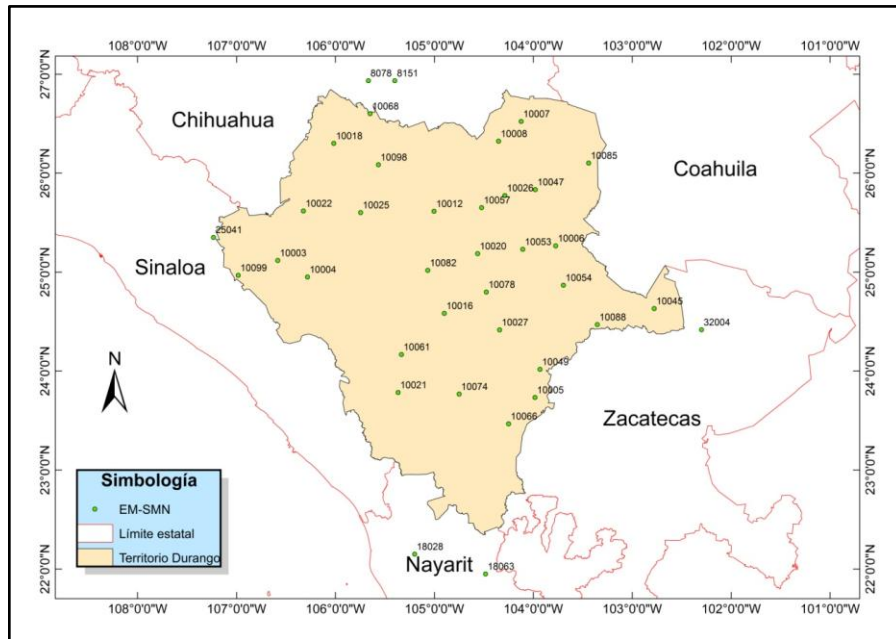


Figura 10. Estaciones Meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional (EMSMN) empleadas para el análisis climático del Estado de Durango.

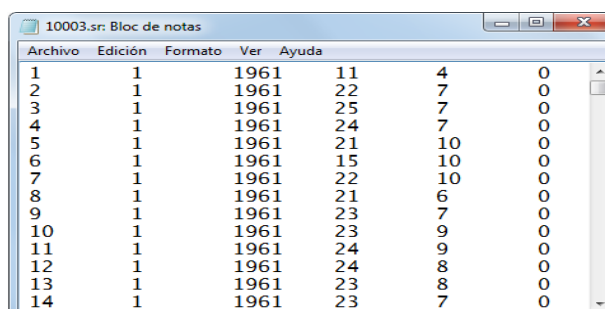
5.3.3 Proceso de reducción de escala

Una vez que se seleccionaron las EM, se procedió con la manipulación de la información para hacerla compatible con el Generador de Tiempo Estocástico (LARS-WG) para la siguiente etapa del estudio. Los archivos utilizados, que contienen la información climática de las estaciones, se manejaron en hojas de cálculo de Microsoft Office Excel; y si en su estructura se presenta algún período con ausencia de datos, estos se denotaron con el código -99.

Cuadro 2. Estaciones Meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional (EMSMN) empleadas para el análisis climático del Estado de Durango.

No. estación	Clave estación	Nombre de la estación	Municipio	Coordenadas geográficas (grados decimales)		Altura (m)
				X	Y	Z
Coahuila						
1	5028	Presa Guadalupe	San Pedro	-103.22	25.759	1110
Chihuahua						
1	8078	Hidalgo del Parral	Hidalgo del Parral	-105.667	26.933	1661
2	8151	Valle de Allende	Allende	-105.400	26.933	1960
Durango						
1	10003	Canelas	Canelas	-106.583	25.117	1360
2	10004	Cañon de Fernández	Cuencame	-103.774	25.265	1200
3	10005	Ceballos	Mapimí	-104.123	26.522	1188
4	10006	Cendradillas	Guanaceví	-106.017	26.300	2500
5	10007	Cienega de Escobar	Tepehuanes	-105.746	25.601	2144
6	10008	Cinco de Mayo	San Pedro del Gallo	-104.288	25.773	1700
7	10012	Cuencame	Cuencame	-103.696	24.867	1600
8	10016	Chinacates	Santiago Papasquiaro	-105.067	25.017	2040
9	10018	El Cantil	Santiago Papasquiaro	-106.283	24.950	2035
10	10020	El Derrame	Mapimí	-104.351	26.322	1300
11	10021	El Palmito II	Inde	-105.004	25.614	1600
12	10022	EL Pino	Canatlan	-104.900	24.583	2004
13	10025	El Salto (SMN)	Pueblo Nuevo	-105.367	23.783	2560
14	10026	El Tarahumar	Tepehuanes	-106.324	25.617	2435
15	10027	Francisco I. Madero (SMN)	Panuco de Coronado	-104.341	24.416	1961
16	10045	Mapimí (Km. 29)	Mapimí	-103.980	25.833	1300
17	10047	Narciso Mendoza	Poanas	-103.933	24.017	1910
18	10049	Nazas	Nazas	-104.107	25.230	1300
19	10053	Peñoles	San Pedro del Gallo	-104.523	25.651	1950
20	10054	Peña del Águila	Durango	-105.333	24.167	1896
21	10057	Presa Santa Elena	Suchil	-104.250	23.467	2000
22	10061	Rosario	Melchor Ocampo	-105.650	26.600	1790
23	10066	San Jose de Acevedo	Nombre de Dios	-104.750	23.767	1750
24	10068	San Juan del Rio (SMN)	San Juan del Rio	-104.475	24.798	1700
25	10074	Santa Clara	Santa Clara	-103.353	24.469	1800
26	10078	Sardinas	San Bernardo	-105.566	26.084	1639
27	10082	Tamazula	Tamazula	-106.983	24.967	1580
28	10085	Tlahualilo	Tlahualilo	-103.441	26.101	1100
29	10088	Vicente Guerrero	Vicente Guerrero	-103.983	23.733	1913
30	10098	Rodeo	Rodeo	-104.563	25.186	1450
31	10099	San Juan de Guadalupe	San Juan de Guadalupe	-102.778	24.631	1700
Nayarit						
1	18028	Rosamorada	Rosamorada	-105.200	22.150	44
2	18063	Chapalacana	Jesús María	-104.483	21.950	1018
Sinaloa						
1	25041	Guatenipa	Badiraguato	-107.233	25.350	290
Zacatecas						
1	32004	Camacho	Mazapil	-102.300	24.417	1665

El procedimiento consistió en escoger el periodo de información de 1961-2003, posteriormente se eliminaron los títulos para cada columna de información (ya sea temperatura máxima, temperatura mínima o precipitación), esto con la finalidad de dejar en el archivo solo los valores correspondientes a cada variable climática como se muestra en la Figura 11 y el archivo fue guardado con extensión *.sr.



Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda		
1	1	1961	11	4	0	
2	1	1961	22	7	0	
3	1	1961	25	7	0	
4	1	1961	24	7	0	
5	1	1961	21	10	0	
6	1	1961	15	10	0	
7	1	1961	22	10	0	
8	1	1961	21	6	0	
9	1	1961	23	7	0	
10	1	1961	23	9	0	
11	1	1961	24	9	0	
12	1	1961	24	8	0	
13	1	1961	23	8	0	
14	1	1961	23	7	0	

Figura 11. Formato de un archivo *.sr

Los archivos con extensión *.sr son aquellos donde van las bases de datos pero el programa LARS-WG también requiere de archivos de localización *.st. Estos últimos archivos fueron elaborados a base de Bloc de Notas donde deben ir indicados diferentes aspectos como el nombre del archivo *.sr (SITE), latitud y longitud en grados decimales al igual que la altitud en msnm (LAT, LON and ALT), también debe ir indicada la ruta que ocupa el archivo *.sr dentro de la PC (WEATHER FILES) así como la indicación de cómo están ordenadas las columnas del archivo *.sr con los datos de la EM (FORMAT), al finalizar estos aspectos debe colocarse (END) para indicar al LARS-WG que allí termina el archivo de localización. Un ejemplo de esto se ilustra en la Figura 12.

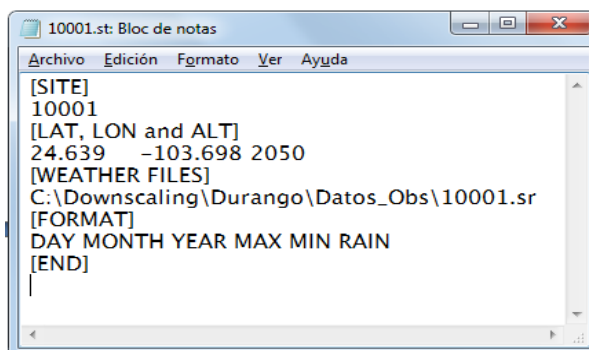


Figura 12. Formato de un archivo *.st

Otros archivos que usa LARS-WG para la generación de series sintéticas, son los archivos de escenarios climáticos y esto se lleva a cabo mediante el uso de los Modelos Climáticos Regionalizados para México (MCRM), creados por el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, los cuales tienen una resolución de 2,500 km², cuyos nodos son equidistantes a razón de 0.5 x 0.5°, lo que equivale a 50 x 50 km. Dentro del proceso de reducción de escala se usó el escenario A2 para el periodo 2010-2039 y así obtener bases sintéticas afectadas por cambio climático las cuales tienen una terminación *WG.dat.

5.3.4 Cálculo de probabilidades

Las bases de datos reescaladas calculadas por LARS-WG con terminación *WG.dat las bases de datos de SICLIMA fueron abiertas en Excel usando la opción: delimitado por espacio, para posteriormente ser guardadas en un archivo nuevo con terminación *.csv (delimitado por comas) y se da el nombre correspondiente.

Ya que se tienen los archivos con la extensión *.csv; se procedió a abrir el programa computacional PARAMETRO2.exe, en el cual se ingresó la información del archivo como se muestra en la Figura 13.



Figura 13. Interfaz de PARAMETROS2.

Donde en el apartado NOMBRE DE ARCHIVO CON LOS DATOS, se colocó el nombre del archivo *.csv recién creado; en NOMBRE DE ARCHIVO DE SALIDA, se le asignó el mismo nombre pero con extensión *.dat; en la parte de LONGITUD DEL ARCHIVO, se escribió el número de años con los que cuenta el archivo *.csv y en AÑO DE INICIO se indicó el primer año con el que empieza el archivo *.csv.

El uso de esta subrutina permite adecuar los archivos *.csv obtenidos en el re-escalado y puedan ser leídos por WXPARM ya que se requiere estén en una presentación o acomodo “especial”. En el último procedimiento se abre el WXPARM.EXE desde C:\ > Como se observa en la Figura 14 y se ingresa el nombre del archivo con extensión *.dat creado por PARAMETROS2.

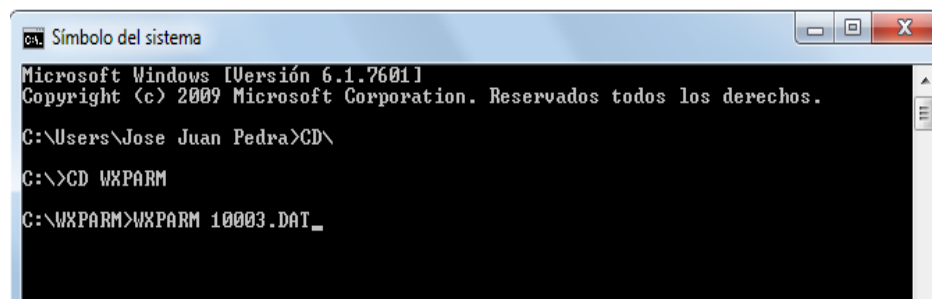


Figura 14. Interfaz de WXPARM.

El resultado es la generación de un archivo con extensión *.lis donde están sintetizados, datos de precipitación, temperatura, PWW, PWD entre otros (Figura 15).

```

1
WXPARM - Weather Parameter Generating Utility - PC
PC version updated - January 311.991
USDA/ARS Grassland Soil & Water Research Laboratory
Temple, TX 76502
J.R. Williams

10003-31.dat
1 10003-31.dat

NO YRS SIM = 31

MONTH 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
TMAX 23.2 24.2 25.5 27.8 29.9 30.3 28.2 28.1 28.1 27.7 26.2 23.5 DEG C
TMIN 8.4 8.5 9.7 11.9 14.2 16 16.5 16.3 16.1 14.5 12 9.2 DEG C
SDTMAX 2.9 3.5 3.4 2.8 2 2.1 2.2 2 1.9 2.4 2.6 3.6 DEG C
SDTMIN 2.3 2.5 2.2 2.2 2 1.8 1.4 1.3 1.4 2 2.4 2.6 DEG C
RAIN 60.6 30.6 23.4 9.6 23.2 150.8 331.5 287.3 204.4 89.3 41.1 80.8 MM
SDRF 18.97 13.31 18.59 8.99 11.26 14.61 12.9 12.11 12.43 21.28 16.91 23.08 MM
SKRF 4.679 1.613 2.809 3.818 2.2 1.92 1.993 2.313 2.462 4.468 2.133 2.794
PWI 0.08 0.053 0.032 0.034 0.044 0.175 0.623 0.577 0.41 0.128 0.052 0.098
PWW 0.525 0.5 0.396 0.348 0.451 0.683 0.853 0.807 0.722 0.468 0.511 0.448
DAYP 4.5 2.7 1.5 1.5 2.3 10.7 25.1 23.2 17.9 6 2.9 4.7
S RAD 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 LY
R HUM 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 %
W VEL 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 M/SEC
SDWVEL 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 M/SEC
SKWVEL 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

AVE ANN RF = 1332.6 MM
1

```

Figura 15. Archivo creado en WXPARM.

5.3.5 Calibración del generador de lluvia

A continuación en la Figura 16 se presenta la comparación de valores promedio mensuales de precipitación para la estación de Ceballos, Mapimí, comparando la precipitación observada del periodo 1961-2003 vs. la precipitación simulada dentro de un periodo de 30 años re-escalada en LARS-WG y sintetizada en WXPARM.

Se graficaron los datos de probabilidad PWW y PWD del periodo observado (1961-2003) vs. PWW y PWD de datos simulados en LARS-WG (Figura 17).

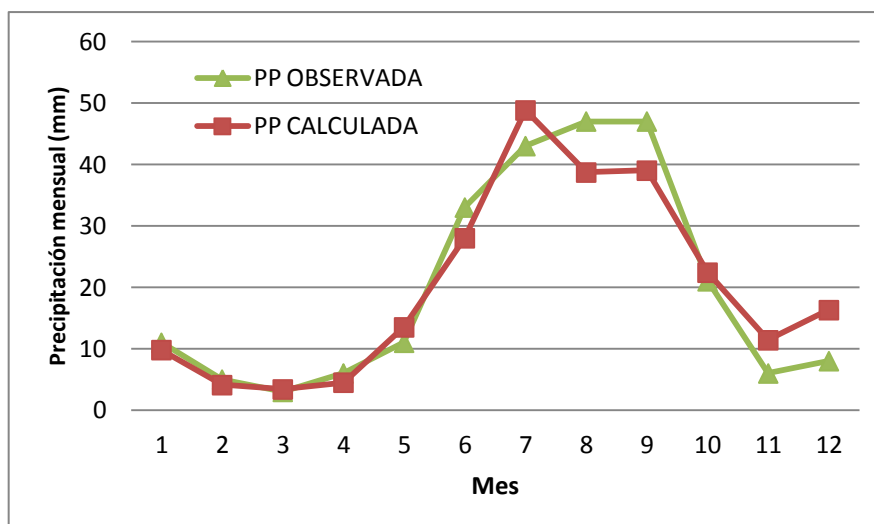


Figura 16. Comparación de la precipitación media mensual observada del periodo 1961-2003 contra precipitación media mensual obtenida a partir de la simulación de 30 años con LARS-WG y posterior síntesis con WXPARM para la EM Ceballos, Mapimí.

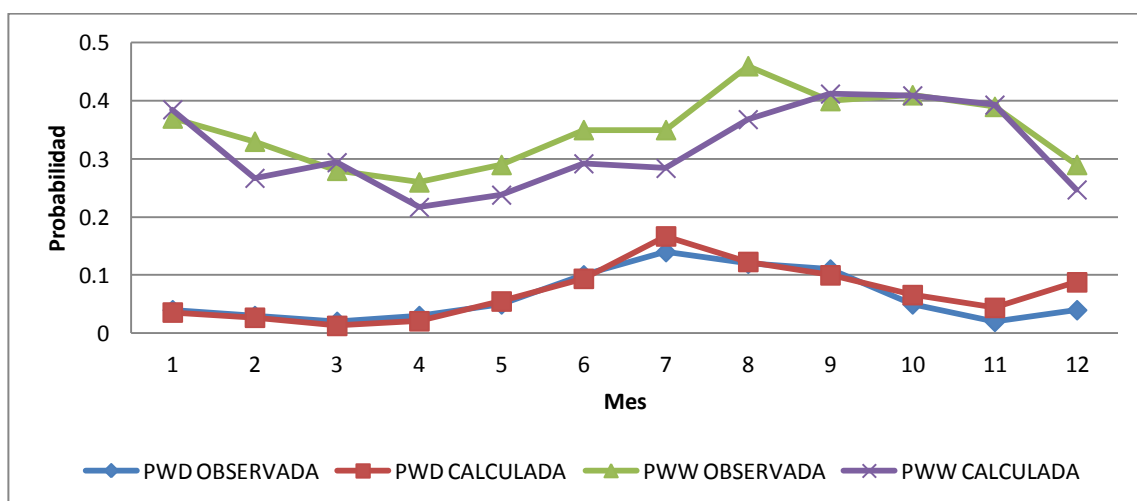


Figura 17. Comparación de los parámetros PWD y PWW creados por WXPARM. Datos observados en el periodo 1961-2003 contra datos re-escalados usando una serie de 30 años para la EM de Ceballos en Mapimí.

La Figura 18 muestra la comparación entre los valores de PWW obtenidos a partir de datos diarios observados de precipitación para la estación de Ceballos, Mapimí del periodo 1961-2003, y los valores de PWW obtenidos a partir de datos diarios de precipitación simulados utilizando LARS-WG en un periodo de 30 años.

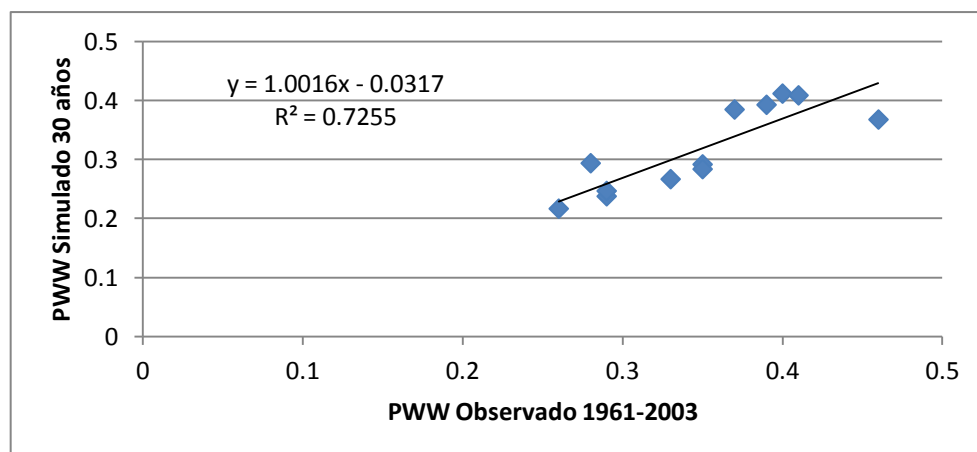


Figura 18. Comparación de PWW obtenido a partir de valores diarios observados en el periodo 1961-2003, contra PWW obtenidos a partir de una serie de 30 años simulado en el LARS-WG, estación Ceballos, Mapimí.

De igual forma, al comparar los valores de PWD obtenidos a partir de datos diarios observados de precipitación para la estación de Ceballos, Mapimí del periodo 1961-2003, contra los valores de PWD obtenidos a partir de datos diarios de precipitación simulados utilizando LARS-WG en un periodo de 30 años, muestra la correlación entre estos dos parámetros (Figura 19).

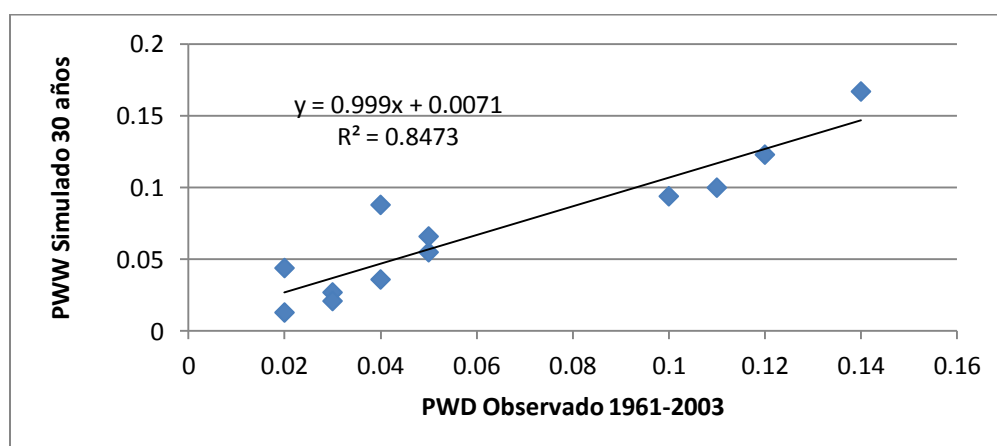
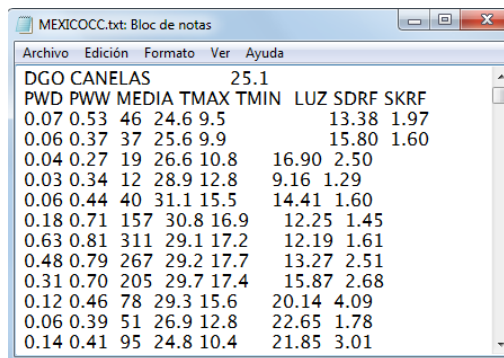


Figura 19. Comparación de PWD obtenido a partir de valores diarios observados en el periodo 1961-2003, contra PWD obtenidos a partir de una serie de 30 años simulado en el LARS-WG, estación Ceballos, Mapimí.

Con los archivos *.lis listos, se procedió a nutrir con información dos diferentes archivos en bloc de notas llamados MEXICO.txt y MEXICOCC.txt, el primero con datos de la información histórica y el segundo con datos re-escalados y afectados por cambio climático. En estos archivos, se compila la información climatológica y de ubicación que el modelo SICTOD necesita.

Un ejemplo de estos archivos se muestra en la Figura 20 donde se puede apreciar el siguiente orden: En la parte superior se ubica la abreviatura del estado, seguido del nombre de la EM y luego su latitud en grados decimales. En seguida se encuentran en columnas de forma mensual los valores de PWD, PWW, Precipitación, Temperatura máxima, Temperatura mínima, LUZ (sin existencia), SDRF y SKRF.



DGO CANELAS		25.1					
PWD	PWW	MEDIA	TMAX	TMIN	LUZ	SDRF	SKRF
0.07	0.53	46	24.6	9.5		13.38	1.97
0.06	0.37	37	25.6	9.9		15.80	1.60
0.04	0.27	19	26.6	10.8	16.90	2.50	
0.03	0.34	12	28.9	12.8	9.16	1.29	
0.06	0.44	40	31.1	15.5	14.41	1.60	
0.18	0.71	157	30.8	16.9	12.25	1.45	
0.63	0.81	311	29.1	17.2	12.19	1.61	
0.48	0.79	267	29.2	17.7	13.27	2.51	
0.31	0.70	205	29.7	17.4	15.87	2.68	
0.12	0.46	78	29.3	15.6	20.14	4.09	
0.06	0.39	51	26.9	12.8	22.65	1.78	
0.14	0.41	95	24.8	10.4	21.85	3.01	

Figura 20. Visualización del archivo MEXICOCC.txt usado por SICTOD cuyos datos provienen de la rutina con WXPARM.

5.3.6 Sistema para cuantificar riesgo hidrológico en agricultura de temporal, SICTOD

Para facilidad de uso de la herramienta computacional, se desarrolló una interfaz amigable al usuario. Es menester recalcar que para obtener la mayor ventaja en el uso

del modelo, se deberá contar con un conocimiento básico de manejo de comandos en plataforma windows. La pantalla de entrada a la aplicación (Figura 21) presenta los objetivos y alcances del modelo así como el modelo conceptual de donde parte el balance de humedad en el suelo.



Figura 21. Pantalla de inicio de la aplicación computacional.

En la esquina superior izquierda se muestran dos pestañas: Introducción y Datos de entrada. La primera de ellas es la que muestra la pantalla señalada en la Figura 21 y en la segunda se despliega la serie de información que el modelo necesita para su funcionamiento y que debe de ser provista por el usuario (Figura 22).

En la esquina inferior izquierda aparece un icono  que, al presionarlo, muestra los créditos de la aplicación.

Figura 22. Pantalla para introducir información necesaria para correr el modelo.

A la izquierda de cada apartado donde es necesario introducir información, aparece un ícono  que al presionarlo despliega la descripción de la información requerida en ese apartado. A continuación se describe cada apartado.

- **Tecnología disponible:** Al seleccionar dicho apartado, se despliega una ventana nueva en el explorador web predeterminado donde debe seleccionarse el estado de la república y el cultivo de interés (Figura 23).

Figura 23. Pantalla para indicar lugar y cultivo de interés.

Una vez seleccionado el lugar y el cultivo se despliega una serie de hipervínculos cuya función es ayudar al usuario a entender o resolver los problemas que causan un bajo rendimiento en el cultivo (Figura 24).



Figura 24. Hipervínculos que contienen tecnología disponible para el cultivo de interés.

- **Escenario climático actual / Escenario A2 cambio climático:** Donde el usuario puede elegir usar datos actuales o futuros afectados por cambio climático usando como base el escenario A2.
- **Introduzca Número Aleatorio:** Se refiere a un número entero comprendido entre 0 y 1000 ($0 < \# \leq 1000$), que es necesario para iniciar el proceso de generación de números aleatorios, que a su vez son utilizados para la simulación de la variable aleatoria precipitación, esto para determinar la ocurrencia de periodos secos y periodos húmedos (Días secos y días con Lluvia). Como se ha anotado anteriormente, el método de generación de lluvia se fundamenta en un proceso matemático – estadístico de cadenas de Markov de primer orden en donde las

probabilidades condicionales de lluvia son analizadas. Para este estudio, el numero aleatorio designado fue “567” para todas las EM.

- ***Seleccione la fecha de siembra:*** Se refiere al mes del año en que se tiene planeado realizar la siembra del cultivo. También es necesario introducir el día del mes que se planea sembrar. El modelo contempla tres tipos de variedades (o materiales de siembra) en relación a la longitud del periodo de crecimiento: variedades precoces (90 días de periodo de crecimiento), intermedias (120 días), y tardías (150 días). Aunque la interfaz despliega la fecha actual, el propósito es solo garantizar que el usuario no introduzca datos erróneos (meses con más de 31 días), además de la facilidad de elegir el día en el mismo icono. También, la fecha base, sirve en la contabilidad de años bisiestos.

Para el cultivo de maíz en el estado de Durango, se selecciono una variedad intermedia de 120 días haciendo variar la fecha de siembra modificando así su periodo de crecimiento a lo ancho del territorio duranguense con la premisa de que no en todo el estado se siembra en la misma fecha debido al temporal de lluvias que obedece entre otras cosas a un gradiente altitudinal (Escobar, 2011).

En la Figura 25, se puede ver la división del estado de Durango en 3 diferentes zonas de acuerdo al periodo de crecimiento del cultivo seleccionado, las cuales son: 1) 10 de Abril a 7 de Agosto, 2) 20 de Mayo a 17 de Septiembre y 3) 30 de Junio a 28 de Octubre. Esta división obedece al registro histórico de lluvia (1961–2003) en las 31 EM

de Durango seleccionadas donde se observo aproximadamente cuando inicia el periodo de lluvias. Además se hizo uso del mapa *.shp Precipitación Modal Anual del SIGEED (Sistema de Información Geográfica de los Ecosistemas del Estado de Durango) localizado en su página de internet: <http://ujed.mx/sigeed/> (Figura 26).

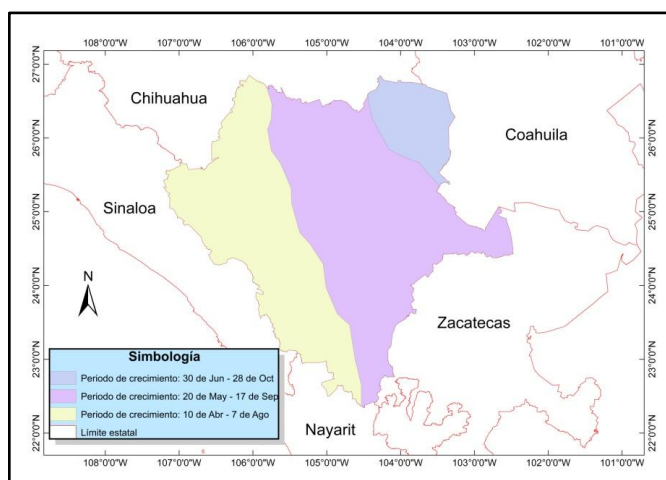


Figura 25. División del estado de Durango en tres diferentes periodos de crecimiento de maíz.

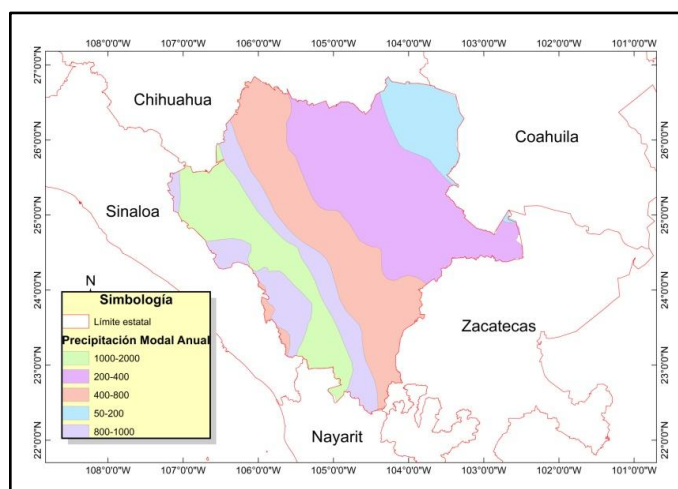


Figura 26. Precipitación modal anual del estado de Durango.

- **Ciclo vegetativo:** Este concepto considera la duración del ciclo del cultivo desde la siembra hasta la madurez fisiológica. Para los cultivos considerados, el ciclo

vegetativo varía según la variedad o híbrido utilizado, las condiciones climáticas y las interacciones entre estos componentes. Como se señaló anteriormente, en el modelo se tiene la opción de considerar una variedad de ciclo precoz (90 días de ciclo vegetativo), variedades de ciclo intermedio (120 días de ciclo vegetativo) y de ciclo tardío (150 días de ciclo vegetativo). En algunas regiones del mundo y con ciertas variedades e híbridos la duración del ciclo vegetativo del maíz (por ejemplo) va desde menos de 88 días en híbridos ultra precoces y en otras hasta de 155 días en variedades ultra tardías. Aunque el ciclo medio es alrededor de 120-125 días.

Como se menciona con anterioridad, para el estado de Durango se selecciono una variedad de ciclo intermedio (120 días de ciclo vegetativo).

- ***Seleccione Municipio donde se encuentra el cultivo:*** en este apartado es requisito seleccionar el municipio donde se encuentra el sitio de interés. Al presionar el ícono  se desplegará el mapa de Durango con división política municipal (Figura 27).

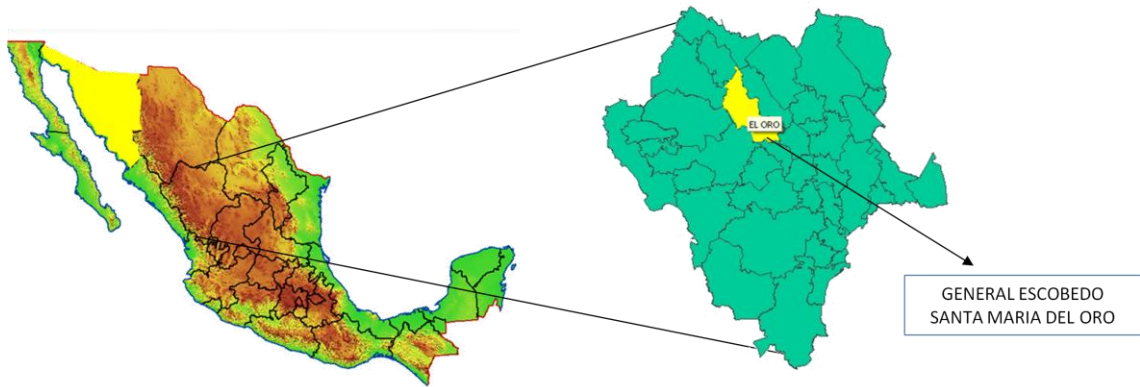


Figura 27. Selección del municipio de interés. El ejemplo muestra que el municipio “Santa María del Oro” cuenta con dos estaciones climatológicas (General Escobedo y Santa María del Oro) de donde se deberá seleccionar una.

- **Seleccione la estación:** Para calcular las variables precipitación y evapotranspiración potencial, variables que son necesarias para el cálculo de rendimiento potencial del área de estudio, el modelo utiliza información de 88 estaciones meteorológicas distribuidas en el estado de Durango. Por lo que es necesario seleccionar la estación más cercana y con condiciones similares al predio bajo estudio, que en la mayoría de las ocasiones se encuentra en el mismo municipio y en otras en un municipio colindante. En caso de que en el municipio seleccionado no haya estaciones climatológicas, el modelo le sugerirá al usuario ubicar otra estación cercana al sitio de interés. Si el usuario cuenta con una conexión a internet, se puede observar también la imagen de satélite ó el mapa

geográfico del sitio elegido. Esa aplicación se activa al pulsar el ícono 

Véase Figura 28.

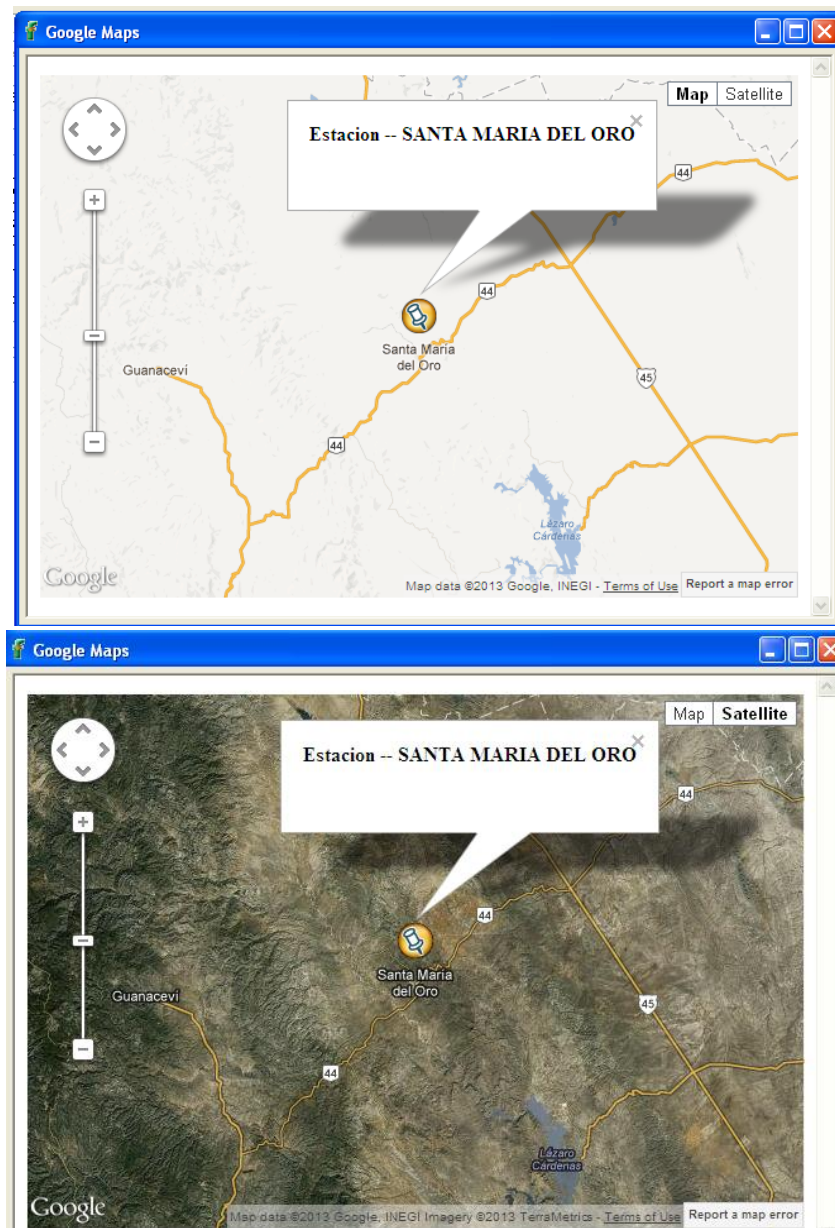


Figura 28. Mapa de la localización de la estación climatológica elegida (arriba) y vista satelital (abajo).

- **Selección del cultivo:** El modelo considera los principales 6 cultivos que comúnmente se siembran en zonas de temporal en el estado: maíz, frijol, cebada, avena forrajera, trigo y sorgo. El programa asigna los parámetros de cultivo para la determinación de la evapotranspiración máxima, toda vez que este ha sido seleccionado. La base de datos del modelo trae pre asignado los valores de

coeficiente de cultivo (K_c). La función de los K_c 's es "elástica" es decir, se adecua a la duración del ciclo del cultivo acorde a la longitud del periodo de crecimiento de la variedad seleccionada (precoz, intermedia ó tardía). La base de datos considera tres estaciones de crecimiento de los cultivos: emergencia a inicio de floración (etapa vegetativa), inicio de floración a madurez fisiológica (etapa fructificación) y madurez fisiológica a senescencia. En caso de que el usuario conozca los K_c 's, éstos se pueden introducir desde el teclado.

- ***Contempla cosecha de agua:*** Este concepto se refiere a si se tiene contemplado durante el ciclo de producción del cultivo alguna actividad de captación de agua de lluvia para derivarla al área de siembra. Esta opción es útil cuando las cantidades de lluvia no satisfacen los requerimientos del cultivo. El modelo considera el método de curva numérica (CN) para el cálculo del escurrimiento. Aquí, se tiene que elegir un valor de CN que represente las condiciones del terreno donde se origina el escurrimiento hacia el área del cultivo acorde Al Cuadro 3. La CN representa: a) el tipo de cubierta vegetal, b) la condición de ésta y c) el tipo hidrológico del suelo (Tipo A que son suelos con poca capacidad de producir escurrimiento, hasta suelos con alta capacidad de producir escurrimiento Tipo D. Los suelos B y C son suelos con condiciones intermedias entre ambos extremos); véase Cuadro 3.

Cuadro 3. Valores de la curva numérica según tipo de ecosistema, porcentaje de cobertura del suelo y potencial de escurrimiento.

COBERTURA	GRUPO				
	Condición	A	B	C	D
Bosques	Buena	30	55	70	77
	Regular	36	60	73	79
	Mala	45	66	77	83
Arbustos	Buena	30	48	65	73
	Regular	36	60	73	79
	Mala	48	67	77	83
Pastizales	Buena	39	61	74	80
	Regular	49	69	79	84
	Mala	68	79	86	89
Suelo en descanso		77	86	91	94

Tomado de (USDA-NRCS, 2004).

Grupo “A”: Bajo potencial de escurrimiento, Velocidad de Infiltración (VI) = 8-12 mm hr⁻¹

Grupo “B”: Moderado Bajo potencial de escurrimiento, VI = 4-8 mm hr⁻¹

Grupo “C”: Moderado alto potencial de escurrimiento, VI = 1- 4 mm hr⁻¹

Grupo “D”: Alto potencial de escurrimiento, VI ≤ 1 mm hr⁻¹

Conductividad Hidráulica Buena: Cobertura vegetal > 75%

Conductividad Hidráulica Regular: Cobertura vegetal 50% - 75%

Conductividad Hidráulica Buena: Cobertura vegetal < 50%

- **Consultar textura:** Es importante la selección de la textura del suelo pues influye grandemente la capacidad de retención de humedad en el suelo. La cantidad de humedad del suelo que los cultivos pueden aprovechar se encuentra entre los límites de Capacidad de Campo y Punto de Marchitez Permanente, ésta varía acorde a la textura de cada suelo, por ejemplo desde 25 cm m⁻¹ en suelos limosos hasta 6 cm m⁻¹ en suelos arenosos. El usuario deberá elegir la textura del suelo del triángulo de texturas; al realizar esto, el modelo automáticamente

selecciona la capacidad de retención de humedad para fines del balance de agua en el suelo (Figura 29).

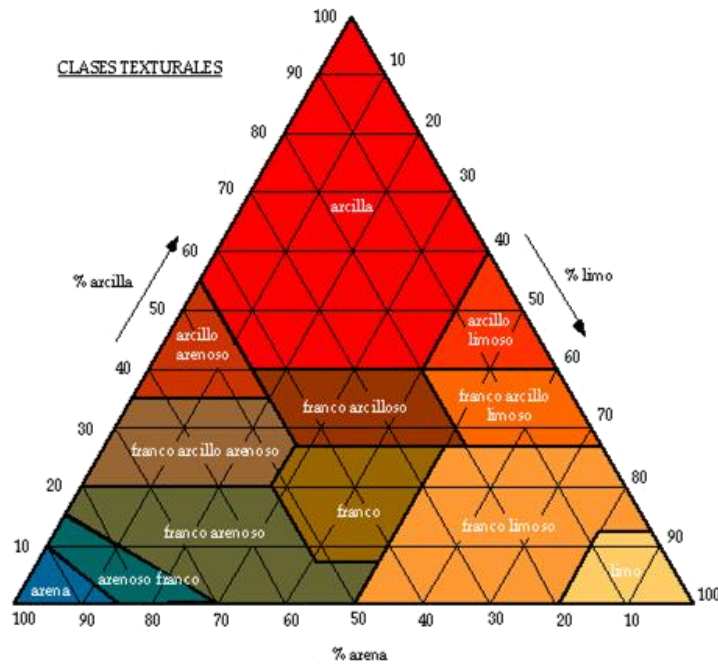


Figura 29. Triángulo de texturas para la obtención de la capacidad de retención de humedad del suelo.

Para conocer la textura en los lugares donde se encontraban las EM, se hizo uso de los datos edafológicos serie I y II de INEGI.

- **Profundidad del suelo:** El modelo pregunta por la profundidad del suelo considerada para efectos de la capacidad de retención de humedad. Aquí se utiliza una función lineal de la capacidad de retención de humedad con la profundidad. Para fines prácticos del estudio, se optó por una profundidad de suelo única donde el cultivo de maíz se desarrolla en condiciones favorables (90cm).

- **Contenido inicial de humedad en el área de cultivo (%):** Referido como el valor en porcentaje del contenido volumétrico de humedad inicial al momento de la siembra. Existen varios métodos para calcular este parámetro, aunque aún el más común es el método gravimétrico, que consiste en tomar una muestra de suelo, pesarla (PSH) y después dejarla secar en un horno a 105°C por 24 horas para obtener el peso de suelo seco (PSS) con este valor se obtiene el contenido de humedad inicial en base a masa (W). Ver ecuaciones 5 y 6.

$$W = \frac{PSH - PSS}{PSS} * 100 \quad (5)$$

Donde los pesos son en g. y el contenido volumétrico de humedad inicial se obtiene con la formula:

$$\theta_0 = \frac{da * W}{\delta} * 100 \quad (6)$$

Donde da es la densidad aparente del suelo, W contenido gravimétrico de humedad inicial, δ se refiere a la densidad del agua (1 g cm⁻³). Este valor es necesario para iniciar el cálculo del balance de agua en el suelo. Para fines del estudio, esta variable al igual que otras se mantuvo constante con un valor de 30% de humedad inicial en el suelo.

- **Años de simulación:** El modelo puede simular “n” numero de años (estaciones de crecimiento del cultivo elegido) capturando la variabilidad temporal de la precipitación pluvial. Aunque se pueden simular cualquier cantidad de años, es

recomendable elegir entre 5 y 10 años. El modelo realiza el balance diario de humedad en el suelo. Después de introducir este valor, es necesario pulsar el ícono  para iniciar el balance diario de humedad en el suelo para el número de años seleccionado, acorde a los datos proporcionados al modelo. En este caso se usó un total de 10 años de simulación.

En el Cuadro 4 se presentan las variables que se modifican e ingresan al programa SICTOD 1. El resto de las variables quedan constantes de acuerdo a las especificaciones anteriormente mencionadas.

- **Resultados:** El interfaz ofrece diversas opciones para visualizar los resultados. Una manera es elegir de los “combos” que aparecen en la esquina inferior izquierda en la pestaña “variable a graficar en líneas”, la variable “Balance” y en la pestaña “variable a graficar en barras” elegir, la variable “lluvia”; al realizar esto, aparecerá la gráfica que muestra la Figura 30.

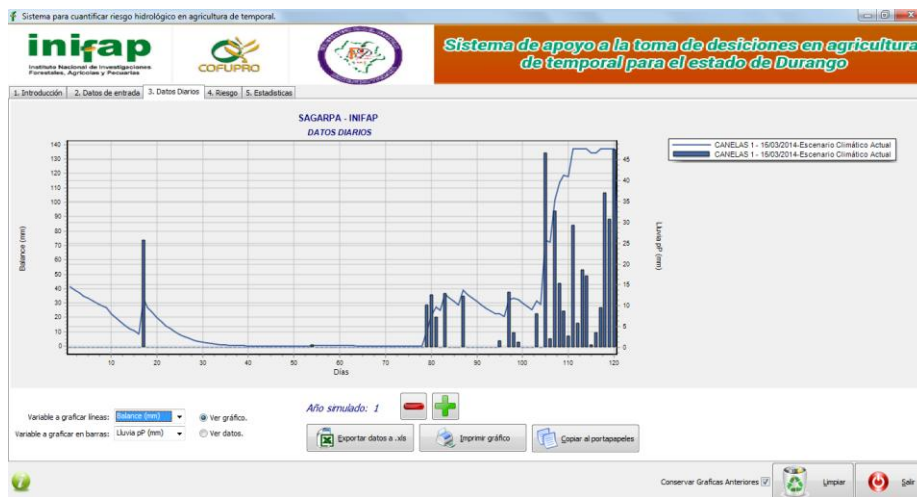


Figura 30. Pantalla de salida para la visualización de resultados.

Cuadro 4. Variables de entrada del modelo SICTOD 1 por estación meteorológica.

No. estación	Clave estación	Nombre de la estación	Municipio	Fecha de siembra	Rendimiento máximo	Textura
Coahuila						
1	5028	Presa Guadalupe	San Pedro	30-jun	0.80	2
Chihuahua						
1	8078	Hidalgo del Parral	Hidalgo del Parral	20-may	1.98	2
2	8151	Valle de Allende	Allende	20-may	1.99	2
Durango						
1	10003	Canelas	Canelas	10-abr	1.08	2
2	10004	Cañón de Fernández	Cuencame	20-may	1.37	2
3	10005	Ceballos	Mapimí	30-jun	0.80	3
4	10006	Cendradillas	Guanaceví	10-abr	1.20	2
5	10007	Cienega de Escobar	Tepehuanes	10-abr	1.10	2
6	10008	Cinco de Mayo	San Pedro del Gallo	20-may	1.00	2
7	10012	Cuencame	Cuencame	20-may	1.37	2
8	10016	Chinacates	Santiago Papasquiaro	20-may	1.60	3
9	10018	El Cantil	Santiago Papasquiaro	10-abr	1.02	2
10	10020	El Derrame	Mapimí	30-jun	0.80	3
11	10021	El Palmito II	Indé	20-may	2.40	2
12	10022	EL Pino	Canatlán	20-may	1.10	2
13	10025	El Salto (SMN)	Pueblo Nuevo	10-abr	1.08	2
14	10026	El Tarahumar	Tepehuanes	10-abr	1.10	2
15	10027	Francisco I. Madero (SMN)	Panuco de Coronado	20-may	1.66	2
16	10045	Mapimí (Km. 29)	Mapimí	30-jun	0.80	2
17	10047	Narciso Mendoza	Poanas	20-may	1.50	1
18	10049	Nazas	Nazas	20-may	1.00	2
19	10053	Peñoles	San Pedro del Gallo	20-may	1.00	2
20	10054	Peña del Águila	Durango	10-abr	1.10	2
21	10057	Presa Santa Elena	Súchil	20-may	3.80	2
22	10061	Rosario	Melchor Ocampo	20-may	3.00	2
23	10066	San José de Acevedo	Nombre de Dios	20-may	1.10	2
24	10068	San Juan del Rio (SMN)	San Juan del Rio	20-may	1.30	3
25	10074	Santa Clara	Santa Clara	20-may	1.20	3
26	10078	Sardinas	San Bernardo	20-may	0.90	2
27	10082	Tamazula	Tamazula	10-abr	1.10	2
28	10085	Tlahualilo	Tlahualilo	30-jun	0.60	3
29	10088	Vicente Guerrero	Vicente Guerrero	20-may	3.80	2
30	10098	Rodeo	Rodeo	20-may	1.00	2
31	10099	San Juan de Guadalupe	San Juan de Guadalupe	20-may	1.00	2
Nayarit						
1	18028	Rosamorada	Rosamorada	10-abr	4.50	2
2	18063	Chapalacana	Jesus Maria	10-abr	1.40	2
Sinaloa						
1	25041	Guatenipa	Badiraguato	10-abr	1.02	2
Zacatecas						
1	32004	Camacho	Mazapil	20-may	0.70	2

En el ícono *Año simulado: 1*   al pulsar el signo de “mas” se puede visualizar el año No. 2 simulado y así sucesivamente. De igual manera se pueden exportar los datos a formato “Excel”, imprimir el gráfico o copiar la imagen al portapapeles para posterior uso. Toda vez que se ha visualizado la distribución de la lluvia y del balance de humedad en el suelo a través de los años, el siguiente paso es visualizar el riesgo de falla, o probabilidad de ocurrencia de algún evento o variable; i.e. rendimiento, lluvia, escurrimiento. Para esto se debe seleccionar la pestaña No. 4 indicada como “Riesgo” (Figura 31).



Figura 31. Pantalla para visualización de la probabilidad de ocurrencia de variables implícitas en el modelo.

En la esquina inferior izquierda aparece un “combo” en donde se puede seleccionar la variable de la cual se desea conocer la probabilidad de ocurrencia. En la parte superior derecha de la Figura aparece el nombre de la estación y la fecha de

siembra. En la pestaña 5 se pueden consultar las estadísticas del ensayo (véase Figura 32). Si al realizar el análisis resulta que el riesgo es muy alto, se puede regresar y cambiar la fecha de siembra, el ciclo de cultivo, el cultivo, la localidad, ó bien añadir una obra de captación de agua de lluvia y volver a correr el modelo. Cuando el rendimiento estimado es 50% menor que el rendimiento esperado, se despliega la liga hacia alternativa descrita anteriormente.



Figura 32. Estadísticos de las variables simuladas e interface para la consulta de la tecnología disponible.

Al cambiar a una condición de cambio climático, se puede tener una apreciación del impacto en el rendimiento u otra variable. Es importante notar que si la semilla para la generación de variables aleatorias cambia, el patrón de clima cambiará en consecuencia (Figuras 33-35).

Para poder visualizar los cambios en las variables respuesta al variar cualquier variable de entrada, es importante mantener activada la opción “Conservar Gráficas Anteriores” que se encuentra en la esquina inferior derecha de la pantalla.

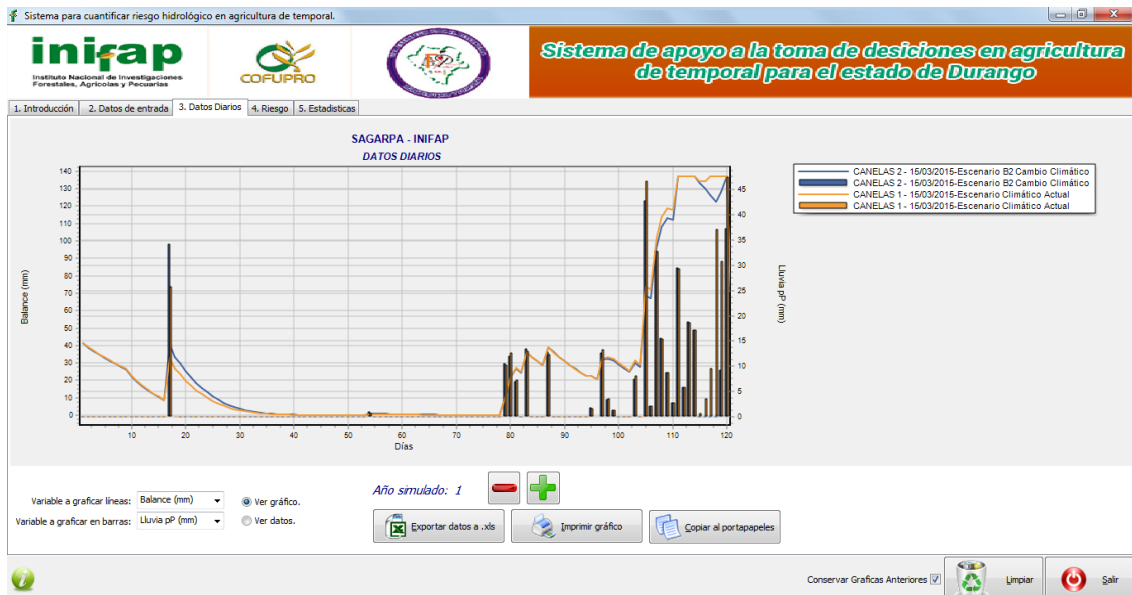


Figura 33. Impacto en el balance de humedad del suelo al cambiar a condición de cambio climático.



Figura 34. Impacto en la probabilidad de ocurrencia de lluvia al cambiar a condición de cambio climático.



Figura 35. Impacto en el rendimiento del cultivo al cambiar a condición de cambio climático.

5.3.7 Generación de mapas de superficie. Técnicas de interpolación

En la última etapa del análisis las estadísticas, obtenidas con SICTOD, fueron integradas en una base de datos georeferenciada acorde a la ubicación de las EM-SMN seleccionadas para este estudio mostradas en el Cuadro 2. Las variables z por interpolar se hizo corresponder con cada una de las variables de T_{max} ($^{\circ}\text{C}$), T_{min} ($^{\circ}\text{C}$), Precipitación (mm) y Rendimiento (ton ha^{-1}).

Se elaboraron mapas o modelos de superficie mediante procesos de interpolación usando el método Distancia Inversa Ponderada (IDW, por sus siglas en ingles) mediante el empleo de la herramienta Geoestadística en ArcGis 10.1. El método se utiliza para predecir el valor de un lugar no muestral, por consiguiente, se utilizarán los valores de los lugares muestrales que haya alrededor del lugar que se va a predecir. Los valores de los lugares más próximos al que se va a predecir tendrán más influencia y por lo tanto

más peso que los que están más lejos, este peso disminuye con la distancia. Lo anterior se expresa de la siguiente manera:

$$Z_{(S_0)} = \sum_{i=1}^N \lambda_i * Z_{(S_i)} \quad (7)$$

Donde, $(Z_{(S_0)})$ es el valor por predecir para el lugar S_0 ; N es el número de puntos muestrales alrededor del lugar que se va a predecir y que serán tenidos en cuenta en la predicción; λ_i es el peso asignado a cada punto muestral por usar, los cuales decrecen con la distancia; $Z_{(S_i)}$ es el valor observado del lugar S_i . La determinación de los pesos λ_i se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$\lambda_i = \frac{d_{i0}^{-p}}{\sum_{i=0}^N d_{i0}^{-p}} \quad (8)$$

A medida que la distancia se hace más grande, el peso es reducido por un factor p ; es decir, que a medida que se incrementa la distancia entre los puntos observados y el punto calculado, el peso que tendrá un punto muestral sobre el predicho decrecerá exponencialmente; d_{i0} es la distancia entre el lugar de predicción S_0 y en cada lugar muestral, S_i ; los pesos de los lugares utilizados para la predicción serán escalados de tal forma que su suma es 1, es decir:

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \quad (9)$$

El óptimo valor de p se determina haciendo mínimo el error de predicción o error cuadrático medio, que tiene la siguiente expresión:

$$EMC = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{Z}(S_i) - Z(S_i))^2}{n}} \quad (10)$$

El analizador geoestadístico utiliza potencias más grandes que 1. Por defecto se usa $p=2$ que se conoce como distancia inversa del cuadrado.

6.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se muestran los resultados de acuerdo a las tres diferentes fechas de siembra usadas en el estudio:

6.1 Fecha de Siembra 10 de Abril

6.1.1 Temperatura Máxima

Los datos de temperatura máxima (Tmax), corresponden a un periodo analizado de abril - agosto, cuyos datos se encuentran en la matriz sintetizada que arroja el programa computacional WXPARM y que forman parte de los datos de entrada al modelo SICTOD 1 para la estimación del rendimiento y la dinámica de la humedad en el suelo.

Al comparar los datos de Tmax con escenario climático actual (histórico) versus escenario A2 cambio climático (reescalado) (Ver Figura 36), se tiene que el 100% de las estaciones meteorológicas (EM) donde se uso una fecha de siembra de 10 de abril, tienden a un incremento en promedio de 1 °C para los meses de abril-agosto, encontrando municipios como Guanaceví con un incremento de hasta 1.4 °C (Cuadro 5) cuyo valor, coincide con lo reportado por Esquivel, (2011) quien realizo un reescalado en la misma estación usando el modelo de circulación canadiense CGCM1 del Centro Canadiense de Modelación y de Análisis Climático y el modelo estadístico de reducción de escala SDSM. Pedro, (2011) afirma que la tendencia en este municipio es a incrementar la Tmax al analizar la EM Guanaceví durante un periodo de tiempo de 1922 a 2008.

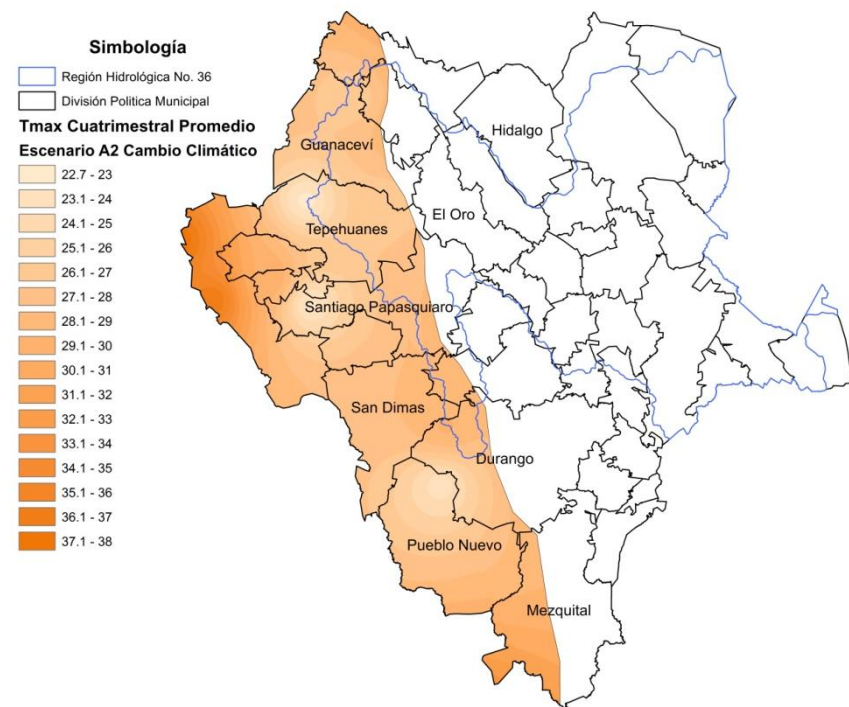
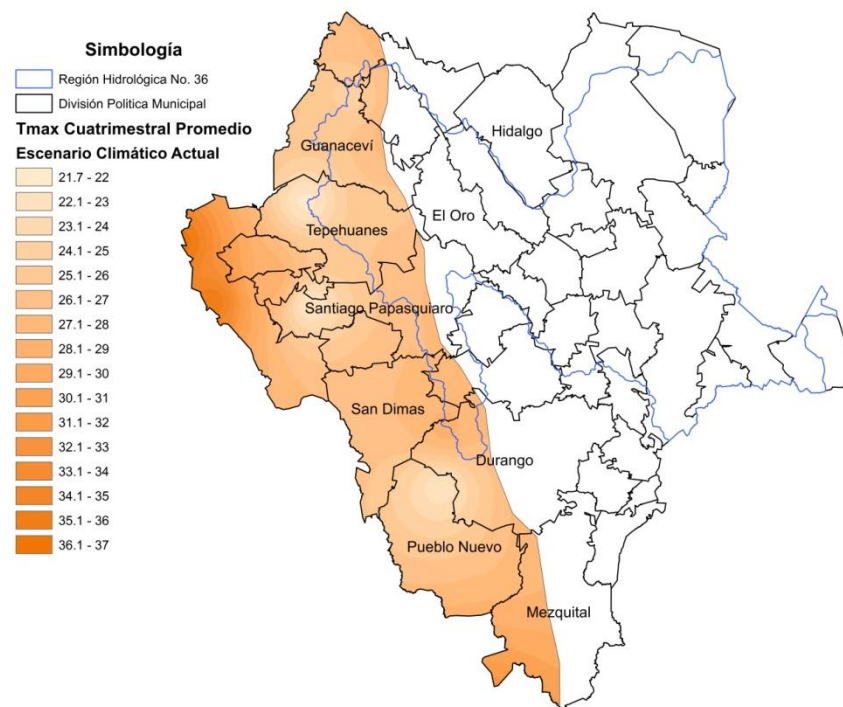


Figura 36. Distribución espacial de temperatura máxima cuatrimestral promedio actual (izquierda) y futura (derecha) durante un periodo de crecimiento del cultivo 10 de Abril - 7 de Agosto.

Cuadro 5. Comparación de temperatura máxima cuatrimestral promedio actual y futura por municipio y estación meteorológica

Fecha de siembra: 10 de Abril					
Clave	Estación meteorológica	Municipio	Temperatura Máxima (°C)		Anomalía ¹
			Escenario Climático Actual	Escenario A2 Cambio Climático	
10003	Canelas	Canelas	28.8	29.8	1.0
10006	Cendradillas	Guanaceví	24.6	26.0	1.4
10007	Cienega de Escobar	Tepehuanes	25.7	26.3	0.6
10018	El Cantil	Santiago Papasquiaro	22.0	22.9	0.9
10025	El Salto (SMN)	Pueblo Nuevo	22.4	23.6	1.2
10026	El Tarahumar	Tepehuanes	21.7	22.7	1.0
10054	Peña del Águila	Durango	28.3	29.1	0.8
10082	Tamazula	Tamazula	35.7	36.8	1.1

¹La anomalía se refiere a la diferencia entre el valor de temperatura del escenario climático A2 y del escenario actual. Un valor positivo significa que la temperatura se incrementará y un valor negativo que decrecerá

6.1.2 Temperatura Mínima

Los datos de temperatura mínima (Tmin), corresponden a un periodo analizado de abril a agosto, cuyos datos se encuentran en la matriz sintetizada que arroja el programa computacional WXPARM y que forman parte de los datos de entrada al modelo SICTOD 1.

En cuanto a la comparación de la variable Tmin con escenario climático actual versus escenario A2 cambio climático (Ver Figura 37), se tiene que el 100% de las EM donde se asigno una fecha de siembra del 10 de Abril, experimentan un incremento en promedio de 1.1 °C para los meses de abril-agosto siendo Guanaceví el municipio con mayor incremento de 2 °C (Cuadro 6). En Esquivel, (2011) se observa que la Tmin en esta misma estación incrementa pero no tan significativamente como en el presente estudio (0.8°C) usando el modelo de circulación canadiense CGCM1 y el modelo estadístico de reducción de escala SDSM. Pedro, (2011) comenta que en Guanaceví, no solo la Tmax sino también la Tmin tiende a incrementarse usando un periodo de análisis desde 1922 a 2008.

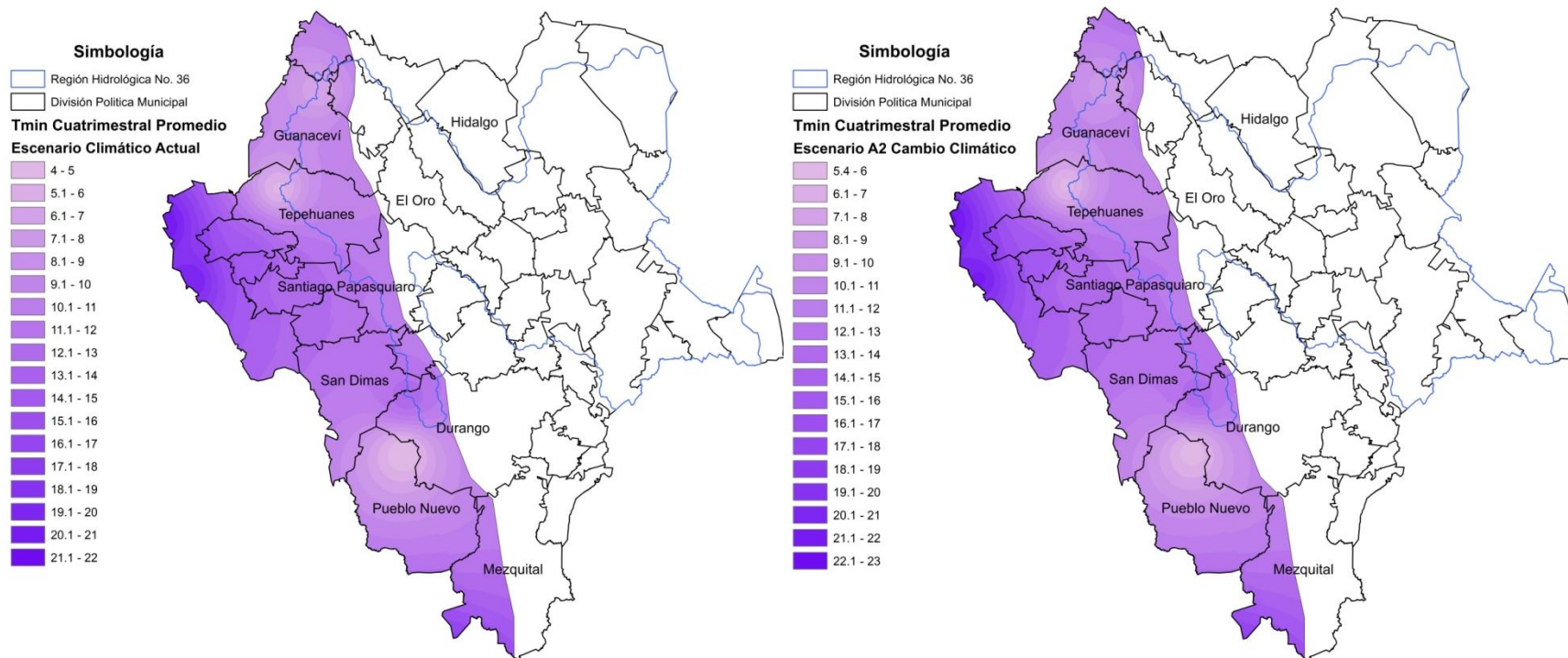


Figura 37. Distribución espacial de temperatura mínima cuatrimestral promedio actual (izquierda) y futura (derecha) durante un periodo de crecimiento del cultivo 10 de Abril - 7 de Agosto.

Cuadro 6. Comparación de temperatura mínima cuatrimestral promedio actual y futura por municipio y estación meteorológica.

Fecha de siembra: 10 de Abril					
Clave	Estación meteorológica	Municipio	Temperatura Mínima (°C)		Anomalía
			Escenario Climático Actual	Escenario A2 Cambio Climático	
10003	Canelas	Canelas	15.0	16.0	1.0
10006	Cendradillas	Guanaceví	6.2	8.2	2.0
10007	Cienega de Escobar	Tepehuanes	9.5	10.3	0.8
10018	El Cantil	Santiago Papasquiaro	12.7	13.6	0.9
10025	El Salto (SMN)	Pueblo Nuevo	4.0	5.4	1.4
10026	El Tarahumar	Tepehuanes	4.8	5.7	0.9
10054	Peña del Águila	Durango	12.6	13.5	0.9
10082	Tamazula	Tamazula	19.9	21.2	1.3

6.1.3 Precipitación

En el Cuadro 7 se presenta el comparativo de la precipitación bajo el escenario climático actual versus escenario A2 cambio climático para un periodo simulado de 10 años por SICTOD 1 cuyo análisis fue del 10 de abril (fecha de siembra) al 7 de agosto (Ver Figura 38), dichos valores se obtienen en las estadísticas de SICTOD 1 como se puede ver en las Figuras 28 y 31.

En el análisis comparativo se puede ver que aproximadamente el 60% de las EM, tienden a disminuir en promedio 26.3 mm su precipitación. Esto difiere con lo presentado en Esquivel, (2011) quien usa siete de las ocho EM del presente estudio y observa que la precipitación histórica comparada con la simulada incrementa usando un modelo de circulación canadiense CGCM1 y el modelo estadístico de reducción de escala SDSM. También difiere con Escobar, (2011) donde usando el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) observa una tendencia positiva con respecto a intensidad de los excesos de humedad. Esto probablemente se deba a que los datos reportados por ambos autores, contemplan datos

anuales sin embargo en el presente estudio solo se evalúan cuatro meses del temporal de lluvias.

La EM que presenta una mayor disminución es la de Tamazula, localizada en el municipio con el mismo nombre con 74.4 mm. El 40% restante, tiene un incremento en promedio de 31.5 mm siendo la EM El Salto en Pueblo Nuevo la de mayor incremento con 34.9 mm.

Cuadro 7. Comparación de la precipitación cuatrimestral promedio actual y futura por municipio y estación meteorológica para un periodo simulado de 10 años por SICTOD.

Fecha de siembra: 10 de Abril					
Clave	Estación meteorológica	Municipio	Precipitación (mm)		Anomalía ²
			Escenario Climático Actual	Escenario A2 Cambio Climático	
10003	Canelas	Canelas	606.8	638.9	32.1
10006	Cendradillas	Guanaceví	274.1	273.3	-0.8
10007	Cienega de Escobar	Tepehuanes	267.2	250.5	-16.7
10018	El Cantil	Santiago Papasquiaro	672.9	700.6	27.7
10025	El Salto (SMN)	Pueblo Nuevo	421.6	456.5	34.9
10026	El Tarahumar	Tepehuanes	375.3	354.6	-20.7
10054	Peña del Águila	Durango	239.6	220.5	-19.1
10082	Tamazula	Tamazula	467.8	393.4	-74.4

² La anomalía se refiere a la diferencia entre el valor de precipitación del escenario climático A2 y del escenario actual. Un valor positivo significa que la precipitación se incrementará y un valor negativo que decrecerá.

Para poder entender ambas EM (Tamazula y El Salto) se grafica la probabilidad de ocurrencia de lluvia. En la Figura 39 se aprecia que en Tamazula, la probabilidad de lluvia para el escenario A2 de cambio climático (línea azul) está por debajo de la probabilidad del escenario climático actual (línea naranja).

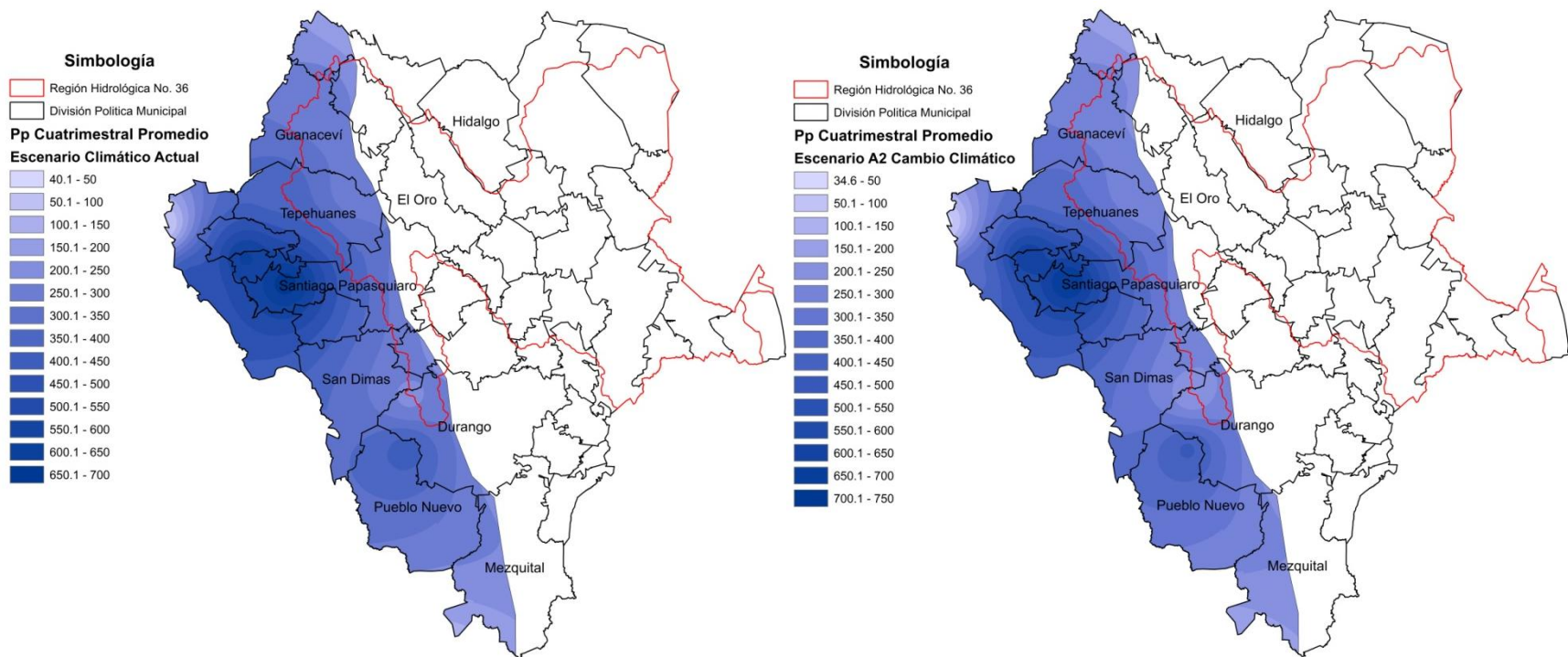


Figura 38. Distribución espacial de la precipitación cuatrimestral promedio actual (izquierda) y futura (derecha) durante un periodo de crecimiento del cultivo 10 de Abril - 7 de Agosto.

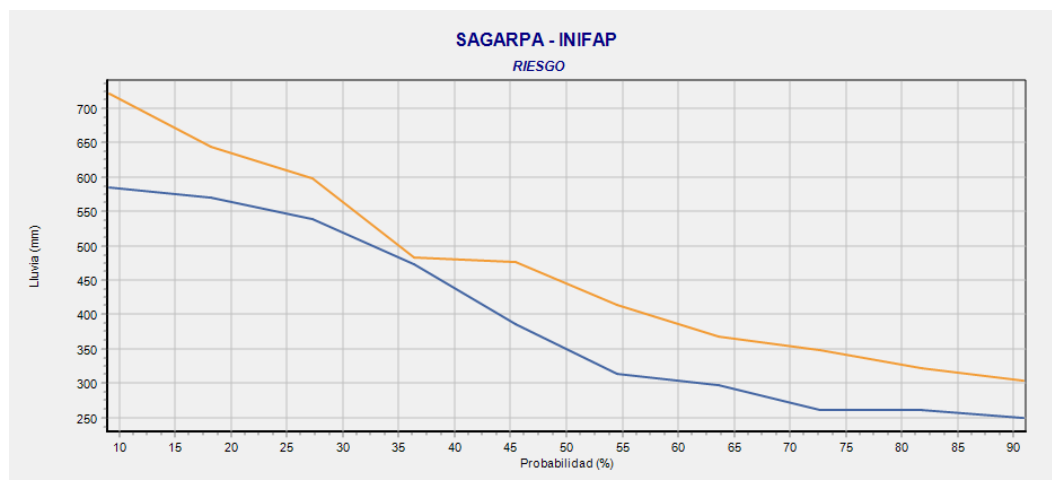


Figura 39. Probabilidad de ocurrencia de lluvia en la estación Tamazula para un periodo simulado de 10 años por SICTOD 1. En línea naranja, la probabilidad bajo un escenario climático actual y en azul, bajo un escenario A2 de cambio climático.

Con respecto a El Salto, la Figura 40 muestra valores mucho más elevados de precipitación (eje “y”) y una probabilidad de ocurrencia de lluvia del escenario A2 (línea azul) superior a la probabilidad del escenario climático actual (línea naranja).

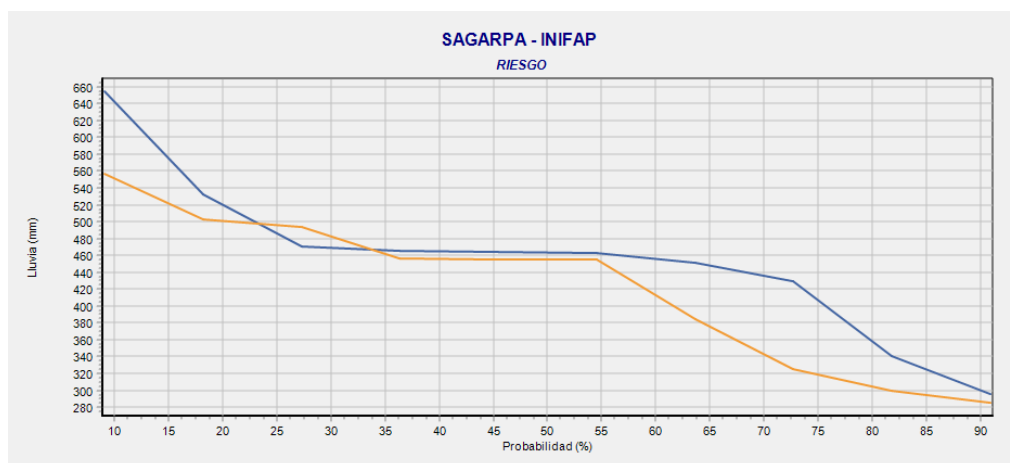


Figura 40. Probabilidad de ocurrencia de lluvia en la estación El Salto para un periodo simulado de 10 años por SICTOD 1. En línea naranja, la probabilidad bajo un escenario climático actual y en azul, bajo un escenario A2 de cambio climático.

6.1.4 Rendimiento

Con respecto al rendimiento, el Cuadro 8 presenta una comparación entre el rendimiento bajo el escenario climático actual versus escenario A2 cambio climático para un periodo simulado de 10 años por SICTOD 1 (Ver Figura 41). Esquivel, (2011) comenta que probablemente los rendimientos en la sierra en el futuro cercano se incrementen al realizar una metodología similar a la del presente estudio usando como modelo de cultivo el programa EPIC lo que también se aprecia en el presente estudio.

Se puede apreciar que aproximadamente solo el 75% de las EM incrementan su rendimiento en promedio 433kg ha^{-1} , donde este fenómeno es más significativo es en la EM Canelas ya que probablemente, al incrementarse la precipitación y las temperaturas de acuerdo a los Cuadros 5-7, se obtiene un mayor rendimiento, no así para su EM vecina Tamazula, la cual tiene el único decremento de esta variable probablemente debido a la disminución de la precipitación.

Cuadro 8. Comparación del rendimiento actual y futuro por municipio y estación meteorológica para un periodo simulado de 10 años por SICTOD.

Fecha de siembra: 10 de Abril					
Clave	Estación meteorológica	Municipio	Rendimiento (ton ha^{-1})		Anomalía ³
			Escenario Climático Actual	Escenario A2 Cambio Climático	
10003	Canelas	Canelas	0.938	1.852	0.914
10006	Cendradillas	Guanaceví	0.045	0.056	0.011
10007	Cienega de Escobar	Tepehuanes	0.000	0.032	0.032
10018	El Cantil	Santiago Papasquiaro	0.732	1.406	0.674
10025	El Salto (SMN)	Pueblo Nuevo	0.114	0.943	0.829
10026	El Tarahumar	Tepehuanes	0.103	0.242	0.139
10054	Peña del Águila	Durango	0.000	0.000	0.000
10082	Tamazula	Tamazula	0.053	0.000	-0.053

³ La anomalía es la diferencia entre el valor de rendimiento del escenario climático A2 y del escenario actual. Un valor positivo significa que el rendimiento se incrementará y un valor negativo que decrecerá.

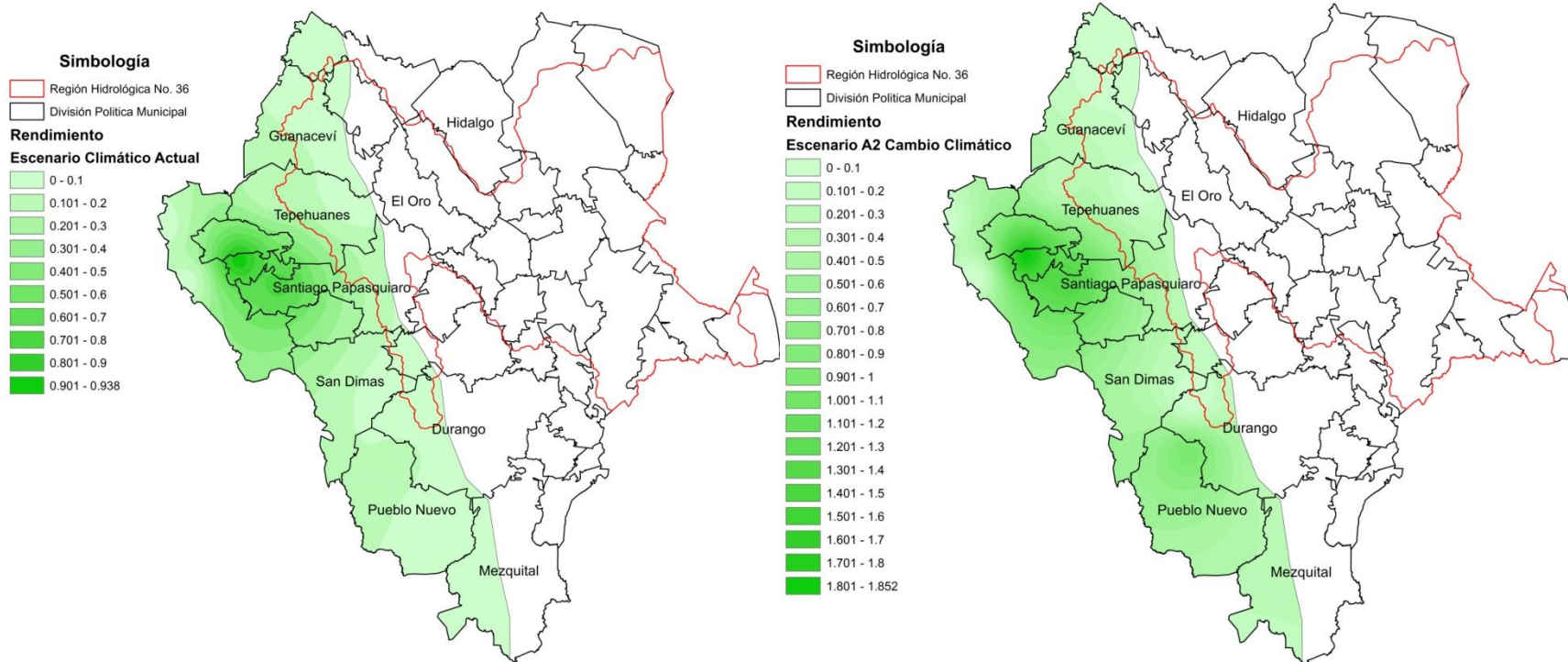


Figura 41. Distribución espacial del rendimiento actual (izquierda) y futuro (derecha) durante un periodo de crecimiento del cultivo 10 de Abril - 7 de Agosto.

Estas apreciaciones sobre las EM Tamazula y Canelas, se pueden ver gráficamente en las Figuras 42 y 43. En la primera, se observa que en Tamazula, el valor de la probabilidad de rendimiento para el escenario A2 (línea azul) está por debajo de la probabilidad del escenario climático actual (línea naranja). En la segunda, el rendimiento en Canelas para el escenario A2 (línea azul) resultó superior que el rendimiento bajo un escenario actual (línea naranja).

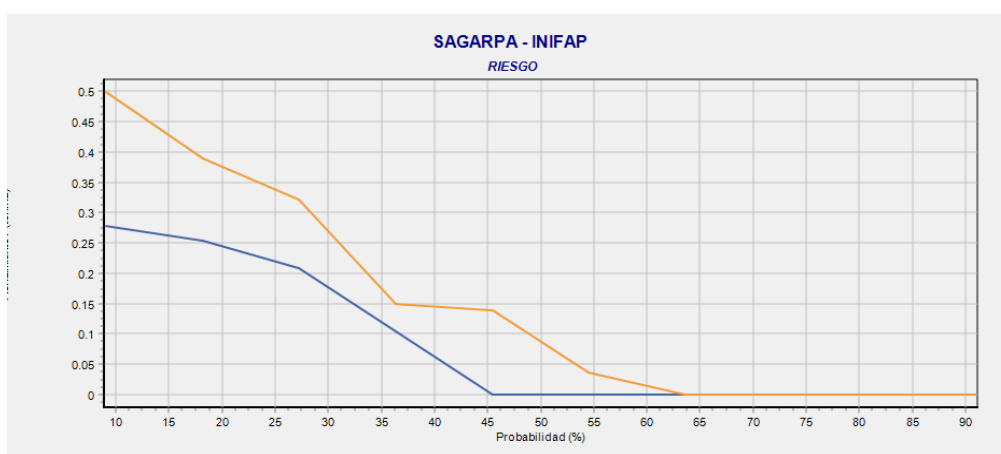


Figura 42. Probabilidad de rendimiento en la estación Tamazula para un periodo simulado de 10 años por SICTOD 1. En línea naranja, la probabilidad bajo un escenario climático actual y en azul, bajo un escenario A2 de cambio climático.

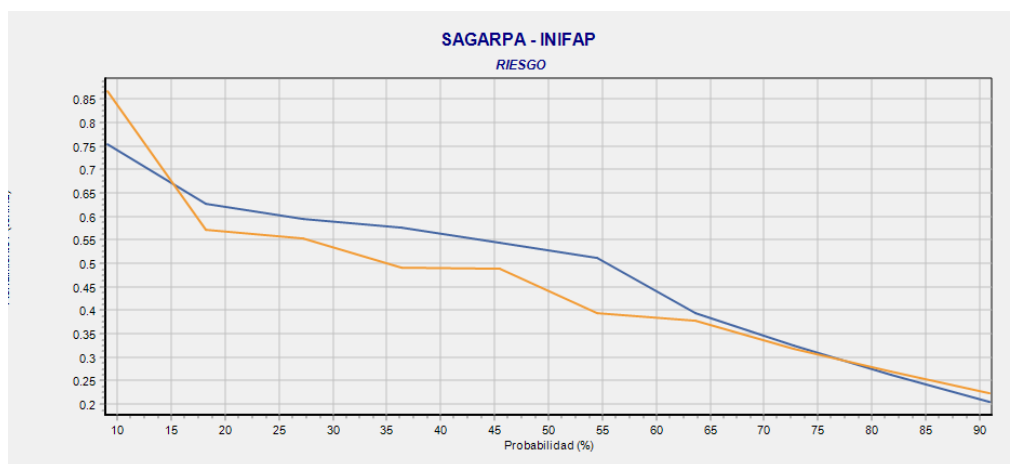


Figura 43. Probabilidad de rendimiento en la estación Canelas para un periodo simulado de 10 años por SICTOD 1. En línea naranja, la probabilidad bajo un escenario climático actual y en azul, bajo un escenario A2 de cambio climático.

6.2 Fecha de Siembra 20 de Mayo

6.2.1 Temperatura Máxima

El periodo analizado para las variables Tmax y Tmin comprende de mayo a septiembre debido a que la fecha de siembra usada en el modelo SICTOD 1 comienza el 20 de mayo. Al comparar los valores de Tmax con escenario climático actual versus escenario A2 cambio climático (Ver Figura 44), se tiene que el 100% de las EM, tienden a un incremento en promedio de 1.1 °C para los meses de mayo a septiembre encontrando municipios como San Pedro del Gallo con un incremento de hasta 3.1 °C (Cuadro 9).

Cuadro 9. Comparación de temperatura máxima cuatrimestral promedio actual y futura por municipio y estación meteorológica

Fecha de siembra: 20 de Mayo					
Clave	Estación meteorológica	Municipio	Temperatura Máxima		Anomalía
			Escenario Climático Actual	Escenario A2 Cambio Climático	
10004	Cañón de Fernández	Cuencame	33.3	34.5	1.2
10008	Cinco de Mayo	San Pedro del Gallo	31.2	32.3	1.1
10012	Cuencame	Cuencame	33.2	34.1	0.9
10016	Chinacates	Santiago Papasquiaro	28.8	29.9	1.1
10021	El Palmito II	Indé	31.8	33.0	1.2
10022	EL Pino	Canatlán	26.4	27.9	1.5
10027	Francisco I. Madero (SMN)	Panuco de Coronado	28.3	29.2	0.9
10047	Narciso Mendoza	Poanas	28.8	29.5	0.7
10049	Nazas	Nazas	33.7	34.7	1.0
10053	Peñoles	San Pedro del Gallo	27.7	30.8	3.1
10057	Presa Santa Elena	Súchil	26.7	27.5	0.8
10061	Rosario	Melchor Ocampo	27.5	29.1	1.6
10066	San Jose de Acevedo	Nombre de Dios	28.9	29.4	0.5
10068	San Juan del Rio (SMN)	San Juan del Rio	32.2	33.6	1.4
10074	Santa Clara	Santa Clara	30.2	31.3	1.1
10078	Sardinas	San Bernardo	29.1	30.1	1.0
10088	Vicente Guerrero	Vicente Guerrero	28.5	29.3	0.8
10098	Rodeo	Rodeo	33.3	34.1	0.8
10099	San Juan de Guadalupe	San Juan de Guadalupe	29.2	30.1	0.9

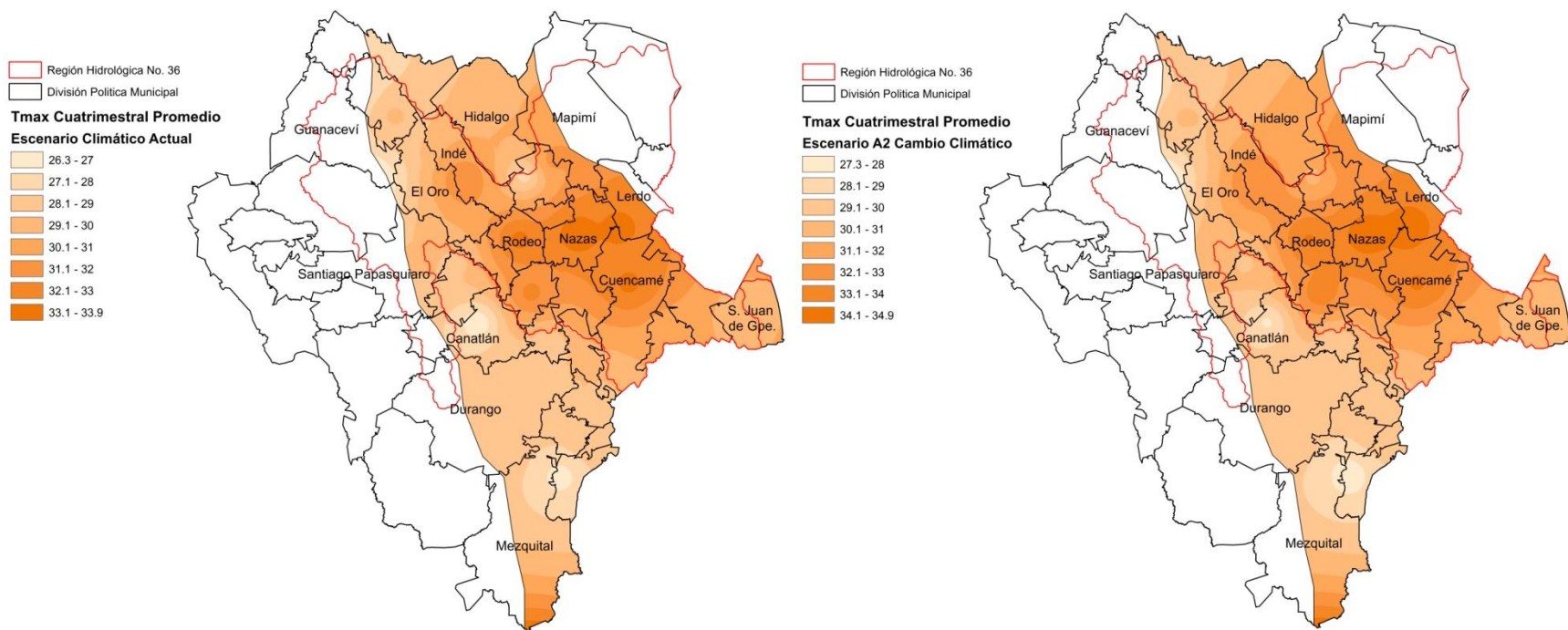


Figura 44. Distribución espacial de temperatura máxima cuatrimestral promedio actual (izquierda) y futura (derecha) durante un periodo de crecimiento del cultivo 20 de Mayo – 17 de Septiembre.

6.2.2 Temperatura Mínima

Con respecto al comparativo de la Tmin, se puede observar en el Cuadro 10 que el 100% de las EM incrementan la temperatura en promedio 1.1 °C, cuyo valor coincide con el de Tmax visto en el apartado anterior usando un periodo de análisis de mayo a septiembre. La EM que presenta mayor incremento es Peñoles en San Pedro del Gallo con hasta 2.3 °C en promedio. La distribución geográfica de esta variable con el comparativo se observa en la Figura 45.

Cuadro 10. Comparación de temperatura mínima cuatrimestral promedio actual y futura por municipio y estación meteorológica.

Fecha de siembra: 20 de Mayo					
Clave	Estación meteorológica	Municipio	Temperatura Mínima		Anomalía
			Escenario Climático Actual	Escenario A2 Cambio Climático	
10004	Cañón de Fernández	Cuencame	19.7	20.7	1.0
10008	Cinco de Mayo	San Pedro del Gallo	13.8	14.7	0.9
10012	Cuencame	Cuencame	17.3	18.1	0.8
10016	Chinacates	Santiago Papasquiaro	11	11.9	0.9
10021	El Palmito II	Indé	16.4	17.6	1.2
10022	EL Pino	Canatlán	11.3	13.4	2.1
10027	Francisco I. Madero (SMN)	Panuco de Coronado	13.3	14.2	0.9
10047	Narciso Mendoza	Poanas	12.9	13.6	0.7
10049	Nazas	Nazas	17.4	18.3	0.9
10053	Peñoles	San Pedro del Gallo	10.7	13	2.3
10057	Presa Santa Elena	Súchil	12.5	13.3	0.8
10061	Rosario	Melchor Ocampo	11.2	13	1.8
10066	San José de Acevedo	Nombre de Dios	11.1	11.5	0.4
10068	San Juan del Rio (SMN)	San Juan del Rio	13.6	15.4	1.8
10074	Santa Clara	Santa Clara	13.2	14.3	1.1
10078	Sardinas	San Bernardo	12.4	13.3	0.9
10088	Vicente Guerrero	Vicente Guerrero	12.4	13.2	0.8
10098	Rodeo	Rodeo	15.9	16.8	0.9
10099	San Juan de Guadalupe	San Juan de Guadalupe	12.8	14.2	1.4

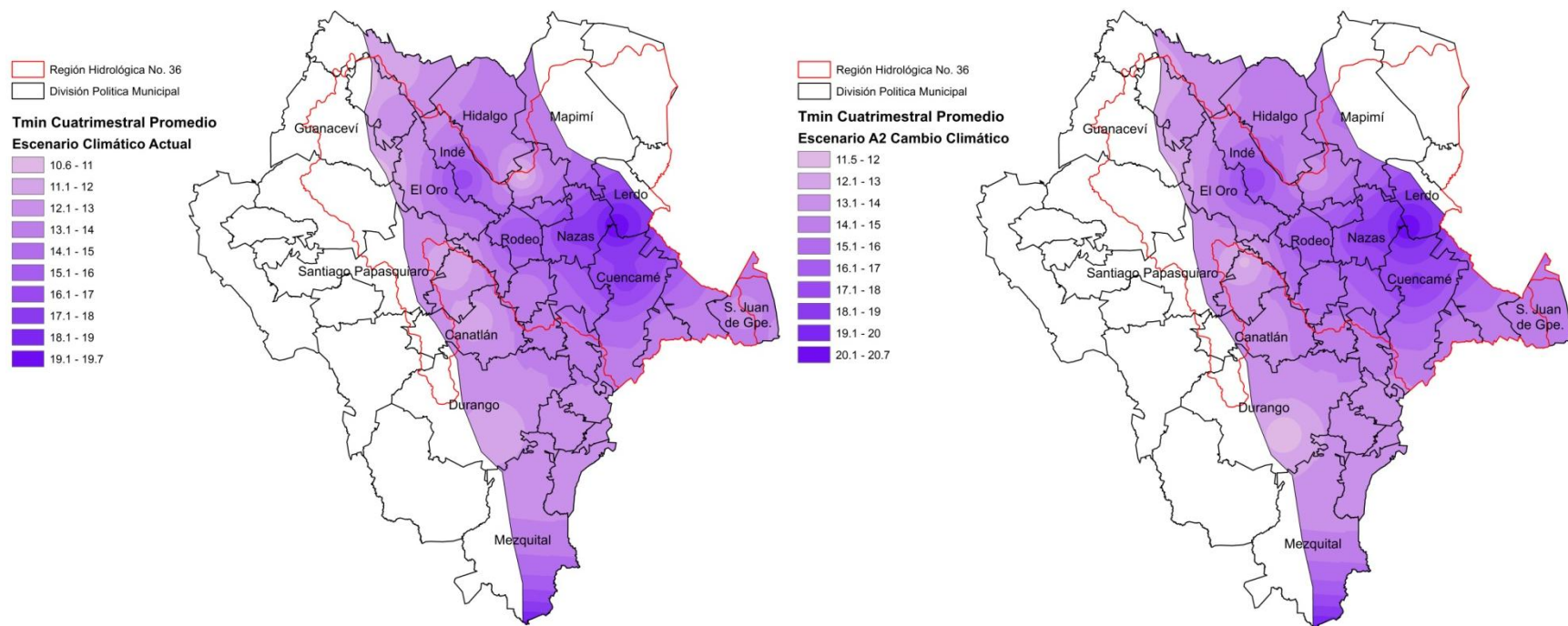


Figura 45. Distribución espacial de temperatura mínima cuatrimestral promedio actual (izquierda) y futura (derecha) durante un periodo de crecimiento del cultivo 20 de Mayo – 17 de Septiembre.

6.2.3 Precipitación

Para la variable precipitación en el comparativo bajo el escenario climático actual versus escenario A2 para un periodo simulado de 10 años por SICTOD 1 (Ver Figura 46), aproximadamente el 74% de las EM tienden a reducir en promedio 30.4 mm su precipitación dentro del periodo mayo-septiembre. La EM que presenta una mayor disminución es Narciso Mendoza, localizada en el municipio de Poanas con 58.6 mm. El restante 26%, tiende a incrementar su precipitación 7.6 mm en promedio, siendo la EM Peñoles en el municipio de San Pedro del Gallo con el más alto incremento, 12.7 mm. (Cuadro 11).

Cuadro 11. Comparación de la precipitación cuatrimestral promedio actual y futura por municipio y estación meteorológica para un periodo simulado de 10 años por SICTOD.

Fecha de siembra: 20 de Mayo					
Clave	Estación meteorológica	Municipio	Precipitación		Anomalía
			Escenario Climático Actual	Escenario A2 Cambio Climático	
10004	Cañon de Fernández	Cuencame	204.9	212.8	7.9
10008	Cinco de Mayo	San Pedro del Gallo	229.6	186.8	-42.8
10012	Cuencame	Cuencame	286.4	246.4	-40.0
10016	Chinacates	Santiago Papasquiaro	322.4	287.6	-34.8
10021	El Palmito II	Indé	279.4	254.2	-25.2
10022	EL Pino	Canatlán	349.8	353.5	3.7
10027	Francisco I. Madero (SMN)	Panuco de Coronado	359.7	344.2	-15.5
10047	Narciso Mendoza	Poanas	345.0	286.4	-58.6
10049	Nazas	Nazas	250.4	206.0	-44.4
10053	Peñoles	San Pedro del Gallo	221.2	233.9	12.7
10057	Presa Santa Elena	Súchil	325.9	285.4	-40.5
10061	Rosario	Melchor Ocampo	119.9	124.3	4.4
10066	San Jose de Acevedo	Nombre de Dios	311.7	304.4	-7.3
10068	San Juan del Rio (SMN)	San Juan del Rio	353.8	328.7	-25.1
10074	Santa Clara	Santa Clara	284.9	253.4	-31.5
10078	Sardinas	San Bernardo	134.1	127.3	-6.8
10088	Vicente Guerrero	Vicente Guerrero	358.7	324.6	-34.1
10098	Rodeo	Rodeo	306.8	287.6	-19.2
10099	San Juan de Guadalupe	San Juan de Guadalupe	197.0	206.1	9.1

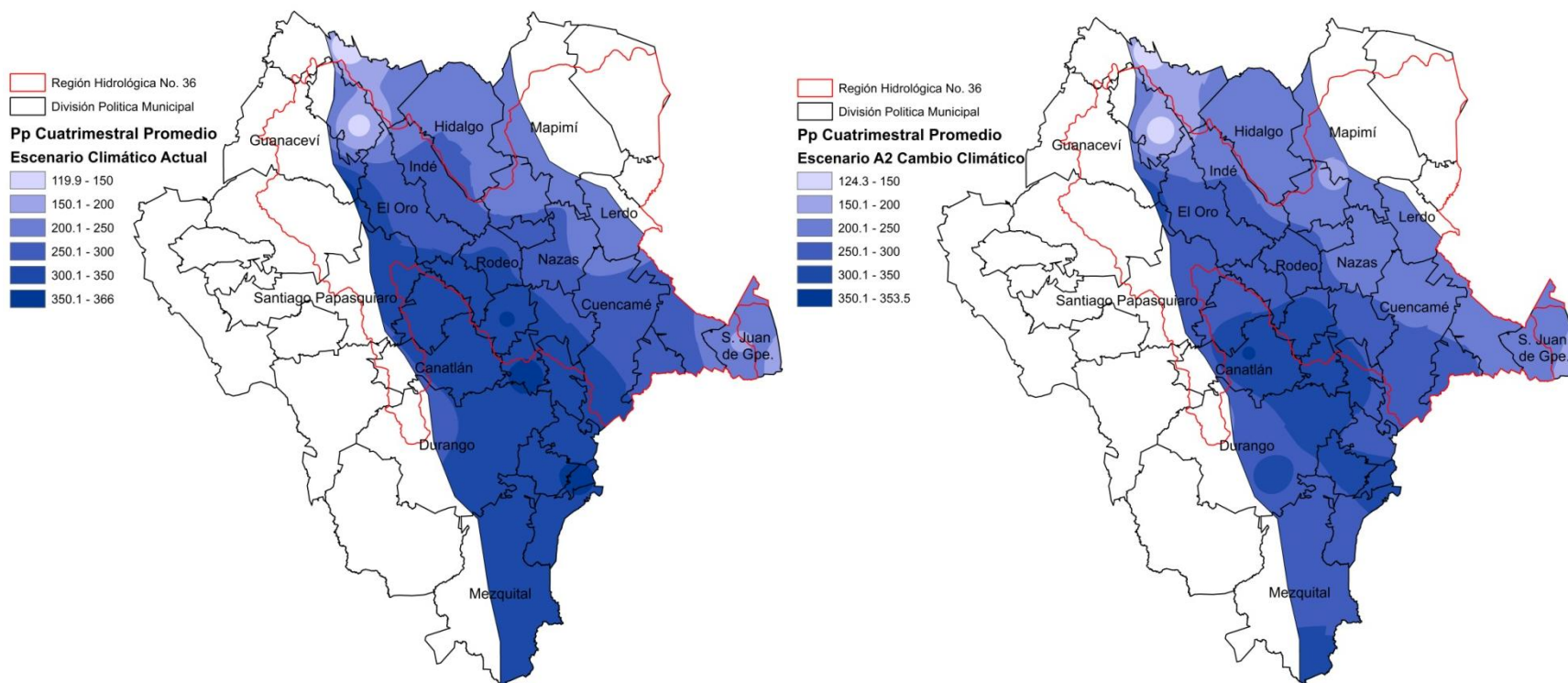


Figura 46. Distribución espacial de la precipitación cuatrimestral promedio actual (izquierda) y futura (derecha) durante un periodo de crecimiento del cultivo 20 de Mayo – 17 de Septiembre.

Visualizando lo que pasa en Narciso Mendoza, se grafica la probabilidad de ocurrencia de lluvia, observándose que la probabilidad de lluvia para el escenario A2 de cambio climático (línea azul) está en algunas partes por debajo de la probabilidad del escenario climático actual (línea naranja) (Figura 47). Con respecto a Peñoles, la Figura 48 ilustra la probabilidad de ocurrencia de lluvia del escenario A2 (línea azul) por arriba de la probabilidad del escenario climático actual (línea naranja).

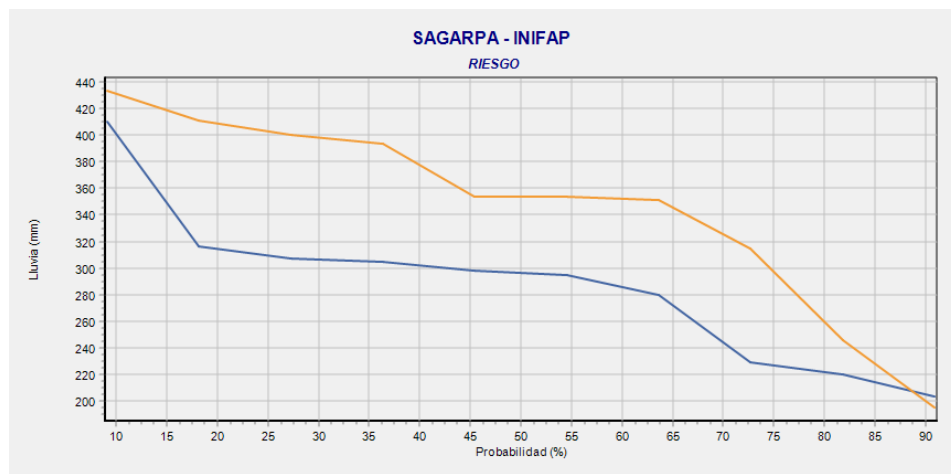


Figura 47. Probabilidad de ocurrencia de lluvia en la estación Narciso Mendoza para un periodo simulado de 10 años por SICTOD 1. En línea naranja, la probabilidad bajo un escenario climático actual y en azul, bajo un escenario A2 de cambio climático.

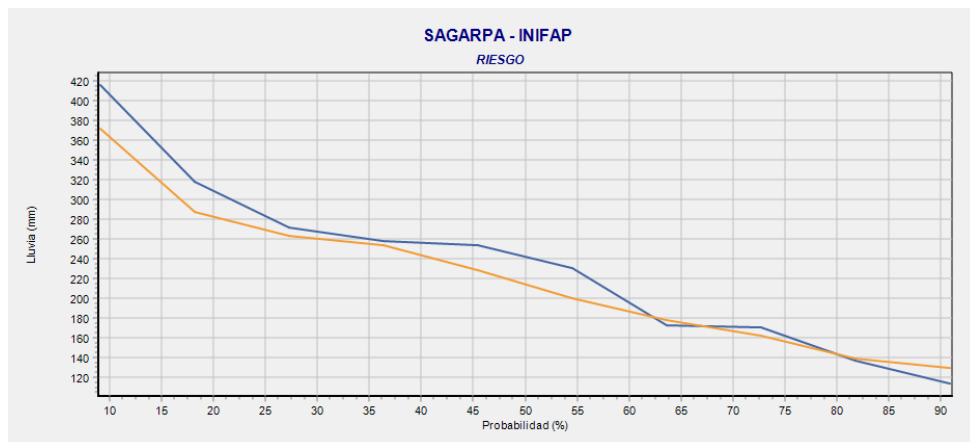


Figura 48. Probabilidad de ocurrencia de lluvia en la estación Peñoles para un periodo simulado de 10 años por SICTOD 1. En línea naranja, la probabilidad bajo un escenario climático actual y en azul, bajo un escenario A2 de cambio climático.

6.2.4 Rendimiento

En cuanto al rendimiento, el comparativo bajo el escenario climático actual versus escenario A2 para un periodo simulado de 10 años por SICTOD 1 (Ver Figura 49) se puede observar que alrededor del 32% de las EM incrementan su rendimiento en promedio 173kg ha^{-1} . La EM con mayor incremento es El Pino, ubicada en el municipio de Canatlán con aproximadamente 307kg ha^{-1} por encima del rendimiento bajo el escenario actual. El 58% de las EM tienden a un decremento de 351kg ha^{-1} en promedio, donde la estación de Narciso Mendoza en el municipio de Poanas tiene un decremento de 650kg ha^{-1} siendo el de mayor significancia (Cuadro 12).

Cuadro 12. Comparación del rendimiento actual y futuro por municipio y estación meteorológica para un periodo simulado de 10 años por SICTOD.

Fecha de siembra: 20 de Mayo					
Clave	Estación meteorológica	Municipio	Rendimiento		Anomalía
			Escenario Climático Actual	Escenario A2 Cambio Climático	
10004	Cañón de Fernández	Cuencame	0.273	0.366	0.093
10008	Cinco de Mayo	San Pedro del Gallo	0.568	0.204	-0.364
10012	Cuencame	Cuencame	0.790	0.495	-0.295
10016	Chinacates	Santiago Papasquiaro	1.303	0.830	-0.473
10021	El Palmito II	Indé	0.814	0.489	-0.325
10022	EL Pino	Canatlán	1.392	1.699	0.307
10027	Francisco I. Madero (SMN)	Panuco de Coronado	1.628	1.933	0.305
10047	Narciso Mendoza	Poanas	1.498	0.848	-0.650
10049	Nazas	Nazas	0.543	0.266	-0.277
10053	Peñoles	San Pedro del Gallo	0.38	0.463	0.083
10057	Presa Santa Elena	Súchil	1.394	0.969	-0.425
10061	Rosario	Melchor Ocampo	0.000	0.000	0.000
10066	San José de Acevedo	Nombre de Dios	1.197	1.244	0.047
10068	San Juan del Rio (SMN)	San Juan del Rio	1.721	1.46	-0.261
10074	Santa Clara	Santa Clara	0.755	0.465	-0.290
10078	Sardinas	San Bernardo	0.000	0.000	0.000
10088	Vicente Guerrero	Vicente Guerrero	1.724	1.395	-0.329
10098	Rodeo	Rodeo	1.261	1.094	-0.167
10099	San Juan de Guadalupe	San Juan de Guadalupe	0.204	0.408	0.204

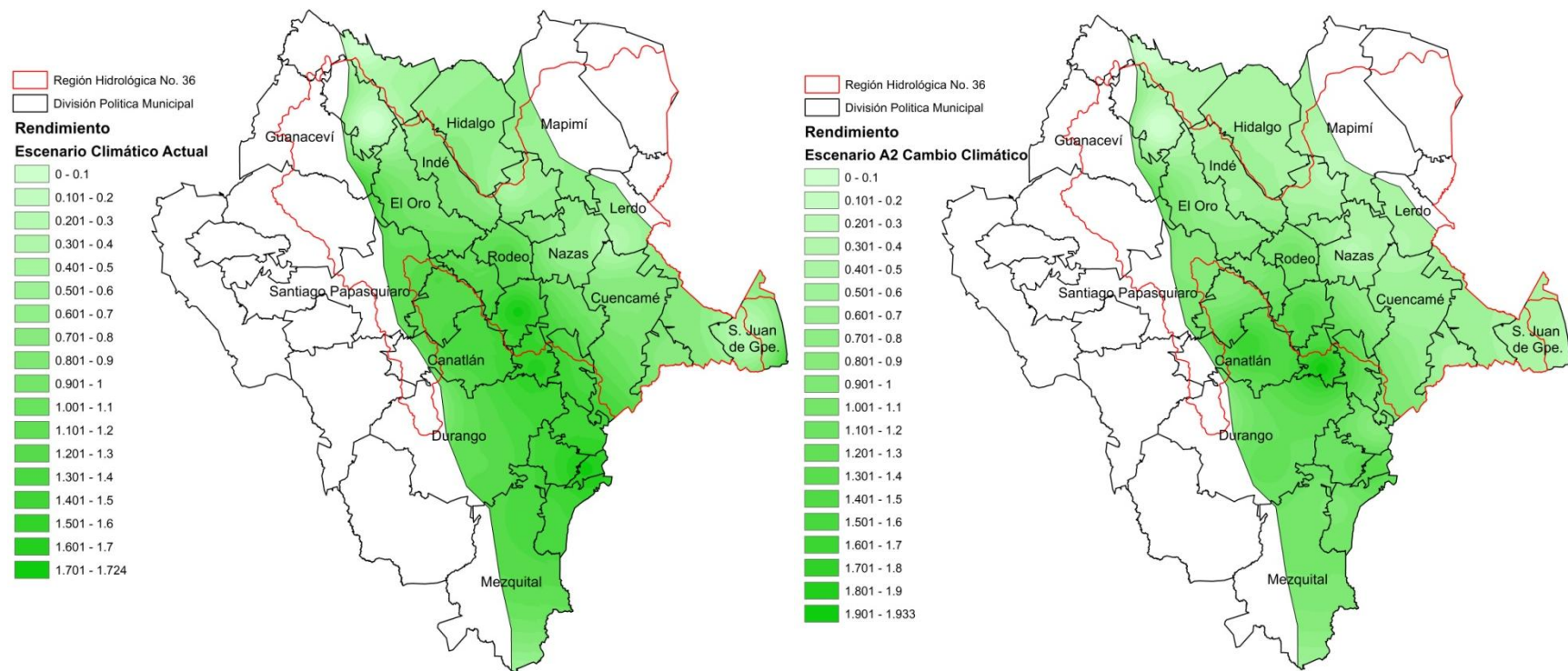


Figura 49. Distribución espacial del rendimiento actual (izquierda) y futuro (derecha) durante un periodo de crecimiento del cultivo 10 de Abril - 7 de Agosto.

Para comprender el incremento en El Pino y el decremento en Narciso Mendoza, se grafican las probabilidades de rendimiento. En El Pino, se observa en la Figura 50 que el valor de la probabilidad de rendimiento para el escenario A2 (línea azul) está por encima de la probabilidad del escenario climático actual (línea naranja). Para la estación de Narciso Mendoza, el rendimiento bajo el escenario A2 (línea azul) es inferior al rendimiento bajo un escenario actual (línea naranja) (Figura 51).

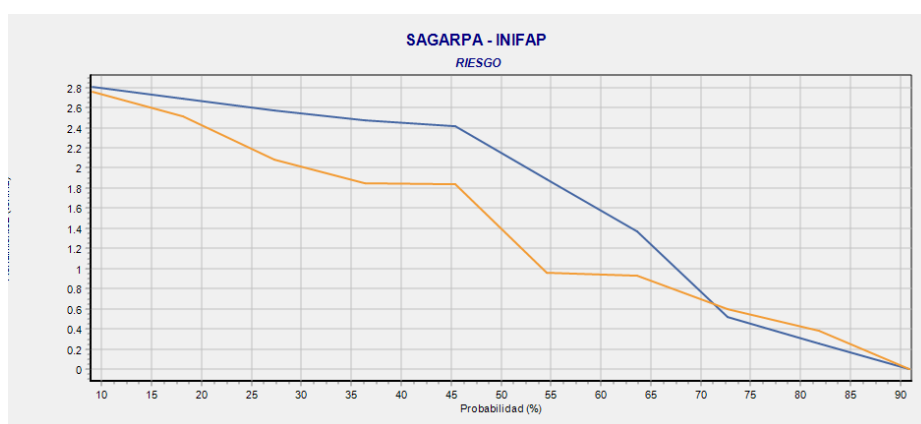


Figura 50. Probabilidad de rendimiento en la estación El Pino para un periodo simulado de 10 años por SICTOD 1. En línea naranja, la probabilidad bajo un escenario climático actual y en azul, bajo un escenario A2 de cambio climático.

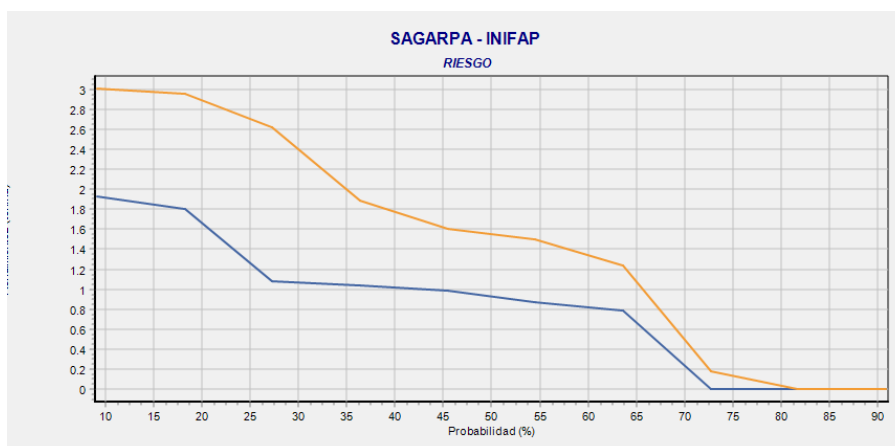


Figura 51. Probabilidad de rendimiento en la estación Narciso Mendoza para un periodo simulado de 10 años por SICTOD 1. En línea naranja, la probabilidad bajo un escenario climático actual y en azul, bajo un escenario A2 de cambio climático.

6.3 Fecha de Siembra 30 de Junio

6.3.1 Temperatura Máxima

El periodo analizado para las variables Tmax y Tmin comprende de julio a octubre debido a que la fecha de siembra usada en el modelo SICTOD 1 comienza el 30 de junio. Al comparar los valores de Tmax con escenario climático actual versus escenario A2 cambio climático (Ver Figura 52), se tiene que el 100% de las EM, tienden a un incremento en promedio de 1.3 °C para los meses de julio a octubre. La estación con mayor incremento es Mapimí con 2.4 °C al comparar el escenario A2 de cambio climático versus escenario climático actual (Cuadro 13). De acuerdo a Esquivel, (2011) en su estudio, analizó dos de las cuatro estaciones que aquí se presentan con un incremento en la temperatura de 1.2°C en promedio al usar el modelo SDSM.

Cuadro 13. Comparación de temperatura máxima cuatrimestral promedio actual y futura por municipio y estación meteorológica

Fecha de siembra: 30 de Junio					
Clave	Estación meteorológica	Municipio	Temperatura Máxima		Anomalía
			Escenario Climático Actual	Escenario A2 Cambio Climático	
10005	Ceballos	Mapimí	33.1	34.2	1.1
10020	El Derrame	Mapimí	30.6	31.5	0.9
10045	Mapimí (Km. 29)	Mapimí	29.8	32.2	2.4
10085	Tlahualilo	Tlahualilo	33.6	34.4	0.8

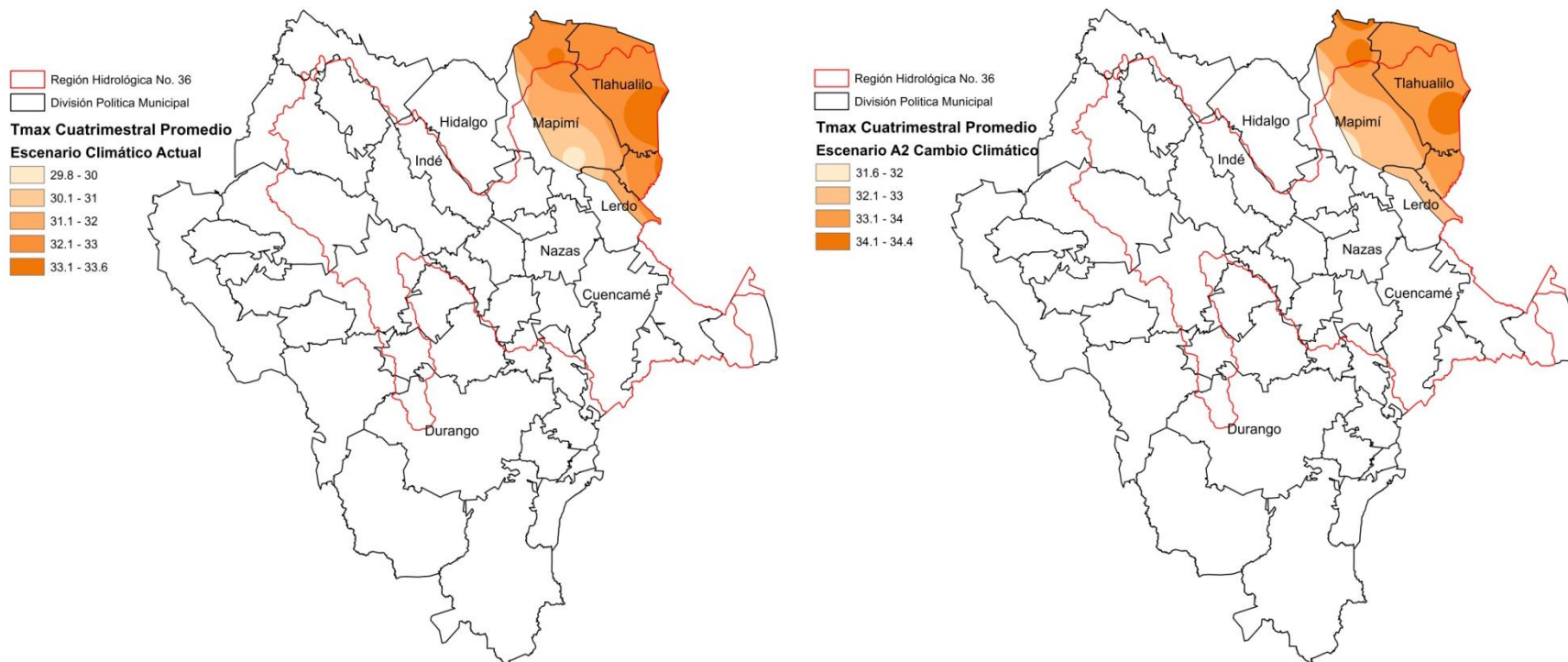


Figura 52. Distribución espacial de temperatura máxima cuatrimestral promedio actual (izquierda) y futura (derecha) durante un periodo de crecimiento del cultivo 30 de Junio – 28 de Octubre.

6.3.2 Temperatura Mínima

En el comparativo de Tmin, como se puede apreciar en el Cuadro 14, el 100% de las EM incrementaron en promedio 1.4 °C su temperatura, coincidiendo así con la Tmax del apartado anterior. El incremento más importante se da en Mapimí con 2.7 °C comparando el escenario A2 de cambio climático versus escenario climático actual. En Esquivel-Arriaga, (2011) las estaciones Ceballos y Tlahualilo tienen un incremento de 0.5 y 0.2°C respectivamente, valores por debajo a los presentados en el presente estudio.

En la Figura 53 se observa la distribución espacial de la Tmin con escenario actual y escenario A2 de cambio climático.

Cuadro 14. Comparación de temperatura mínima cuatrimestral promedio actual y futura por municipio y estación meteorológica.

Fecha de siembra: 30 de Junio					
Clave	Estación meteorológica	Municipio	Temperatura Mínima		Anomalía
			Escenario Climático Actual	Escenario A2 Cambio Climático	
10005	Ceballos	Mapimí	15.1	16.8	1.7
10020	El Derrame	Mapimí	15.2	16.0	0.8
10045	Mapimí (Km. 29)	Mapimí	12.3	15.0	2.7
10085	Tlahualilo	Tlahualilo	16.6	17.0	0.4

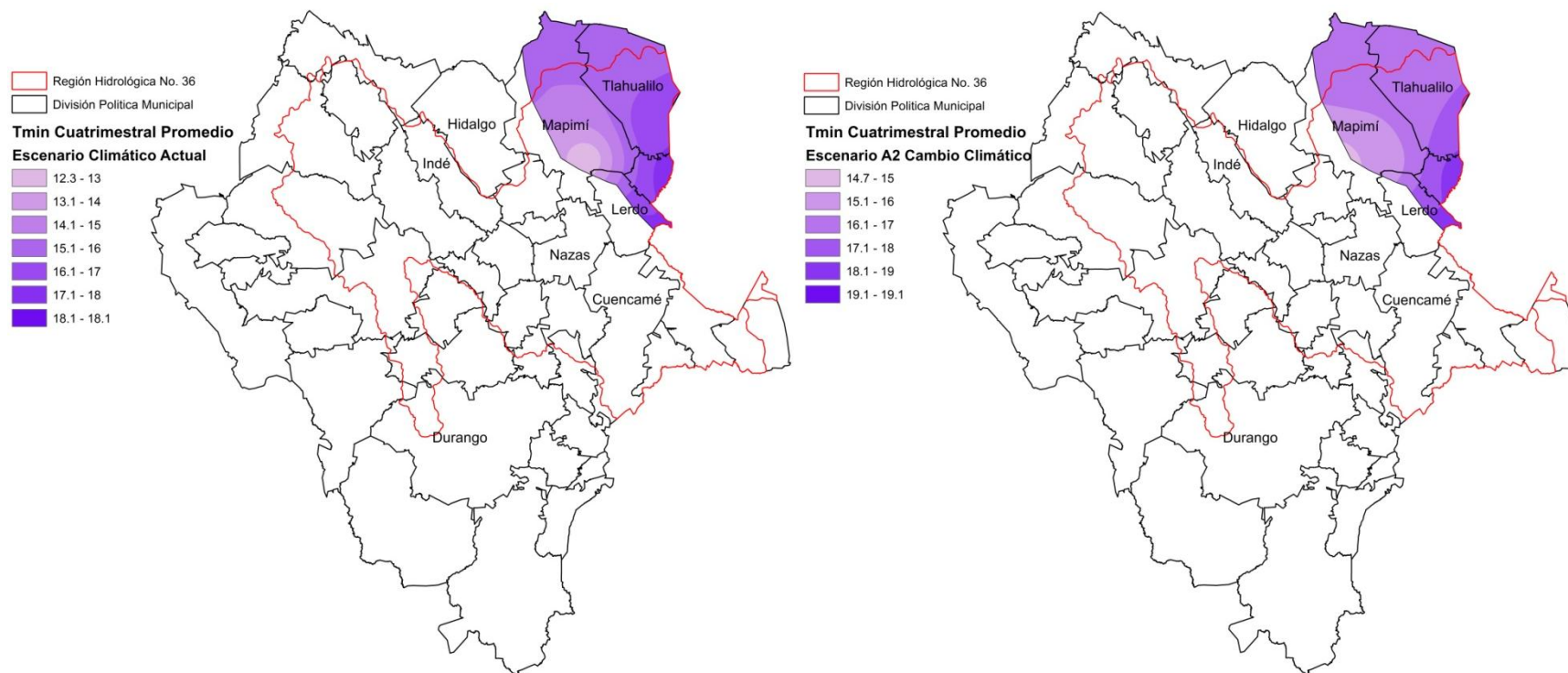


Figura 53. Distribución espacial de temperatura mínima cuatrimestral promedio actual (izquierda) y futura (derecha) durante un periodo de crecimiento del cultivo 30 de Junio – 28 de Octubre.

6.3.3 Precipitación

Para la variable precipitación, en el comparativo bajo el escenario climático actual versus escenario A2 para un periodo simulado de 10 años por SICTOD 1 (Ver Figura 54), el 75% de las EM donde se utilizó una fecha de siembra del 30 de junio, presentan un decremento promedio de 14.6 mm en el periodo julio a octubre. La EM con mayor disminución es Tlahualilo ubicada en el municipio con el mismo nombre con 21 mm. El 25% restante tiende a incrementar su precipitación en 25.1 mm que es el caso de Mapimí (Cuadro 15).

Cuadro 15. Comparación de la precipitación cuatrimestral promedio actual y futura por municipio y estación meteorológica para un periodo simulado de 10 años por SICTOD.

Fecha de siembra: 30 de Junio					
Clave	Estación meteorológica	Municipio	Precipitación		Anomalía
			Escenario Climático Actual	Escenario A2 Cambio Climático	
10005	Ceballos	Mapimí	148.4	145.6	-2.8
10020	El Derrame	Mapimí	176.0	155.9	-20.1
10045	Mapimí (Km. 29)	Mapimí	207.8	232.9	25.1
10085	Tlahualilo	Tlahualilo	153.4	132.4	-21.0

Graficando la probabilidad de ocurrencia de la lluvia en la estación de Tlahualilo se observa que la probabilidad de lluvia para el escenario A2 de cambio climático (línea azul) está por debajo de la probabilidad del escenario climático actual (línea naranja) (Figura 55). Con respecto a Mapimí, la Figura 56 ilustra la probabilidad de ocurrencia de lluvia del escenario A2 (línea azul) por arriba de la probabilidad del escenario climático actual (línea naranja).

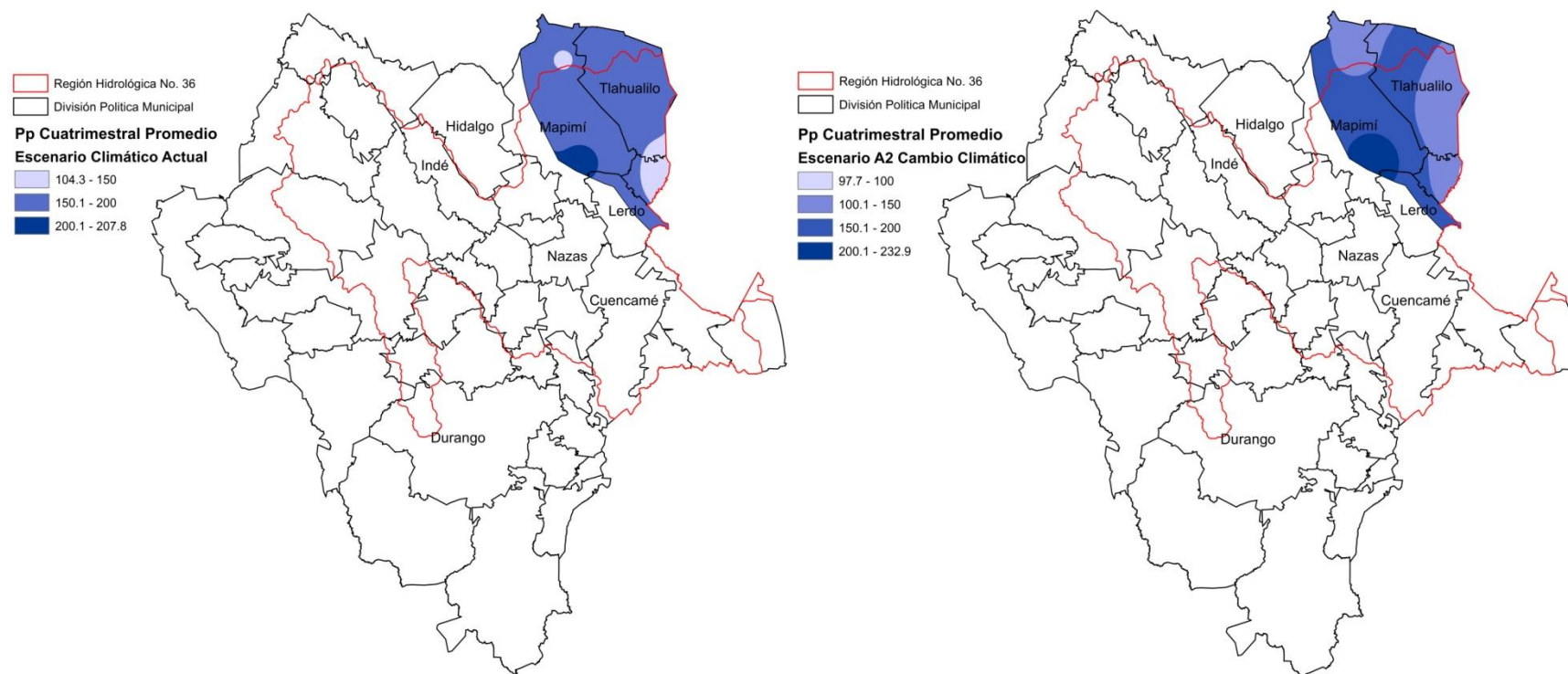


Figura 54. Distribución espacial de la precipitación cuatrimestral promedio actual (izquierda) y futura (derecha) durante un periodo de crecimiento del cultivo 30 de Junio – 28 de Octubre.

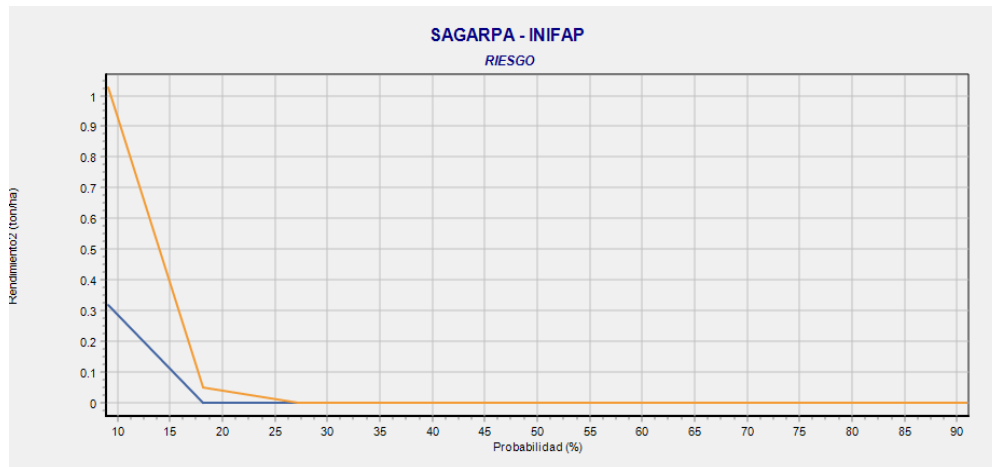


Figura 55. Probabilidad de ocurrencia de lluvia en la estación Tlahualilo para un periodo simulado de 10 años por SICTOD 1. En línea naranja, la probabilidad bajo un escenario climático actual y en azul, bajo un escenario A2 de cambio climático.

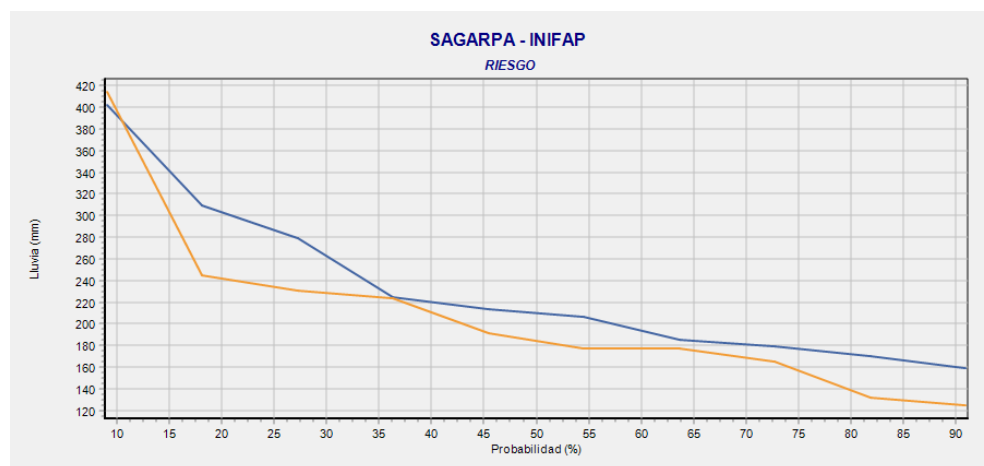


Figura 56. Probabilidad de ocurrencia de lluvia en la estación Mapimí para un periodo simulado de 10 años por SICTOD 1. En línea naranja, la probabilidad bajo un escenario climático actual y en azul, bajo un escenario A2 de cambio climático.

6.3.4 Rendimiento

Con respecto a la variable rendimiento, el Cuadro 16 presenta una comparación entre el rendimiento bajo el escenario climático actual versus escenario A2 cambio climático para un periodo simulado de 10 años por SICTOD 1 (Ver Figura 57). Se puede apreciar que el 25% de las EM incrementan su rendimiento, específicamente en la

estación Mapimí con 29kg ha^{-1} , probablemente debido al incremento de la precipitación y temperaturas visto en los apartados anteriores. El 75% de las estaciones, tienden a disminuir su rendimiento en promedio 60kg ha^{-1} donde este fenómeno es más significativo es en la estación El Derrame con 80kg ha^{-1} .

Cuadro 16. Comparación del rendimiento actual y futuro por municipio y estación meteorológica para un periodo simulado de 10 años por SICTOD.

Fecha de siembra: 30 de Junio					
Clave	Estación meteorológica	Municipio	Rendimiento		Anomalía
			Escenario Climático Actual	Escenario A2 Cambio Climático	
10005	Ceballos	Mapimí	0.100	0.076	-0.024
10020	El Derrame	Mapimí	0.234	0.154	-0.080
10045	Mapimí (Km. 29)	Mapimí	0.354	0.383	0.029
10085	Tlahualilo	Tlahualilo	0.108	0.032	-0.076

Graficando las probabilidades de rendimiento para las estaciones Mapimí y El Derrame, se observa que en la primera, el escenario A2 (línea azul) es superior al rendimiento bajo un escenario actual (línea naranja) sin embargo, tiene solo el 36% de probabilidad de obtener rendimiento (Figura 58). Por otro lado en El Derrame, el valor de la probabilidad de rendimiento para el escenario A2 (línea azul) está por debajo de la probabilidad del escenario climático actual (línea naranja) (Figura 59).

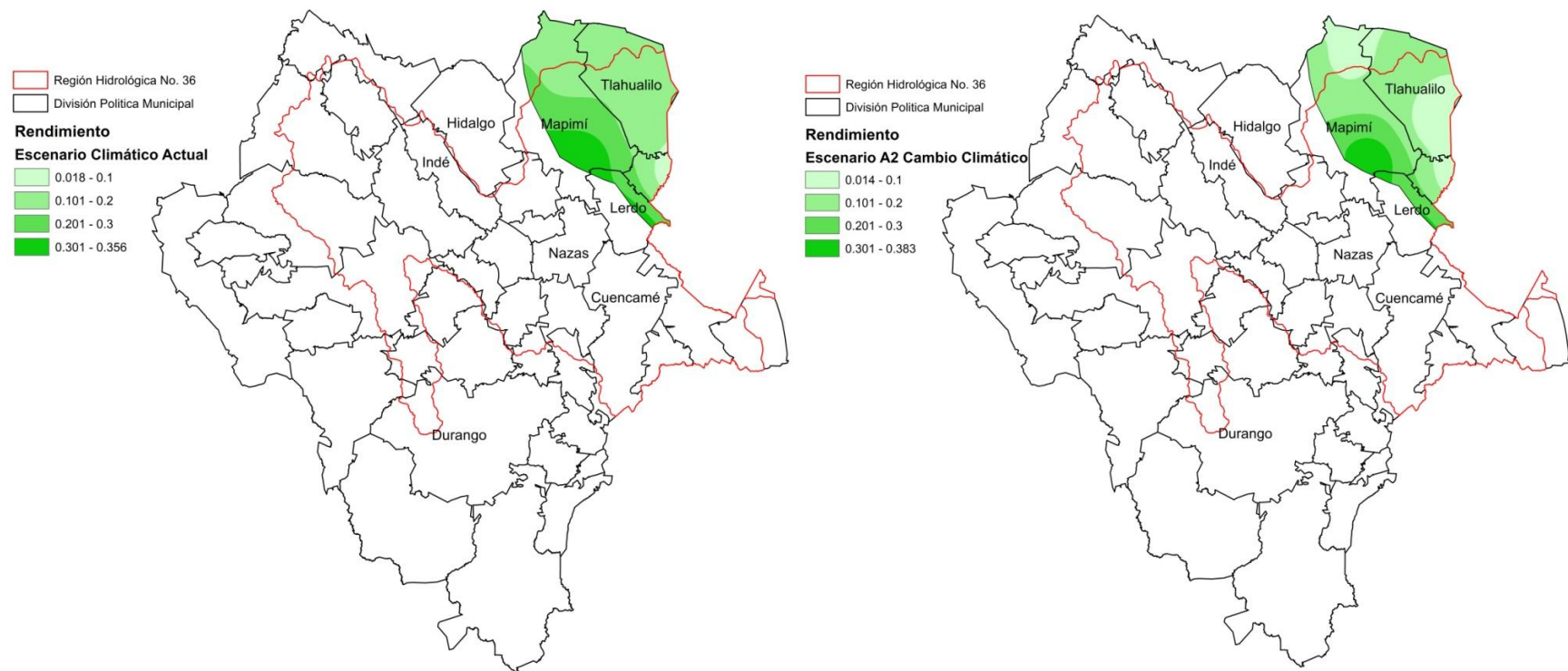


Figura 57. Distribución espacial del rendimiento actual (izquierda) y futuro (derecha) durante un periodo de crecimiento del cultivo 30 de Junio – 28 de Octubre.

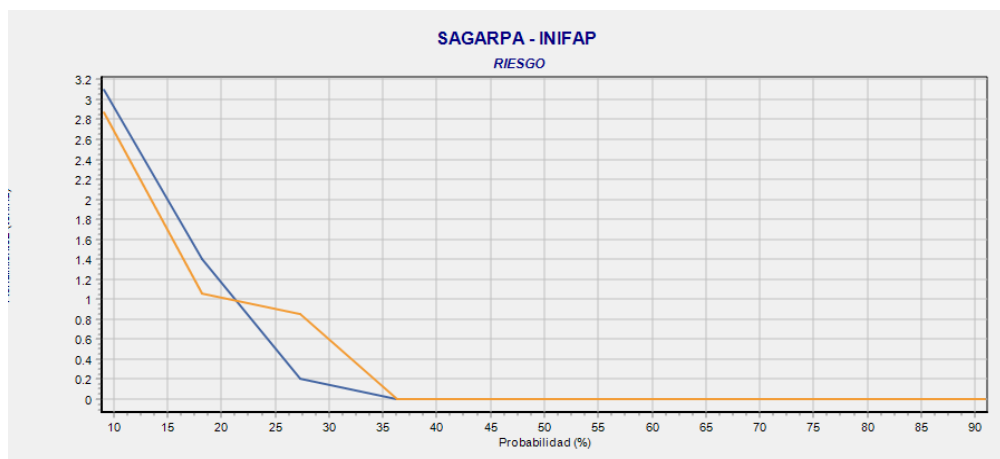


Figura 58. Probabilidad de rendimiento en la estación Mapimí para un periodo simulado de 10 años por SICTOD 1. En línea naranja, la probabilidad bajo un escenario climático actual y en azul, bajo un escenario A2 de cambio climático.

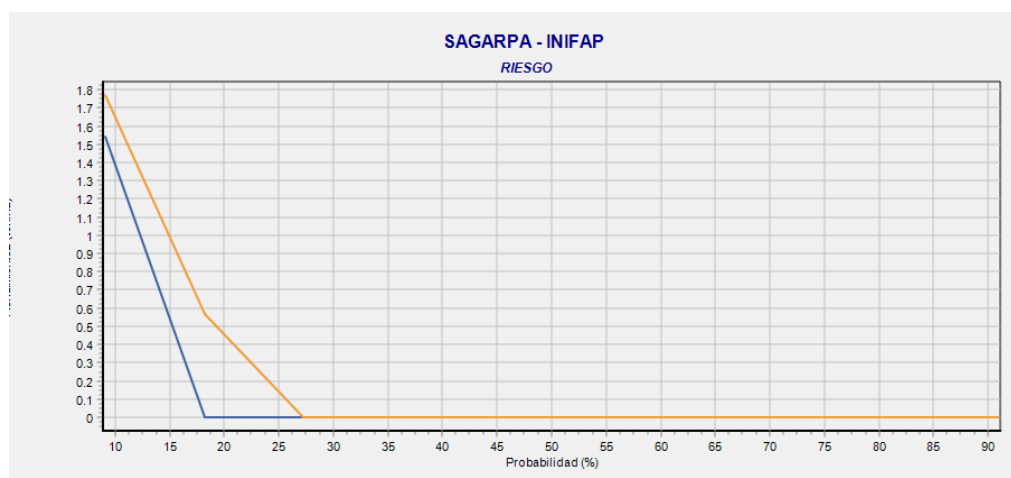


Figura 59. Probabilidad de rendimiento en la estación El Derrame para un periodo simulado de 10 años por SICTOD 1. En línea naranja, la probabilidad bajo un escenario climático actual y en azul, bajo un escenario A2 de cambio climático.

7.- CONCLUSIONES

Las variaciones climáticas y su amplia distribución espacio-temporal, han resultado en una complejidad en la estimación de eventos extremos sean estos caracterizados por sequías o inundaciones. Dichos escenarios han tenido un fuerte impacto en la sociedad más vulnerable y han evidenciado la falta de algoritmos robustos de estimación y alternativas eficientes de mitigación volviendo aun más vulnerables los sistemas productivos.

Un sistema vulnerable es un sistema bajo riesgo el cual puede ser físico, económico y social sin ser excluyentes entre sí. En el sector agropecuario, el riesgo físico se relaciona a variables como el rendimiento de los cultivos siendo la principal fuente de riesgo físico el riesgo climático. Prácticamente cualquier problema que involucre riesgo puede ser representado con un razonable grado de precisión por medio de un modelo de simulación.

En el presente estudio se mostró una metodología la cual ensambla diversos algoritmos que de manera individual son usados para diferentes propósitos y así obtener un buen resultado. El unir un modelo de simulación climático y un modelo de simulación de cultivo, nos permite contar con una herramienta de planeación para evadir el riesgo climático al realizar análisis de balance continuo de humedad en el suelo bajo dos diferentes condiciones de precipitación pluvial (escenario climático actual y escenario de cambio climático). El carácter estocástico de la variable precipitación le

imprime un valor agregado a la metodología ya que se analizan diferentes escenarios de lluvia que pueden ocurrir acorde al historial climático y la simulación climática reescalada. La ventaja de la simulación de procesos, es que se puede obtener información estadística a cerca del comportamiento del sistema lo que permite la cuantificación del comportamiento.

Por ello se pudo observar que mediante la simulación de 10 años con el modelo SICTOD1 empleando un escenario climático actual versus escenario de cambio climático (A2) al evaluar un ciclo agrícola de 120 días en ocho estaciones meteorológicas donde puede sembrarse maíz a partir del 10 de abril, las variables de Tmax y Tmin tienden a un incremento de 1 y 1.1 °C en promedio durante el periodo de crecimiento del cultivo respectivamente. En cuanto a la variable precipitación, el 60% de las estaciones tienden a un decremento en promedio de 26.3 mm y el 40% restante, tienden a incrementar su precipitación en promedio 31.5 mm durante el periodo de crecimiento del cultivo. Este tipo de alteraciones climáticas, son factor de cambio en el rendimiento de manera positiva en 75% de las estaciones donde el rendimiento se incrementó en promedio 433kg ha⁻¹ y de forma negativa el 25% tienden a disminuir o no su rendimiento aproximadamente 53kg ha⁻¹.

Para 19 estaciones meteorológicas donde puede sembrarse maíz a partir del 20 de mayo las variables de Tmax y Tmin tienden a un incremento en promedio de 1.1 °C cada una durante el periodo de crecimiento del cultivo. Con respecto a la variable precipitación, aproximadamente el 74% de las estaciones tienden a un decremento en

promedio de 30.4 mm y el 26% restante, tienden a incrementar su precipitación en promedio 7.6 mm durante el periodo de crecimiento del cultivo modificando de igual forma el rendimiento del cultivo donde alrededor del 32% de las estaciones tienden a incrementar su rendimiento en promedio 173kg ha⁻¹, por otro lado, el 58% de las estaciones tienden a un decremento en el rendimiento en promedio de 351kg ha⁻¹.

En 4 estaciones meteorológicas donde puede sembrarse maíz a partir del 30 de junio, las variables de Tmax y Tmin tienden a un incremento de 1.3 y 1.4 °C en promedio durante el periodo de crecimiento del cultivo respectivamente; con respecto a la variable precipitación, el 75% de las estaciones tienden a un decremento en promedio de 14.6 mm y el 25% restante, tienden a incrementar su precipitación en 25.1 mm durante el periodo de crecimiento del cultivo, modificando probablemente el rendimiento de manera positiva en 25% de las estaciones con 29kg ha⁻¹ o manera negativa en 75% de las estaciones con 60kg ha⁻¹ en promedio.

Es importante considerar que el método que se presenta no está diseñado para la predicción de rendimiento sino que, mediante la simulación continua de varios periodos de crecimiento del cultivo, se puede obtener una apreciación del déficit o excesos de humedad que se pudieran esperar en el sitio de interés con impacto en el rendimiento. Quizá la variable de decisión de mayor importancia para elegir un determinado modelo, además del objetivo, es la disponibilidad y calidad de información que ingresa al modelo. SICTOD 1 promete ser un modelo robusto, confiable y de fácil manejo para la toma de decisiones en la agricultura de temporal.

8.- LITERATURA CITADA

- Adhya T. K., Sharma P. D. and Gogoi K. A. 2009. Mitigating Greenhouse Gas Emission from Agriculture. En: S.N. Singh (ed.) Climate Change and Crops, Environmental Science and Engineering.
- Al-Abed, N., F. Abdulla, and A. Abu K. 2005. GIS-hydrological models for managing water resources in the Zarqa River basin. Environ. Geol. 47: 405-411.
- Bruinsma J. 2003. World agriculture: towards 2015/2030 An FAO Perspective. Earthscan Publications Ltd London.
- Chen S. T., Yu P. S. and Tang Y. H. 2010. Statistical downscaling of daily precipitation using support vector machines and multivariate analysis. Journal of Hidrology 385: 13-22.
- Conde A., A. C., Gay G., C.2008. Guía para la generación de escenarios de cambio climático a escala regional. Centro de Ciencias de la Atmosfera. UNAM. México, D.F.
- Díaz Padilla, G., y Sánchez Cohen, I. (2007). Sistema de consulta y procesamiento de información climatológica de México. In I. Sánchez Cohen, & G. Chebhouni, Procesos Hidrológicos en Zonas Áridas y Semiáridas (pp. 21-39). Gómez Palacio, Durango, México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relaciones Agua Suelo Planta Atmosfera.
- Díaz, P. G. y M. Cortina C. 2005. Sistema de consulta y procesamiento de información climatológica de México. Centro de Investigación Regional Golfo Centro. Campo Experimental Xalapa. Xalapa, Veracruz, México.
- Escobar Pedraza, J. J. 2011. Análisis de la Información Climática Reciente para el Estudio de la Precipitación Pluvial en la Cuenca Alta Del Rio Nazas en el Contexto del Cambio Climático Global. Tesis inédita de maestría, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas. Universidad Autónoma Chapingo.
- Esquivel Arriaga, G. 2011. Efecto del Cambio en los Patrones del Clima sobre el Rendimiento de los Cultivos. Tesis inédita de maestría, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas. Universidad Autónoma Chapingo.
- FAO. 2002. Agricultura mundial, hacia los años: 2015-2030. Informe Resumido. Roma, Italia.

- Gottfried, S. B. 1984. Elements of Stochastic Process Simulation. University of Pittsburg : Pretnice may Inc.
- Haan, C. T. 1982. Statistical Methods in Hydrology. The Iowa State University Press.
- Hashmi M. Z., Shamsedin A. Y. and Melville B. W. 2010. Comparison of SDSM and LARS-WG for simulation and downscaling for extreme precipitation events in a watershed. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment 25 (4): 475-484.
- Herrero, J., Aguilar, C., Millares, A., Polo, M.J. 2011. WiMMed Manual de Usuario v1.1. Grupo de Dinámica Fluvial e Hidrología Universidad de Córdoba. Grupo de Dinamica de Flujos Ambientales Centro Andaluz de Medio Ambiente (CEAMA) Universidad de Granada. p. 66.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 2008. Anuario Estadístico del Estado de Durango. Aguascalientes, Aguascalientes. México.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis K. B., Averyt M. T. and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York. NY, USA.
- IPCC, 2010: Meeting Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Expert Meeting on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. IPCC Working Group I Technical Support Unit, University of Bern, Bern, Switzerland, pp. 117.
- Jenièek, M. 2007. Rainfall–runoff modeling in small and middle–large catchments – an overview. Geografie– Sbornik 111 (3): 305–313.
- Krishnan P., Ramakrishnan B., Rao K. S. and Dash R. N. 2009. Simulation Studies to Characterize the Impact of Climate Change on Crop Production and to Identify Strategies for Adaptation and Mitigation. En: Climate Change and Crops. S.N. Singh National Botanical Research Inst. (NBRI) Environmental Science Division. India.
- Law, A. M. And Kelton, W. D. 1982. Simulation Modeling and Analysis. Mc. Graw Hill Book Co., Inc. New Cork, N. Y.
- Li K. & Qi J. 2010. Statistical Downscaling: a Powerful Tool for Estimating Global Change Impacts on Regional Scale. 2nd Conference on Environmental Science and Information Application Technology.

- Lobell D. & Burke M. 2010. Global and Regional Assessments 177-192. En: D. Lobell and M. Burke (eds.), *Climate Change and Food Security*, *Advances in Global Change Research* 37.
- Magaña R. V. O. 2010. Curso Taller Elaboración de Escenarios de Riesgo y Vulnerabilidad Ante el Cambio Climático. Realizado en la Universidad Autónoma de Aguascalientes los días 13, 14 y 15 de noviembre, 2010. Aguascalientes, Ags.
- Martín de Santa Olalla, F. 2005. *Agua y Agronomía*. Madrid, Universidad de Castilla La Mancha, España: Mundi-Presa.
- Martínez, S. S. 2013. Modelación del impacto potencial del cambio climático mediante dos indicadores de calidad ambiental en el Estado de Aguascalientes. (Tesis inédita profesional). Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo. Bermejillo, Dgo., México. 151 p.
- McColl, C., and G. Agget. 2007. Land–use forecasting and hydrologic model integration for improved land–use decision support. *J. Environ. Manage.* 84(4): 494–512.
- Nakicenovic, N., O. Davidson, G. Davis, A. Grabler, T. Kram, E. Lebre La Rovere, B. Metz, T. Morita, W. Pepper, H. Pitcher, A. Sankovski, P. Shukla, R. Swart, R. Watson and Z. Dadi. 2000. Special Report on Emissions Scenarios. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido. <http://ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-sp.pdf>.
- Nouvelot, J.F., L. Descroix y J. Estrada. 2004. El clima y la variabilidad pluviométrica en el norte de México. Pp. 117-132. En: Descroix, L., J.L. González Barrios, J. Estrada Avalos. (Editores). *La Sierra Madre Occidental, una fuente de agua amenazada*. Ediciones INIFAP-IRD. Gómez Palacio, Durango, México. 300 p.
- NSF (National Science Foundation). 2009 Climate Literacy. The Essential Principles of Climate Sciences. Washington DC Unites States of America. 17 pp.
- Pimentel D. 2009. Agriculture and Food Problems. Chapter 27: 513-516. En: Jan J. Boersema and Lucas Reijnders (eds.), *Principles of Environmental Sciences*, Springer Science + Business Media B.V.
- Pedro, M. M. 2011. Análisis de información climática reciente para el estudio de la temperatura en la cuenca alta del río Nazas en el contexto del cambio climático global. Tesis Profesional. Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo. Bermejillo, Dgo., México. 168 p.
- Ponce, V. M. (1989). *Engineering Hydrology*. Prentice Hall.

- Purkey, D., B. Joyce, S. Vicuna, M. Hanemann, L. Dale, D. Yates and J.A. Dracup. 2007. Robust analysis of future climate change impacts on water for agriculture and other sectors: a case study in the Sacramento Valley. *Climatic Change*, doi: 10.1007/s10584-007-9375-8.
- Qaderi M. M. & Reid M. D. 2009. Crop Responses to Elevated Carbon Dioxide and Temperature. Chapter 1: 1-18 En: S.N. Singh (ed.). *Climate Change and Crops, Environmental Science and Engineering*.
- Rentería, J. y Stenta, H. 2003. Desarrollo de soporte computacional interactivo para sistema de simulación hidrológica superficial. Tesis de grado Ingeniería Civil. FCEIA-UNR. Rosario, Argentina. Inédito.
- Reyna, S., Reyna, T., Lábaque, M., Toselli, L., Gióvine, L., Fulginiti, F. 2010. Modelación Hidrológica – Hidráulica de la Presa Chihuido I. *In: VI Congreso Argentino de Presas y Aprovechamientos Hidroeléctricos*. 3–6 de Noviembre. Neuquén, Argentina. p. 15.
- Riccardi, G. 2000. Cell model for hydraulic modeling. *Journal of Enviromental Hydrology*. Vol. 8. paper 15. pp 1-13.
- Rosegrant M. W., Ewing M., Yohe G., Burton I, Huq S., and Valmonte S. R. 2008. *Climate Change and Agriculture. Threats and Opportunities*. Eschborn Germany. Climate Protection Programme for Developing Countries. 36 pp.
- Sánchez Cohen, I. 1994. *Evaluating strip farming systems for arid ecosystems a stochastic approach*. Doctoral Thesis dissertation, University of Arizona.
- Sanchez Cohen, I. 2005. *Fundamentos para el Manejo Integral del agua* (Libro Científico No. 2). Gómez Palacio, Durango, México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relaciones Agua Suelo Planta Atmosfera.
- Sánchez Cohen, I., Velásquez Valle, M. A., Catalán Valencia, E., Inzunza Ibarra, M. A., Esquivel Arriaga, G., Bueno Hurtado, P., & Díaz Padilla, G. 2013. *Modelo de balance hídrico como apoyo a toma de decisiones en zonas agrícolas bajo incertidumbre climática* (Folleto Técnico No. 28). Gómez Palacio, Durango: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relaciones Agua Suelo Planta Atmosfera.
- Scioli, C. 2009. Modelación del escurrimiento superficial en areas de llanura: Implementación y calibración de un modelo distribuido de grilla. Tesis Maestría – Universidad de Rosario, Rosario, Argentina. 160 pp.

- SEMARNAT-SHCP, 2009. La Economía del Cambio Climático en México. Subsecretaría de Planeación y Política Ambiental Dirección General Adjunta de Financiamiento Estratégico. Blvd. Adolfo Ruiz Cortines 4209, Col. Jardines en la Montaña, C.P. 14210, Tlalpan, México, D.F. Impreso en México, agosto 2009. 80 p. ISBN 978-968-817-938-3.
- Singh, V. P. 1996. *Kninematic wave modeling in water resources. Surface Water Hydrology*. New Delhi, India: John Wiley & Sons, Inc.
- Singh, V. P., & Kumar, B. 1993. *Surface Water Hydrology. Proceedings of the international conference on hydrology and water resources*. (V. P. Singh, & B. Kumar, Eds.) New Delhi, India.
- Tebaldi C. & Knutti R. 2010. Climate Models and Their Projections of Future Changes. Chapter 3:31-56 En: D. Lobell and M. Burke (eds.), *Climate Change and Food Security*, Advances in Global Change Research 37
- The National Academies. 2001. *Climate Change Science: An Analysis of Some Key Questions*. Committee on the Science of Climate Change – National Research Council. Washington DC. 42 pp.
- The National Academies. 2006. *Surface Temperature Reconstructions for the Last 2,000 Years*. Committee on Surface Temperature Reconstructions for the Last 2,000 Years - National Research Council. Washington DC. 161 pp.
- The National Academies. 2008. *Ecological Impacts of Climate Change*. National Academy of Sciences – National Academy of Engineering - Institute of Medicine - National Research Council. Washington DC. 32 pp.
- The National Academies. 2009. *Restructuring Federal Climate Research to Meet the Challenges of Climate Change*. Committee on Strategic Advice on the U.S. Climate - Change Science Program - National Research Council. Washington DC. 267 pp.
- The National Academies. 2010. *Assessment of Intraseasonal to Interannual Climate Prediction and Predictability*. Committee on Assessment of Intraseasonal to Interannual Climate Prediction and Predictability - National Research Council. Washington DC. 193 pp.
- USDA-NRCS. 2004. National Handbook. Part 630 Hydrology: Hydrologic soil cover complexes. USDA. Washington. Estados Unidos. 9-14 Pág.[En línea] Disponible para la World Wide Web en: <http://policy.nrcs.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=17758.wba>

- Williams, J.R. 1992. WXPARM: Weather parameter calculator for EPIC. User Manual. U.S. Department of Agriculture. Grassland Soil and Water Research Laboratory, Texas. 6 pp.
- Wreford A., Moran D. and Adger N. 2010. Climate Change and Agriculture. Impacts, adaptation and mitigation. Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). 139 pp.
- Xiong Z. & Khalil M. A. K. 2009. Greenhouse Gases from Crop Fields. Chapter 6:113-132. En: Singh (ed.). Climate Change and Crops, Environmental Science and Engineering. S.N.
- Yates, D., J. Sieber, D. Purkey, and A. Huber Lee, and H. Galbraith. 2005a. WEAP21: A demand, priority, and preference driven water planning model: Part 2, Aiding freshwater ecosystem service evaluation. *Water International*. 30(4):487-500.
- Yates, D., J. Sieber, D. Purkey, and A. Huber Lee. 2005b. WEAP21: A demand, priority, and preference driven water planning model: Part 1, model characteristics. *Water International*. 30(4):501-512.
- Yates, D., D. Purkey, J. Sieber, A. Huber-Lee , H. Galbraith, J. West, and S. Herrod-Julius. 2006. A physically-based, water resource planning model of the Sacramento Basin, California USA. ASCE J. of Water Res. Management.
- Ziervogel, G., Cartwright, A., Tas, A., Adejuwon, J., Zermoglio, F., Shale, M., & Smith, B. (2008). *Climate change and adaptation in African agriculture*. Prepared for Rockefeller Foundation By Stockholm Environment Institute.