



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN
CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO
PROGRAMA EN HIDROCIENCIAS**

**IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS
DISTRITOS DE RIEGO DE SINALOA**

HILARIO FLORES GALLARDO

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

MAESTRO EN CIENCIAS

**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO
OCTUBRE DE 2010**

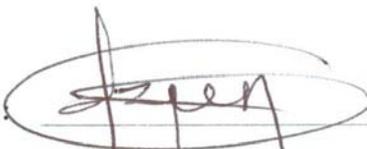
La presente tesis titulada: **Impacto del cambio climático en los distritos de riego de Sinaloa**, fue realizada por el alumno: **Hilario Flores Gallardo** bajo la dirección del consejo particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



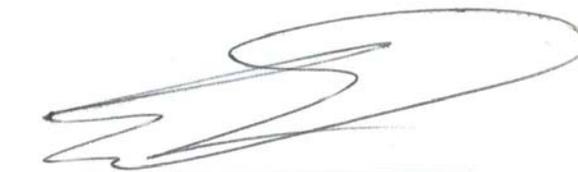
Dr. Héctor Flores Magdaleno

DIRECTOR:



Dr. Waldo Ojeda Bustamante

ASESOR:



Dr. Enrique Mejía Sáenz

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS DISTRITOS DE RIEGO DE SINALOA

Hilario Flores-Gallardo, MC.

Colegio de Postgraduados, 2010

El desarrollo de los cultivos depende principalmente de las condiciones ambientales que se presentan durante el ciclo fenológico de los cultivos y de las prácticas de manejo que se utilicen. Debido a lo anterior, la agricultura es el sector productivo más susceptible a la variabilidad climática y por lo tanto, al cambio climático. El cambio climático es atribuido a las actividades antropogénicas y durante los últimos años ha sido aceptado como un fenómeno real que representa una gran amenaza para la producción de alimentos. En el presente estudio se utilizó el modelo AquaCrop para simular el desarrollo y el rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays L.*) bajo condiciones climáticas actuales y bajo los escenarios de cambio climático A1B y A2. El modelo AquaCrop fue validado para la región del norte de Sinaloa utilizando un grupo de parámetros conservativos, los cuales son considerados como aplicables para un amplio rango de condiciones y que no dependen de la variedad utilizada. También fue utilizada información de estudios previos sobre experimentos de maíz, tal como: densidad de siembra, fecha de siembra, grados día (°D) a madurez, rendimiento obtenido, tipo de suelo y láminas de riego aplicado, lo anterior sirvió para validar el desempeño del modelo en la región de estudio y aplicarlo posteriormente a las demás regiones de Sinaloa. Una vez validado el modelo, éste fue utilizado para simular el desarrollo y el rendimiento del maíz bajo condiciones de cambio climático y poder analizar su efecto en la duración del ciclo fenológico y en el rendimiento del cultivo. Por lo tanto, se buscaron alternativas para disminuir el impacto del cambio climático tales como: variación en las fechas de siembra, un ajuste en los calendarios de riego, uso de variedades más resistentes al estrés térmico y uso de variedades de diferente duración en su ciclo fenológico.

Palabras clave: Adaptación, rendimiento, modelación de cultivos, variabilidad climática.

CLIMATE CHANGE IMPACT ON IRRIGATION DISTRICTS OF SINALOA

Hilario Flores-Gallardo, MC.

Colegio de Postgraduados, 2010

The crop season depends mainly on the environmental conditions during the crop growth and management practices implemented. Due to the above mentioned, the agriculture is the most susceptible productive sector to the climatic variability and therefore, to the climate change. The climate change is attributed to anthropogenic activities and over the last years has been accepted as a real phenomenon that represents a great threat for agricultural production. In the present study the AquaCrop model was used to simulate the development and the yield of the corn (*Zea mays L.*) under actual climatic conditions and future scenarios of climate change A1B and A2. The AquaCrop model was validated for the northern region of state of Sinaloa using a group of preservative parameters, which are considered as applicable for a wide range of conditions and don't depend of the crop used. Information of previous corn experimental studies was also used such as: sow density, sow date, degree day (°D) to maturity, obtained yield, soil type and amount of applied irrigations; these data were used to validate the performance of the model in the study region and later applied to other regions of Sinaloa. Once validated the model, it was used to simulate the development and the yield of the corn under scenarios of climate change to analyze their effect in the duration of the phenological cycle and on the crop yield. Therefore, alternatives were analyzed for diminish the impact of climate change such as: variation in the sowing dates, an adjustment in the irrigation scheduling, use of more resistant varieties to the thermal stress and use of varieties of different duration in their phenological cycle.

Key words: Adaptation, climatic variability, crop model, yield.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y el Colegio de Postgraduados (COLPOS) por financiar este ciclo importante de mi formación académica así como pulir mis conocimientos en este ramo de la ciencia e investigación agrícola.

A los integrantes de mi consejo particular por el apoyo, confianza, enseñanza y facilidad depositada en mi persona para llevar a cabo este proyecto de investigación: Dr. Waldo Ojeda Bustamante, Dr. Héctor Flores Magdaleno y Dr. Enrique Mejía Sáenz. También al Programa en Hidrociencias ubicado en el campus Montecillo del Colegio de Postgraduados, por apoyarme para realizar diversos trabajos y publicaciones científicas así como la elaboración de la presente tesis.

Al Dr. Waldo Ojeda Bustamante, por brindarme esa confianza incondicional desde el verano de 2006 y la cual se ha transformado en un camino lleno de apoyo y enseñanza continúa. *“Seguiremos adelante en este largo y sinuoso camino de la investigación, gracias Dr.”*

Mi más sincero agradecimiento al Dr. Héctor Flores Magdaleno, por su valiosa ayuda y orientación en todo momento durante el transcurso de mis estudios de maestría y además, por brindarme su amistad y tiempo. *“Se convirtió en el hermano mayor que nunca tuve”*.

Al Dr. Enrique Mejía Sáenz, por brindarme ese valioso apoyo sin prácticamente conocerme, por sus acertados comentarios y orientación durante mi transcurso en los estudios de maestría en el Colegio de Postgraduados así como en las observaciones realizadas a la presente tesis. *“Gracias Dr., por mostrarme que se puede realizar investigación en nuestro país bajo una constante lucha”*.

*A todos ellos
Sinceramente ¡Muchas Gracias!*

DEDICATORIAS

Esta tesis va dedicada a toda mi familia

“Por ser el centro de mi universo”

A mi Esposa

Fabiola Zavala Estrada

Y a nuestro Hijo

Fernando Enrique

“Los amo y adoro”

A mi Madre

Reyna Elena Gallardo Camacho

Y a mi Padre

Hilario Flores Murguía

“Muchas Gracias por su bendito e infinito amor, por sus valiosos apoyos para poder llegar al término de un ciclo más en mi preparación, por sus grandes esfuerzos y sacrificios a pesar de la distancia”

A mis Hermanos: *Paola Flores Gallardo* y *Pedro Enrique Flores Gallardo*

“Deseo expresarles, que mis esfuerzos y logros han sido suyos también”

De nueva cuenta expreso mis más sinceros y profundos agradecimientos a toda mi familia, por seguirme dando la fuerza necesaria para salir adelante en las buenas y en las malas. A la familia Zavala Estrada, por abrirme las puertas de su casa e incluirme en el núcleo de esa bonita familia.

“Espero no defraudarlos nunca y recuerden siempre que los adoro”

En recuerdo amoroso a mis abuelas:

Cipriana Gallardo Flores y Trinidad Murguía Sandoval

“Que son unas diosas, las cuales han sido y serán mi fuerza, inspiración y motivación para realizar todo lo que he logrado hasta el día de hoy y todo lo que me queda por hacer”

A la memoria de *Gilberto Flores Murguía*.

Y también a la memoria de *Howard Markusen*. *“Quien brindo su amistad sin pedir nada a cambio”*

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
PÁGINA DE FIRMAS.....	i
RESUMEN.....	ii
ABSTRACT.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
DEDICATORIAS.....	v
ÍNDICE GENERAL.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE CUADROS.....	xiv
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
OBJETIVOS.....	4
Objetivo general.....	4
Objetivos particulares.....	4
HIPÓTESIS.....	6
LITERATURA CITADA.....	7
CAPÍTULO I. <i>Descripción agroclimática del estado de Sinaloa</i>	9
RESUMEN.....	10
ABSTRACT.....	11
1.1. INTRODUCCIÓN.....	12
1.1.1. <i>Localización geográfica</i>	12
1.1.2. <i>Recursos naturales e importancia económica</i>	14
1.1.3. <i>Principales cultivos</i>	21
1.2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	22
1.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	24
1.3.1. <i>Evaluación del rendimiento promedio y la superficie sembrada de maíz en los distritos de riego de Sinaloa</i>	24
1.3.2. <i>Descripción de variables climáticas para tres zonas de Sinaloa</i>	34

	1.4. CONCLUSIONES.....	38
	1.4.1. Agradecimientos.....	38
	1.5. LITERATURA CITADA.....	39
CAPÍTULO II.	<i>Proyecciones de cambio climático en el estado de Sinaloa.....</i>	40
	RESUMEN.....	41
	ABSTRACT.....	42
	2.1. INTRODUCCIÓN.....	43
	2.1.1. Descripción breve del efecto invernadero.....	45
	2.1.2. Descripción de los escenarios de cambio climático.....	45
	2.2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	47
	2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	52
	2.3.1. Período base de precipitación y temperaturas en Sinaloa.....	52
	2.3.2. Escenario A1B para la precipitación de Sinaloa.....	54
	2.3.3. Escenario A1B para la temperatura máxima de Sinaloa.....	55
	2.3.4. Escenario A1B para la temperatura media de Sinaloa..	56
	2.3.5. Escenario A1B para la temperatura mínima de Sinaloa.....	57
	2.3.6. Escenario A2 para la precipitación de Sinaloa.....	58
	2.3.7. Escenario A2 para la temperatura máxima de Sinaloa.	59
	2.3.8. Escenarios A2 para la temperatura media de Sinaloa...	60
	2.3.9. Escenarios A2 para la temperatura mínima de Sinaloa	61
	2.4. CONCLUSIONES.....	62
	2.5. LITERATURA CITADA.....	63
CAPÍTULO III.	<i>Validación del modelo AquaCrop.....</i>	65
	RESUMEN.....	66
	ABSTRACT.....	67
	3.1. INTRODUCCIÓN.....	68
	3.2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	70
	3.2.1. Descripción general del modelo.....	70

3.2.2. <i>Descripción de la zona y parcelas de validación.....</i>	73
3.2.3. <i>Descripción de los parámetros conservativos del modelo AquaCrop.....</i>	74
3.2.4. <i>Análisis de datos y tratamientos simulados.....</i>	76
3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	77
3.3.1. <i>Rendimientos simulados para maíz y desarrollo del dosel vegetal.....</i>	78
3.3.2. <i>Requerimiento hídrico con respecto a la fecha de siembra.....</i>	80
3.3.3. <i>Duración del ciclo del cultivo simulado.....</i>	80
3.4. CONCLUSIONES.....	82
3.5. LITERATURA CITADA.....	83
CAPÍTULO IV. <i>Estimación del impacto del cambio climático en el cultivo de maíz en el estado de Sinaloa.....</i>	85
RESUMEN.....	86
ABSTRACT.....	87
4.1. INTRODUCCIÓN.....	88
4.2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	90
4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	91
4.3.1. <i>Evapotranspiración de referencia (ETo) promedio bajo cambio climático.....</i>	91
4.3.2. <i>Respuesta del cultivo de maíz para el escenario A1B...</i>	93
4.3.3. <i>Respuesta del cultivo de maíz para el escenario A2.....</i>	95
4.4. CONCLUSIONES.....	97
4.5. LITERATURA CITADA.....	98
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES.....	100
APÉNDICE I.....	101
APÉNDICE II.....	184

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Representación esquemática del efecto invernadero (PNUMA/WMO, 1996).....	2
Figura 1.1. Localización del estado de Sinaloa en la república mexicana (ESRI, 1999).....	12
Figura 1.2. Municipios que constituyen el estado de Sinaloa.....	13
Figura 1.3. Superficie establecida por agricultura de riego y temporal en Sinaloa.	14
Figura 1.4. Pendiente predominante en Sinaloa.....	15
Figura 1.5. Cuencas hidrográficas ubicadas en el estado de Sinaloa.....	16
Figura 1.6. Uso de suelo en Sinaloa.....	18
Figura 1.7. Textura de suelo predominante en Sinaloa.....	19
Figura 1.8. Precipitación anual promedio en Sinaloa para el período de 1950 al 2000.....	20
Figura 1.9. Temperatura media anual promedio en Sinaloa para el período de 1950 al 2000.....	20
Figura 1.10. Ubicación de los distritos de riego del estado de Sinaloa.....	22
Figura 1.11. Mapa de estaciones climatológicas del ERIC III.....	23
Figura 1.12. Rendimiento promedio y superficie sembrada del cultivo de maíz en el DR-010 para el ciclo OI.....	25
Figura 1.13. Rendimiento promedio y superficie sembrada del cultivo de maíz en el DR-063 para el ciclo OI.....	25
Figura 1.14. Rendimiento promedio y superficie sembrada del cultivo de maíz en el DR-074 para el ciclo OI.....	26
Figura 1.15. Rendimiento promedio y superficie sembrada del cultivo de maíz en el DR-075 para el ciclo OI.....	26
Figura 1.16. Rendimiento promedio y superficie sembrada del cultivo de maíz en el DR-076 para el ciclo OI.....	27

Figura 1.17.	Rendimiento promedio y superficie sembrada del cultivo de maíz en el DR-108 para el ciclo OI.....	27
Figura 1.18.	Rendimiento promedio y superficie sembrada del cultivo de maíz en el DR-109 para el ciclo OI.....	28
Figura 1.19.	Rendimiento promedio y superficie sembrada del cultivo de maíz en el DR-111 para el ciclo OI.....	28
Figura 1.20.	Rendimiento promedio y superficie sembrada del cultivo de maíz en el DR-010 para el ciclo PV.....	29
Figura 1.21.	Rendimiento promedio y superficie sembrada del cultivo de maíz en el DR-063 para el ciclo PV.....	30
Figura 1.22.	Rendimiento promedio y superficie sembrada del cultivo de maíz en el DR-074 para el ciclo PV.....	30
Figura 1.23.	Rendimiento promedio y superficie sembrada del cultivo de maíz en el DR-075 para el ciclo PV.....	31
Figura 1.24.	Rendimiento promedio y superficie sembrada del cultivo de maíz en el DR-076 para el ciclo PV.....	31
Figura 1.25.	Rendimiento promedio y superficie sembrada del cultivo de maíz en el DR-108 para el ciclo PV.....	32
Figura 1.26.	Rendimiento promedio y superficie sembrada del cultivo de maíz en el DR-109 para el ciclo PV.....	32
Figura 1.27.	Rendimiento promedio y superficie sembrada del cultivo de maíz en el DR-111 para el ciclo PV.....	33
Figura 1.28.	Temperatura máxima, media y mínima anual promedio para la zona norte de Sinaloa.....	34
Figura 1.29.	Precipitación anual acumulada para la zona norte de Sinaloa.....	35
Figura 1.30.	Temperatura máxima, media y mínima anual promedio para la zona centro de Sinaloa.....	35
Figura 1.31.	Precipitación anual acumulada para la zona centro de Sinaloa.....	36
Figura 1.32.	Temperatura máxima, media y mínima anual promedio para la zona sur de Sinaloa.....	36
Figura 1.33.	Precipitación anual acumulada para la zona sur de Sinaloa.....	37

Figura 2.1.	Variación observada a nivel mundial del promedio de la temperatura en superficie (IPCC, 2007).....	44
Figura 2.2.	Malla con datos climatológicos y anomalías a una resolución de 0.5° x 0.5° de latitud y longitud en Sinaloa.....	49
Figura 2.3.	Precipitación anual promedio del período base (1950-2000).....	52
Figura 2.4.	Temperatura máxima, media y mínima anual promedio del período base comprendido de 1950-2000.....	53
Figura 2.5.	Proyección de cambio climático para la precipitación anual promedio del escenario A1B para los períodos de 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2098.....	54
Figura 2.6.	Proyección de cambio climático para la temperatura máxima anual promedio del escenario A1B para los períodos de 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2098.....	55
Figura 2.7.	Proyección de cambio climático para la temperatura media anual promedio del escenario A1B para los períodos de 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2098.....	56
Figura 2.8.	Proyección de cambio climático para la temperatura mínima anual promedio del escenario A1B para los períodos de 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2098.....	57
Figura 2.9.	Proyección de cambio climático para la precipitación anual promedio del escenario A2 para los períodos de 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2098.....	58
Figura 2.10.	Proyección de cambio climático para la temperatura máxima anual promedio del escenario A2 para los períodos de 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2098.....	59
Figura 2.11.	Proyección de cambio climático para la temperatura media anual promedio del escenario A2 para los períodos de 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2098.....	60
Figura 2.12.	Proyección de cambio climático para la temperatura mínima anual promedio del escenario A2 para los períodos de 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2098.....	61

Figura 3.1.	Operación y lógica en la simulación utilizada por el modelo AquaCrop en donde se involucran dos procesos: separación de la evaporación del suelo (ES) y la transpiración (Tr), y el rendimiento (Y) de la biomasa (B) e índice de cosecha (H_i). En donde WP es la productividad del agua y K_y es un factor de proporción entre el rendimiento perdido y la reducción en evapotranspiración (adaptada de Raes <i>et al.</i>, 2009).....	70
Figura 3.2.	Rendimientos simulados para maíz en los dos ciclos agrícolas típicos (OI y PV).....	78
Figura 3.3.	Simulación del dosel vegetal (CC) para una misma fecha de siembra en el ciclo agrícola OI bajo las tres condiciones de disponibilidad de agua.....	79
Figura 3.4.	Simulación del dosel vegetal (CC) para una misma fecha de siembra en el ciclo agrícola PV bajo las tres condiciones de disponibilidad de agua.....	79
Figura 3.5.	Duración del ciclo del cultivo simulado por el modelo AquaCrop con respecto a la disponibilidad de agua y fechas de siembra en los ciclos agrícolas OI y PV.....	81
Figura 4.1.	Pantalla del software “CROPWAT 8.0” para realizar el cálculo de la ET_o.....	91
Figura 4.2.	Evapotranspiración de referencia (ET_o) promedio para el escenario A1B.....	92
Figura 4.3.	Evapotranspiración de referencia (ET_o) promedio para el escenario A2.....	92
Figura 4.4.	Obtención del rendimiento promedio bajo cambio climático para el escenario A1B.....	93
Figura 4.5.	Obtención de la biomasa promedio bajo cambio climático para el escenario A1B.....	94
Figura 4.6.	Obtención de la duración del ciclo promedio bajo cambio climático para el escenario A1B.....	94

Figura 4.7. Obtención del rendimiento promedio bajo cambio climático para el escenario A2.....	95
Figura 4.8. Obtención de la biomasa promedio bajo cambio climático para el escenario A2.....	96
Figura 4.9. Obtención de la duración del ciclo promedio bajo cambio climático para el escenario A2.....	96

ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1.1. Datos generales de los municipios del estado de Sinaloa (INEGI, 2005).....	13
Cuadro 1.2. Ríos y presas de Sinaloa (CONAGUA, 2008).....	17
Cuadro 1.3. Principales cultivos establecidos en Sinaloa (SIAP, 2010).....	21
Cuadro 1.4. Porcentaje de siniestralidad en maíz por cada distrito de riego en Sinaloa.....	33
Cuadro 2.1. Relación de MCG disponibles por el IPCC.....	47
Cuadro 3.1. Láminas de riego aplicadas en el experimento de Ojeda-Bustamante <i>et al.</i> (2006).....	73
Cuadro 3.2. Datos de campo correspondientes a suelo y cultivo para los diferentes ciclos agrícolas OI y PV de validación.....	74
Cuadro 3.3. Parámetros conservativos del modelo AquaCrop basados en resultados de Hsiao <i>et al.</i> (2009).....	75
Cuadro 3.4. Datos obtenidos en el experimento vs. validación del modelo AquaCrop.....	77
Cuadro 3.5. Resultados en parcelas comerciales de validación.....	78
Cuadro 3.6. Requerimientos hídricos de maíz para los ciclos OI y PV de acuerdo a las diferentes condiciones de disponibilidad de agua y fecha de siembra.....	80
Cuadro 4.1. Coordenadas geográficas para cada punto representativo de los distritos de riego.....	90

INTRODUCCIÓN GENERAL

El planeta Tierra es un sistema dinámico en donde los cambios ambientales han sido parte de su evolución (Zachos *et al.*, 2001). Desde tiempos remotos y para ser más precisos, en los últimos diez mil años, la Tierra ha sufrido cambios de clima durante sus diferentes períodos pero la mayoría de los investigadores ambientalistas así como el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), coinciden en que el mundo se ha calentado más de lo normal durante el siglo XX y principalmente durante las dos últimas décadas de éste, con aumentos en la temperatura global de $0.6 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$, tendiendo a continuar e incluso, aumentar aceleradamente en los próximos años (Hansen *et al.*, 2002; IPCC, 2001; Kerr, 2002). De acuerdo con Vitousek (1992), se pueden identificar dos tipos principales de cambios globales: a) los que alteran el equilibrio de las cubiertas de la Tierra (atmósfera y océanos) experimentándose globalmente y b) los que ocurren en sitios discretos pero, que se expanden hasta constituir un cambio global. Los pronósticos de cambio climático indican un incremento global consistente, con una variabilidad espacial y temporal regional tanto de la temperatura como en la concentración de bióxido de carbono (CO_2) a partir de 1990 hasta el 2100. Se espera que la precipitación aumente a nivel mundial pero se pronostica una disminución de esta variable en la mayor parte de México, lo cual obedece a que en el territorio mexicano existe una gran diversidad de climas posicionando a México en una situación de alta vulnerabilidad a los efectos del cambio climático (Martínez-Austria, 2007).

También se han reportado evidencias de que el noroeste del territorio mexicano se encuentra en un proceso de transición hacia un clima más árido debido a una reducción de la precipitación y un incremento en la evaporación observada (Seager *et al.*, 2007). El efecto invernadero (capaz de producir el calentamiento global) es ocasionado por la presencia de gases en la atmósfera que retienen la radiación de onda larga que emite la Tierra al disipar el calor recibido por el Sol (SEMARNAP, 1997). Lo anterior se puede describir de la siguiente manera: una parte total de la radiación que llega a la Tierra ($\sim 343 \text{ W/m}^2$) es inmediatamente reflejada al espacio exterior ($\sim 103 \text{ W/m}^2$) y la otra parte es absorbida por la Tierra ($\sim 240 \text{ W/m}^2$) que se calienta y reemite algo de esta energía en forma de radiación infrarroja (**Figura 1**). Pero antes de alcanzar el espacio exterior, una porción de esta radiación es capturada por algunos gases en la atmósfera, cuyas capas bajas (tropósfera) se calientan mediante este proceso y en consecuencia aumenta la temperatura del planeta. Los gases de efecto invernadero (GEI) más importantes que retienen el calor en la atmósfera son los siguientes: bióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) y clorofluorocarburos (CFC).

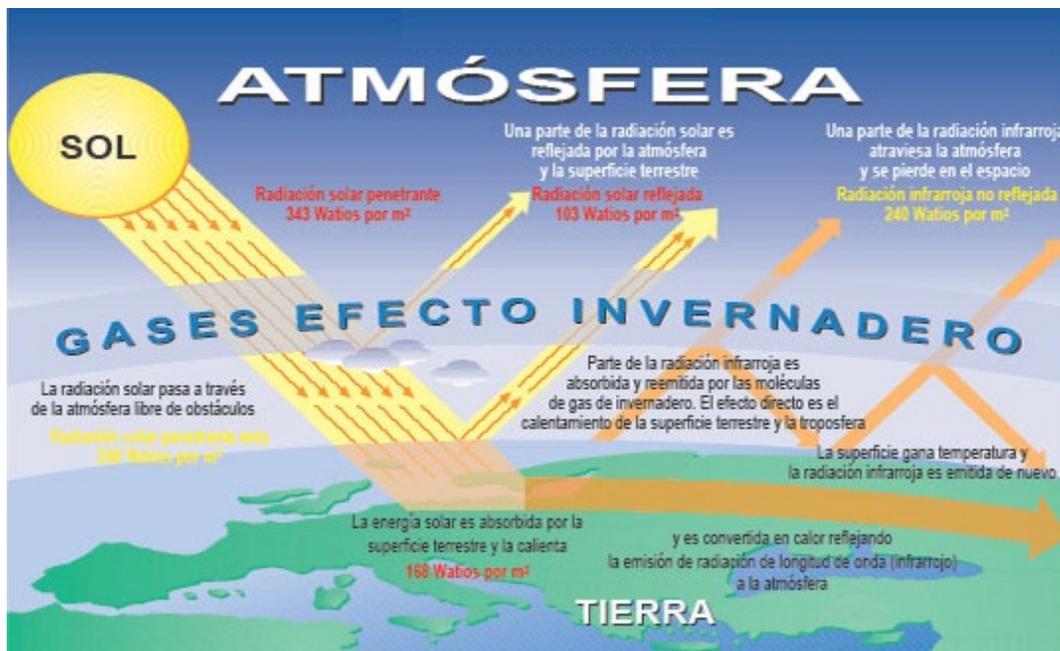


Figura 1. Representación esquemática del efecto invernadero (PNUMA/WMO, 1996).

La agricultura es un sector muy vulnerable a las variaciones climáticas, lo cual se debe a que los diferentes procesos involucrados en el crecimiento de las plantas dependen de variables como la radiación solar, la precipitación, la temperatura, y otras más. Por lo tanto, el calentamiento global de la atmósfera puede modificar los ciclos de estas variables con efectos potenciales a mediano y largo plazo en la agricultura como consecuencia de cambios en la productividad de los cultivos, en las prácticas agronómicas así como en la oferta y demanda de los recursos hídricos de estas zonas productivas. Adams *et al.*, (1998) señalan que la magnitud y dirección de estos efectos resultantes del cambio climático es compleja e incierta, además, Ojeda-Bustamante *et al.*, (2008) mencionan que la agricultura será afectada por estos impactos en los patrones climáticos, ya que es una actividad productiva ligada a los ciclos naturales de las variables ambientales y que un incremento en la temperatura incrementará consecuentemente la tasa de desarrollo de los cultivos y la evapotranspiración.

Las grandes zonas agrícolas bajo riego se encuentran en las regiones áridas y semiáridas del país, las cuales son de alta vulnerabilidad climática a eventos climatológicos como sequías, tormentas torrenciales, huracanes e inundaciones (Flores-Gallardo *et al.*, 2006) y actualmente, varias zonas productivas del país han experimentado con mayor recurrencia y severidad la presencia de eventos climatológicos extremos, los cuales han puesto a prueba la sustentabilidad de estas. Las sequías inducen a restringir las dotaciones normales de volumen de agua para riego y en consecuencia, disminuye la superficie cultivable de estas zonas. Por lo tanto, la duración e intensidad de una sequía y por ende, la disminución de la precipitación en zonas agrícolas de temporal causa una sustancial reducción de los rendimientos y genera un aumento del riesgo por variabilidad climática en los pequeños productores agrícolas principalmente (Conde *et al.*, 2006).

OBJETIVOS

Objetivo general

Analizar el impacto del cambio climático en el cultivo de maíz (*Zea mays L.*) en los distritos de riego del estado de Sinaloa bajo los escenarios A1B y A2 de cambio climático utilizando el modelo AquaCrop.

Objetivos particulares

- Caracterizar la zona de estudio (estado de Sinaloa) mediante su localización geográfica, actividades socioeconómicas, recursos naturales, descripción territorial y poblacional.
- Conformación de una base de datos climatológicos históricos y futuros, así como de cultivos establecidos, superficie sembrada, superficie cosechada y rendimiento.
- Generación de mapas base (clima histórico comprendido del período de 1950-2000) sobre temperatura máxima, media, mínima y precipitación.
- Generación de mapas con proyecciones de cambio climático para los escenarios A1B y A2 sobre promedios anuales de temperatura máxima, media, mínima y precipitación para los períodos de 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2098.

- Validación del modelo AquaCrop mediante simulaciones en parcelas típicas de maíz ubicadas en el distrito de riego 075 “Río Fuerte” para los ciclos agrícolas otoño-invierno “OI” y primavera-verano “PV”.
- Obtención de la respuesta y adaptabilidad del cultivo de maíz para los escenarios futuros considerados de cambio climático mediante el modelo AquaCrop.

HIPÓTESIS

El uso de modelos de crecimiento de cultivos como el modelo AquaCrop junto con información fiable de climatología futura con anomalías de cambio climático, permiten evaluar los impactos esperados del cambio climático en el cultivo de maíz (*Zea mays L.*) y, facilitar el desarrollo integral de estrategias de adaptación y mitigación.

LITERATURA CITADA

- Adams, R. M., Hurd, B. H., Lenhart, S. and Leary, N. 1998.** *Effects of global climate change on agriculture: an interpretative review.* Clim. Res. 11:19-30.
- Conde, C., Ferrer, R. and Orozco, S. 2006.** *Climate change and climate variability impacts on rainfed agricultural activities and possible adaptation measures "A Mexican case study".* *Atmósfera.* 19(3):181-194.
- Flores-Gallardo, H., Ojeda-Bustamante, W. y Sifuentes-Ibarra, E. 2006.** *Estudio retrospectivo de la sequía en el norte de Sinaloa.* multi-CIENCIA. 1(3):15-20.
- Hansen, J., Ruedy, R. and Lo, M. S. K. 2002.** *Global warming continues.* Science. 295(5553): 275.
- IPCC. 2001.** *Tercer informe de evaluación "La base científica".* Grupo I del Tercer Grupo Intergubernamental para el Cambio Climático. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.
- Kerr, R. A. 2002.** *Reducing uncertainties of global warming.* Science. 295:29-30.
- Martínez-Austria, P. F. 2007.** *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México.* Instituto Mexicano de Tecnología del agua. Jiutepec, Morelos, México. 75 pp.
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., Iñiguez-Covarrubias, M. y Hernández-Barrios, L. 2008.** *Impacto del cambio climático en las demandas hídricas del maíz en el DR-075.* In: memorias del XX congreso nacional de hidráulica. Área: impacto del cambio climático en los recursos hídricos. Celebrado del 15 al 18 de octubre de 2008. Toluca, Estado de México, México.
- PNUMA/WMO. 1996.** *La ciencia del cambio climático: contribución del Grupo I.* Segundo reporte de evaluación (SAR) del IPCC. Programa de la Naciones Unidas para el Medio Ambiente y Organización Meteorológica Mundial.
- Seager, R., Ting, M., Held, I., Kushnir, Y., Lu, J., Vecchi, G., Huang, H., Harnik, N., Leetmaa, A., Lau, N., Li, C., Velez, J. and Naik, N. 2007.** *Model projections of an imminent transition to a more arid climate in southwestern North America.* Science. 316: 1181-1184.

SEMARNAP. 1997. *Primera comunicación nacional ante la convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático.* Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. México. 149 pp.

Vitousek, P. M. 1992. *Global environmental change: an introduction.* Annu. Rev. Ecol. Syst. 23:1-14.

Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E. and Billups, K. 2001. *Trends, rhythms and aberrations in global climate 65 ma to present.* Science. 292:686-690.

CAPÍTULO I

Descripción agroclimática del estado de Sinaloa

RESUMEN

En México no hay una cultura de sistematización y difusión de la información. Sin embargo, esta claro que hay instituciones realizando un gran esfuerzo para cambiar este esquema y permitir que la información se divulgue en la sociedad a través de diversos medios como la red de Internet, facilitando de esta forma el flujo de información para consultas en software o diversos estudios e informes publicados. En el presente capítulo se muestra información referente al estado de Sinaloa, la cual contiene datos desde población, agricultura, mercados agrícolas, distritos de riego, consumo de agua, clima hasta mínimas características territoriales de interés.

Palabras clave: Agricultura, agua, datos, producción.

ABSTRACT

In Mexico there is not a culture of systematization and diffusion of the information. However, this very undoubtedly are institutions carrying out a great effort to change this outline and to allow that the information is disclosed in the society through diverse means like the net of Internet, facilitating this way the flow of information for consultations in software or diverse studies and published reports. In the present chapter show information with respect to the state of Sinaloa, this contains data from population, agriculture, agricultural markets, irrigation districts, climate until minimum characteristic territorial of interest.

Key words: Agriculture, data, production, water.

1.1. INTRODUCCIÓN

1.1.1. Localización geográfica

El estado de Sinaloa se localiza en el noroeste de la república mexicana y tiene una forma de franja alargada, adyacente por el poniente del Golfo de California (también conocido como el mar de Cortez) en la parte centro y norte, y al Océano Pacífico en la parte sur. Limita al norte con el estado de Sonora, al sur con Nayarit y al este u oriente con Chihuahua y Durango (separados por la Sierra Madre Occidental). La orientación general del estado con respecto a la zona costera es de noroeste a sureste (**Figura 1.1**).



Figura 1.1. Localización del estado de Sinaloa en la república mexicana (ESRI, 1999).

El estado de Sinaloa se localiza entre unas coordenadas geográficas de una longitud W de -105.3° a -109.5° y una latitud N de 22.4° a 27.1° . Además, el estado de Sinaloa ocupa una superficie equivalente al 2.9% del territorio nacional con una extensión de $58,091.95 \text{ km}^2$ y está constituido por 18 municipios como se puede observar en la **Figura 1.2**, los cuales comprenden a una población de 2,608,442 habitantes y la cual equivale al 2.5% de la población total del país (**Cuadro 1.1**).

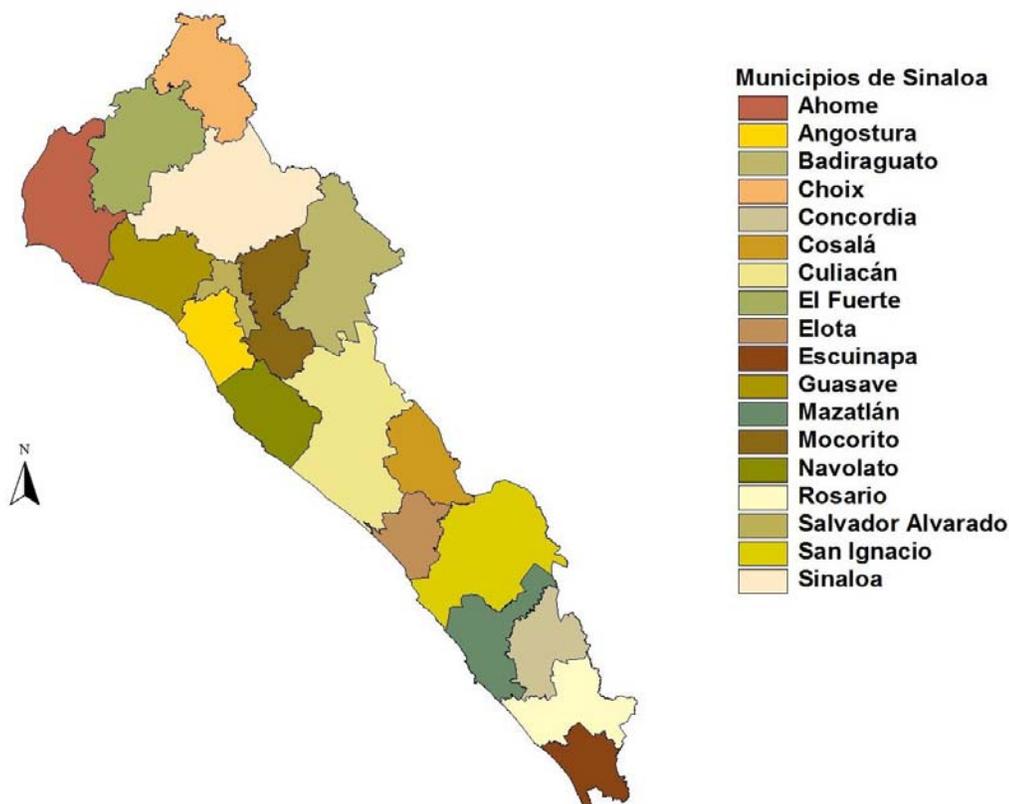


Figura 1.2. Municipios que constituyen al estado de Sinaloa.

Cuadro 1.1. Datos generales de los municipios del estado de Sinaloa (INEGI, 2005).

Clave	Municipio	Cabecera municipal	Superficie	Población	Creación
001	Ahome	Los Mochis	4,342.89	388,344	1917
002	Angostura	Angostura	1,447.63	42,445	1916
003	Badiraguato	Badiraguato	5,864.75	32,295	1915
004	Concordia	Concordia	1,524.34	27,001	1915
005	Cosalá	Cosalá	2,665.12	17,813	1915
006	Culiacán	Culiacán de Rosales	4,758.90	793,730	1915
007	Choix	Choix	4,512.40	31,763	1916
008	Elota	La Cruz de Elota	1,518.15	46,462	1917
009	Escuinapa	Escuinapa de Hidalgo	1,633.22	49,655	1915
010	El Fuerte	El Fuerte	3,843.02	92,585	1915
011	Guasave	Guasave	3,464.41	270,260	1916
012	Mazatlán	Mazatlán	3,068.48	403,888	1915
013	Mocorito	Mocorito	2,405.49	44,217	1915
014	Rosario	El Rosario	2,723.28	47,394	1915
015	Salvador Alvarado	Guamúchil	1,197.50	76,537	1962
016	San Ignacio	San Ignacio	4,650.97	23,355	1915
017	Sinaloa	Sinaloa de Leyva	6,186.40	85,017	1915
018	Navolato	Navolato	2,285.00	135,681	1982
TOTAL			58,091.95	2,608,442	

1.1.2. Recursos naturales e importancia económica

Se puede decir que Sinaloa es el estado agrícola de México porque cuenta con una gran superficie conformada por valles agrícolas, los cuales en su mayoría se cultivan bajo riego a excepto de ciertas zonas pequeñas con problemas de salinidad; mientras que las zonas agrícolas de temporal se ubican en las partes altas de la sierra (**Figura 1.3**). Debido a lo anterior, gran superficie está por debajo de los 16 m sobre el nivel del mar (**Figura 1.4**) y por lo tanto, ésta es sólo una de varias características que definen los recursos naturales para los sectores agrícola, industrial y de población (Ojeda-Bustamante, 2010). A continuación se destacan los recursos de mayor importancia para los sectores mencionados anteriormente: zonas agrícolas (agricultura de riego y temporal), cuencas hidrográficas, pendiente, textura de suelo, uso de suelo, pastizales, ríos y vegetación (INEGI, 2005).

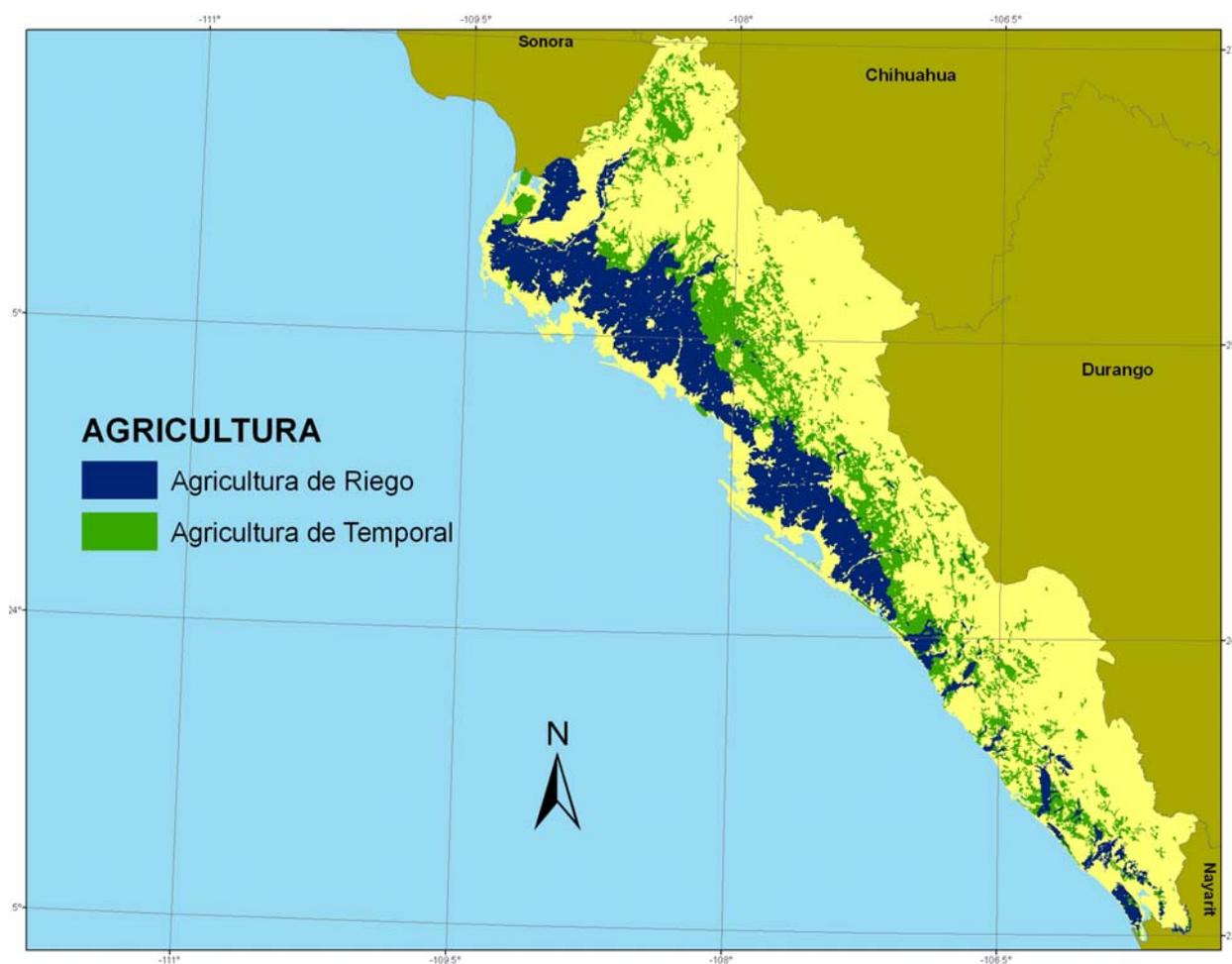


Figura 1.3. Superficie establecida por agricultura de riego y temporal en Sinaloa.

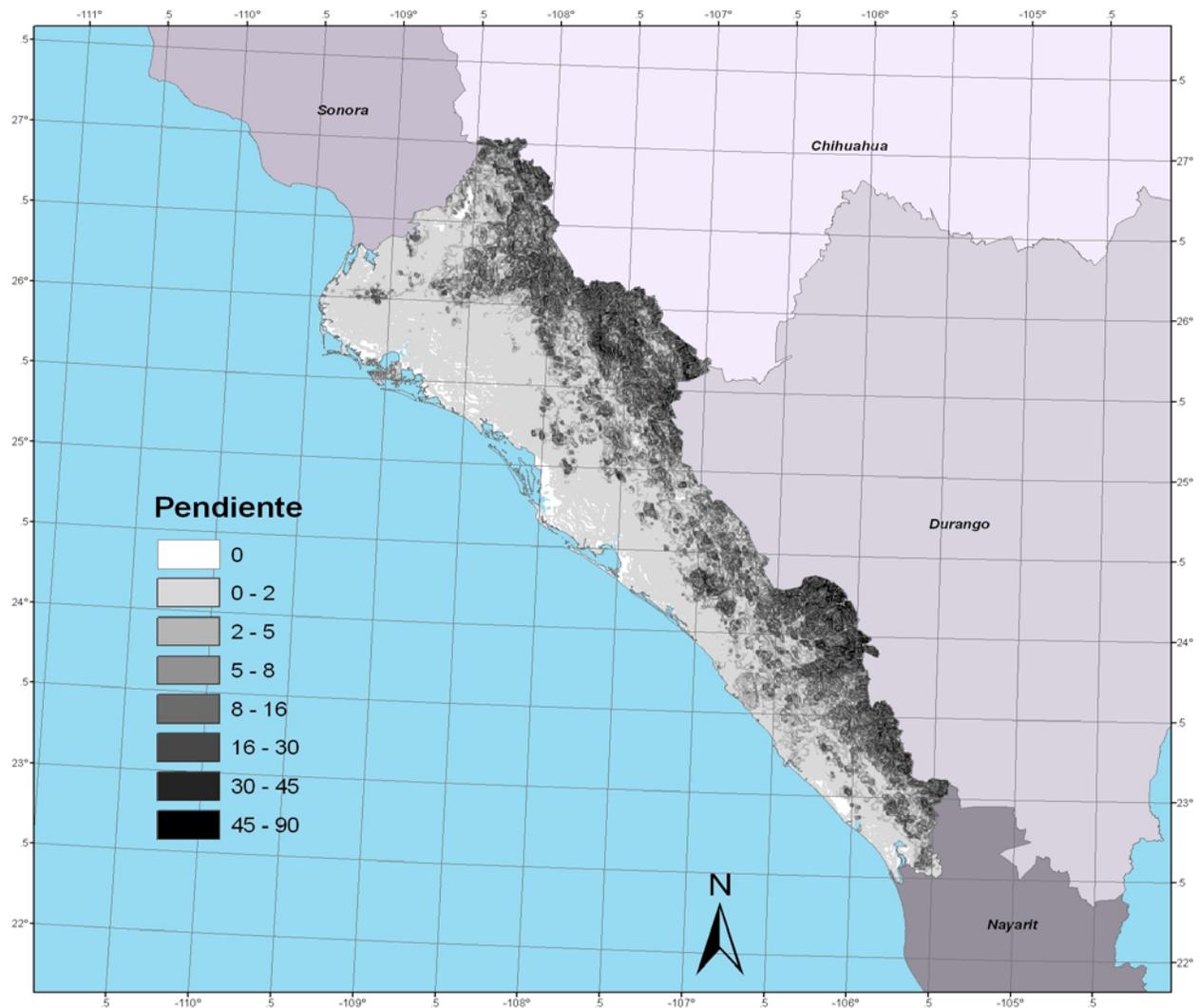


Figura 1.4. Pendiente predominante en Sinaloa.

Como se puede observar en las figuras anteriores, el estado de Sinaloa se encuentra en una región naturalmente fértil. Ya que cuenta con una gran infraestructura hidroagrícola, en la cual se puede mencionar los 11 ríos y 11 presas ubicadas en las diferentes cuencas hidrográficas (**Figura 1.5**), cuenta con 12 bahías y 15 esteros, un total de 656 km de litoral pertenecientes en su mayoría al Golfo de California y el resto al Océano Pacífico.

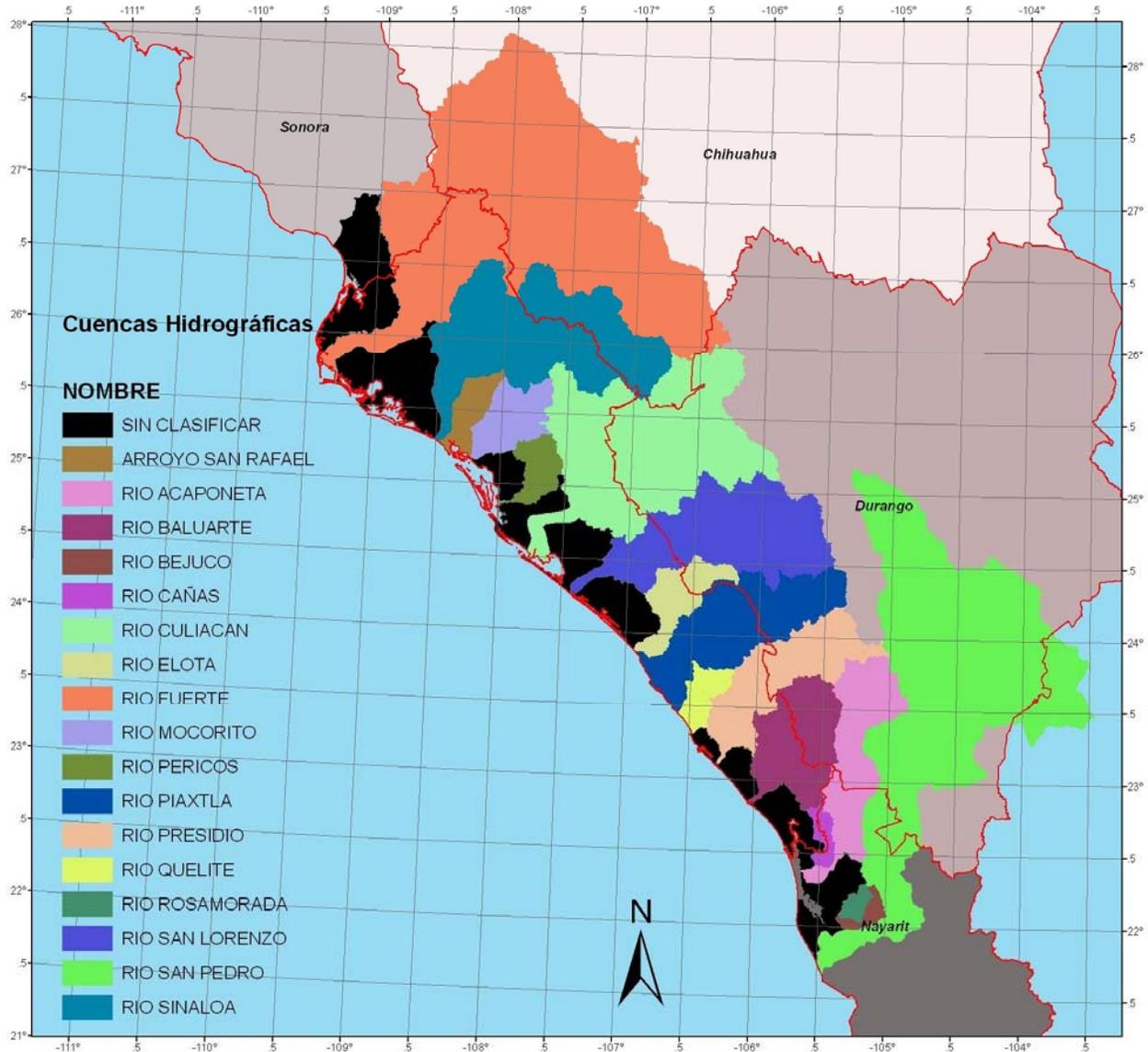


Figura 1.5. Cuencas hidrográficas ubicadas en el estado de Sinaloa.

En el **Cuadro 1.2** se muestra información más detallada de las diferentes cuencas hidrográficas ubicadas a lo largo y ancho del estado de Sinaloa: ríos, longitud de ríos, presas, capacidad y municipios que abarca cada cuenca hidrográfica (CONAGUA, 2008).

Cuadro 1.2. Ríos y presas de Sinaloa (CONAGUA, 2008).

Río	Longitud (km)	Municipios	Presa	Capacidad (hm³)
Río Fuerte	670	Choix, El Fuerte y Ahome	Miguel Hidalgo (El Mahone) Josefa Ortiz Luis Donaldo Colosio (Huites)	3,038 520 4,568
Río Sinaloa	420	Sinaloa y Guasave	Gustavo Díaz Ordaz (Bacurato) Guillermo Blake (El Sabinal)	1,920 300
Río Mocorito	108	Mocorito, Salvador Alvarado y Angostura	Eustaquio Buelna	151
Río Humaya	280	Badiraguato, Culiacán y Navolato	Adolfo López Mateos (Varejonal)	3,153
Río Tamazula Forman:	280		Sanalona	843
Río Culiacán	72		Vinoramas	102
Río Elota	221	Cosalá y Elota	Aurelio Benassini (El Salto)	415
Río Baluarte	155	Rosario		
Río Quelite	110	San Ignacio y Mazatlán		
Río San Lorenzo	156	Cosalá y Culiacán	José López Portillo (Comedero)	2,250
Río Presidio	167	Mazatlán		
Río Piaxtla	203	San Ignacio		
Río Cañas	72	Escuinapa		

Debido a lo anterior, la actividad económica se sustenta principalmente en la agricultura, la cual es la más tecnificada del país desde la década de los 60's. Lo mencionado anteriormente es resultado de que Sinaloa cuenta con la mayor superficie regable del país con alrededor de 800 mil ha así como varios de los distritos de riego más productivos resultado de la infraestructura hidroagrícola existente (CONAGUA, 2009). Su alta productividad en diversos cultivos le permite participar en los mercados internacionales fungiendo como exportador de productos frescos entre los que destacan las hortalizas y frutales, los cuales representan más del 65% de las exportaciones totales que realiza Sinaloa (SIACON, 2008).

Aproximadamente el 97% de las exportaciones de hortalizas, legumbres y frutales son enviadas hacia los Estados Unidos, mientras que el resto de la producción es principalmente para cubrir los mercados de Canadá, Belice, España, Francia, Italia, Suiza, Argentina, Alemania, Holanda, Bélgica, Japón y Colombia (SIAP, 2010). En la **Figura 1.6** y **1.7** podemos ver el uso de suelo y la textura para ampliar aun más el panorama de la productividad agrícola en Sinaloa (Ojeda-Bustamante, 2010).

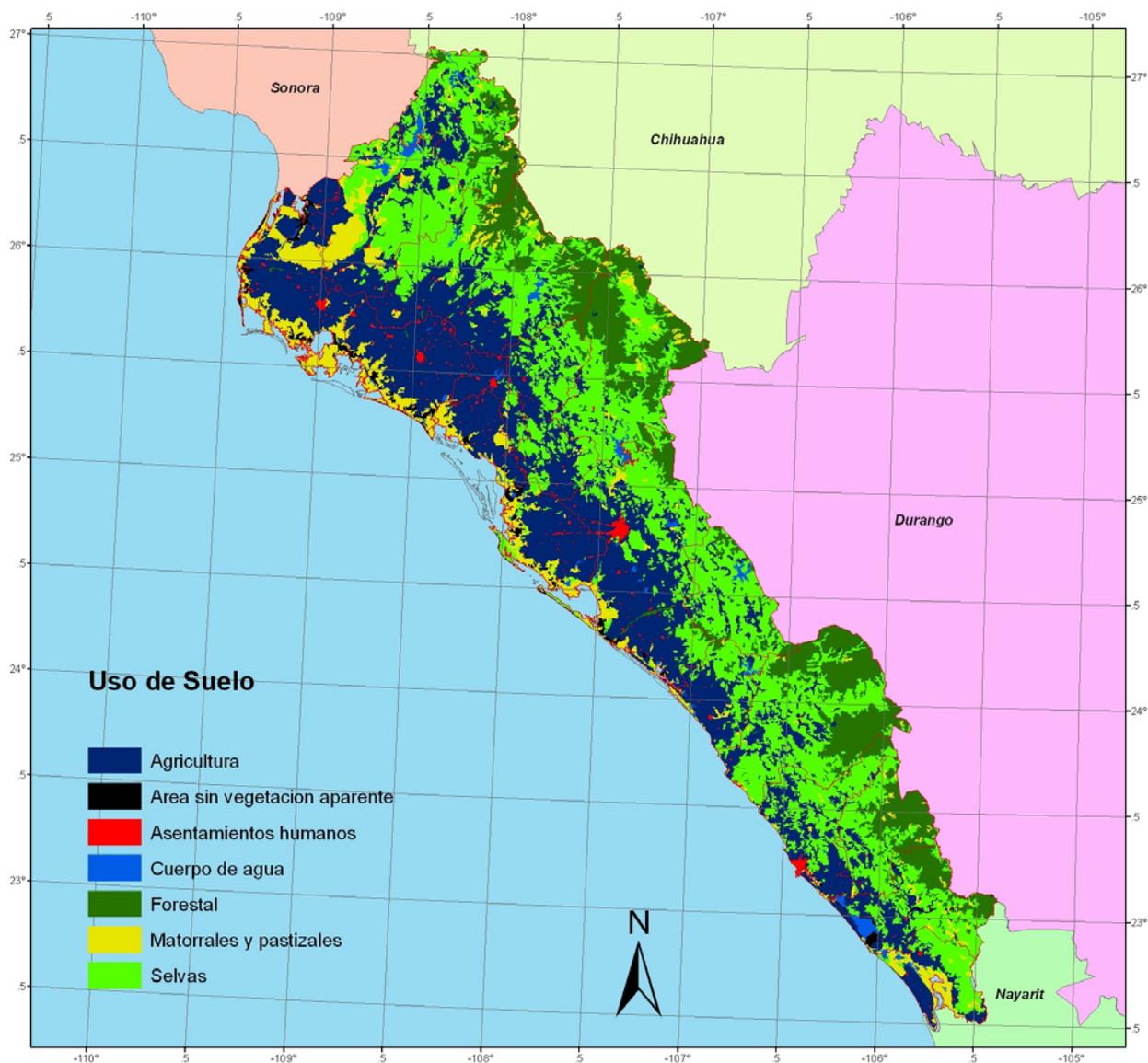


Figura 1.6. Uso de suelo en Sinaloa.

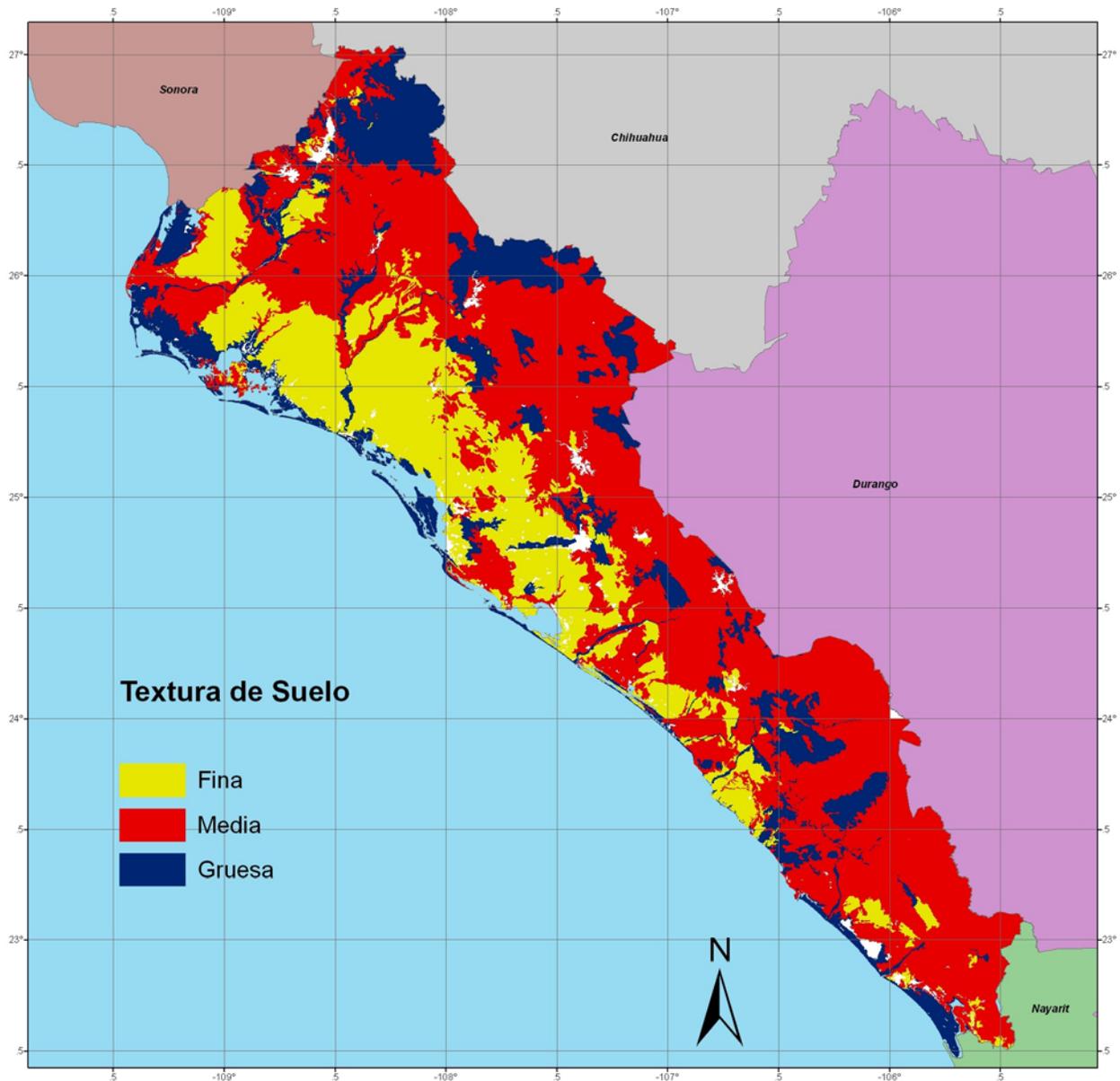


Figura 1.7. Textura de suelo predominante en Sinaloa.

Como se puede observar en la información anterior, en Sinaloa hay una gran diversidad en cuanto se refiere a recursos naturales e infraestructura hidroagrícola pero también hay que mencionar el comportamiento de las variables climáticas que predominan para poder establecer determinados cultivos de acuerdo a estas variables. De acuerdo con Ojeda-Bustamante (2010) en los valles de Sinaloa no hay gran precipitación (**Figura 1.8**) para establecer cultivos sin riego y lo cual va ligado a la temperatura predominante (**Figura 1.9**), generando la necesidad de regar para cubrir la demanda hídrica de los cultivos y lo contrario sucede en la parte de la sierra en donde se establece la agricultura de temporal.

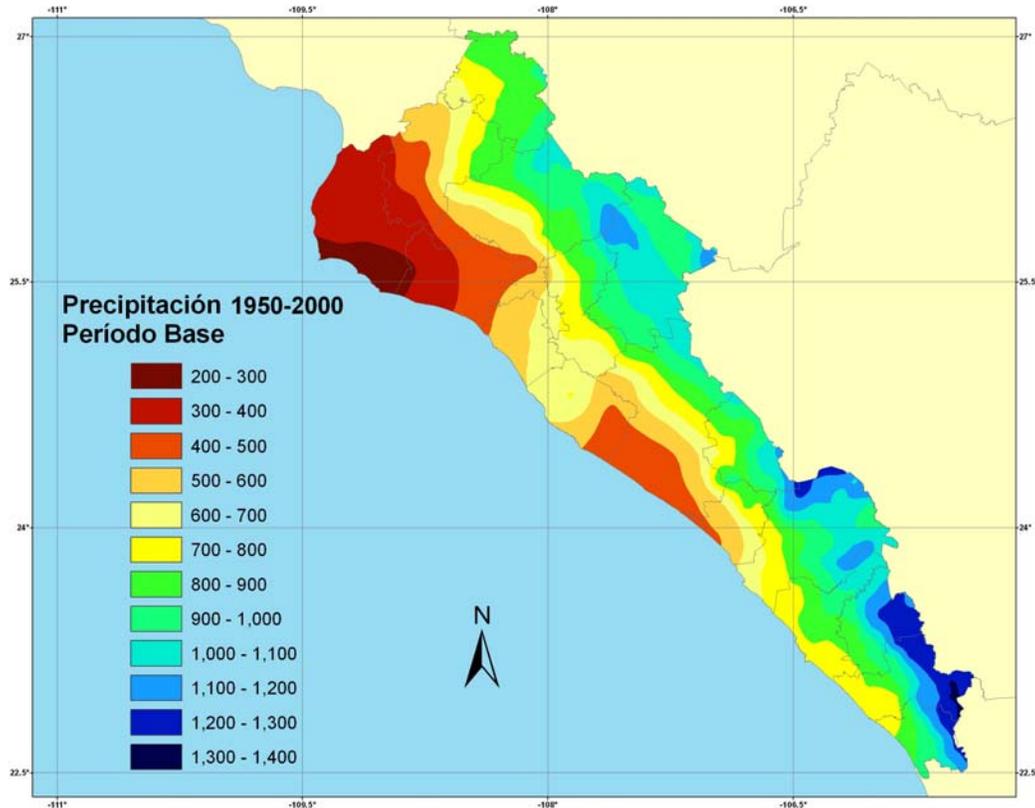


Figura 1.8. Precipitación anual promedio en Sinaloa para el período de 1950 al 2000.

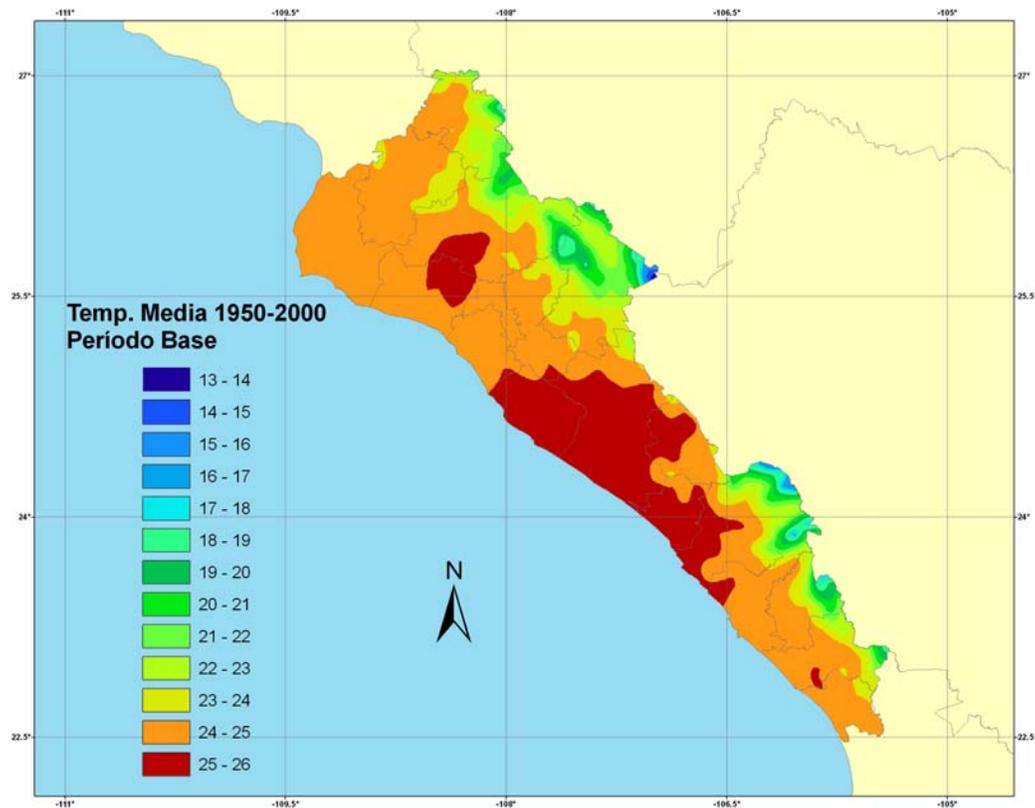


Figura 1.9. Temperatura media anual promedio en Sinaloa para el período de 1950 al 2000.

1.1.3. Principales cultivos

En el estado de Sinaloa se produce una amplia variedad de cultivos tanto hortícolas, frutales y granos (**Cuadro 1.3**), lo cual lo convierte en un importante productor agrícola a nivel nacional.

Cuadro 1.3. Principales cultivos establecidos en Sinaloa (SIAP, 2010).

Nombre común	Nombre científico	Clasificación
Calabaza	<i>Cucurbita spp.</i>	Hortaliza
Chile	<i>Capsicum annum L.</i>	Hortaliza
Jitomate	<i>Lycopersicon esculentum Mill.</i>	Hortaliza
Papa	<i>Solanum tuberosum L.</i>	Hortaliza
Tomate verde	<i>Physalis ixocarpa L.</i>	Hortaliza
Pepino	<i>Cucumis sativus L.</i>	Hortaliza
Mango	<i>Mangifera indica L.</i>	Frutal
Melón	<i>Cucumis melo L.</i>	Frutal
Sandía	<i>Citrullus lanatus L.</i>	Frutal
Arroz	<i>Oryza sativa L.</i>	Granos
Cártamo	<i>Carthamus linctorius L.</i>	Granos
Frijol	<i>Phaseolus vulgaris L.</i>	Granos
Maíz	<i>Zea mays L.</i>	Granos
Sorgo	<i>Sorghum vulgare L.</i>	Granos
Soya	<i>Glycine max L.</i>	Granos
Trigo	<i>Triticum aestivum L.</i>	Granos

Lo anterior se debe a que Sinaloa cuenta con gran diversidad de climas, valles e infraestructura hidroagrícola para regar los cultivos.

1.2. MATERIALES Y MÉTODOS

Mediante el uso de los informes estadísticos de los distritos de riego elaborados por la CONAGUA “*estadísticas agrícolas de los distritos de riego*”, los cuales contienen información desde el año agrícola 1970-1971 hasta el año agrícola 2007-2008 (CNA-IMTA, 2005; CONAGUA, 2009 y CONAGUA, 2010) se realizó un análisis de la productividad de los diferentes distritos de riego de Sinaloa: DR-010 “Culiacán-Humaya”, DR-063 “Guasave”, DR-074 “Mocorito”, DR-075 “Río Fuerte”, DR-076 “Valle del Carrizo”, DR-108 “Elota-Piaxtla”, DR-109 “Río San Lorenzo” y DR-111 “Baluarte-Presidio” (**Figura 1.10**) respecto a los principales cultivos establecidos, superficie sembrada, superficie cosechada y rendimiento promedio para el ciclo otoño-invierno (OI), primavera-verano (PV) y Perennes.



Figura 1.10. Ubicación de los distritos de riego del estado de Sinaloa.

También se utilizó la información climatológica contenida en el software ERIC III (**Figura 1.11**) desarrollado por IMTA (2007) para analizar el comportamiento de las variables climáticas de interés de las cuales dependen los diferentes cultivos para desarrollarse adecuadamente, tomando una estación climatológica representativa para las siguientes zonas del estado: norte, centro y sur.

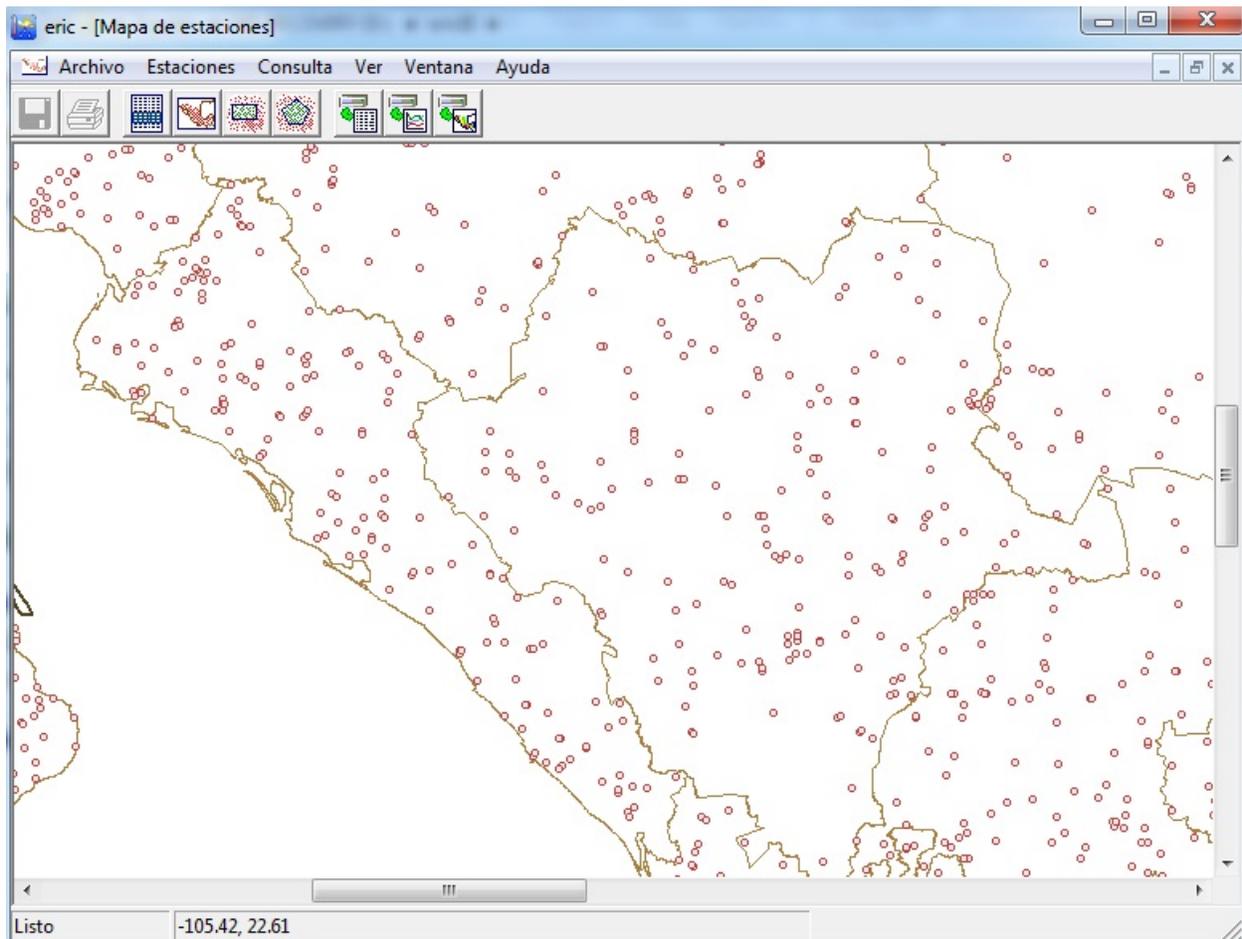


Figura 1.11. Mapa de estaciones climatológicas del ERIC III.

Para realizar los análisis mencionados anteriormente, se apoyó en la aplicación SQLite Manager desarrollada por Kant (2010) para estructurar y ordenar la base de datos de los distritos de riego (cultivo, superficie sembrada, superficie cosechada y rendimiento) e información climatológica, exportándola posteriormente a la aplicación Microsoft Office Excel de Windows para generar las gráficas y los cálculos de interés.

1.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados de las diferentes evaluaciones sobre superficie establecida y superficie cosechada, rendimiento y descripción de variables climáticas para cada uno de los distritos de riego y zonas de Sinaloa.

1.3.1. Evaluación del rendimiento promedio y la superficie sembrada de maíz en los distritos de riego de Sinaloa

En los distritos de riego de Sinaloa (DR-010, DR-063, DR-074, DR-075, DR-076, DR-108, DR-109 y DR-111) hay una gran diversidad de cultivos establecidos en los ciclos agrícolas OI y PV, debido a lo anterior; la cantidad de información que se procesó para obtener las gráficas de rendimiento promedio y superficie sembrada es demasiada y sólo se presenta para el cultivo de maíz (OI y PV).

Por lo tanto, para fines de consulta de los demás cultivos se puede acceder al **APÉNDICE I** de la presente tesis y a continuación se presentan los rendimientos obtenidos y superficie sembrada para el ciclo OI (**Figura 1.12** a la **Figura 1.19**), en donde se puede observar que la tendencia del cultivo de maíz ha aumentado tanto en rendimiento como en superficie sembrada debido a que se ha convertido redituable para los agricultores y condiciones favorables para producirlo.

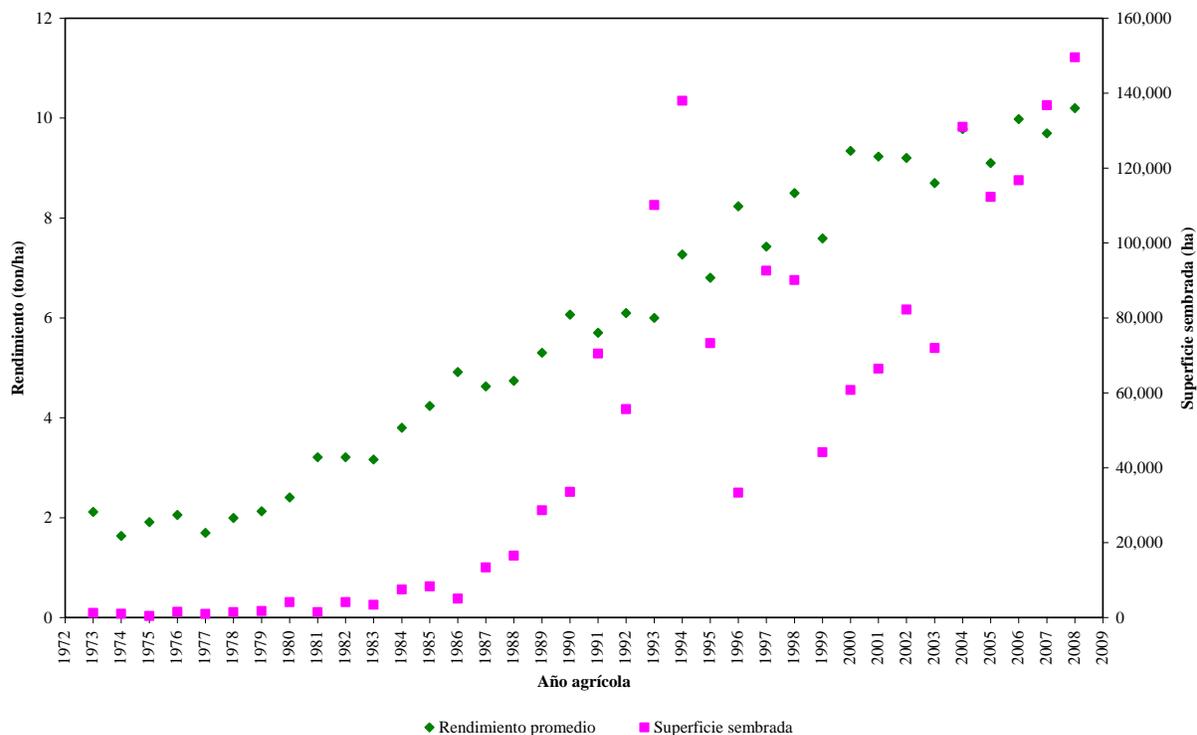


Figura 1.12. Rendimiento promedio y superficie sembrada del cultivo de maíz en el DR-010 para el ciclo OI.

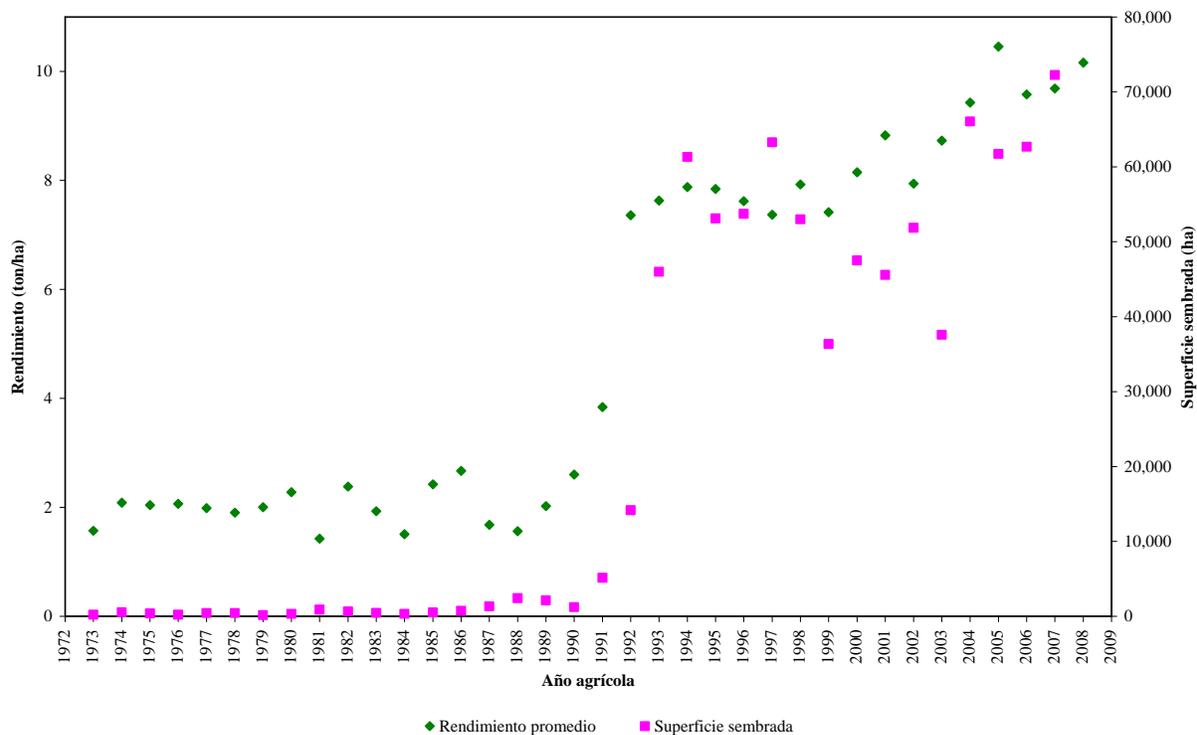


Figura 1.13. Rendimiento promedio y superficie sembrada del cultivo de maíz en el DR-063 para el ciclo OI.

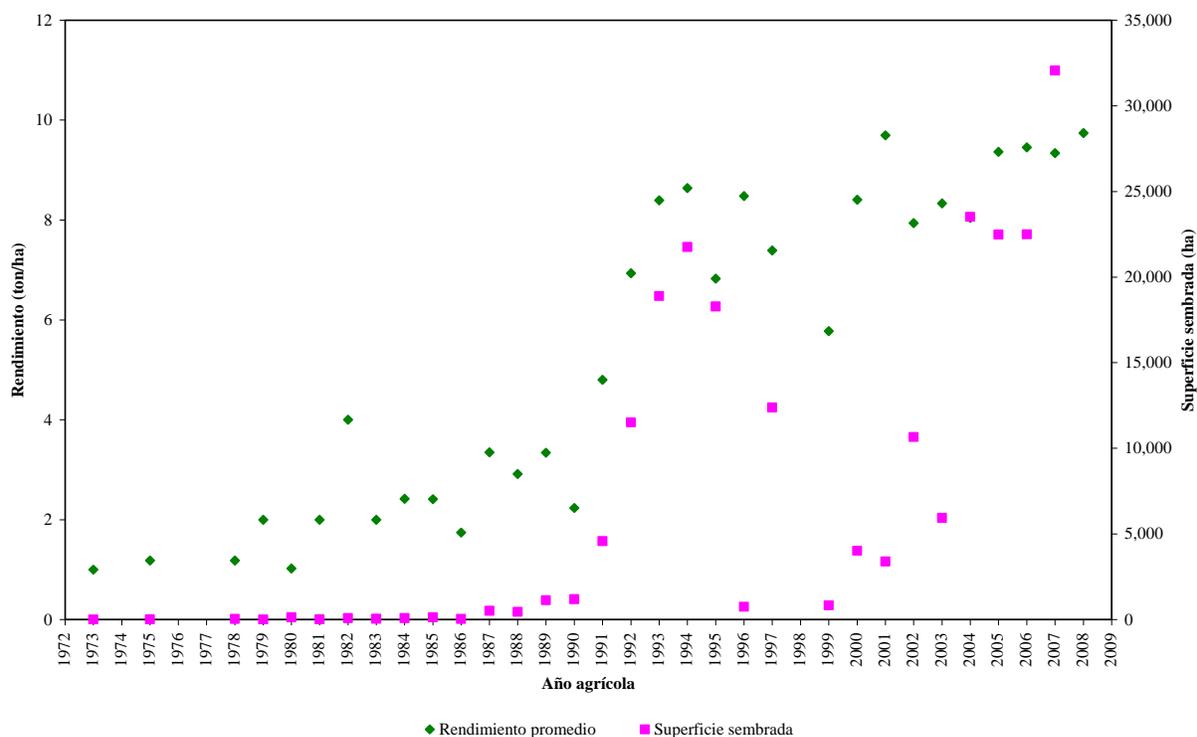


Figura 1.14. Rendimiento promedio y superficie sembrada del cultivo de maíz en el DR-074 para el ciclo OI.

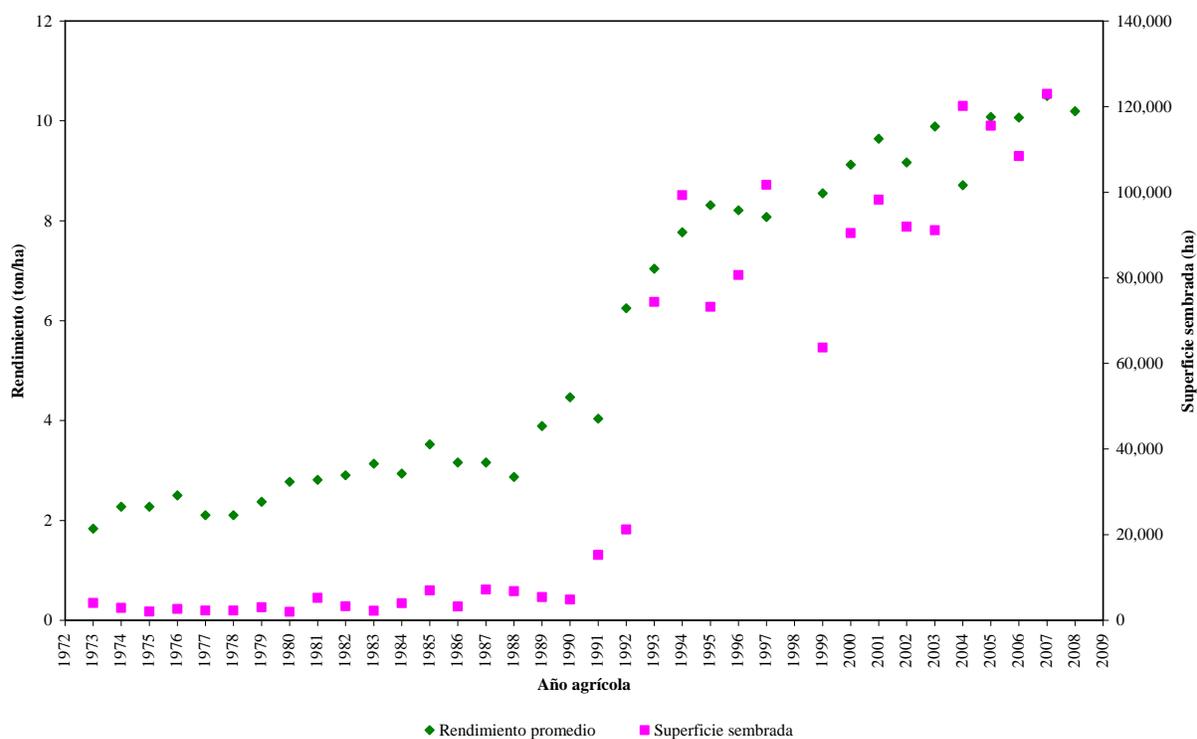


Figura 1.15. Rendimiento promedio y superficie sembrada del cultivo de maíz en el DR-075 para el ciclo OI.

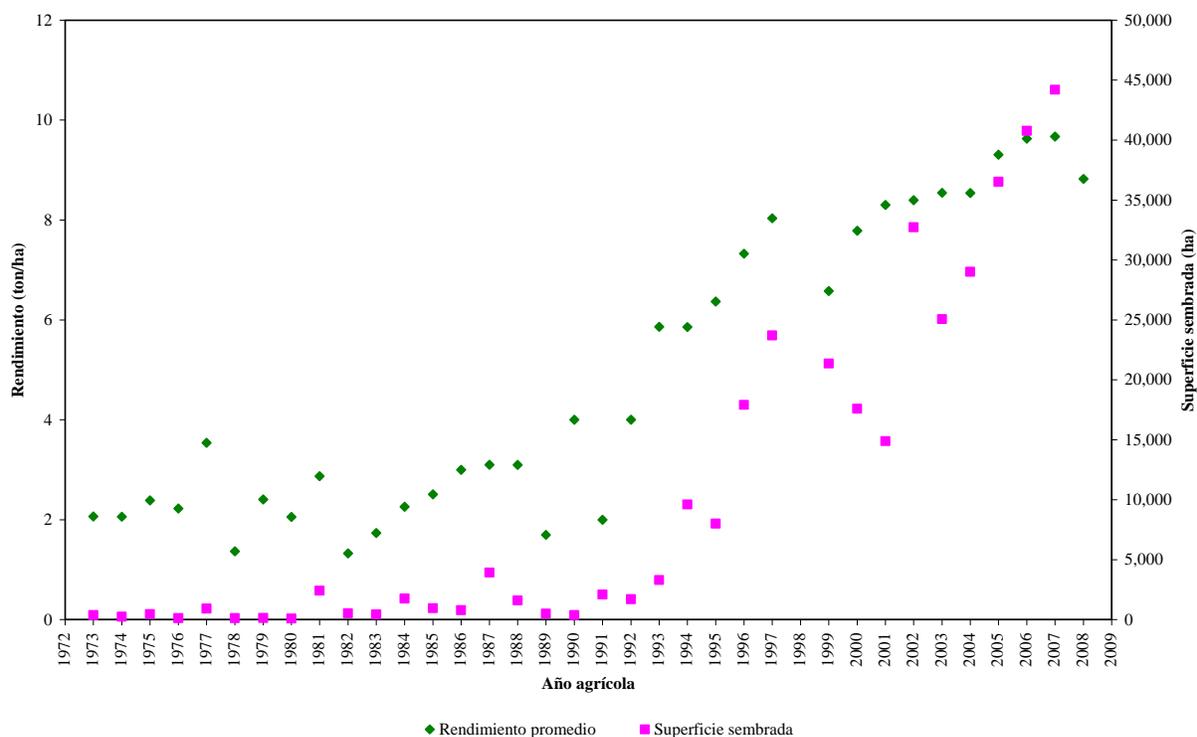


Figura 1.16. Rendimiento promedio y superficie sembrada del cultivo de maíz en el DR-076 para el ciclo OI.

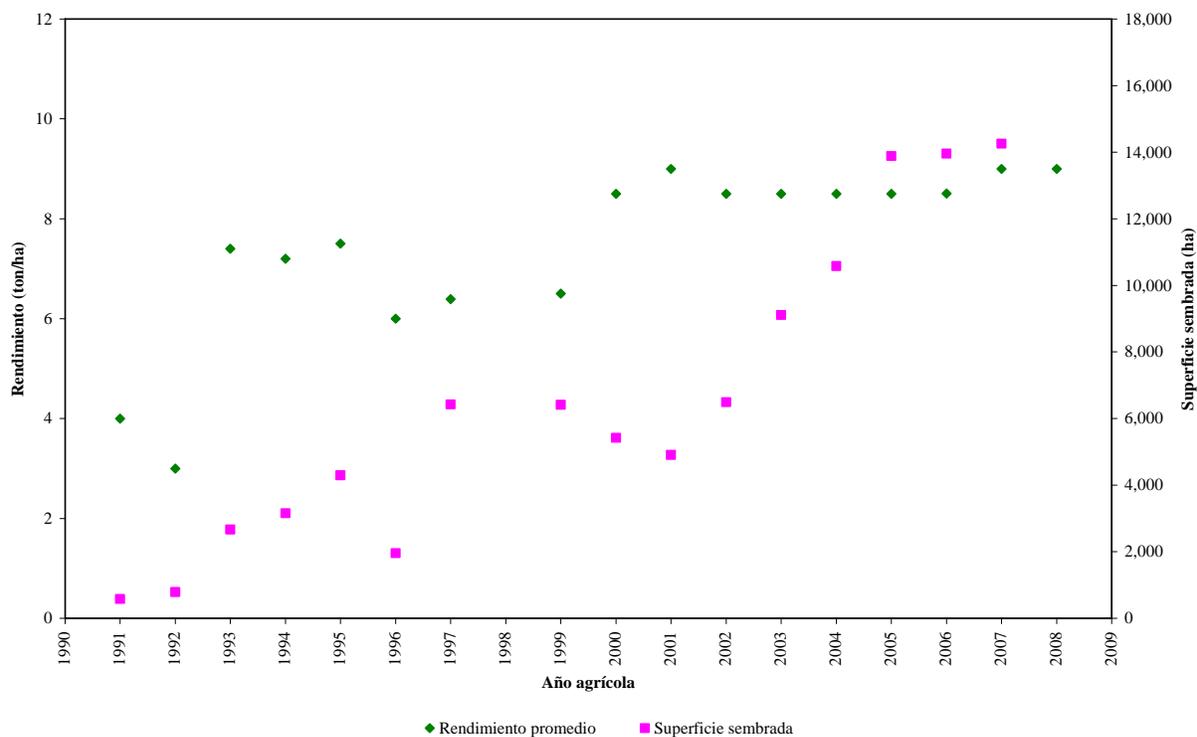


Figura 1.17. Rendimiento promedio y superficie sembrada del cultivo de maíz en el DR-108 para el ciclo OI.

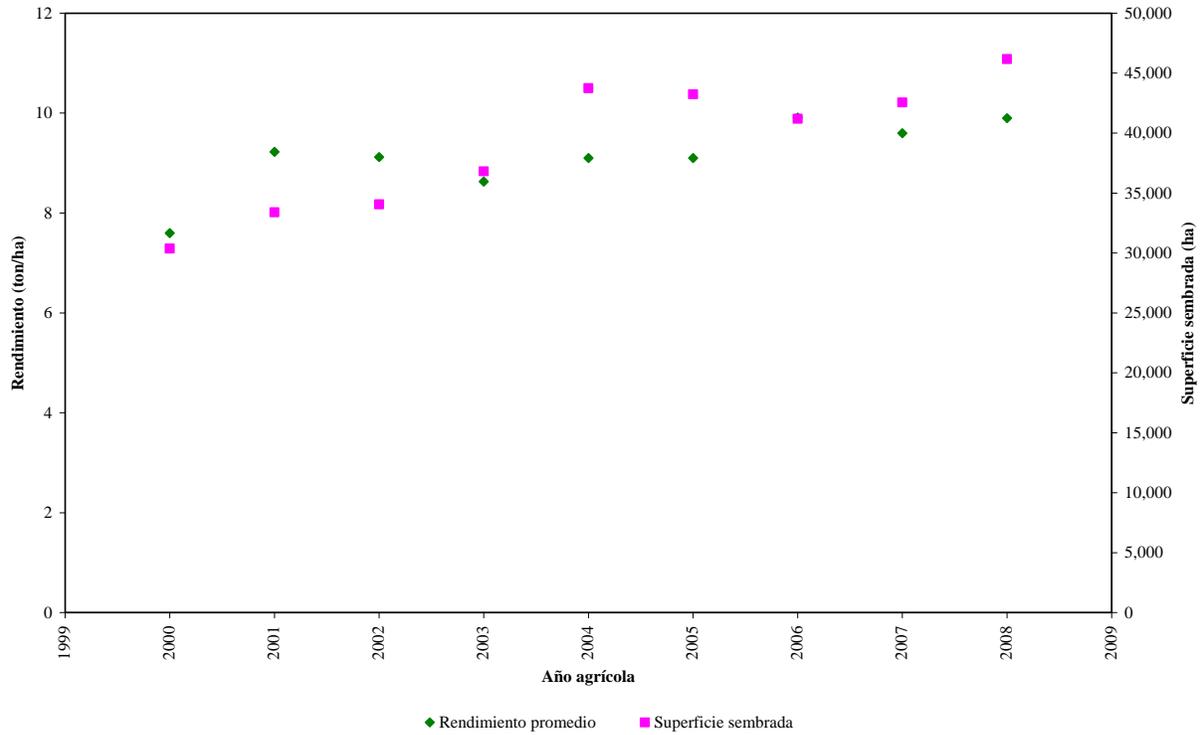


Figura 1.18. Rendimiento promedio y superficie sembrada del cultivo de maíz en el DR-109 para el ciclo OI.

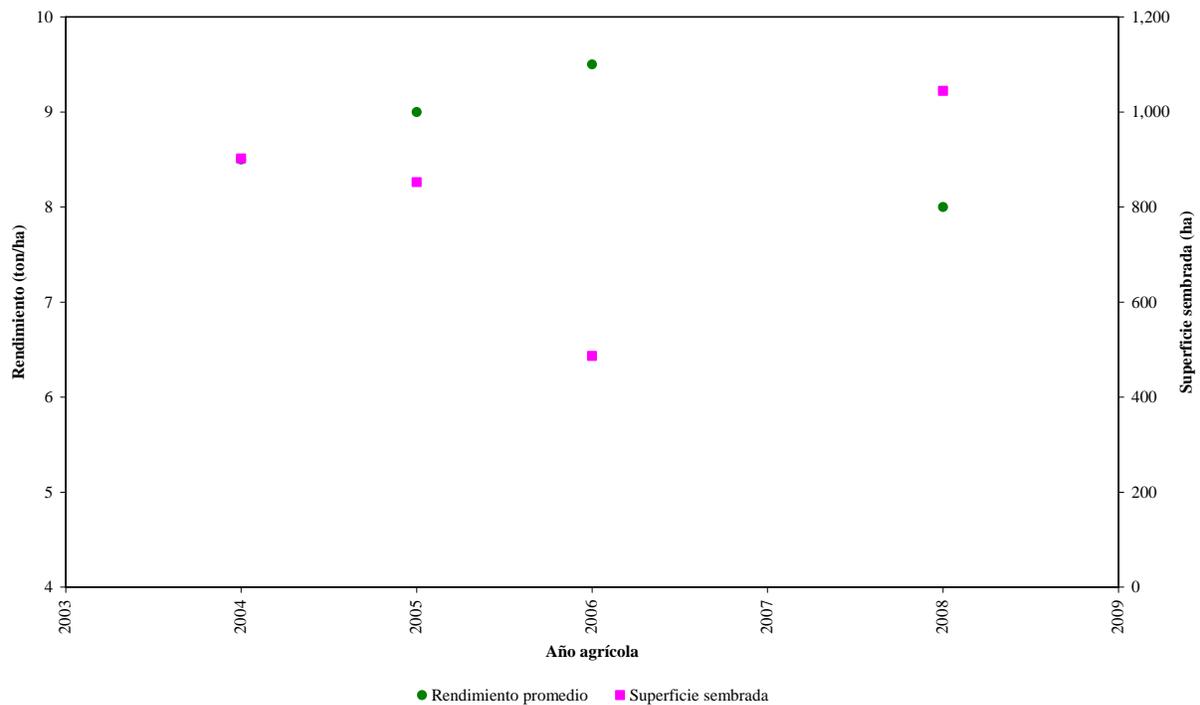


Figura 1.19. Rendimiento promedio y superficie sembrada del cultivo de maíz en el DR-111 para el ciclo OI.

A continuación también se presentan los rendimientos obtenidos y superficie sembrada para el ciclo PV (**Figura 1.20** a la **Figura 1.27**), en donde se puede observar la misma tendencia que para el ciclo OI del cultivo de maíz. Aunque a diferencia del ciclo OI, en el ciclo PV se siembra si hay volumen disponible de agua para establecer el cultivo.

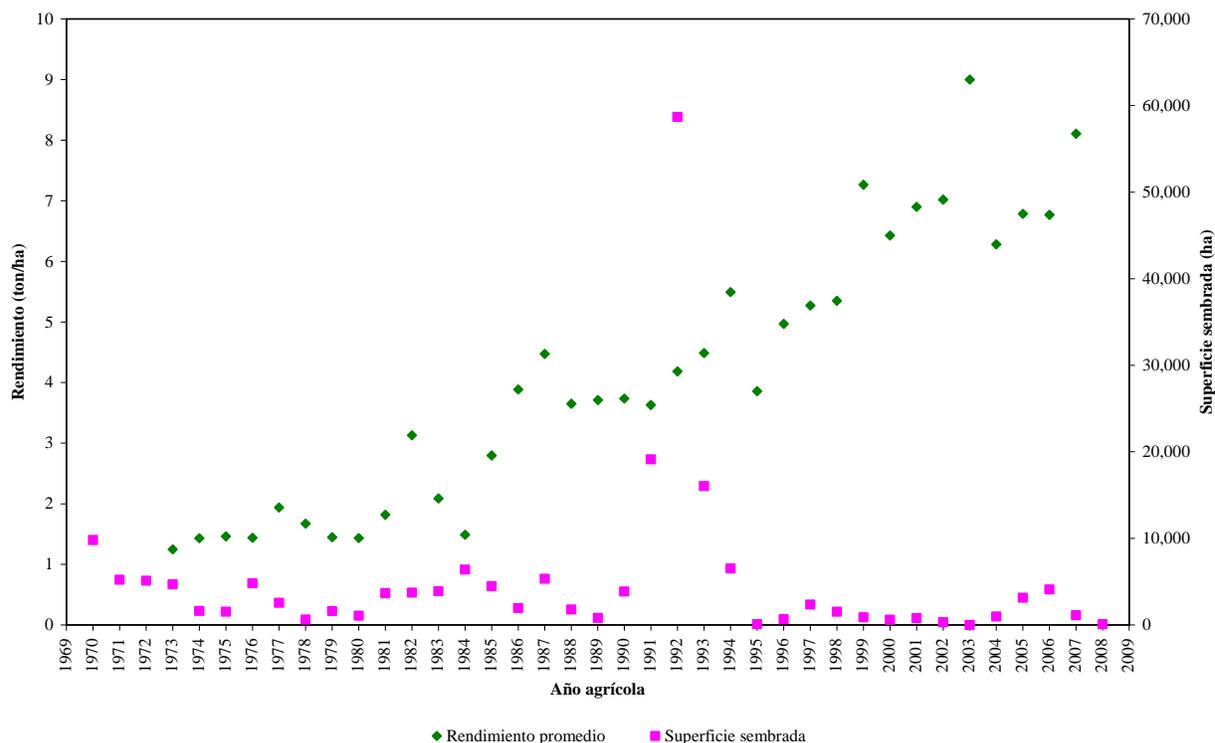


Figura 1.20. Rendimiento promedio y superficie sembrada del cultivo de maíz en el DR-010 para el ciclo PV.

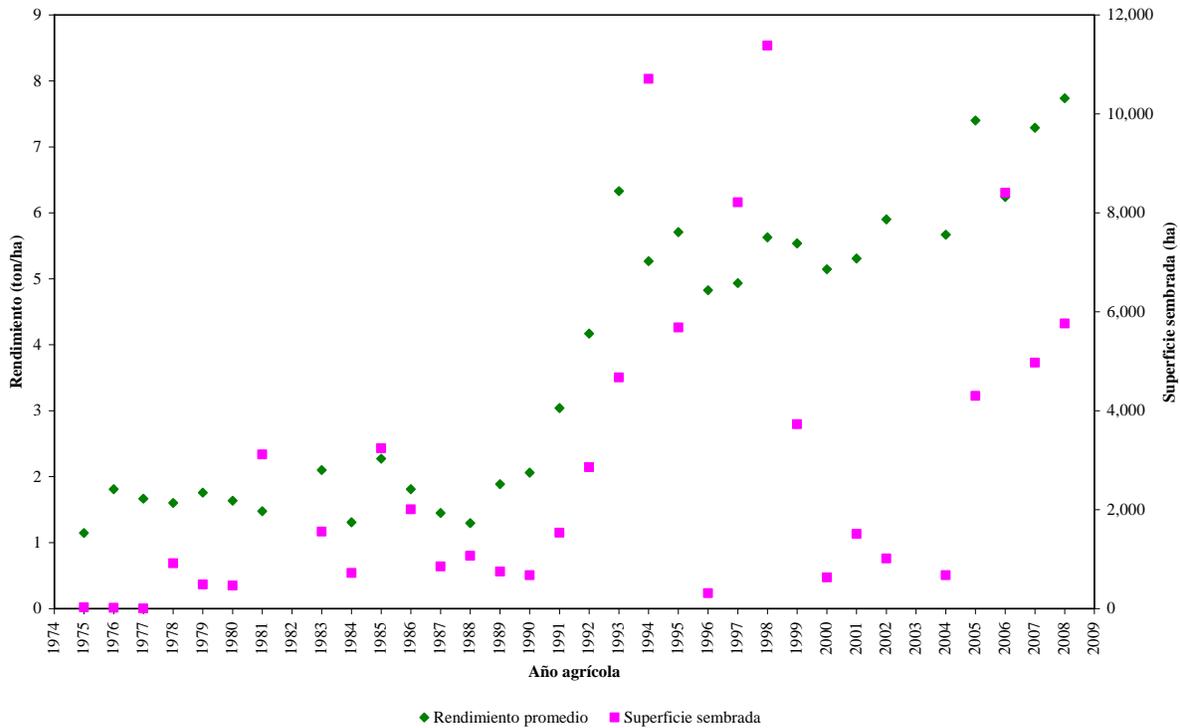


Figura 1.21. Rendimiento promedio y superficie sembrada del cultivo de maíz en el DR-063 para el ciclo PV.

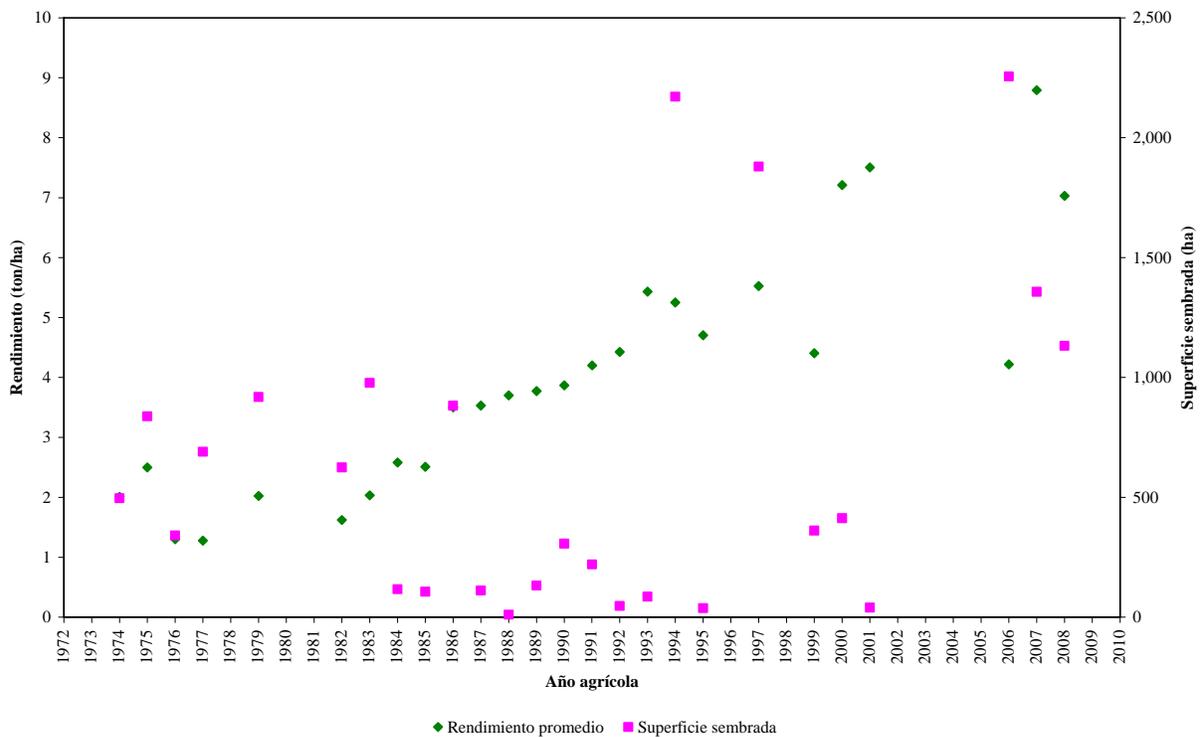


Figura 1.22. Rendimiento promedio y superficie sembrada del cultivo de maíz en el DR-074 para el ciclo PV.

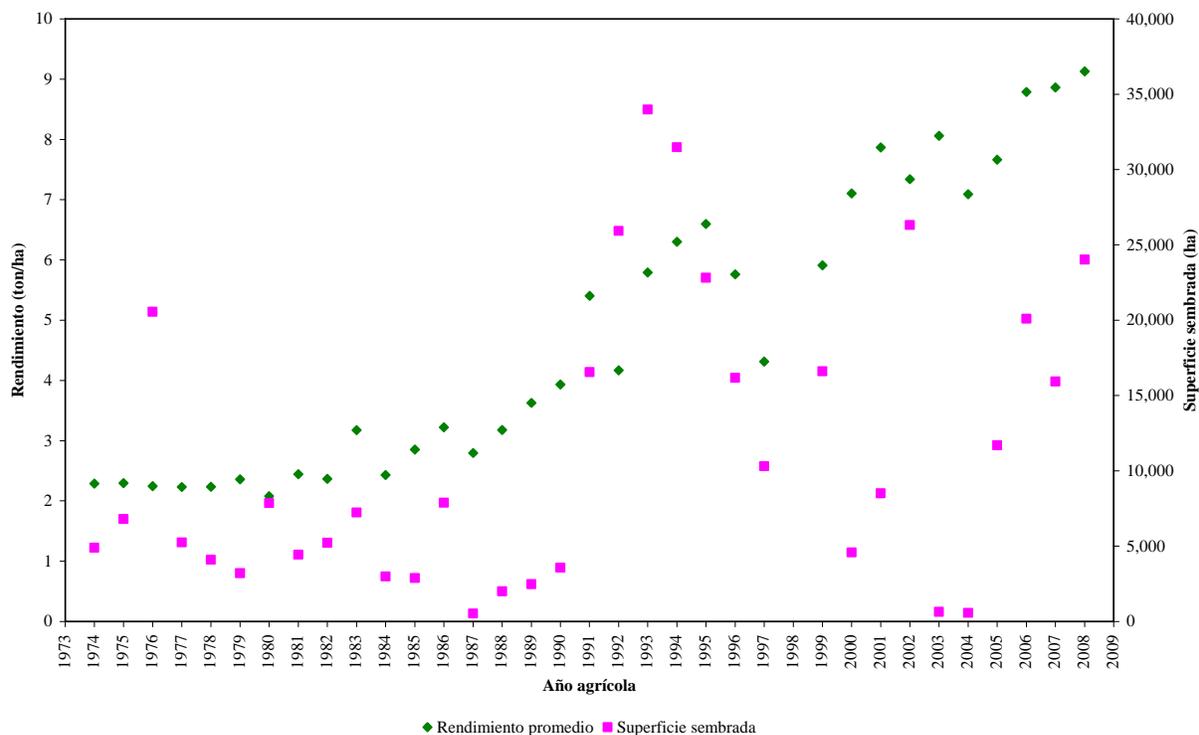


Figura 1.23. Rendimiento promedio y superficie sembrada del cultivo de maíz en el DR-075 para el ciclo PV.

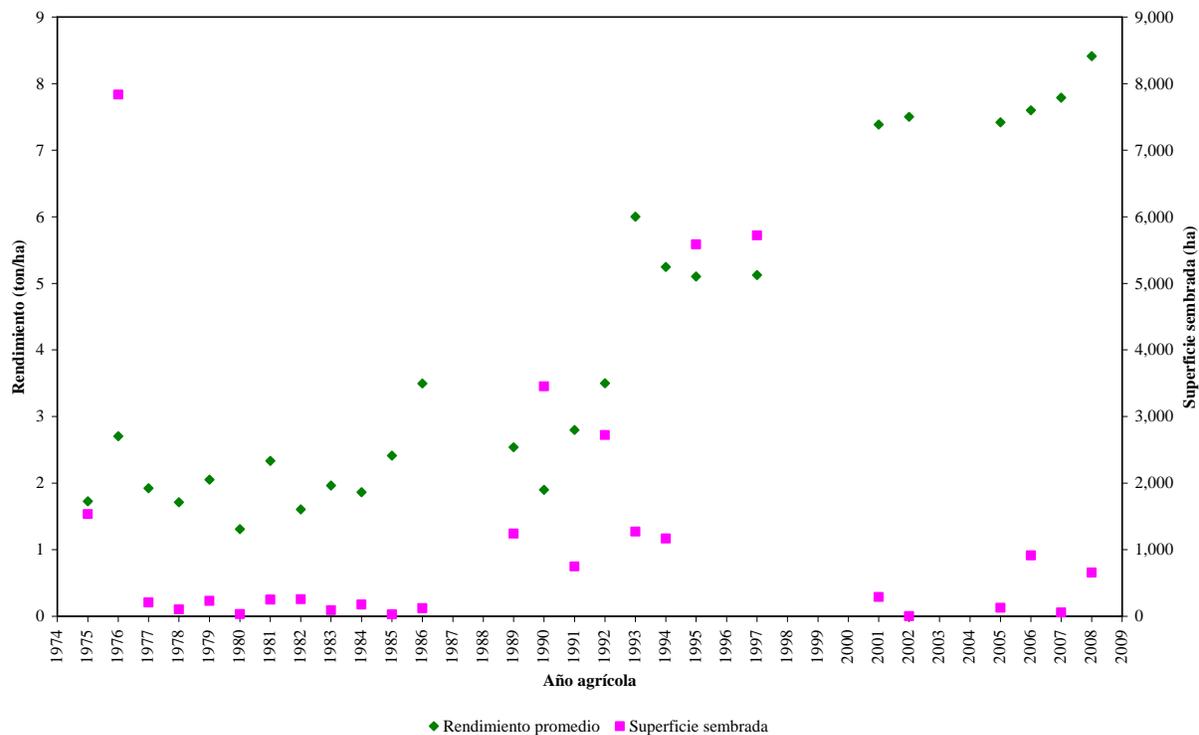


Figura 1.24. Rendimiento promedio y superficie sembrada del cultivo de maíz en el DR-076 para el ciclo PV.

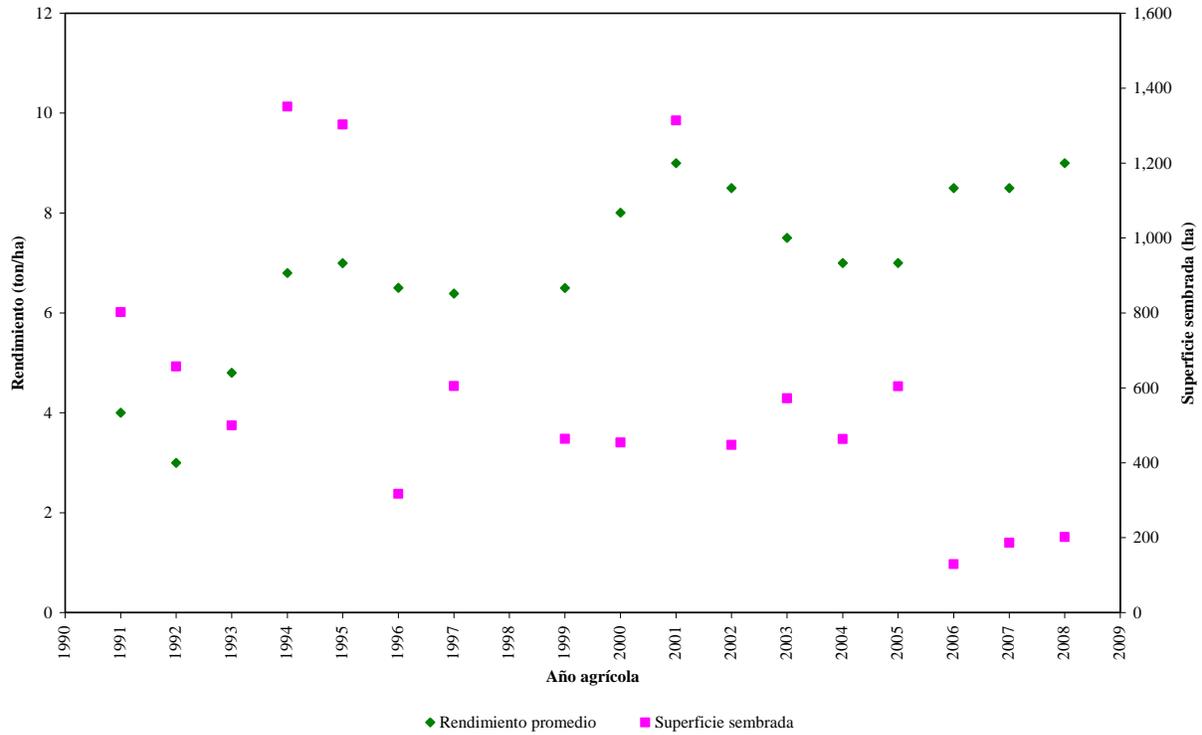


Figura 1.25. Rendimiento promedio y superficie sembrada del cultivo de maíz en el DR-108 para el ciclo PV.

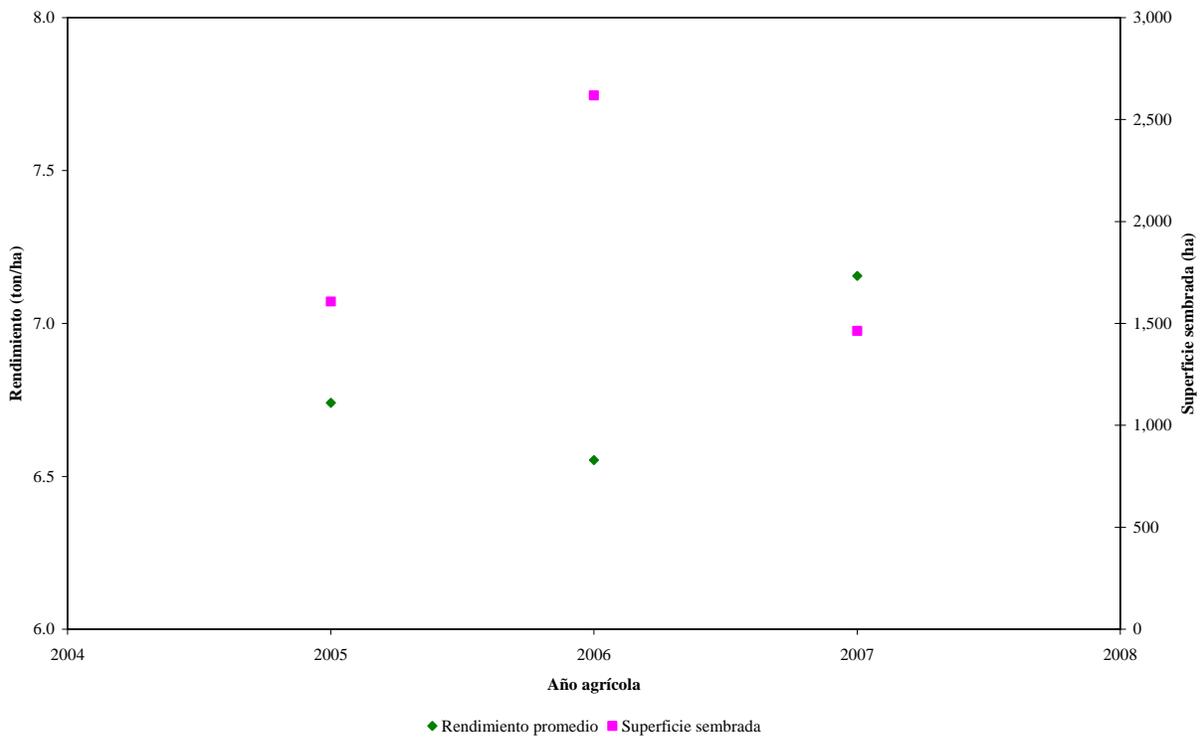


Figura 1.26. Rendimiento promedio y superficie sembrada del cultivo de maíz en el DR-109 para el ciclo PV.

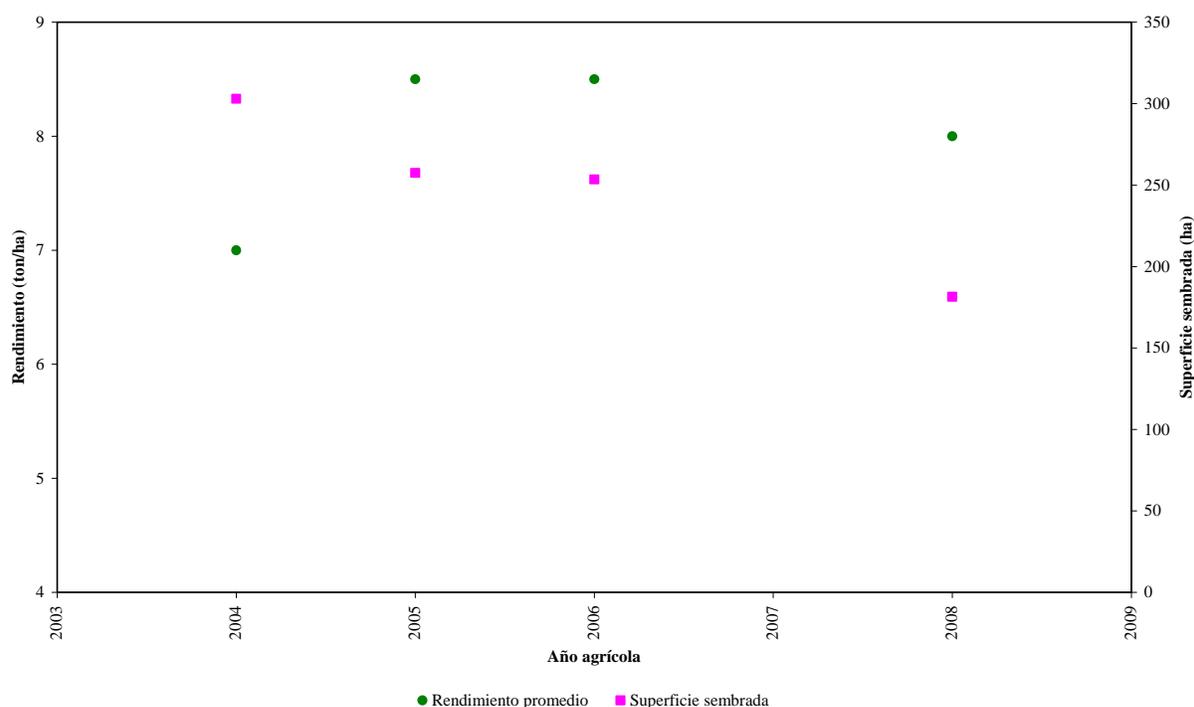


Figura 1.27. Rendimiento promedio y superficie sembrada del cultivo de maíz en el DR-111 para el ciclo PV.

Como se puede observar en la información anterior, el rendimiento y superficie sembrada aumentaron conforme pasaron los años debido a que el cultivo de maíz se volvió rentable para los productores agrícolas. Además, el porcentaje de siniestralidad en el cultivo de maíz para cada distrito de riego de Sinaloa es muy bajo comparado con zonas de temporal (**Cuadro 1.4**).

Cuadro 1.4. Porcentaje de siniestralidad en maíz por cada distrito de riego en Sinaloa.

Distrito de riego (DR)	Porcentaje de siniestralidad histórico para cada ciclo agrícola	
	OI	PV
010 “Culiacán-Humaya”	4%	5%
063 “Guasave”	4%	9%
074 “Mocorito”	3%	3%
075 “Río Fuerte”	3%	6%
076 “Valle del Carrizo”	14%	9%
108 “Elota-Piactla”	0%	0%
109 “Río San Lorenzo”	0%	0%
111 “Baluarte-Presidio”	0%	0%

1.3.2. Descripción de variables climáticas para tres zonas de Sinaloa

En este apartado se presenta la información anual promedio para el período de 1961 al 2000 para una estación climatológica representativa de cada zona del estado, las tres estaciones seleccionadas así como la información de éstas se almacenan en el software ERIC III y a continuación se describe la localización de cada estación climatológica: 1) norte (Guamúchil) con unas coordenadas geográficas de longitud W de 108.09°, latitud N de 25.46° y una altitud de 50 m (**Figura 1.28** y **1.29**), 2) centro (Culiacán) con unas coordenadas geográficas de longitud W de 107.41°, latitud N de 24.82° y una altitud de 40 m (**Figura 1.29** y **1.30**) y por último, 3) sur (Rosario) con unas coordenadas geográficas de longitud W de 105.85°, latitud N de 22.98° y una altitud de 32 m (**Figura 1.31** y **1.32**). A continuación se presentan las gráficas generadas a partir de la información climatológica de cada estación y se puede observar el comportamiento anual de la precipitación (Pp), temperatura máxima ($T_{m\acute{a}x}$), temperatura media (T_{med}) y temperatura mínima ($T_{m\acute{i}n}$) para el período histórico mencionado anteriormente.

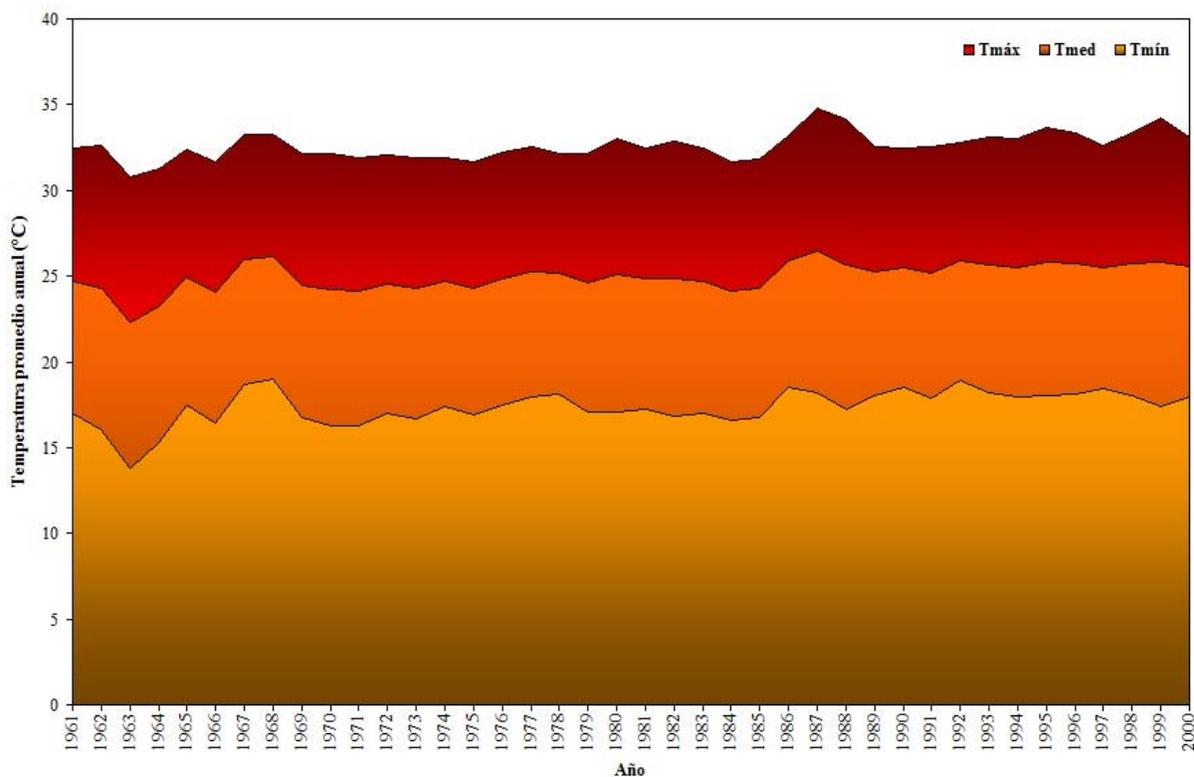


Figura 1.28. Temperatura máxima, media y mínima anual promedio para la zona norte de Sinaloa.

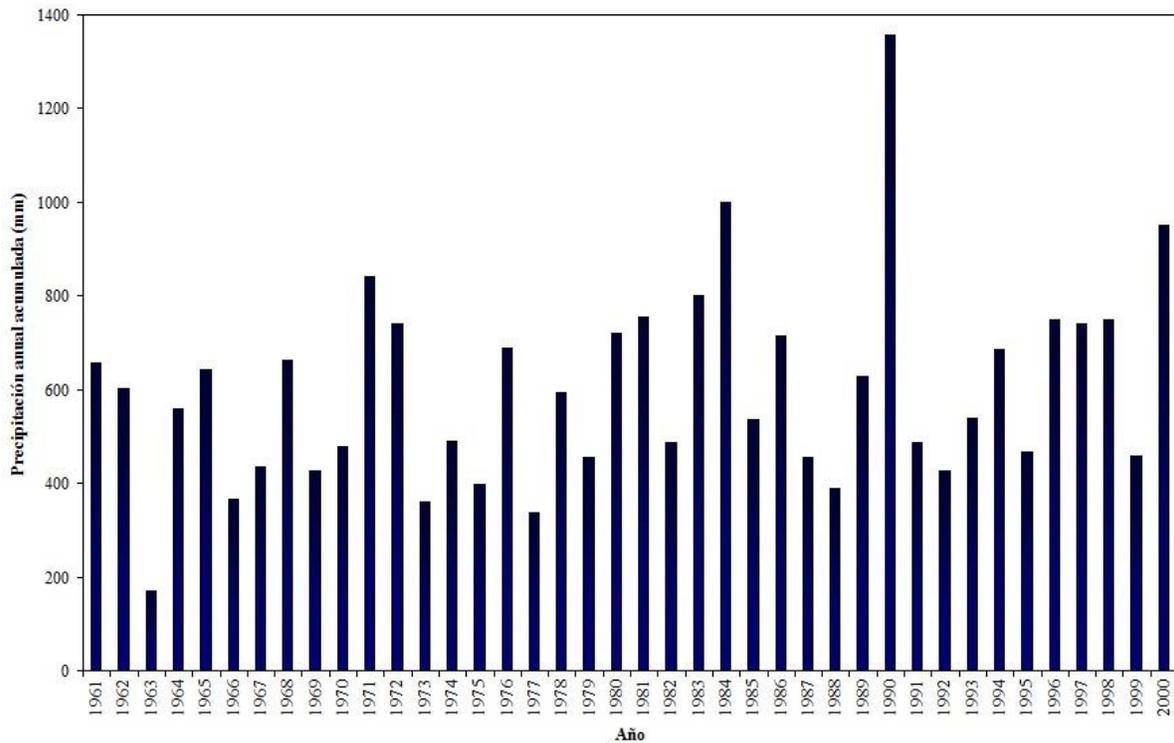


Figura 1.29. Precipitación anual acumulada para la zona norte de Sinaloa.

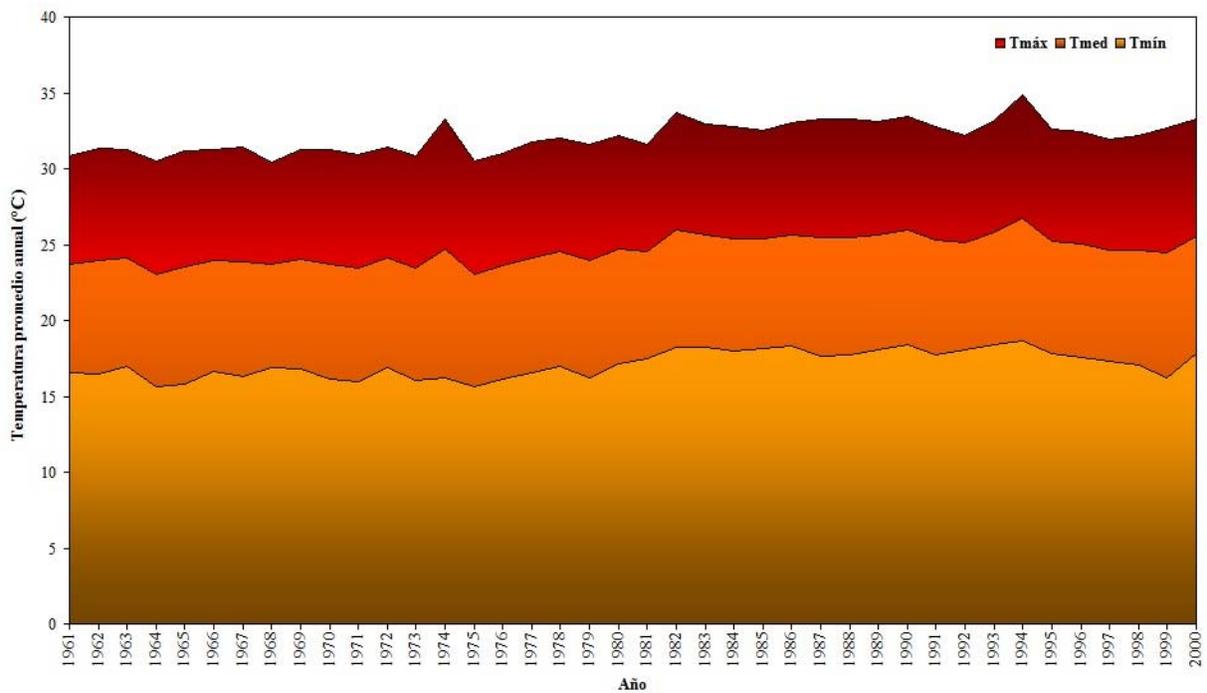


Figura 1.30. Temperatura máxima, media y mínima anual promedio para la zona centro de Sinaloa.

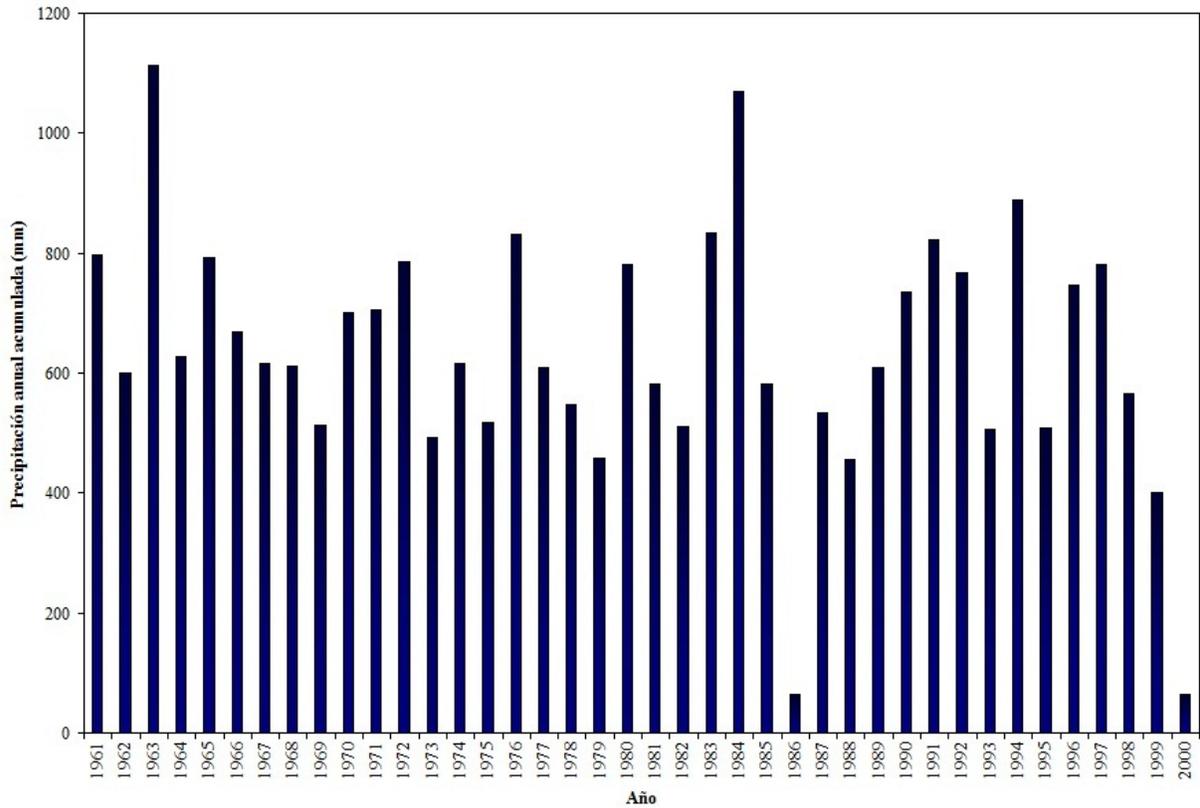


Figura 1.31. Precipitación anual acumulada para la zona centro de Sinaloa.

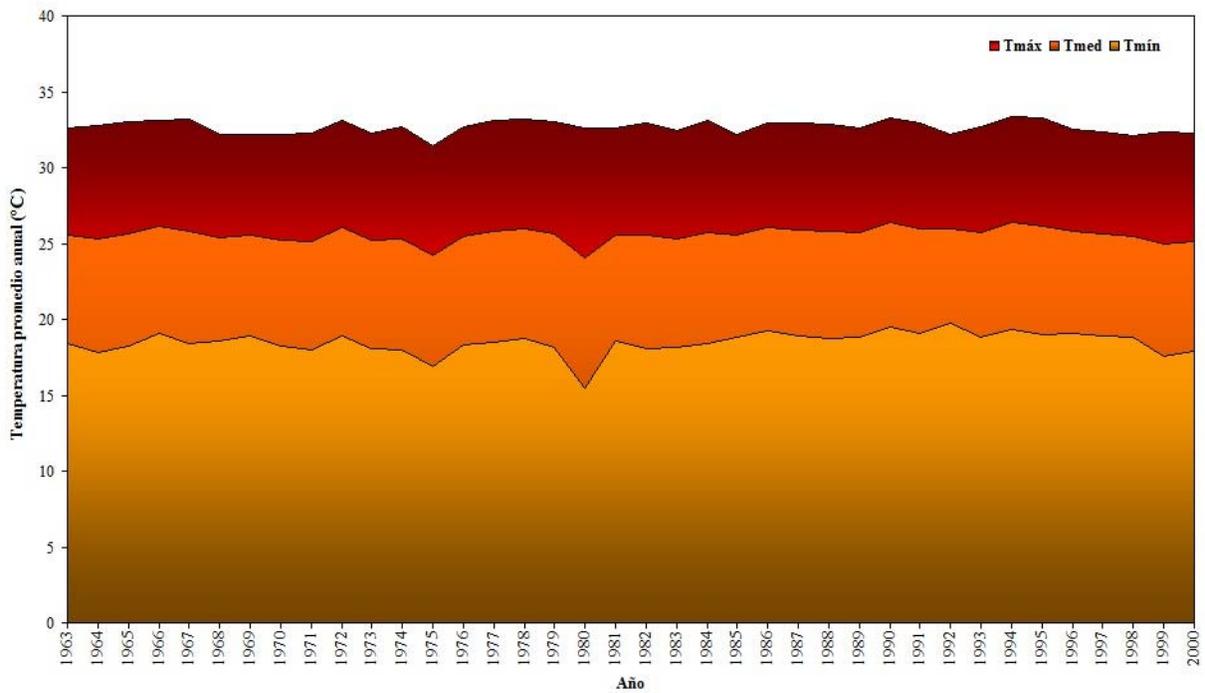


Figura 1.32. Temperatura máxima, media y mínima anual promedio para la zona sur de Sinaloa.

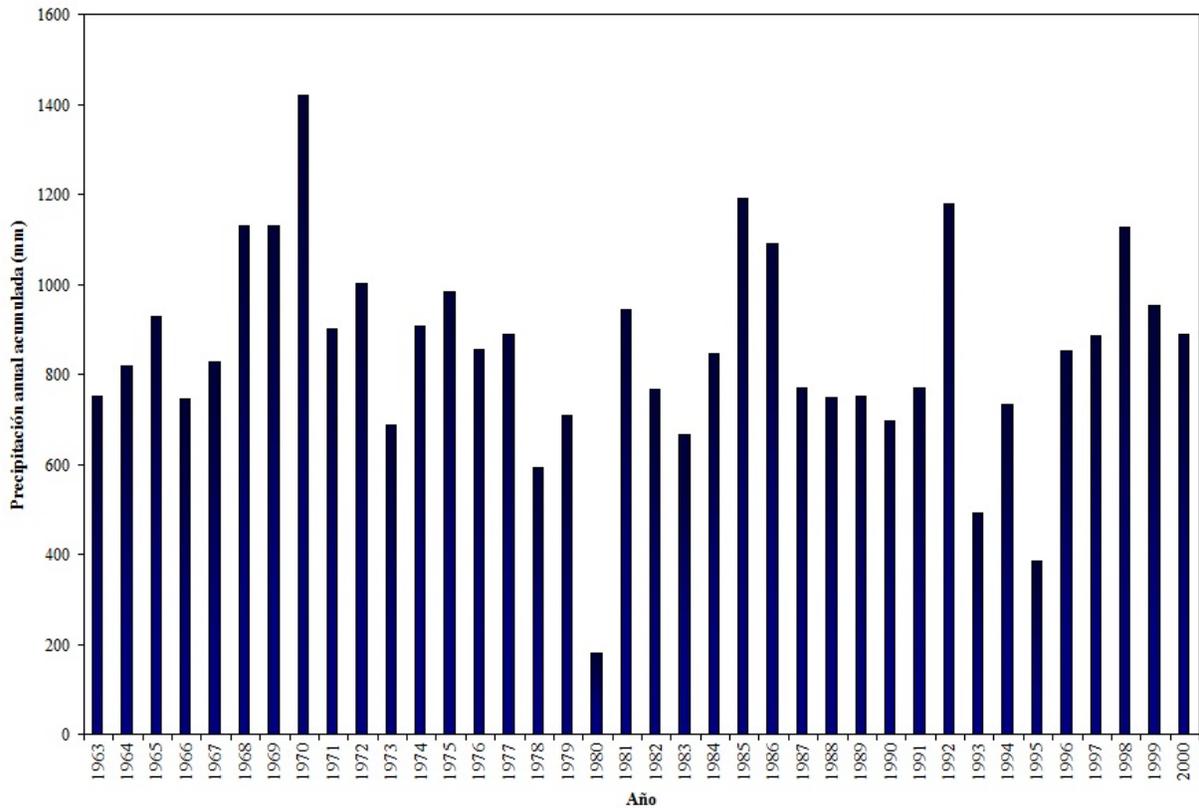


Figura 1.33. Precipitación anual acumulada para la zona sur de Sinaloa.

La precipitación varía para cada zona, ya que en la zona norte oscila en 400 mm la media anual, en la zona centro en 600 mm y en la zona sur 800 mm.

1.4. CONCLUSIONES

La descripción agroclimática del estado de Sinaloa con respecto a las variables climáticas y estadísticas agrícolas evaluadas, muestra que el cultivo de maíz se ha vuelto mas rentable debido al aumento de superficie sembrada y obtención de rendimientos altos; lo cual se debe tanto al grado de tecnificación así como evolución de la agricultura por su potencial productivo desarrollado a través de los años en los diferentes distritos de riego. Es importante destacar que todos los procesos de producción involucrados en ésta actividad así como los recursos naturales existentes para producir lo mejor posible son resultado de las condiciones y diversidad natural que predominan a lo largo y ancho del territorio estatal.

Además, el porcentaje de siniestros por eventos climatológicos o meteorológicos es más frecuente en el DR-076 “Valle del Carrizo” porque esa región es más propensa a heladas que las otras en donde se encuentran los demás distritos de riego, aunque los DR-108 “Elota-Piactla”, DR-109 “Río San Lorenzo” y DR-111 “Baluarte Presido” no presentan siniestros hasta la fecha debido a que son regiones nuevas que se destinan a la producción agrícola. Pero en términos generales hay un 4% en promedio de siniestros para todos los ciclos agrícolas en que se establece el maíz (OI y PV) en Sinaloa.

También es importante señalar que la producción ha incrementado conforme se ajustan o mejoran los paquetes tecnológicos centrados en semilla y tratando de reducir los costos de producción aunado a la mejora de las prácticas agrícolas de acuerdo a los requerimientos de los mercados nacionales e internacionales.

1.4.1. Agradecimientos

La información cartográfica que aquí se presento fue compilada como parte del proyecto *Evaluación del impacto del cambio climático en la productividad de la agricultura de riego y temporal del estado de Sinaloa*, financiado por el Fondo Mixto CONACYT-Gobierno del estado de Sinaloa (Ojeda-Bustamante, 2010).

1.5. LITERATURA CITADA

- CNA-IMTA. 2005.** *Estadísticas agrícolas de los distritos de riego “años agrícolas 1997-2003”*. Ed. Waldo Ojeda Bustamante.
- CONAGUA. 2008.** *Estadísticas del agua en México “Edición 2008”*. SEMARNAT. México, D.F. 228 p.
- CONAGUA. 2009.** *Estadísticas agrícolas de los distritos de riego “año agrícola 2007-2008”*. SEMARNAT. México, D.F. 409 p.
- CONAGUA. 2010.** *Sistema gerencial de estadísticas agrícolas e hidrométricas de los distritos de riego “SISTAG-CNA”*. Responsable: Waldo Ojeda Bustamante. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua “IMTA”. Jiutepec, Morelos, México.
- ESRI. 1999.** *ArcView GIS 3.2*. Environmental Systems Research Institute, Inc.
- IMTA. 2007.** *Extractor rápido de información climatológica “ERIC III”*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, México.
- INEGI. 2005.** *Anuario estadístico del estado de Sinaloa “II conteo de población y vivienda”*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 548 pp.
- Kant, M. 2010.** *SQLite Manager 0.5.12*. Mozilla Firefox Application.
- Ojeda-Bustamante, W. 2010.** *Evaluación del impacto del cambio climático en la productividad de la agricultura de riego y temporal del estado de Sinaloa*. Proyecto FOMIX-C01-98981-CONACYT-Gobierno del estado de Sinaloa.
- SIACON, 2008.** *Sistema de información agroalimentaria de consulta*. SAGARPA. México, D.F.
- SIAP. 2010.** *Sistema de información agroalimentaria y pesquera*. SAGARPA. México, D.F.

CAPÍTULO II

Proyecciones de cambio climático en el estado de Sinaloa

RESUMEN

El planeta Tierra ha experimentado cambios en su clima desde épocas muy remotas y a pesar de que dichos cambios han provocado calentamiento o congelamiento en la atmósfera de éste, lo anterior ha generado como consecuencia que las especies se adapten a dichos cambios para poder sobrevivir. Sin embargo, en el último siglo y en especial, en las últimas tres décadas hasta la fecha se ha observado un aumento en el promedio de la temperatura global por motivo de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Debido a lo anterior, inicialmente se usó el término de calentamiento global para indicar solamente la tendencia en el incremento de la temperatura global de la Tierra. Sin embargo, dado a que el cambio no sólo se presenta en la variable climática de temperatura sino en otras como precipitación, humedad, viento, eventos extremos, etc., se prefiere usar ahora el término de cambio climático. En el presente capítulo se utilizaron dos bases climatológicas de México (elaboradas por el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México “UNAM” para el período base y el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua “IMTA” para el futuro), el período histórico esta comprendido de 1950 a 2000, con base a estos datos se calcularon anomalías y desviaciones estándar para las variables de temperatura y precipitación mediante los modelos de circulación general (MCG) propuestos por el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC), usando posteriormente el método Reliability Ensemble Averaging (REA) para ver el rango de incertidumbre y proyectar dichos resultados en períodos futuros de 30 años en promedio (2011-2040, 2041-2070 y 2071-2098) para los escenarios A1B y A2 en el estado de Sinaloa, obteniendo el comportamiento espacial y temporal de estas variables climáticas en un sistema de información geográfica (SIG) utilizando el software ArcGIS 9.2.

Palabras clave: Escenarios, cambio climático, lluvia, proyecciones, temperatura.

ABSTRACT

The planet Earth has experienced changes in its climate from very remote times and although these changes have caused warming or freezing in the atmosphere of this, the above mentioned has generated as consequence that the species adapt to this changes to be able to survive. However, in the last century and especially, in the last three decades increase has been observed so far in the average of the global temperature for reasons of the emissions of gases of greenhouse effect (GEI). Due to the above mentioned, initially the term of global warming was used to indicate only the tendency in the increment of the global temperature of the Earth. However, given to that the change is not only presented in the climatic variable of temperature but in others as precipitation, humidity, wind, extreme events, etc., is preferred to use the term of climate change now. In the present chapter was used two climatologically data bases of Mexico (elaborated by the Center of Sciences of the Atmosphere of the Autonomous National University of Mexico "UNAM" for the historic period and the Mexican Institute of Technology of the Water "IMTA" for the future), the historical period is of 1950 at 2000, in base to this dates was calculating anomalies and deviations standard for the variables of temperature and precipitation by means of the models of general circulation (MCG) proposed by the Intergovernmental Panel for the Climatic Change (IPCC), using the method Reliability Ensemble Averaging (REA) to see the range of uncertainty and to project this results on the average in future periods 30 years old (2011-2040, 2041-2070 and 2071-2098) for the scenarios A1B and A2 in the state of Sinaloa, obtaining the space behavior and temporal of these climatic variables in a geographical information system (GIS) using the software ArcGIS 9.2.

Key words: Climate change, projections, rain, scenarios, temperature.

2.1. INTRODUCCIÓN

El planeta Tierra ha experimentado diversos cambios climáticos debido a sus procesos naturales internos como las erupciones volcánicas o forzamientos externos provocados por los cambios diferenciales que se presentan en la radiación solar que llega a la Tierra y también por las actividades socioeconómicas (antropogénicas) persistentes que tienen el potencial de cambiar la composición atmosférica o vegetación terrestre. Además, existen evidencias muy sólidas de que los gases de efecto invernadero (GEI) han causado el calentamiento global del planeta a partir de la revolución industrial (IPCC, 2001) y en éste sentido, México ha tomado medidas de inventario y mitigación de GEI principalmente con el inicio de varios estudios sobre los efectos del cambio climático, su impacto y vulnerabilidad en los diferentes sectores productivos como la agricultura, industria, población así como en la planeación y gestión de los recursos hídricos (Martínez y Aguilar, 2008).

A pesar de que existe mucha incertidumbre por los efectos e impacto del cambio climático, el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) ha generado varios estudios convertidos en informes y documentos técnicos, los cuales muestran evidencias contundentes de que el cambio climático es atribuible directa o indirectamente a las actividades humanas de carácter antropogénico en donde la Tierra y su atmósfera se están acoplando al cambio forzado por el incremento de GEI en su balance energético. De acuerdo con el IPCC (2007), el calentamiento del sistema climático es inequívoco y como evidencian los aumentos observados del promedio mundial de la temperatura del aire y del océano, existe una tendencia de incremento de la temperatura a partir de 1910 con respecto al promedio del período correspondiente de 1961-1990 (**Figura 2.1**).

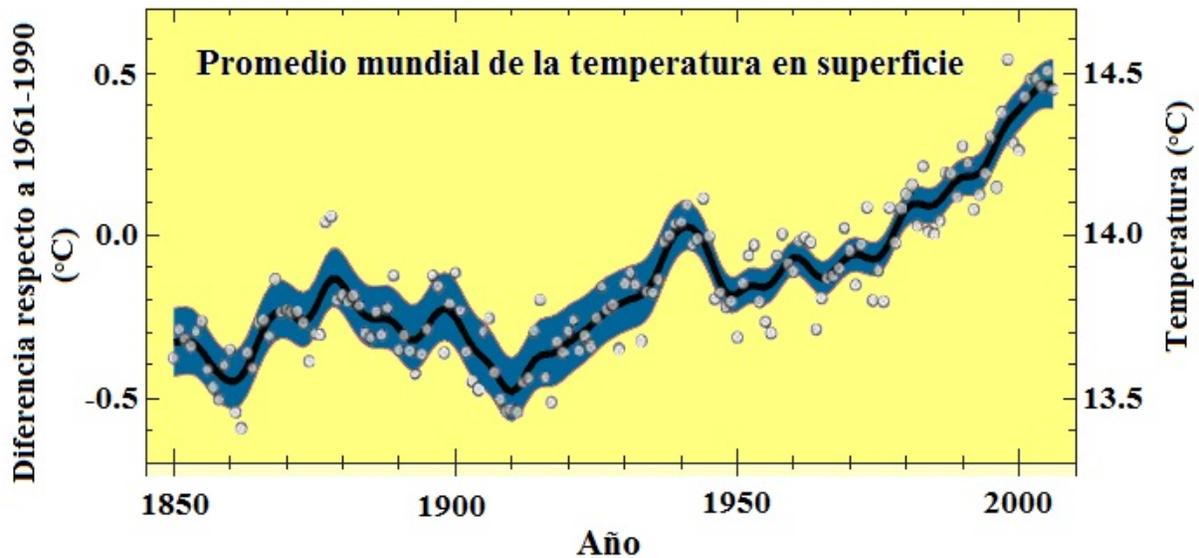


Figura 2.1. Variación observada a nivel mundial del promedio de la temperatura en superficie (IPCC, 2007).

En la figura anterior, las diferencias han sido calculadas respecto de los promedios correspondientes durante el período de 1961-1990 y las curvas aisladas representan los valores promediados decenalmente, mientras que los círculos denotan los valores anuales. Las áreas sombreadas representan los intervalos de incertidumbre estimados a partir de un análisis completo de las incertidumbres conocidas. Actualmente, existe mucha controversia sobre el cambio climático y especialmente sobre la identificación de las causas que lo originan. Lo anterior, es particularmente atribuible a las actividades humanas y en especial, a los diferentes sectores productivos. Sin embargo, el incremento en la concentración de GEI ha intensificado el efecto invernadero de la atmósfera que se considera como uno de los principales causantes del aumento de la temperatura. Como se explica e ilustra en la introducción general de la presente tesis, la Tierra experimenta un efecto natural que provoca que la radiación solar que llega se devuelva lentamente y es mantenida más tiempo junto a la superficie conservando el incremento de ésta pero a continuación se describe de manera breve pero más detalladamente dicho efecto.

2.1.1. Descripción breve del efecto invernadero

La temperatura media de la Tierra había permanecido por muchos años en unos 15 °C pero si la atmósfera no existiera sería de unos -18 °C (Solomon *et al.*, 2007). El efecto invernadero, llamado así por tal similitud con un invernadero de producción agrícola pero en realidad la acción física por la que se produce el efecto invernadero en la atmósfera es totalmente distinto a lo ocurrido en este último. Pues bien, los rayos solares no pasan con igual facilidad por unos gases o por otros; así que mientras el oxígeno (O) y el nitrógeno (N) son transparentes a las radiaciones infrarrojas, los GEI no lo son. Lo anterior se debe a que en el día, los rayos solares que son de onda corta penetran la atmósfera y calientan la Tierra, en la noche la Tierra se enfría pero debido a los GEI, una parte de la radiación de onda larga (infrarroja) que emite la Tierra se refleja a ésta misma por el efecto invernadero de los GEI presentes en la atmósfera. Por lo tanto, se ha registrado un aumento geométrico desde la época preindustrial en la concentración de los GEI [metano (CH₄), bióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O) y ozono (O₃)], los cuales han registrado los valores más altos de la historia durante la década de los 90's (IPCC, 2007). Y también se puede mencionar que las razones más importantes que provocan tales incrementos son: 1) Uso de combustibles fósiles y, 2) Cambio en el uso de las tierras con una gran reducción de la cobertura vegetal, la cual tiene la especial característica de secuestrar el carbono ambiental (IPCC, 1997).

2.1.2. Descripción de los escenarios de cambio climático

En 1996 el IPCC inició el desarrollo de nuevos escenarios de emisiones para actualizar los elaborados en 1992 (conocidos estos últimos como escenarios IS92). Como resultado se elaboraron cuatro familias de escenarios, cada una de ellas fundamentadas en una descripción de las condiciones que posiblemente se encuentre el mundo en un futuro y estos nuevos escenarios son conocidos en términos genéricos como escenarios IE-EE, estos escenarios de emisiones de GEI hasta el año 2100 consideran los cambios posibles en la población global, el grado de globalización, los cambios tecnológicos y sobretodo el grado de uso de fuentes alternas de energía (Nakicenovic y Swart, 2000). A continuación se describe detalladamente cada familia de escenarios:

La familia A1 de escenarios describe un mundo caracterizado por un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su máximo a mediados del presente siglo, empieza a declinar a partir de entonces y adopta tecnologías más eficientes. Y por lo tanto, esta familia de escenarios se subdivide conforme a las tecnologías a usar: intensiva en combustibles fósiles (A1F1), con fuentes alternas de energía (A1T), y con un balance entre diferentes fuentes de energía (A1B).

La familia A2 se refiere a un mundo caracterizado por un incremento continuo de la población, aunque con un crecimiento económico mucho menor que los escenarios A1. Se puede decir que la diferencia es que los escenarios A2 son pesimistas porque se mantiene un elevado aumento de las emisiones de GEI, en particular de CO₂.

La familia B1 describe un mañana en el que la población (semejante a los escenarios A1) alcanza su máximo a mediados del siglo XXI, con un crecimiento económico acelerado pero orientado a los servicios y las tecnologías de información, con un uso menor de materias primas y con un aprovechamiento sustentable de los recursos naturales pero aún sin tomar medidas específicas respecto del clima.

Y por último, la familia B2 describe un porvenir en el que se asumieron previsiones locales y regionales para la protección del ambiente, con un crecimiento de la población menor que en los escenarios A1 y B1. Este escenario se percibe muy optimista por el uso de tecnologías energéticas más eficientes, tal como se han observado las tendencias hasta ahora.

2.2. MATERIALES Y MÉTODOS

En la presente investigación se consolidó y utilizó una base de datos para realizar las proyecciones de cambio climático en el estado de Sinaloa, dicha base de datos se conformó mediante el cálculo de anomalías y desviaciones estándar para las variables de temperatura y precipitación por Ojeda-Bustamante (2010). Por lo tanto, se utilizó la misma metodología que Montero y Pérez (2008), en la cual se implementaron los datos de 16 modelos de circulación general (MCG) más importantes de un total de 23 MCG disponibles en la página Web del IPCC (**Cuadro 2.1**) para realizar el cálculo de las anomalías promedio de precipitación y temperatura para los períodos futuros de 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2098 en los escenarios A1B y A2 con respecto al período base comprendido de 1950-2000.

Cuadro 2.1. Relación de MCG disponibles por el IPCC.

No.	Modelo	Siglas y resolución de malla (nivel global)	País
1	Bjerknes Centre for Climate Research, Bergen Climate Model version 2	*BCCR-BCM2.0 128 long x 124 lat	Noruega
2	Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis, Coupled Global Climate Model 3	*CCCMA-CGCM3 128 long x 124 lat	Canadá
3	Centre National de Recherches Météorologiques, Coupled Model 3	*CNRM-CM3 128 long x 124 lat	Francia
4	CSIRO Atmospheric Research, MK3.5	*CSIRO-MK3.5 192 long x 96 lat	Australia
5	CSIRO Atmospheric Research, MK3	CSIRO-MK3 192 long x 96 lat	Australia
6	Max Planck Institute for Meteorology ECHAM5	*MPI_ECHAM5 192 long x 96 lat	Alemania
7	Meteorological Institute of the University of Bonn, ECHO-G	*MIUB_ECHO_G 96 long x 48 lat	Alemania/Korea
8	National Oceanic Atmospheric Administration Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, CM2.0	*GFDL_CM2.0 144 long x 90 lat	Estados Unidos
9	National Oceanic Atmospheric Administration Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, CM2.1	*GFDL_CM2.1 144 long x 90 lat	Estados Unidos
10	National Institute of Geophysics and Volcanology, ECHAM 4.6	INGV-ECHAM-SXG 320 long x 160 lat	Italia

Continuación del **Cuadro 2.1**.....

11	Institute for Numerical Mathematics, CM3	*INMCM3.0 72 long x 45 lat	Rusia
12	Institute Pierre-Simon Laplace	*IPSL-CM4 96 long x 72 lat	Francia
13	Model for Interdisciplinary Research on Climate Medium Resolution	*MIROC3_2_MEDRES 128 long x 64 lat	Japón
14	Meteorological Research Institute, Coupled Global Climate Model 3	*MRI_CGM2_3_2A 128 long x 64 lat	Japón
15	National Centre for Atmospheric Research Community Climate System Model	*NCAR_CCSM3_0 256 long x 128 lat	Estados Unidos
16	National Centre for Atmospheric Research Parallel Climate Model	*NCAR_PCM1 128 long x 64 lat	Estados Unidos
17	Hadley Centre for Climate Prediction, Met Office	*UKMO_HADCM3 96 long x 73 lat	Inglaterra
18	Hadley Centre Global Environmental Model Met Office	*UKMO_HADGEM1 192 long x 145 lat	Inglaterra
19	Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis, Coupled Global Climate Model 3 T63	CCCMA-CGCM3 128 long x 64 lat	Canadá
20	Laboratory Atmospheric Sciences and Geophysical Institute of Atmospheric Physics, FGOALS1.0_g	IAP-FGOALS 128 long x 64 lat	China
21	National Aeronautics and Space Administration Goddard Institute for Space Studies, Atmospheric-Ocean Model	GISS-AOM 90 long x 60 lat	Estados Unidos
22	National Aeronautics and Space Administration Goddard Institute for Space Studies, Model E20/HYCOM	GISS-EH 72 long x 46 lat	Estados Unidos
23	Model for Interdisciplinary Research on Climate High Resolution	MIROC3_2_HIRES 320 long x 160 lat	Japón

*MCG utilizados para el cálculo de anomalías de precipitación y temperaturas.

Además, es importante mencionar que las diferentes familias de escenarios IE-EE son utilizados por los MCG para generar las proyecciones climáticas espaciales y temporales para cualquier período del presente siglo.

Tal y como se mencionó al principio de este apartado, se trabajó con los escenarios A1B y A2 de acuerdo a la localización geográfica y actividades socioeconómicas desarrolladas en el estado de Sinaloa para proyectar el comportamiento de la precipitación y temperaturas promedio ($T_{\text{máx}}$, T_{med} y $T_{\text{mín}}$) en períodos futuros de 30 años en promedio desplegados en una malla con una resolución de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (latitud y longitud) como se puede observar en la **Figura 2.2** para poder comparar las proyecciones generadas de dichas variables climáticas con el período base de 1950-2000 así como el comportamiento promedio en algunos meses de interés (cuestiones agrícolas) y el cálculo de sus desviaciones estándar.

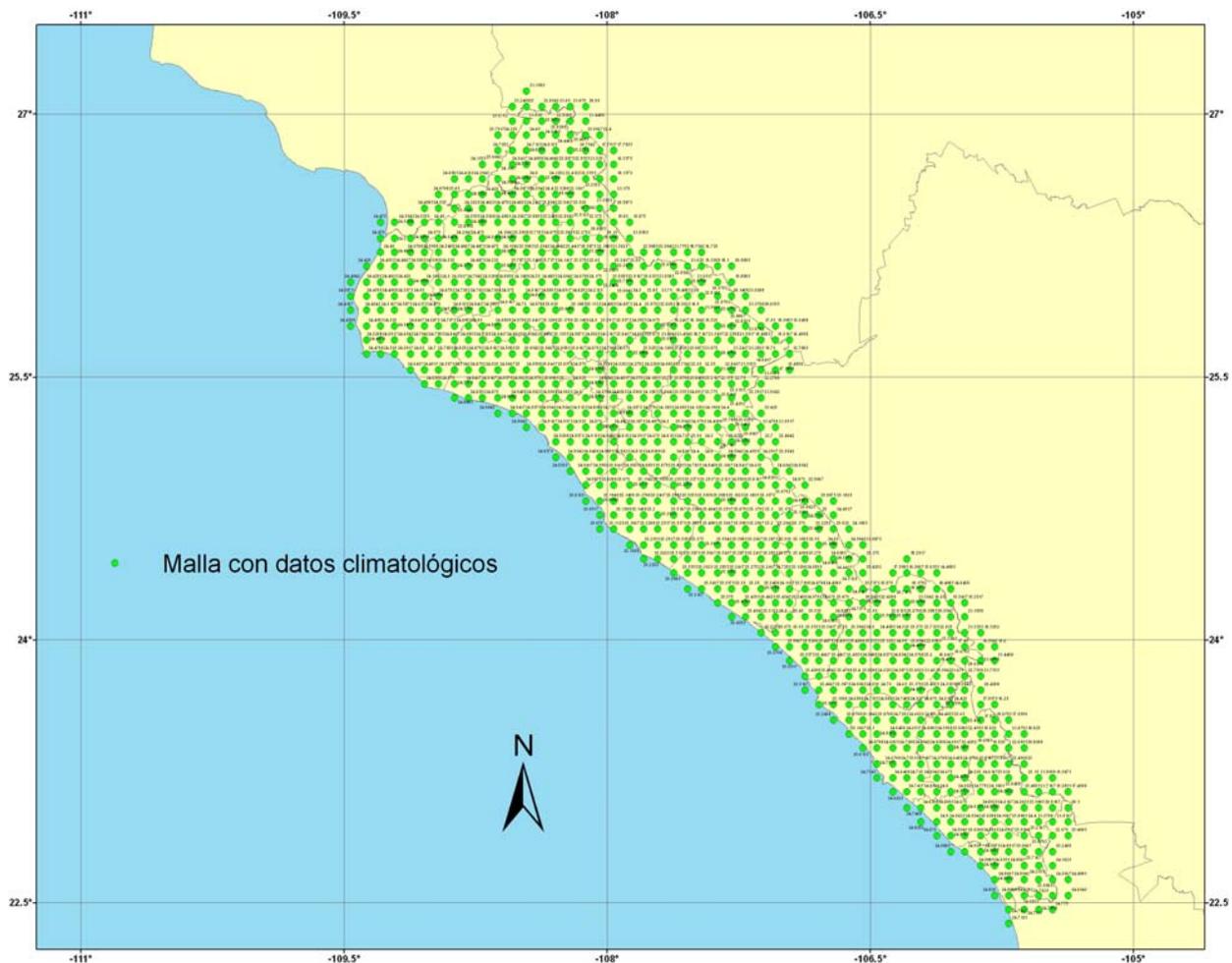


Figura 2.2. Malla con datos climatológicos y anomalías a una resolución de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ de latitud y longitud en Sinaloa.

También se utilizó el método Reliability Ensemble Averaging (REA) para realizar una aproximación simple para el desarrollo de las estimaciones de cambio climático y su rango de incertidumbre (Giorgi y Francisco, 2000; Giorgi y Mearns, 2002).

A continuación se describe el método REA, en donde la aproximación toma como referencia la temperatura, el cambio estimado está dado simplemente por el promedio de ensamble de todas las simulaciones de los modelos con la siguiente ecuación:

$$\overline{\Delta T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1, N} \Delta T_i \quad (1)$$

En donde N es el número total de modelos, la sobreparrilla indica el promedio de ensamble y la Δ indica el cambio simulado por el modelo. Pero en el método REA, el cambio promedio $\tilde{\Delta T}$ está dado por un promedio pesado de los miembros del ensamble, esto se describe de la siguiente manera:

$$\tilde{\Delta T} = \tilde{A}(\Delta T) = \frac{\sum_i R_i \Delta T_i}{\sum_i R_i} \quad (2)$$

En donde el operador \tilde{A} denota el promedio REA y R_i es un factor de fiabilidad del modelo definido como:

$$R_i = [(R_{B,i})^m \times (R_{D,i})^n]^{1/(m \times n)} = \left\{ \left[\frac{\varepsilon_T}{\text{abs}(B_{T,i})} \right]^m \left[\frac{\varepsilon_T}{\text{abs}(D_{T,i})} \right]^n \right\}^{1/(m \times n)} \quad (3)$$

En donde $R_{B,i}$ es un factor que mide la fiabilidad del modelo como una fracción del sesgo del modelo ($B_{T,i}$) en simular la temperatura actual; es decir, entre mayor es el sesgo menor es la fiabilidad del modelo. Por lo tanto, se define el sesgo como la diferencia entre la temperatura media simulada y la observada para el período base de 1950-2000. Además, $R_{D,i}$ es un factor que mide la fiabilidad del modelo en términos de distancia ($D_{T,i}$) entre el cambio calculado por un modelo dado y el cambio promedio del REA, en otras palabras, entre mayor es la distancia menor es la fiabilidad del modelo y por tanto, la distancia se convierte en una medida del grado de convergencia de un modelo dado con los demás. La distancia $D_{T,i}$ se calcula usando un proceso iterativo, el cual comienza dando como primera aproximación un valor para $D_{T,i}$ que es la distancia de cada ΔT_i del cambio promedio del ensamble ΔT de la ecuación 1 y lo cual se describe de la siguiente manera; $[D_{T,i}] = [\Delta T_i - \overline{\Delta T}]$ y se repite la iteración. Comúnmente, este procedimiento converge rápidamente después de varias iteraciones. Por lo tanto, la distancia del promedio del REA es solamente una medida estimada del criterio de convergencia del modelo dado que las condiciones futuras no son conocidas.

Lo anterior no implica que el promedio REA represente la respuesta del clima verdadero a un escenario dado sino que el promedio REA representa la mejor respuesta estimada. Así que los parámetros m y n en la ecuación 3 se pueden usar para pesar cada criterio, los cuales tienen un valor igual a 1 para darle el mismo peso a ambos criterios. También R_B y R_D toman el valor de 1 cuando B y D son menores que ε , respectivamente. La ecuación 3 muestra que una proyección de un modelo es fiable si en ambos el sesgo y la distancia del promedio del ensamble se encuentran dentro de la variabilidad natural, de tal forma que $R_B = R_D = R = 1$.

Pero si el sesgo y la distancia crecen, la fiabilidad de la simulación del modelo dado decrece y por tanto; si R_B y R_D son menores que 1, la ε se cancela en el operador REA y el factor de fiabilidad se reduce al recíproco del producto del sesgo y la distancia. Cabe mencionar que el parámetro ε en la ecuación 3 es una medida de la variabilidad natural en 30 años en promedio de la temperatura y precipitación regional. Para calcular ε , se procede a calcular las series de tiempo de precipitación y temperatura promedio regional observadas en el siglo XX, luego se calculan los promedios móviles de 30 años de las series después de desfasar linealmente los datos para remover las tendencias de escala por siglo y por último se estima ε como la diferencia entre los valores máximo y mínimo de esos promedios móviles de 30 años.

Una vez obtenida la base de datos climatológica con sus respectivas anomalías para las variables de precipitación y temperaturas en los períodos futuros así como escenarios utilizados, se procedió con la generación de los mapas con proyecciones de cambio climático con el método de interpolación Kriging usando el software Surfer 8.0 (Golden Software, 2002) para generar los archivos raster y posteriormente se utilizó la aplicación ArcInfo 9.2 del software ArcGIS 9.2 (ESRI, 2006) para importar el raster y generar el mapa utilizando la herramienta Spatial Analyst de este mismo software. Lo anterior se realizó debido a que el método de interpolación del software Surfer 8.0 es más adecuado que la aplicación de interpolación usada por ArcInfo 9.2.

2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los mapas del estado de Sinaloa, los cuales fueron generados para los escenarios A1B y A2 para los períodos futuros comprendidos de 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2098 de las variables climáticas de precipitación, temperatura máxima, temperatura media y temperatura mínima promedio como producto del período base comprendido de 1950-2000. En el **APÉNDICE II** de la presente tesis se puede consultar la base de datos climatológica con anomalías para los períodos futuros utilizados en ésta investigación así como los mapas de desviaciones estándar, anomalías y promedio de las variables climáticas para diferentes meses.

2.3.1. Período base de precipitación y temperaturas en Sinaloa

En la **Figura 2.3** y **2.4** se presenta la precipitación y temperaturas anuales promedio del período base comprendido de 1950 al 2000 el cual sirvió para fines comparativos con respecto a las proyecciones de cambio climático.

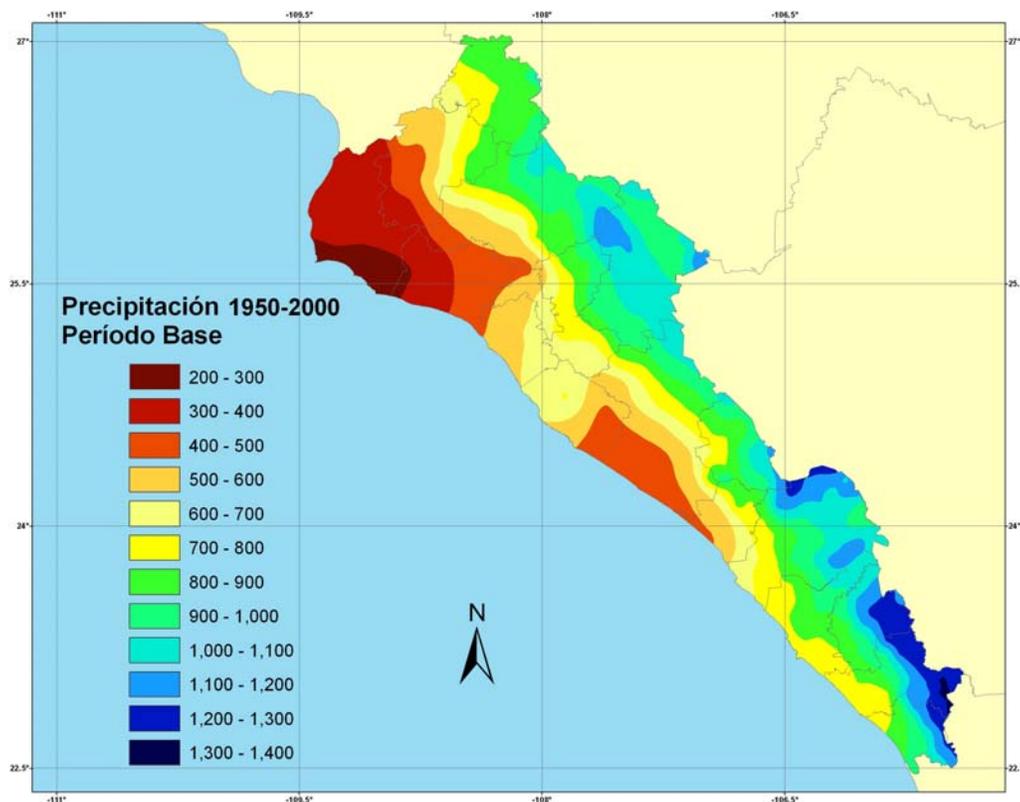


Figura 2.3. Precipitación anual promedio del período base (1950-2000).

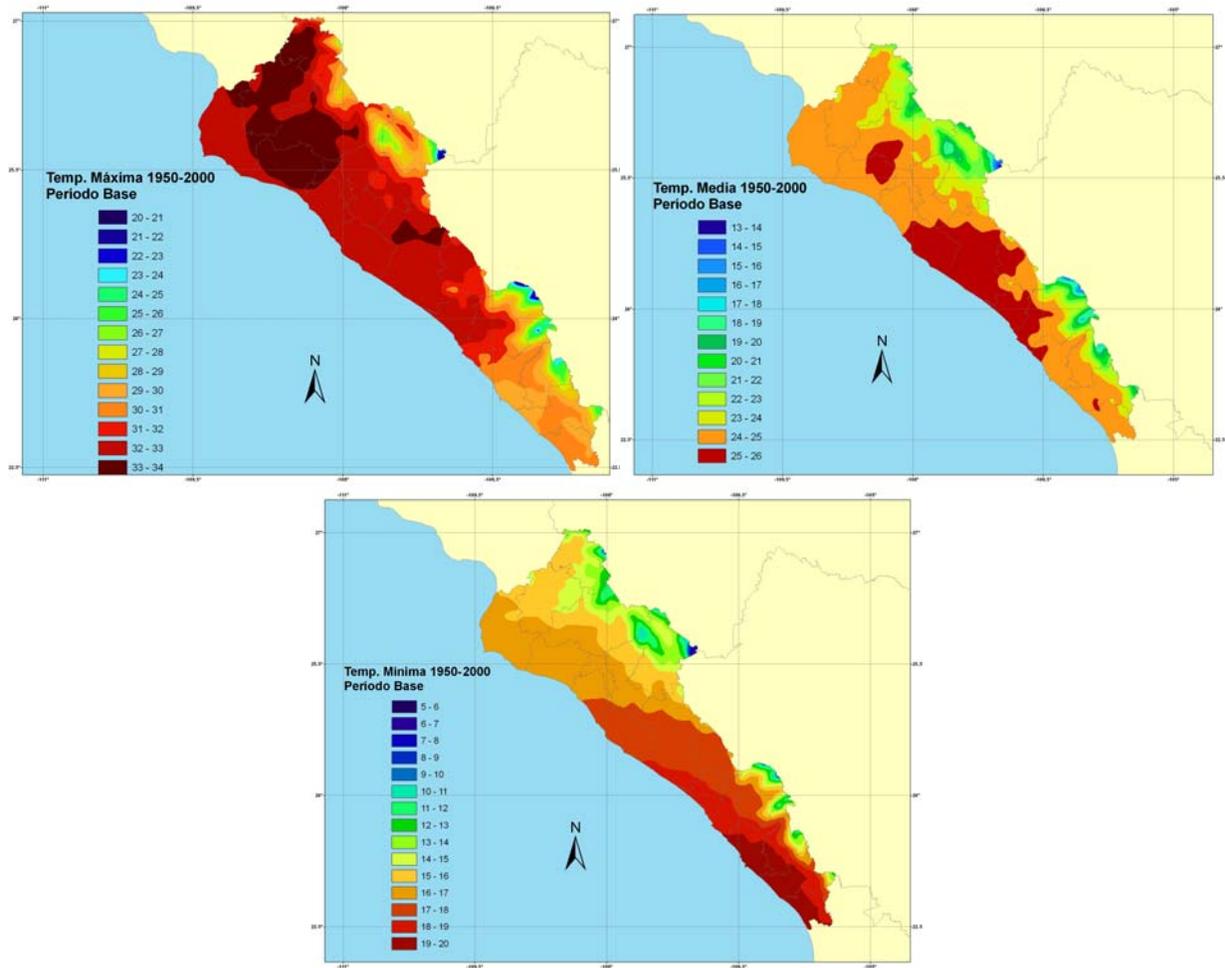


Figura 2.4. Temperatura máxima, media y mínima anual promedio del período base comprendido de 1950-2000.

Se puede observar que la temperatura máxima más alta predomina en la zona norte del estado mientras que la temperatura mínima en la parte de la sierra (zona colindante con Durango y Chihuahua) así como también parte de la zona norte.

2.3.2. Escenario A1B para la precipitación de Sinaloa

De acuerdo con las anomalías calculadas para la precipitación del escenario A1B se generaron proyecciones de cambio climático para los períodos futuros de 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2098 (**Figura 2.5**). Se puede observar que la precipitación se reducirá más en la parte norte junto a la costa del estado en comparación con la parte centro y sur.

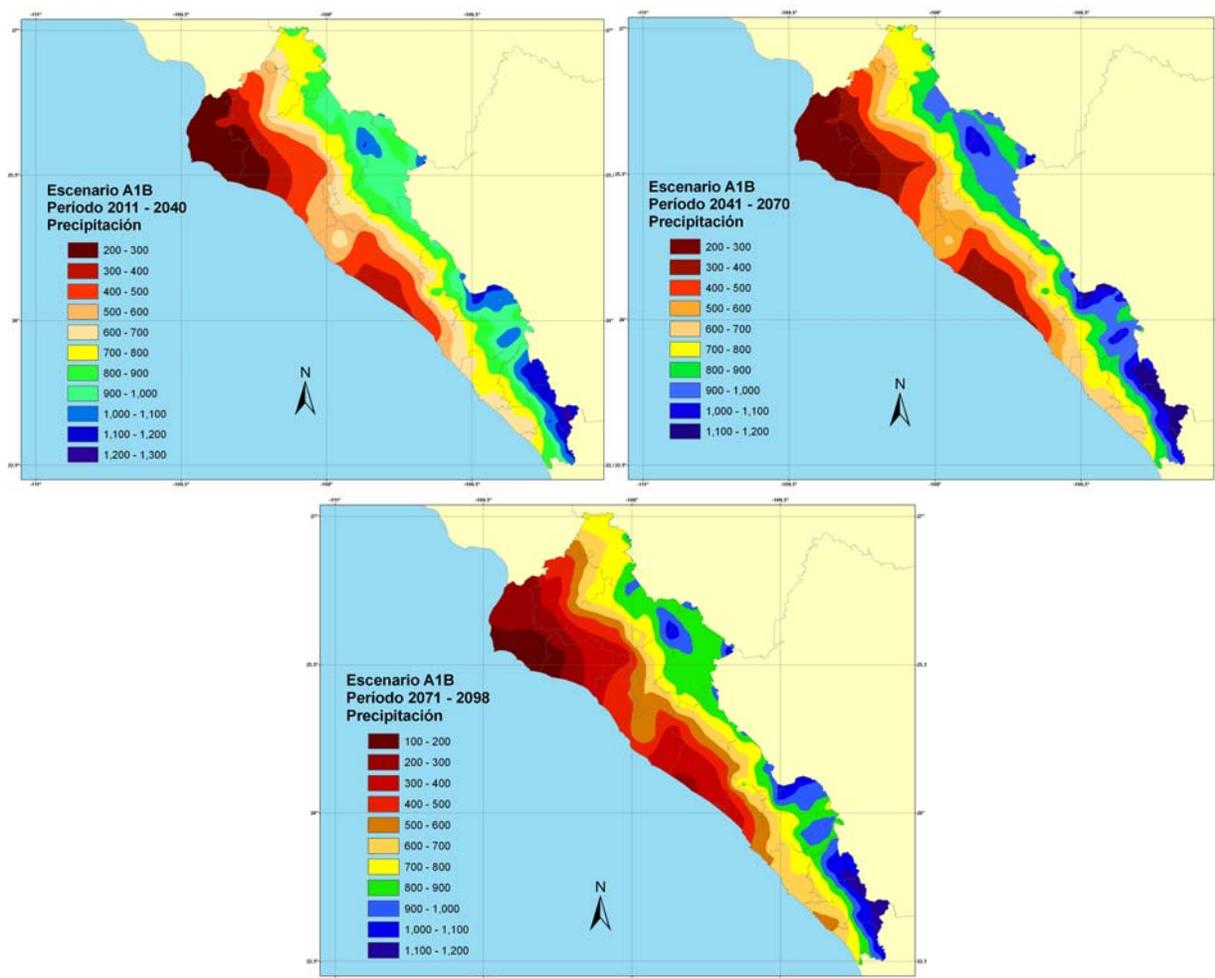


Figura 2.5. Proyección de cambio climático para la precipitación anual promedio del escenario A1B para los períodos de 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2098.

2.3.3. Escenario A1B para la temperatura máxima de Sinaloa

La temperatura máxima bajo cambio climático proyectada para el escenario A1B se observa en la **Figura 2.6**, donde la parte norte será la más caliente para fines de siglo con un aumento promedio de 3 °C.

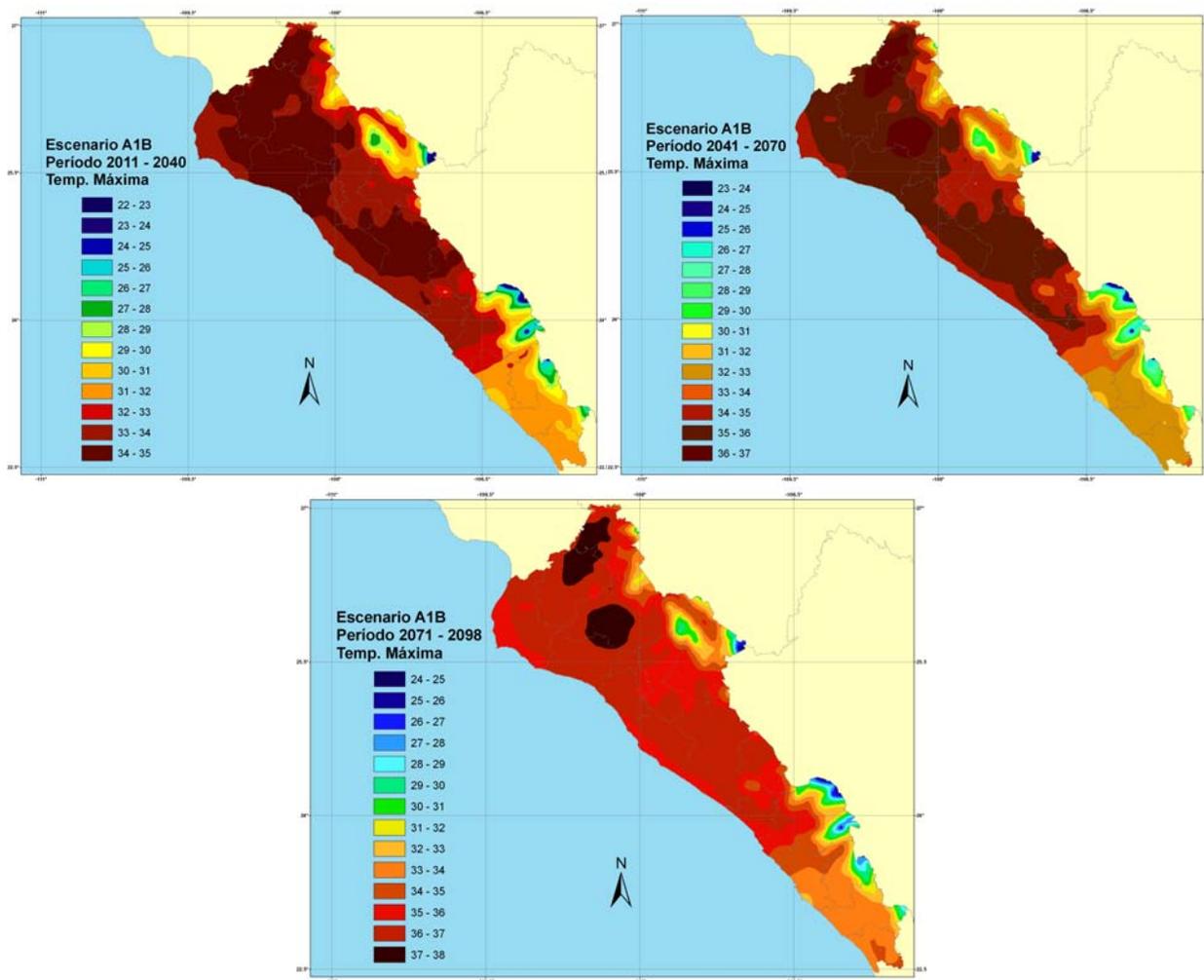


Figura 2.6. Proyección de cambio climático para la temperatura máxima anual promedio del escenario A1B para los períodos de 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2098.

2.3.4. Escenario A1B para la temperatura media de Sinaloa

La temperatura media bajo cambio climático proyectada para el escenario A1B se observa en la **Figura 2.7**, donde la parte norte será la más caliente para fines de siglo.

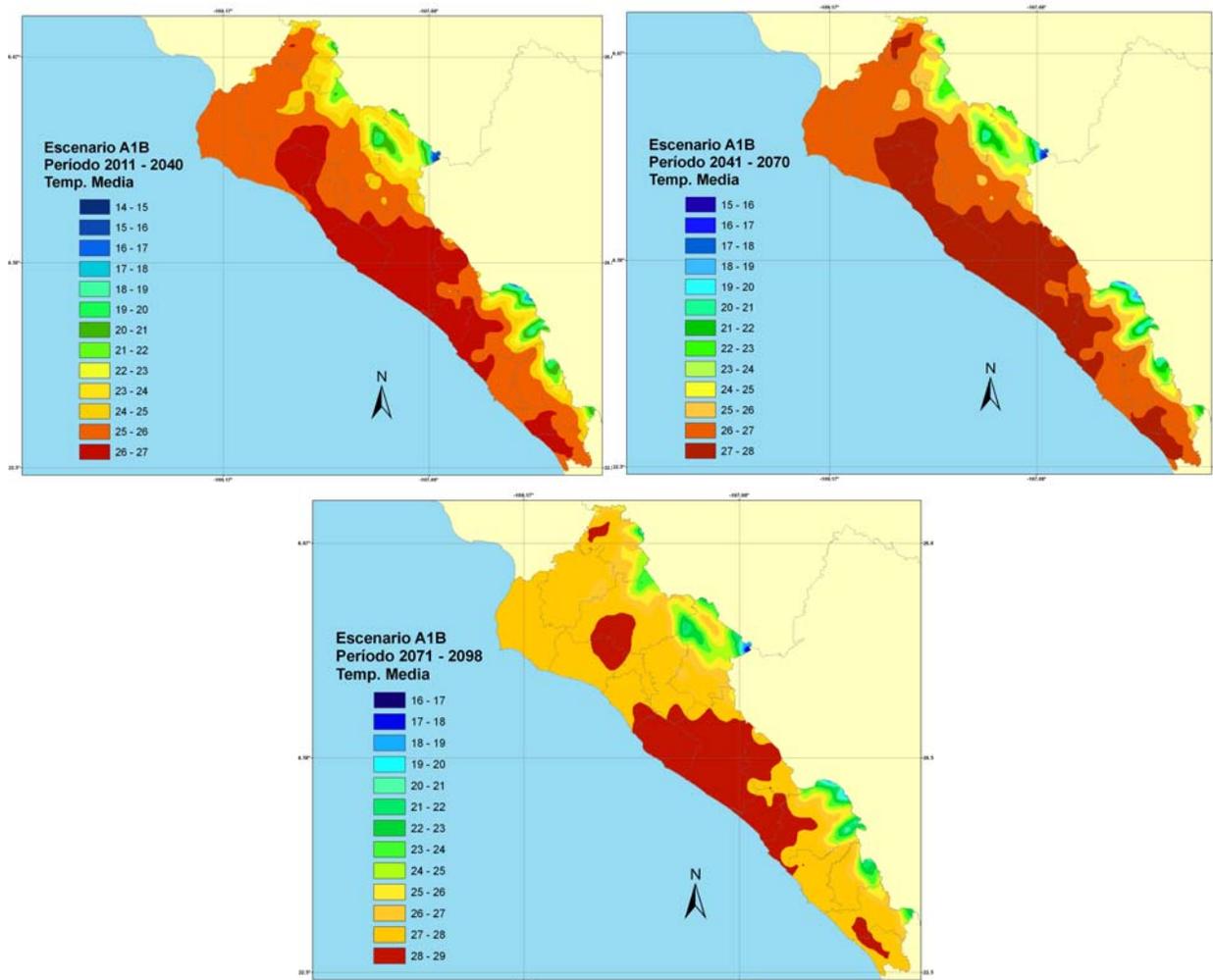


Figura 2.7. Proyección de cambio climático para la temperatura media anual promedio del escenario A1B para los periodos de 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2098.

2.3.5. Escenario A1B para la temperatura mínima de Sinaloa

La temperatura mínima bajo cambio climático proyectada para el escenario A1B se puede observar en la **Figura 2.8**, donde la parte norte será la más caliente y la zona serrana será la más fría para fines de siglo.

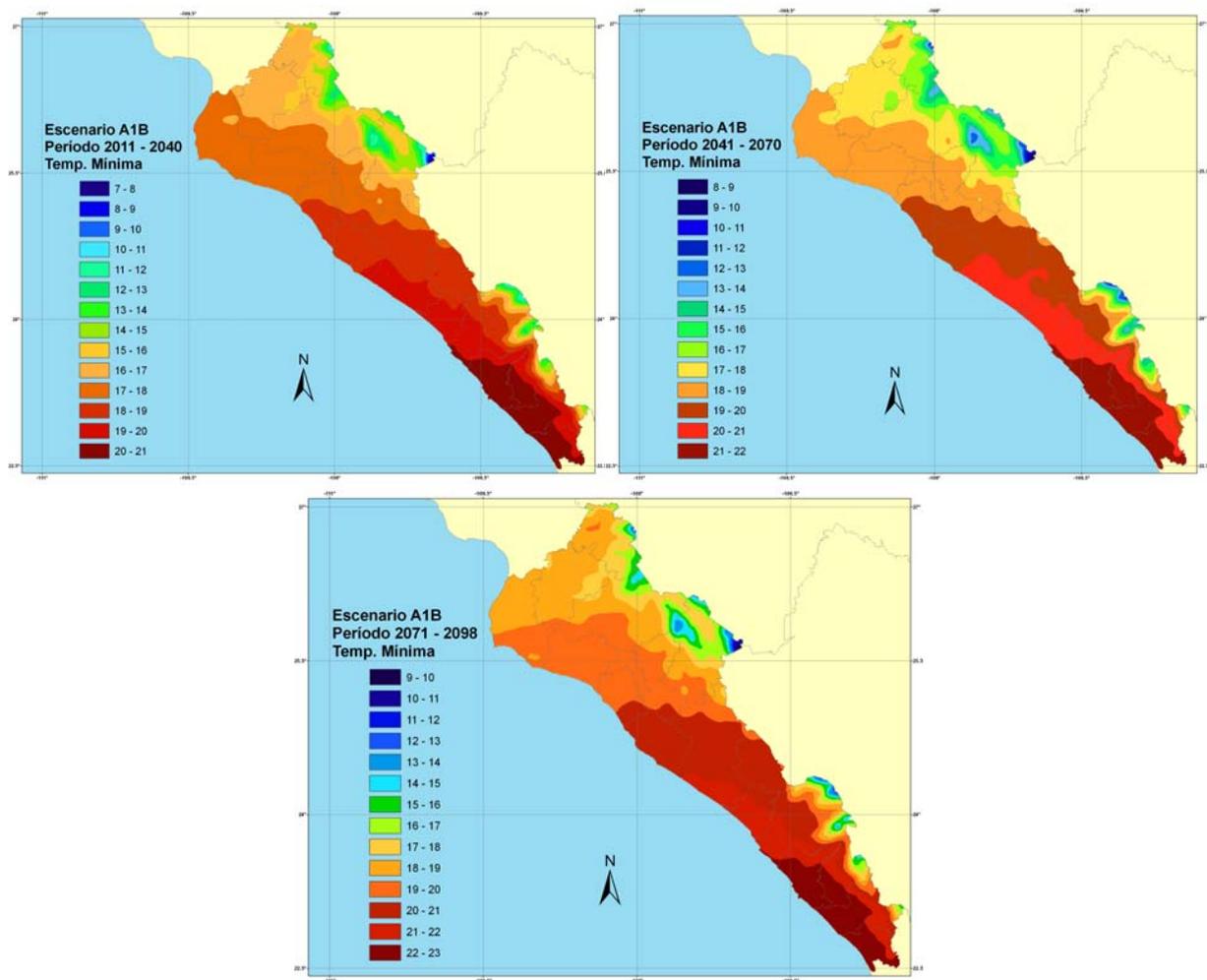


Figura 2.8. Proyección de cambio climático para la temperatura mínima anual promedio del escenario A1B para los periodos de 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2098.

2.3.6. Escenario A2 para la precipitación de Sinaloa

De acuerdo con la literatura, el escenario A2 es más pesimista que el escenario A1B y de acuerdo con las anomalías generadas para la precipitación para los períodos futuros bajo cambio climático para el escenario A2 se puede observar la tendencia en la **Figura 2.9**, donde la parte norte será afectada en gran medida por la reducción de la precipitación para fines de siglo.

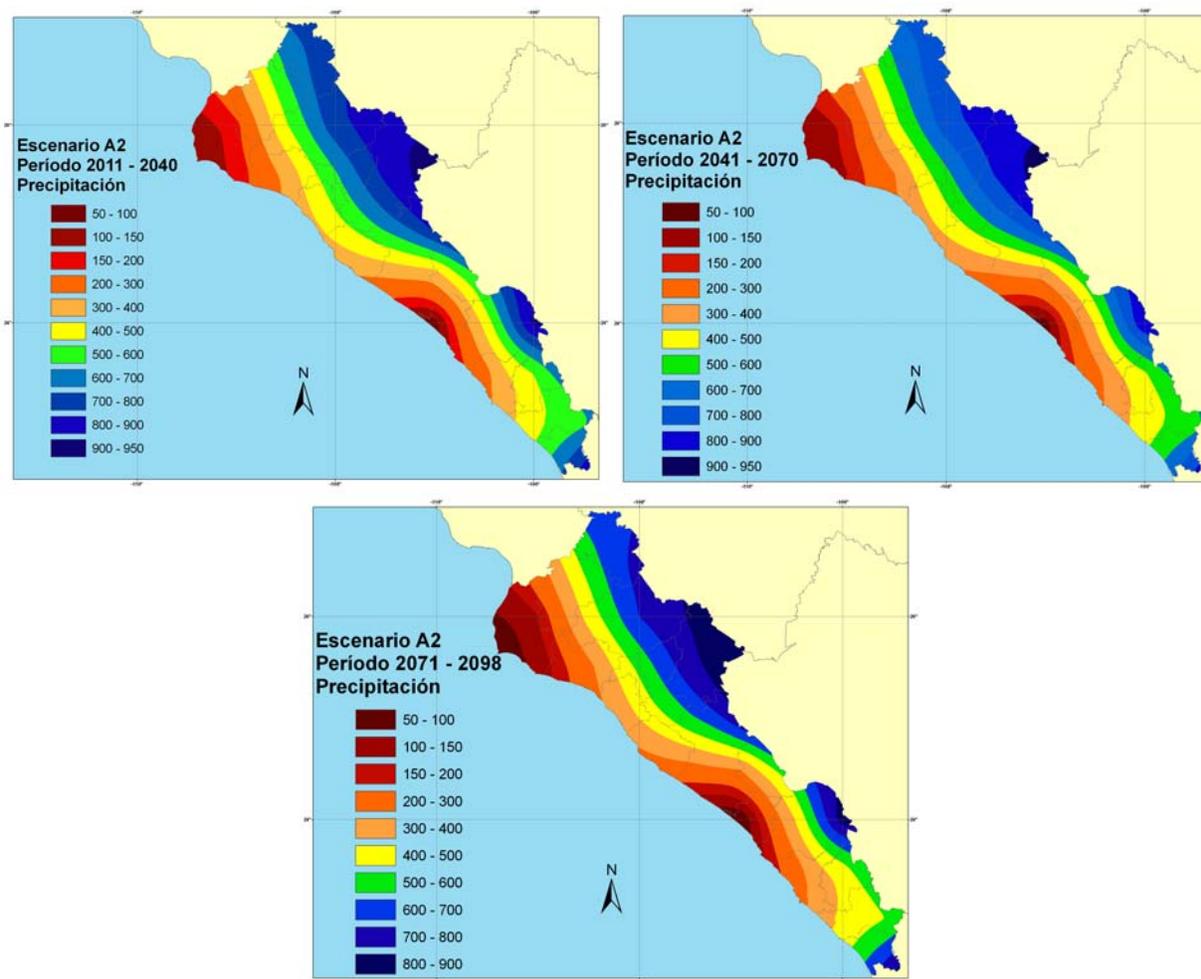


Figura 2.9. Proyección de cambio climático para la precipitación anual promedio del escenario A2 para los períodos de 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2098.

2.3.7. Escenario A2 para la temperatura máxima de Sinaloa

La temperatura máxima proyectada para el escenario A2 se puede observar en la **Figura 2.10**, donde la parte norte será más caliente pero de la parte alta a la baja del territorio.

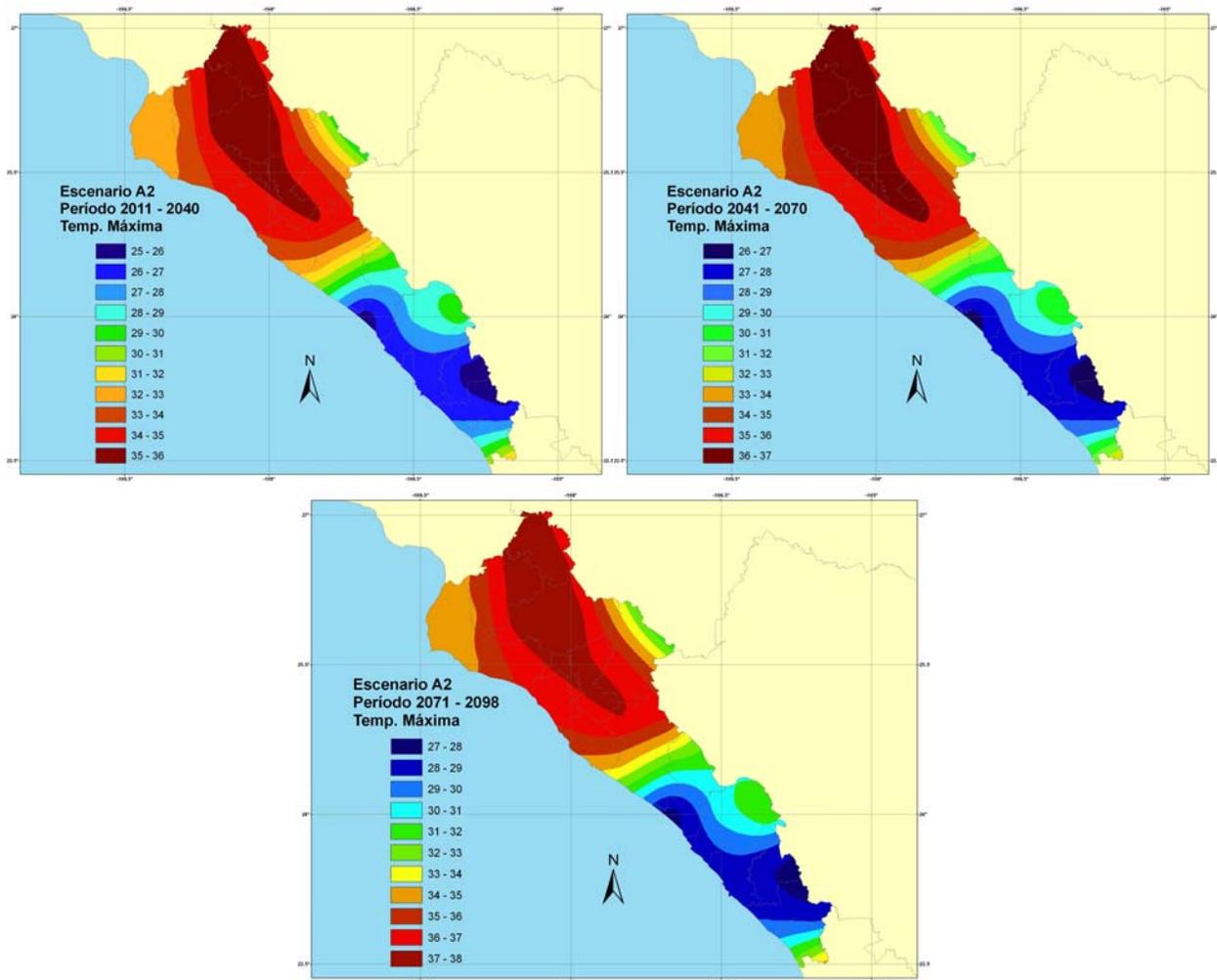


Figura 2.10. Proyección de cambio climático para la temperatura máxima anual promedio del escenario A2 para los períodos de 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2098.

2.3.8. Escenarios A2 para la temperatura media de Sinaloa

La temperatura media bajo cambio climático proyectada para el escenario A2 se observa en la **Figura 2.11**, donde la parte norte será más afectada por el aumento de la temperatura en comparación con la parte sur para fines de siglo.

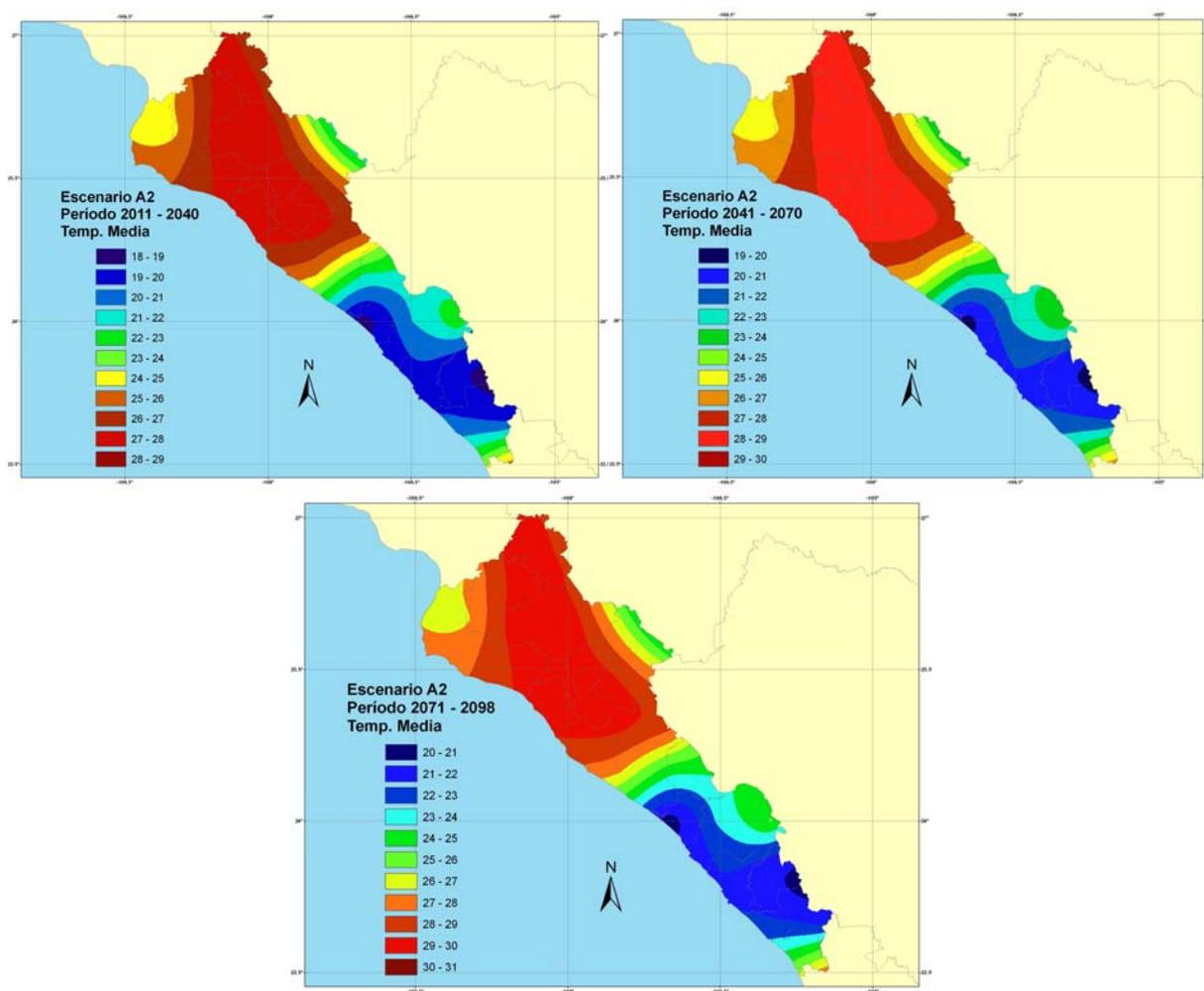


Figura 2.11. Proyección de cambio climático para la temperatura media anual promedio del escenario A2 para los períodos de 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2098.

2.3.9. Escenarios A2 para la temperatura mínima de Sinaloa

La temperatura mínima para el escenario A2 será más baja en la parte sur del estado y en la parte norte será un poco más alta para fines de siglo (**Figura 2.12**). En general, la parte norte será más caliente para los dos escenarios manejados (A1B y A2).

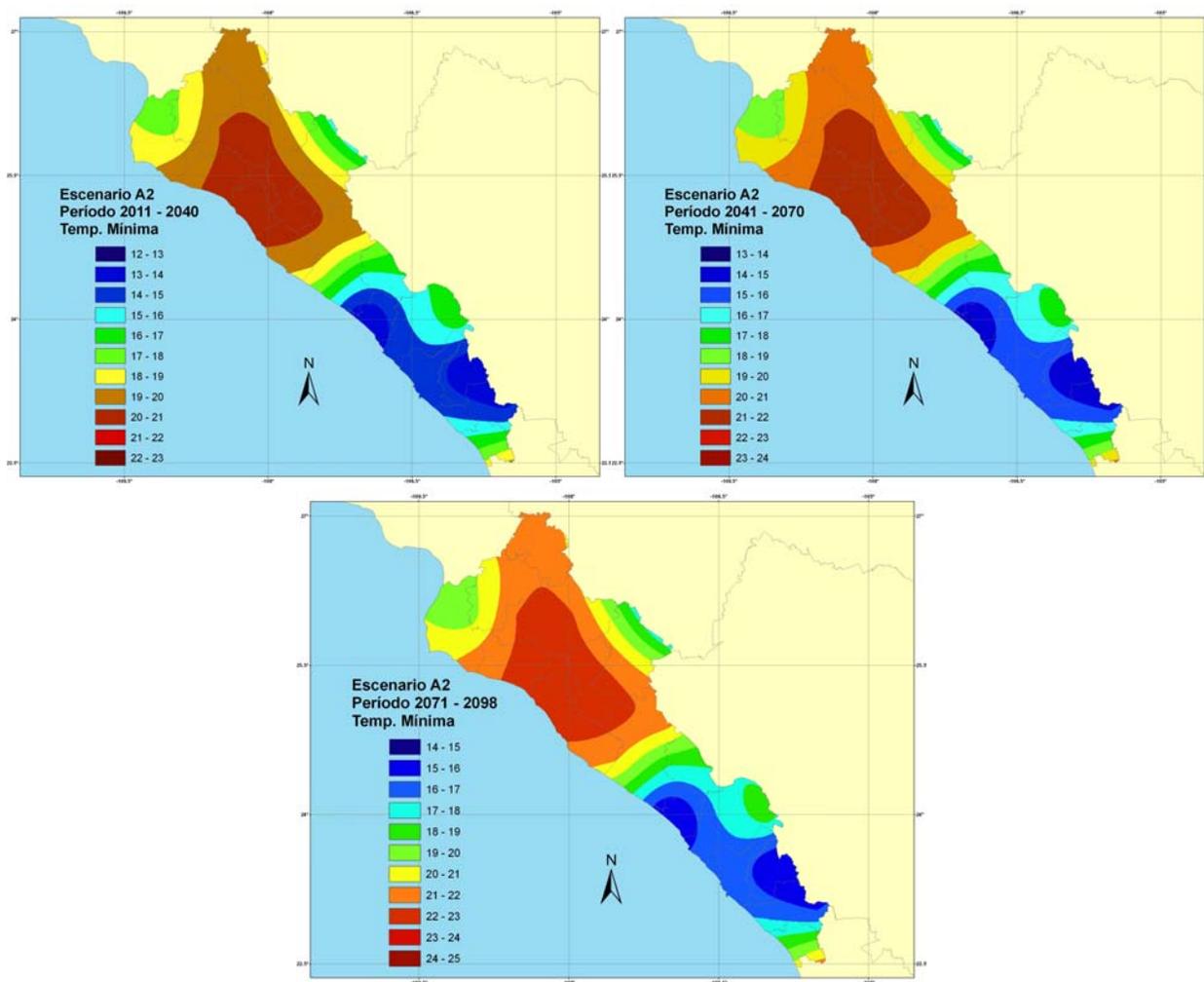


Figura 2.12. Proyección de cambio climático para la temperatura mínima anual promedio del escenario A2 para los períodos de 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2098.

2.4. CONCLUSIONES

La variabilidad climática interanual e interestacional afecta en gran medida el desarrollo y producción tanto de las plantas como de los animales, esto sucede principalmente en las zonas de alta vulnerabilidad que se localizan en las regiones áridas y semiáridas del país. Lo anterior se debe a que México es un país con un gran contraste de climas porque en el norte prevalecen los ambientes secos o muy secos, los cuales están sujetos a sequías recurrentes, y en el sur son húmedos con tormentas tropicales e inundaciones frecuentes.

El escenario A1B es más optimista por considerar el uso de fuentes de energía alternas, la precipitación se reducirá 300 mm y la temperatura aumentará de 3 a 4 °C en promedio para fines del presente siglo, mientras que el escenario A2 se considera más pesimista que el escenario A1B por la constante emisión de GEI, ya que tendrá una reducción de la precipitación entre 500 y 550 mm, y la temperatura aumentará de 5 a 6 °C para fines de siglo. Con la generación de estas bases se podrán realizar estudios enfocados a los sectores de gran interés y llevados más a fondo sobre la presencia de eventos climatológicos y meteorológicos extremos como las sequías, heladas, lluvias torrenciales, tormentas tropicales o huracanes.

Lo anterior obedece a que Sinaloa se ubica en una zona de gran recurrencia de este tipo de eventos naturales por su posición geográfica y lo cual, es de vital importancia hacer énfasis para elaborar un plan estatal ante este tipo de eventos como por ejemplo; plan estatal de sequía, plan estatal de contingencia ambiental o un plan estatal de adaptación y mitigación ante el cambio climático en donde se involucren a las dependencias gubernamentales y organizaciones de estos sectores productivos.

Respecto al sector agrícola, de acuerdo con la información obtenida en el presente capítulo se puede utilizar con la diversidad de modelos generados para simular la respuesta y desarrollo de los cultivos ante el posible cambio climático. Y respecto a esta temática en el sector agrícola, en el **CAPÍTULO IV** de la presente tesis se realizó un trabajo bajo este esquema en el cultivo de maíz (*Zea mays L.*) para todos los distritos de riego del estado de Sinaloa utilizando el modelo AquaCrop.

2.5. LITERATURA CITADA

- ESRI. 2006.** *ArcGIS 9.2.* Environmental Systems Research Institute, Inc.
- Giorgi, F. y Francisco, R. 2000.** *Uncertainties in regional climate change prediction: a regional analysis of ensemble simulations with the HADCM2 coupled AOGCM.* *Climate Dyn.* 16: 182-189.
- Giorgi, F. y Mearns, L. O. 2002.** *Calculation of average, uncertainty range, and reliability of regional climate changes from AOGCM simulations via the Reliability Ensemble Averaging (REA) method.* *J. Climate.* 15: 1141-1158.
- Golden Software. 2002.** *Surfer 8.0.* Surface Mapping System, Golden Software, Inc.
- IPCC. 1997.** *Introducción a los modelos climáticos simples utilizados en el segundo informe de evaluación del IPCC.* Eds. John T. Houghton, L. Gylvan Meira Filho, David J. Griggs y Kathy Maskell. Documento técnico II del IPCC. 52 pp.
- IPCC. 2001.** *Tercer informe de evaluación “La base científica”.* Grupo I del Tercer Grupo Intergubernamental para el Cambio Climático. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.
- IPCC. 2007.** *Climate change 2007: The physical science basis.* Report of the Group I of the IPCC. 987 pp.
- Martínez-Austria, P. F. y Aguilar-Chávez, A. 2008.** *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México “volumen II”.* Instituto Mexicano de Tecnología del agua. Jiutepec, Morelos, México. 118 pp.
- Montero, M. M. J. y Pérez, L. J. L. 2008.** *Regionalización de proyecciones de precipitación y temperatura en superficie aplicando el método REA para México.* In: *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México “volumen II”.* Martínez y Aguilar (eds.). Instituto Mexicano de Tecnología del agua. Jiutepec, Morelos, México. Pp. 11-21.
- Nakicenovic, N. and Swart, R. 2000.** *Special report on emissions scenarios.* Cambridge University Press. Cambridge, U.K. 612 pp.
- Ojeda-Bustamante, W. 2010.** *Evaluación del impacto del cambio climático en la productividad de la agricultura de riego y temporal del estado de Sinaloa.* Proyecto FOMIX-C01-98981-CONACYT-Gobierno del estado de Sinaloa.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Alley, R. B., Berntsen, T., Bindoff, N. L., Chen, Z., Chidthaisong, A., Gregory, J. M., Hegerl, G. C., Heimann, M., Hewitson, B., Hoskins, B. J., Joos, F., Jouzel, J., Kattsov, V., Lohmann, U., Matsuno, T., Molina, M., Nicholls, N., Overpeck, J., Raga, G., Ramaswamy, V., Ren, J., Rusticucci, M.,**

Somerville, R., Stocker, T. F., Whetton, P., Wood, R. A. and Wratt, D. 2007. *Technical summary, climate change 2007: The physical science basis.* Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge and New York.

CAPÍTULO III

Validación del modelo AquaCrop

RESUMEN

El avance y desarrollo de las herramientas computacionales de aplicación agrícola como los modelos de simulación de cultivos son de gran importancia para entender y analizar el funcionamiento de los sistemas de producción agrícola bajo diferentes alternativas de manejo, este tipo de herramientas pueden ser de gran apoyo para la toma de decisiones durante los procesos de planificación, de desarrollo y de producción agrícola. La producción de los cultivos depende de la tasa de desarrollo de los procesos fisiológicos que ocurren en la planta, los cuales dependen en gran medida de las condiciones ambientales presentes. En este contexto, la agricultura es el sector productivo más dependiente de estas condiciones variables porque la demanda evaporativa de la atmósfera define en gran medida la evapotranspiración de los cultivos y por lo tanto, la implantación de modelos en los sistemas computacionales pueden mejorar la toma de decisiones para asignar recursos en tiempo y cantidad, al simular el desarrollo y respuesta de los cultivos. El maíz es el principal cultivo sembrado y de importancia alimenticia en México. Sin embargo, los cambios en los patrones climáticos debido al calentamiento global pueden afectar la productividad del maíz, se requiere del uso de modelos para conocer la respuesta del cultivo bajo diferentes escenarios de manejo y condiciones climáticas. En el presente trabajo se validó el modelo AquaCrop para simular el desarrollo del cultivo de maíz en el norte de Sinaloa, México durante el ciclo agrícola otoño-invierno (OI) 2003-2004, 2007-2008 y 2008-2009, y primavera-verano (PV) 2008 y 2009. Los resultados muestran una buena correlación entre los rendimientos observados y los predichos por el modelo. Se encontró una raíz cuadrada del error medio (*RCEM*) de 0.790 ton ha⁻¹ y un índice de concordancia (*d*) de 0.85. El modelo mostró un buen comportamiento para reproducir la fenología del maíz, lo cual genera condiciones para acoplar la aplicación de insumos con la fenología. Una vez validado el modelo, se simuló respuestas del cultivo bajo condiciones climáticas promedio de la región, diferentes fechas de siembra, densidades de población y niveles de estrés hídrico. Los resultados muestran que el modelo AquaCrop es una alternativa viable para determinar la respuesta de un cultivo bajo diferentes escenarios de manejo del riego y variabilidad climática.

Palabras clave: Modelo de simulación, requerimientos hídricos, *Zea mays* L.

ABSTRACT

The advance and development of computational tools for agricultural applications as the crop simulation models are of great importance to understand and to analyze the operation of the systems of agricultural production under different handling alternatives, this type of tools can be a great support for taking decisions during the planning processes, development and agricultural production. The production of the crops depends on the rate of development of the physiologic processes that happen in the plant, which depend in great measure of the present environmental conditions. In this context, the agriculture is the most dependent productive sector in these variable conditions because the evaporative demand of the atmosphere defines in great measure the evapotranspiration of the crops and therefore, the installation of models in the computational systems can help to take better decisions to assign resources in time and quantity, when simulating the development and response of the crops. The corn is the main sowing crop and nutritious importance in Mexico. However, the changes in the climatic patterns due to the global warming can affect the productivity of the corn, it's required of the use of models to know the response of the crop under different management scenarios and climatic conditions. The present work validated the AquaCrop model to simulate the development of corn in the northern of Sinaloa, Mexico during the agricultural cycle autumn-winter (OI by acronyms in Spanish) 2003-2004, 2007-2008 and 2008-2009, and spring-summer (PV by acronyms in Spanish) 2008 and 2009. The results show a good correlation between the observed yields and the forecasted by yields of model with a root mean square error (*RMSE*) of 0.790 ton ha⁻¹ and index of agreement (*d*) of 0.85. The model showed a good behavior to reproduce the phenology of the corn, that which generates conditions to couple the application of inputs with the phenology. Once validated the model, it was obtained simulated responses of the crop under average climatic conditions, different sowing dates, population's densities and levels of irrigation stress. The results show that the AquaCrop model is a viable alternative to determine the crop responses under different scenarios of management of the irrigation and climatic variability.

Key words: Irrigation requirements, simulation model, *Zea mays* L.

3.1. INTRODUCCIÓN

En el mundo cerca de 80 países, los cuales representan el 40% de la población global, padecen penurias serias por el recurso agua y aproximadamente el 20% de la superficie cultivada mundialmente es bajo riego (Walker y Skogerboe, 1987). La disponibilidad temporal irregular de agua también ha sido un problema mundial aún en zonas de alta precipitación (Wanjura y Upchurch, 2000). En México, las grandes zonas de riego se ubican en regiones áridas y semiáridas que requieren de una adecuada regulación y distribución del agua, por ser un bien escaso y vital para asegurar una producción agrícola económicamente viable (Flores-Gallardo *et al.*, 2006). El maíz es el cultivo de mayor importancia alimentaria para México y uno de los más importantes a nivel mundial. El maíz es cultivado en la mayoría de las zonas de riego y temporal del país, sin embargo, México no es autosuficiente y llega a importar cantidades superiores a los 8 millones de toneladas que corresponden a la tercera parte de sus necesidades del grano de maíz (SIAP, 2008). Varios factores externos e internos complican el abastecimiento de las necesidades de maíz porque la demanda se ha incrementado en la última década para la producción de etanol, el incremento en los costos de producción, la variabilidad climática y la recurrencia de sequías han generado una mayor presión en los recursos hídricos para uso agrícola en México.

El desarrollo y la popularización de las computadoras, ha provisto a los investigadores de herramientas para almacenar grandes volúmenes de datos y realizar un gran número de cálculos, permitiendo el desarrollo de sistemas computacionales para analizar el comportamiento biológico de los sistemas de producción agrícola bajo diferentes escenarios de manejo y condiciones climáticas. Las condiciones ambientales definen la tasa de desarrollo de los organismos. La posible intensificación del ciclo hidrológico por efectos del cambio climático demandará a mediano plazo el uso frecuente de herramientas para conocer con mayor certidumbre la respuesta de los cultivos bajo diferentes escenarios de manejo y condiciones climáticas. Por tal motivo, la respuesta de los cultivos a las variaciones en el déficit hídrico es compleja y por ello, las funciones empíricas han sido la opción más práctica para estimar los rendimientos con base en el nivel de déficit hídrico aplicado durante una parte o en la totalidad del ciclo fenológico del cultivo.

Doorenbos y Kassam (1979) desarrollaron uno de los métodos más utilizados para determinar el rendimiento usando parámetros empíricos obtenidos de experimentos en campo bajo diferentes niveles de estrés hídrico de los cultivos. Los modelos de simulación de cultivos son otra alternativa que usan relaciones con significado físico para predecir el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo porque se conocen las características genéticas y variables climáticas (Monteith, 1996). Además, se deben considerar todos los factores anteriores y las variables climáticas que predominan en la región de interés para el cálculo de los requerimientos de riego del cultivo (González-Camacho *et al.*, 2008). En las últimas décadas se han utilizado diferentes sistemas para simular la respuesta de los cultivos bajo diferentes condiciones de producción a nivel parcelario. El modelo más usado es el DSSAT (Sistema de Soporte de Decisiones para Transferencia Agrotecnológica), que permite estimar los efectos de las diferentes prácticas de manejo y las condiciones ambientales sobre los cultivos (IBSNAT, 2010; Jones *et al.*, 2003). La nueva versión del DSSAT contiene modelos para 17 cultivos, entre ellos el maíz, derivados de los modelos DSSAT-CROPGRO y CERES.

Otros modelos permiten simular el desarrollo del cultivo de maíz como el CERES-Maize (Jones y Kiniry, 1986), EPICphase (Cavero *et al.*, 2000), CropSyst (Stöckle *et al.*, 2003), Hybrid-Maize (Yang *et al.*, 2004) y PASSIM (Keating *et al.*, 2003). Estos modelos sofisticados (Heng *et al.*, 2009), tienen la desventaja de requerir un gran número de parámetros que demandan habilidades avanzadas para su calibración y operación, algunos son específicos por variedad o híbrido, lo que finalmente complica su adopción por los agricultores. En este aspecto, el modelo AquaCrop (Raes *et al.*, 2009) usa un número reducido de parámetros que se pueden aplicar a cualquier región del mundo ajustando solamente el clima, la densidad de población, el tipo de suelo, el requerimiento hídrico, el contenido inicial de agua y la fertilización para la región de interés. El modelo AquaCrop es relativamente nuevo (Raes *et al.*, 2009), de fácil manejo y en la agricultura de México no se ha utilizado con fines de planificación y de simulación de cultivos. Puede utilizarse como herramienta para analizar escenarios agrícolas en diferentes ciclos y localidades (Hsiao *et al.*, 2009; Steduto *et al.*, 2009).

3.2. MATERIALES Y MÉTODOS

3.2.1. Descripción general del modelo

El modelo AquaCrop consta de varias ecuaciones que simulan el crecimiento y el rendimiento del cultivo con base en los datos de clima, la densidad de población, las características genéticas, el tipo de suelo, el nivel de fertilización, la evaporación del suelo, la evapotranspiración y el manejo del déficit hídrico. Para simular el rendimiento del cultivo, la operación y lógica utilizada por el modelo AquaCrop (Raes *et al.*, 2009) se muestran en la **Figura 3.1**.

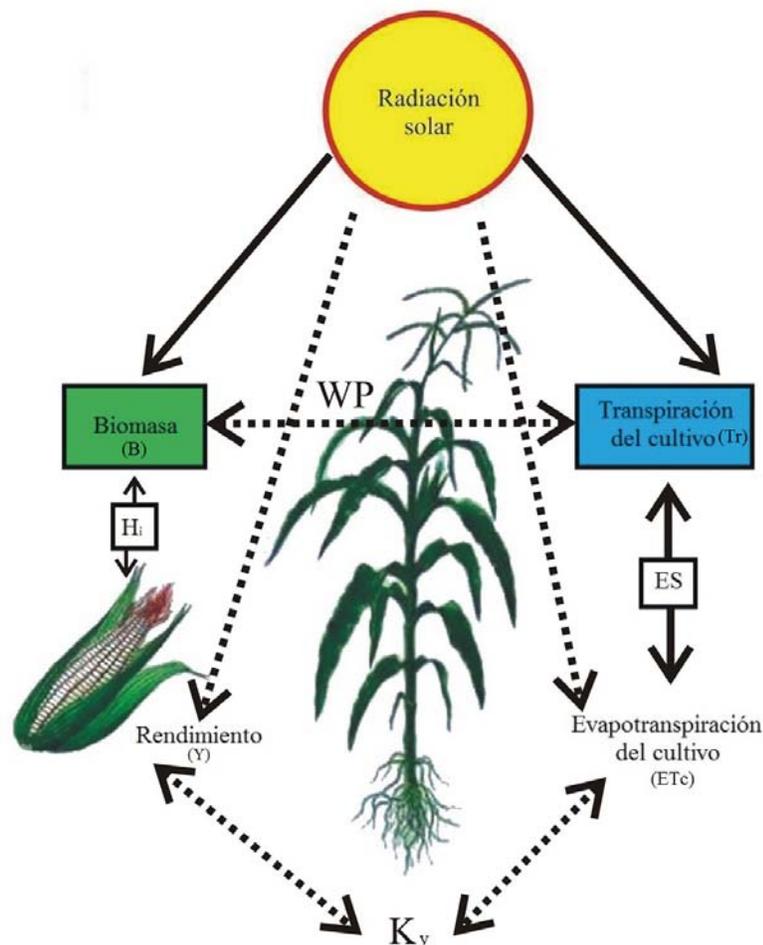


Figura 3.1. Operación y lógica en la simulación utilizada por el modelo AquaCrop en donde se involucran dos procesos: separación de la evaporación del suelo (ES) y la transpiración (Tr), y el rendimiento (Y) de la biomasa (B) e índice de cosecha (H_i). En donde WP es la productividad del agua y K_y es un factor de proporción entre el rendimiento perdido y la reducción en evapotranspiración (adaptada de Raes *et al.*, 2009).

El modelo AquaCrop requiere de la siguiente información meteorológica a nivel diario, decenal o mensual: temperatura máxima (T_{\max}), temperatura mínima (T_{\min}), precipitación (Pp), evapotranspiración de referencia (ETo) y además, considera una concentración media anual de CO₂ en la atmósfera de 369.47 ppm para el año 2000 de acuerdo con las mediciones realizadas por el observatorio ubicado en Manua Loa, Hawai. Sin embargo, los valores de la concentración del CO₂ pueden actualizarse de acuerdo a los escenarios de emisiones a considerar en el futuro.

La producción de biomasa y de grano depende de varios parámetros del cultivo: conductancia estomatal, senescencia del dosel vegetal, productividad del agua e índice de cosecha. La ecuación general para estimar el rendimiento del cultivo Y se presenta en la ecuación (1):

$$Y = B * H_i \quad (1)$$

En donde B es la biomasa del cultivo y H_i es el índice de cosecha que depende del tipo y variedad del cultivo.

En la simulación del cultivo se genera la posible respuesta al estrés térmico que pueda presentarse durante su ciclo de desarrollo, el cual es estimado de acuerdo a las condiciones de clima a partir de la fecha de siembra y se usa especialmente para el período de polinización. El modelo considera tres tipos de estrés hídrico: 1) inhibición de la expansión del dosel vegetal, 2) aceleración de la senescencia del dosel vegetal, y 3) cierre estomacal. Para cuantificar el impacto del estrés hídrico para cada respuesta el modelo considera una curva que se activa cuando se alcanzan límites establecidos para la humedad del suelo.

Según Heng *et al.* (2009) el modelo AquaCrop es robusto para evaluar el efecto del estrés hídrico en el rendimiento de los cultivos durante varias etapas de desarrollo del cultivo, por lo que es útil para planear y evaluar estrategias bajo diferentes condiciones de disponibilidad de agua, sistema de riego, tipo de suelo y fecha de siembra.

El modelo AquaCrop simula el crecimiento del dosel vegetal asumiendo dos casos para el crecimiento exponencial que se presenta para la condición $CC \leq CC_x/2$ utilizando la ecuación 2 y para la senescencia exponencial para la condición $CC > CC_x/2$ utilizando la ecuación 3.

$$CC = CC_o e^{tCGC} \quad (2)$$

$$CC = CC_x - 0.25 \frac{(CC_x)^2}{CC_o} e^{-tCGC} \quad (3)$$

En donde CC es la cobertura dosel vegetal a tiempo t transcurrido (expresado en días o °D), CC_o es la cobertura inicial del dosel ($t=0$), CC_x es la máxima cobertura del dosel vegetal, CGC es el coeficiente de crecimiento del dosel vegetal por unidad de tiempo para el cultivo considerado. El modelo AquaCrop ajusta el crecimiento del dosel vegetal con respecto a la densidad de población (plantas ha^{-1}). En virtud que se carece de información experimental de cobertura del dosel vegetal requerida por el modelo AquaCrop, es posible estimarla a partir de datos de índice de área foliar (IAF), para el caso de maíz el modelo AquaCrop tiene implementada la siguiente ecuación:

$$CC = 1.005[1 - \exp(-0.6 * IAF)]^{1.2} \quad (4)$$

El cálculo de los grados día (°D) se realiza a nivel diario de acuerdo a la ecuación 5.

$$\begin{aligned} \text{°D} &= T_a - T_{c-\min}, T_a > T_{c-\min} \\ \text{°D} &= 0, T_a \leq T_{c-\min} \end{aligned} \quad (5)$$

La temperatura promedio T_a se estimó de acuerdo al método 3 del Aquacrop dada por las siguientes ecuaciones.

$$\begin{aligned} T_a &= \frac{T_x + T_n}{2}, T_x < T_{c-\max} \\ T_a &= \frac{T_{c-\max} + T_n}{2}, T_a \geq T_{c-\max} \\ T_a &= \frac{T_{c-\min} + T_n}{2}, T_x \leq T_{c-\min} \end{aligned} \quad (6)$$

Donde $T_{c-\min}$ y $T_{c-\max}$ son las temperaturas mínimas y máximas del aire, respectivamente, dentro del cual la planta se desarrolla. T_x y T_n son las temperaturas máxima y mínima del día registradas.

Aunque el maíz puede sobrevivir a temperaturas adversas en el rango de 0 a 45 °C, las temperaturas de desarrollo que asume el modelo AquaCrop para estimar los °D en maíz son 10 y 30 °C, para T_{c-max} y T_{c-min} , respectivamente.

3.2.2. Descripción de la zona y parcelas de validación

La validación se realizó en el área de influencia del distrito de riego 075 “Río Fuerte” (DR-075), ubicado en el norte de Sinaloa, México con unas coordenadas geográficas de 25° 48.89’ N, 109° 1.53’ W y con una altura promedio de 20 m. Para fines de validación del modelo se utilizaron los datos del experimento realizado por Ojeda-Bustamante *et al.* (2006) en donde se midieron las láminas de riego aplicadas al cultivo de maíz variedad Pioneer 30G54 en el ciclo otoño-invierno (OI) 2003-2004 para una superficie de 10 ha⁻¹, una textura franco arcillosa, una fecha de siembra del 24 de noviembre de 2003, 1451.1 °D con unas temperaturas umbrales de 10-30 °C a madurez en 179 días después de la siembra, una densidad de población de 95,000 plantas ha⁻¹ y un rendimiento de 10.7 t ha⁻¹. En el **Cuadro 3.1** se muestran los datos de las láminas aplicadas por riego en surcos en el experimento.

Cuadro 3.1. Láminas de riego aplicadas en el experimento de Ojeda-Bustamante *et al.* (2006).

Numero de riego	Intervalo (días)	Días después de siembra	°D acumulados a partir de la siembra ($\Sigma^{\circ}D$)	Lámina neta (mm)	Lámina bruta (mm)
1	0	-20	-240	141.0	235.0
2	84	64	424.72	44.5	74.2
3	34	98	580.13	73.7	122.8
4	23	121	778.48	86.1	143.4
5	30	141	980.00	96.9	161.5
Total	-	-	-	442.2	736.9

Cabe señalar la gran importancia de implementar el modelo AquaCrop en el norte de Sinaloa, debido a que se ubica en uno de los distritos de riego (DR-075) más grandes en cuanto a superficie y el maíz ocupa el 57% de la superficie anual cosechada en este distrito y actualmente (año agrícola 2008-2009), el rendimiento promedio registrado de maíz bajo condiciones de riego en el DR-075 fue de 10.5 t ha⁻¹ y a nivel nacional en 9 t ha⁻¹ (CONAGUA, 2009).

Para el año agrícola en que se estableció el experimento, el rendimiento osciló en las 8.71 t ha⁻¹ (CONAGUA, 2005) mientras que en el experimento se obtuvo 10.7 t ha⁻¹. Una de las características importantes de los datos obtenidos es que se contó con una estación meteorológica Bowen dentro de la parcela donde se estableció el experimento para monitorear las variables climáticas en tiempo real y realizar las estimaciones de la evapotranspiración de referencia (ET_o) con fines de obtener los requerimientos de riego oportunamente.

Posteriormente, se contó con la participación de productores agrícolas de la región durante dos ciclos agrícolas OI y PV, estableciendo las parcelas a nivel comercial durante los años agrícolas 2007-2008 y 2008-2009. En el **Cuadro 3.2** se muestran los datos generales que corresponden a cada parcela establecida. Los riegos fueron estimados usando el Sistema de Pronóstico del Riego en Tiempo Real “SPRITER” que ha sido previamente validado para la zona de estudio (Ojeda-Bustamante *et. al.*, 2007).

Cuadro 3.2. Datos de campo correspondientes a suelo y cultivo para los diferentes ciclos agrícolas OI y PV de validación.

Parcela	Ciclo agrícola	Superficie (ha)	Fecha de siembra	Variedad	Densidad de población (plantas ha ⁻¹)
Parcela 07-08	OI	10	14-dic	Bisonte	133,333
Parcela 08-09	OI	20	05-dic	Cebú	106,666
Parcela 2008	PV	10	25-feb	Bisonte	100,000
Parcela 2009	PV	10	29-feb	Pantera	93,333

3.2.3. Descripción de los parámetros conservativos del modelo AquaCrop

Una vez obtenidos los datos de las parcelas de validación, se utilizaron los parámetros conservativos del modelo AquaCrop (**Cuadro 3.3**) para fines de simulación del rendimiento del cultivo de maíz, dichos parámetros fueron reportados para tres experimentos de maíz realizados en España y Estados Unidos (Hsiao *et al.*, 2009). Lo anterior, se utilizó como referencia para adaptarlos y realizar la adecuada validación del modelo en las condiciones climáticas del norte de Sinaloa, así como características genéticas de las variedades de maíz utilizadas.

Cuadro 3.3. Parámetros conservativos del modelo AquaCrop basados en resultados de Hsiao *et al.* (2009).

Descripción	Valor	Unidad o medida
Temperatura base	8	°C
Temperatura máxima	30	°C
Dosel vegetal al 90% emergido (CC_o)	6.5	cm ²
Coefficiente de crecimiento del dosel (CGC)	1.3%	Incremento relativo del CC por grado día desarrollo (°D)
Máximo dosel vegetal (CC_x)	-	En función de la densidad de plantas
Coefficiente del cultivo para transpiración con un dosel vegetal = 100%	1.03	Transpiración completa del dosel relativo a la ET_o
Coefficiente de declinación del cultivo antes de CC_x	0.3%	Declinación por día de las hojas envejecidas
Coefficiente de declinación (CGC) hasta senescencia	1.06%	Decremento del CC relativo a CC_x por °D
Productividad del agua (WP), normalizado al año 2000	33.7	g (biomasa) m ⁻² , en función del CO ₂ atmosférico
Umbral de crecimiento de hoja p-alto	0.14	Como fracción del agua total disponible (TAW), sobre este crecimiento de hoja es inhibido
Umbral de crecimiento de hoja p-bajo	0.72	El crecimiento de la hoja se detiene completamente a este p
Coefficiente de estrés de crecimiento de la hoja para la formación de curva	2.9	Curva moderadamente convexa
Umbral de conductancia estomatal p-alto	0.69	Sobre esto, los estomas empiezan a cerrarse
Coefficiente de estrés de los estomas para la formación de la curva	6.0	Curva altamente convexa
Coefficiente de estrés de senescencia p-alto	0.69	Sobre esto, la senescencia del dosel inicia más rápido
Coefficiente de estrés de senescencia para la formación de la curva	2.7	Curva moderadamente convexa
Índice de cosecha (Hi) como referencia	48%	Común para buena condiciones
°D desde el 90% de emergencia al inicio de la antesis	800	Puede ser menor para cultivos de ciclo corto
Duración de la antesis en °D	190	-
Coefficiente de inhibición del crecimiento de las hojas con respecto al Hi	7.0	Hi aumentado por inhibición del crecimiento de las hojas en la antesis
Coefficiente de inhibición de los estomas con respecto al Hi	3.0	Hi reducido por inhibición de los estomas en la antesis
°D totales desde emergencia a maduración	1510-1840	Menos para cultivos de ciclo corto

3.2.4. Análisis de datos y tratamientos simulados

Una vez realizada la validación del modelo AquaCrop mediante las simulaciones correspondientes, se realizaron los análisis estadísticos de los datos observados en campo y simulados con los parámetros conservativos utilizados por el modelo mediante los siguientes análisis: raíz cuadrada del error medio (*RCEM*) de acuerdo con Nash y Sutcliffe (1970) y el índice de concordancia (*d*) de acuerdo con Willmott (1982), calculados con las siguientes ecuaciones:

$$RCEM = \sqrt{1/(N) \sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2} \quad (7)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (8)$$

En donde S_i y O_i son los valores simulados y observados, respectivamente, N es el número de observaciones realizadas y \bar{O}_i es la media de los valores de O_i .

De acuerdo con Heng *et al.* (2009) es viable utilizar las ecuaciones anteriores debido a lo siguiente: la *RCEM* (ecuación 7) representa una medida global entre los valores observados y simulados, es decir, un indicador sintético de la incertidumbre absoluta. Debido a que toma las mismas unidades de la variable simulada y por consiguiente, el valor más cercano a cero indica el mejor desempeño en la simulación. El valor *d* (ecuación 8) varía de 0 a 1.0 y en ambos análisis se aplicaron secuencialmente a los datos observados y simulados.

Los tratamientos simulados de crecimiento del cultivo se realizaron generando calendarios de riego bajo el sistema de riego por gravedad con las siguientes características hídricas del suelo: 1) 100% de superficie de suelo húmedo, una profundidad de mojado de 1 m y un 42% de contenido de humedad en la zona de raíces; 2) 80% de superficie de suelo húmedo, una profundidad de mojado de 1 m y un 40% de contenido de humedad en la zona de raíces y; 3) 60% de superficie de suelo húmedo, una profundidad de mojado de 1 m y un 38% de contenido de humedad en la zona radical.

En cada escenario de disponibilidad de agua simulado se tomó en cuenta la misma densidad de población para cada fecha de siembra del ciclo agrícola correspondiente (110,000 para OI y 95,000 para PV), mismo tipo de suelo y clima promedio de la región obtenido de la red de estaciones meteorológicas del DR-075.

3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se inició con la validación del modelo AquaCrop al simular el experimento de Ojeda-Bustamante *et al.* (2006) y obtener los resultados que se presentan en el **Cuadro 3.4**.

Cuadro 3.4. Datos obtenidos en el experimento vs. validación del modelo AquaCrop.

Datos	Experimento	Validación del modelo AquaCrop
Fecha de siembra	24-nov-2003	24-nov-2003
Densidad de población (plantas ha ⁻¹)	95,000	95,000
Textura	Franco-arcilloso	Franco-arcilloso
Fertilización	N-P-K 300-100-80	Sin estrés de fertilidad
Temperaturas umbrales (°C)	10-30	8-30
Días a madurez	179	168
°D a madurez	1451.1	1814
Lámina neta (mm)	442.2	442.2
Lámina bruta (mm)	736.9	736.9
Biomasa (t ha ⁻¹)	19.2	26.6
Rendimiento (t ha ⁻¹)	10.7	10.87

Una vez realizada la simulación del experimento obteniendo los resultados anteriores, se procedió con la validación del modelo AquaCrop en las parcelas comerciales y ciclos agrícolas OI y PV posteriores, obteniendo la siguiente información en donde se puede observar que no hay datos de biomasa y láminas de riego en campo debido a que se trabajó con productores y se complicó la medición de estas variables. Por lo tanto, se consideraron las condiciones del experimento para realizar las simulaciones en las demás parcelas de validación bajo el uso de los parámetros conservativos.

Cuadro 3.5. Resultados en parcelas comerciales de validación.

Parcela	Dato observado en campo			Validación de AquaCrop				% de desviación
	Días a madurez	°D a madurez	Rendimiento (ton ha ⁻¹)	Días a madurez	°D a madurez	Biomasa (ton ha ⁻¹)	Rendimiento (ton ha ⁻¹)	
Exp.	179	1451.1	10.7	168	1814	26.6	10.87	1.59
07-08	177	1434.9	10.0	149	1789	24.2	11.6	0.83
08-09	181	1467.3	12.0	154	1832	25.3	12.1	16
2008	135	1094.4	9.6	127	1367	23.8	10.2	6.25
2009	133	1078.2	9.0	117	1346	19.6	9.4	4.44
				<i>d</i> =0.85		<i>RCEM</i> =0.790 ton ha ⁻¹		

3.3.1. Rendimientos simulados para maíz y desarrollo del dosel vegetal

Considerando los datos agronómicos de validación, se realizaron simulaciones bajo diferentes disponibilidades de agua en el suelo para obtener los rendimientos en el cultivo de maíz con respecto a la densidad de población, fechas de siembra en los ciclos agrícolas OI y PV con un clima promedio del DR-075 (**Figura 3.2**). Además, se puede observar que los rendimientos promedio registrados para la agricultura de riego en el norte de Sinaloa se encuentran dentro del rango simulado por el modelo.

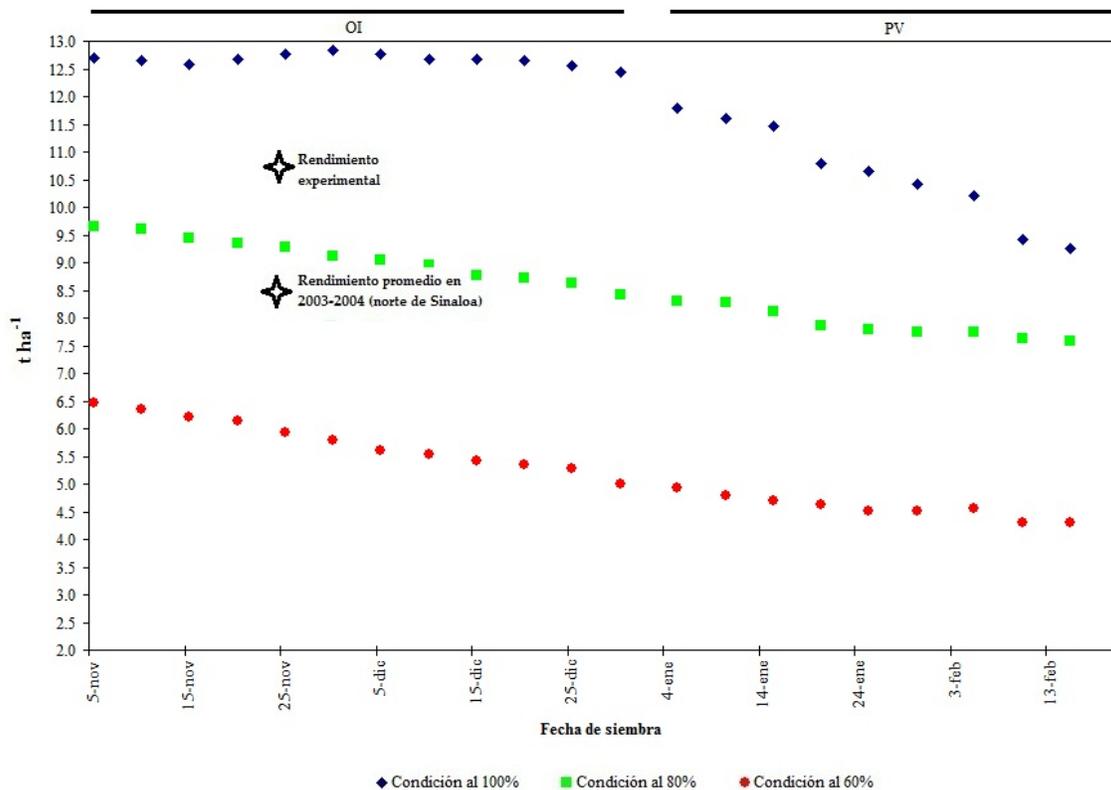


Figura 3.2. Rendimientos simulados para maíz en los dos ciclos agrícolas típicos (OI y PV).

Una de las características que define la producción del cultivo, es la cantidad de biomasa generada durante su ciclo de crecimiento porque esta define el grado de trabajo de la planta para producir su alimento y producción final. En las **Figuras 3.3** y **3.4** se muestra el desarrollo del dosel vegetal simulado para una misma fecha de siembra considerando las diferentes condiciones de disponibilidad de agua en el suelo por el modelo AquaCrop para el ciclo agrícola OI y PV.

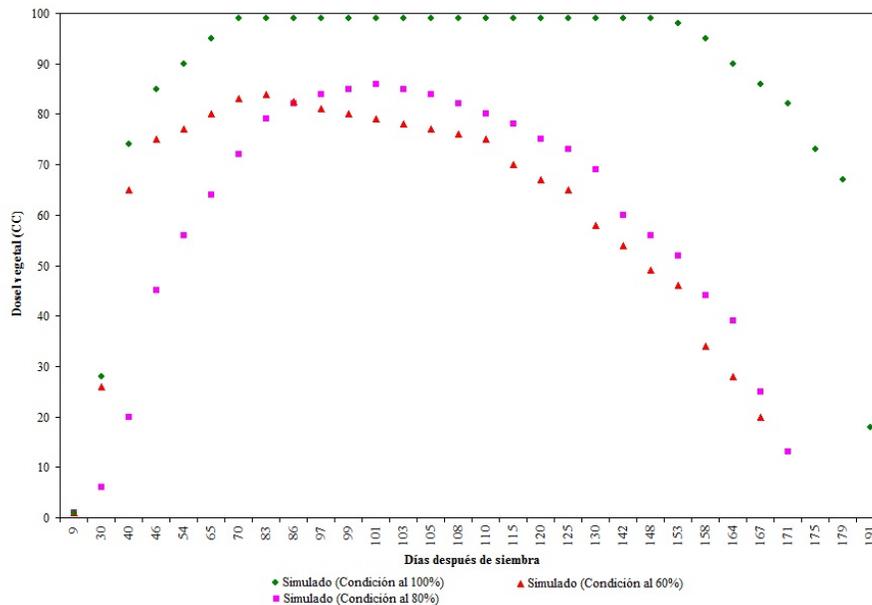


Figura 3.3. Simulación del dosel vegetal (CC) para una misma fecha de siembra en el ciclo agrícola OI bajo las tres condiciones de disponibilidad de agua.

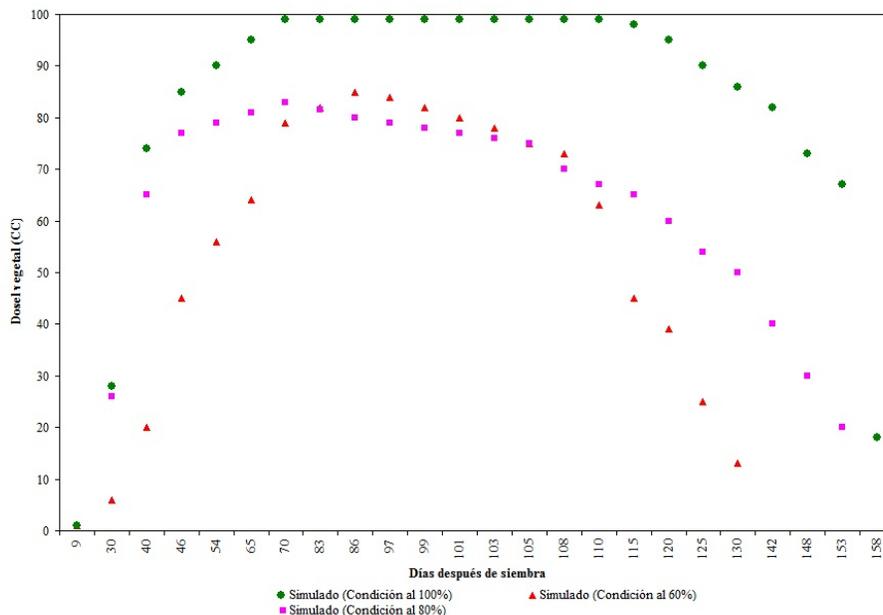


Figura 3.4. Simulación del dosel vegetal (CC) para una misma fecha de siembra en el ciclo agrícola PV bajo las tres condiciones de disponibilidad de agua.

3.3.2. Requerimiento hídrico con respecto a la fecha de siembra

En el **Cuadro 3.6** se presentan los requerimientos hídricos de maíz simulados para diferentes condiciones de crecimiento y fechas de siembra durante los ciclos agrícolas (OI y PV) típicos en que se establece el cultivo.

Cuadro 3.6. Requerimientos hídricos de maíz para los ciclos OI y PV de acuerdo a las diferentes condiciones de disponibilidad de agua y fecha de siembra.

Fecha de siembra	Condición al 60% (mm)	Condición al 80% (mm)	Condición al 100% (mm)
05-nov	373.3	436.8	482.3
15-nov	379.9	441.6	471.1
30-nov	384.0	444.7	473.1
05-dic	375.1	432.5	474.2
15-dic	371.5	427.2	474.4
30-dic	364.0	419.4	463.1
05-ene	397.4	449.0	494.0
15-ene	378.0	435.2	481.2
30-ene	374.3	429.7	474.5
05-feb	336.5	390.9	439.9
15-feb	318.0	360.6	410.3

3.3.3. Duración del ciclo del cultivo simulado

La **Figura 3.5** permite determinar el periodo para el cual el ciclo del cultivo es mas largo, ya que ciclos largos van acompañados generalmente de rendimientos altos. Lo anterior, permite expresar con gran simplicidad la duración del ciclo del cultivo para elegir las fechas de siembra más adecuadas y obtener los mejores rendimientos de maíz. De acuerdo con los resultados obtenidos en campo, la duración del ciclo esta por debajo de los simulados debido a que se considero un clima promedio de la zona y además, no se considero en las simulaciones un estrés térmico y de fertilización, lo cual genera condiciones más propicias para la duración del cultivo pero se muestra una reducción del ciclo en las fechas de siembra correspondientes al período más caliente de la temporada agrícola.

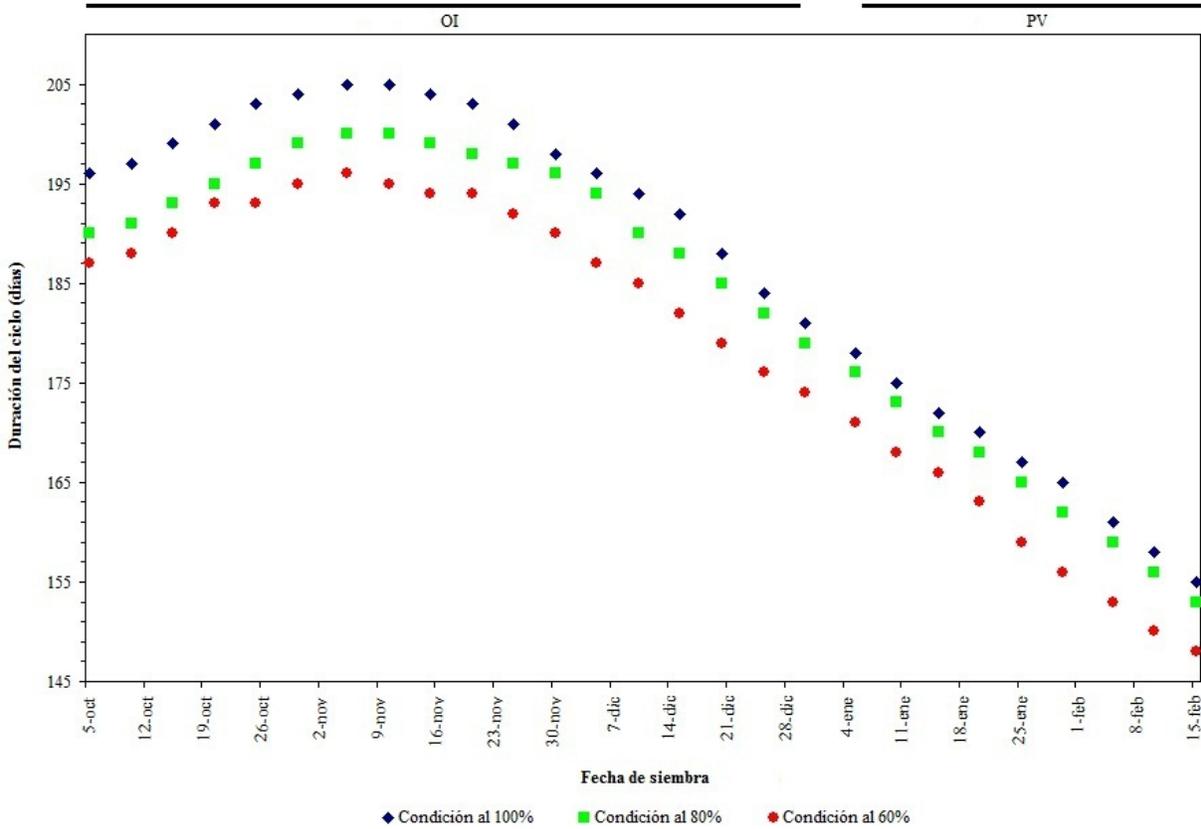


Figura 3.5. Duración del ciclo del cultivo simulado por el modelo AquaCrop con respecto a la disponibilidad de agua y fechas de siembra en los ciclos agrícolas OI y PV.

3.4. CONCLUSIONES

El modelo AquaCrop ha mostrado ser una excelente herramienta de apoyo para la toma de decisiones a nivel parcelario al poder simular con buena confiabilidad el rendimiento del maíz bajo diferentes condiciones climáticas y de manejo del riego, las cuales son características que se presentan en los distritos de riego del norte de Sinaloa.

La ventaja del modelo al simular el requerimiento hídrico del cultivo es que se pueden obtener dichos requerimientos para diferentes fechas de siembra y así elegir la mas adecuada para establecer el cultivo. Además, tiene la capacidad de realizar el calculo considerando las siguientes cuestiones: suelo desnudo (calcula la evaporación del suelo y evapotranspiración de la planta) y suelo cubierto (calcula la evapotranspiración de la planta sin evaporación del suelo).

La calendarización del riego, la simulación de crecimiento y el pronóstico del rendimiento son algunas de las ventajas del AquaCrop como herramienta de planeación y seguimiento de un ciclo agrícola para la toma de decisiones, al reducir el tiempo y recursos necesarios para analizar diferentes alternativas de manejo del cultivo.

De acuerdo con las simulaciones realizadas por el modelo, el período de fechas óptimo esta comprendido desde el 5 de noviembre hasta el 15 de enero de acuerdo a la duración del ciclo del cultivo y rendimientos potenciales. Lo anterior, esta dentro del rango de rendimientos y duración del cultivo observados a nivel de campo en la región, lo cual genera una alta fiabilidad de las simulaciones realizadas con los parámetros conservativos.

Los análisis estadísticos muestran un gran desempeño del modelo para las condiciones predominantes del norte de Sinaloa, ya que tiene una sobreestimación del rendimiento de 0.790 ton ha⁻¹ (*RCEM*) y un 0.85 (*d*). Por lo tanto, se debería aplicar a otras regiones maiceras del estado y del país para ofrecer un panorama más claro a los productores respecto a su toma de decisiones, por ejemplo, en la aplicación de insumos y de riego.

3.5. LITERATURA CITADA

- Cavero, J., I. Farre, P. Debacke and J. M. Faci. 2000.** *Simulation of maize yield under water stress with the EPICphase and CROPWAT models.* Agron. J. 78:273-280.
- CONAGUA. 2005.** *Estadísticas agrícolas de los distritos de riego “Año agrícola 2003-2004”.* México. 383 p.
- CONAGUA. 2009.** *Estadísticas agrícolas de los distritos de riego “Año agrícola 2007-2008”.* México. 389 p.
- Doorenbos, J. and A. H. Kassam. 1979.** *Yield response to water.* Irrigation and Drainage. Paper no. 56. FAO, Italy. 193 p.
- Flores-Gallardo, H., W. Ojeda-Bustamante y E. Sifuentes-Ibarra. 2006.** *Estudio retrospectivo de la sequía en el norte de Sinaloa.* multi-CIENCIA. 1(3):15-20.
- González-Camacho, J. M., R. Cervantes-Osornio, W. Ojeda-Bustamante y I. López-Cruz. 2008.** *Predicción de la evapotranspiración de referencia mediante redes neuronales artificiales.* Ingeniería Hidráulica en México. 23(1): 127-138.
- Heng, L. K., T. Hsiao, S. Evett, T. Howell and P. Steduto. 2009.** *Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize.* Agron. J. 101:488-498.
- Hsiao, T. C., L. K. Heng, P. Steduto, B. Rojas-Lara, D. Raes and E. Fereres. 2009.** *AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize.* Agron. J. 101:448-459.
- IBSNAT, 2010.** *Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT 4.5).* Department of Agronomy and Soil Science. College of Tropical Agriculture and Human Resources. University of Hawaii. Honolulu, Hawaii.
- Jones, C. A. and J. R. Kiniry. 1986.** *CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development.* Texas A&M Univ. Press, College Station.
- Jones, J.W., G. Hoogenboom, C. H. Porter, K. J. Boote, W. D. Batchelor, L. A. Hunt, P. W. Wilkens, U. Singh, A. J. Gijssman and J. T. Ritchie. 2003.** *The DSSAT cropping system model.* Eur. J. Agron. 18:235-265.
- Keating, B. A., P. S. Carberry, G. L. Hammer, M. E. Probert, M. J. Robertson, D. Holzworth, N. I. Huth, J. N. G. Hargreaves, H. Meinke, Z. Hochman, G. McLean, K. Verburg, V. Snow, J. P. Dimes, M. Silburn, E. Wang, S. Brown, K. L. Bristow, S. Asseng, S. Chapman, R. L. McCown, D. M. Freebaim and C. J. Smith. 2003.** *An overview of APSIM; a model designed for farming systems simulation.* Eur. J. Agron. 18:267-288.

- Monteith, J. L. 1996.** *The quest for balance in crop modeling.* Agron. J. 88:695-697.
- Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe. 1970.** *River flow forecasting through conceptual models. I. A discussion of principles.* J. Hydrol. 10:282-290.
- Ojeda-Bustamante, W., E. Sifuentes-Ibarra y H. Unland-Weiss. 2006.** *Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa, México.* Agrociencia. 40:13-25.
- Ojeda-Bustamante, W., J. M. González-Camacho, E. Sifuentes-Ibarra, E. Isidro and L. Rendón-Pimentel. 2007.** *Using spatial information Systems to improve water management in Mexico.* Agricultural Water Management. 89:81-88.
- Raes, D., P. Steduto, T. C. Hsiao and E. Fereres. 2009.** *AquaCrop.* Reference Manual. FAO, Rome, Italy. 218 pp.
- SIAP. 2008.** *Situación actual y perspectivas del maíz en México 1996-2012.* Sistema de información agroalimentaria y pesquera (SIAP). SAGARPA. México, D.F. 208 p.
- Steduto, P., T. C. Hsiao, D. Raes and E. Fereres. 2009.** *AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles.* Agron. J. 101:426-437.
- Stöckle, C. O., M. Donatelli and R. Nelson. 2003.** *CropSyst, a cropping systems simulation model.* Eur. J. Agron. 18:289-307.
- Walker, W. R. and G. Y. Skogerboe. 1987.** *Surface irrigation “Theory and practice”.* Prentice-Hall, Inc. Utah State University. Utah, USA. 368 p.
- Wanjura, D. F. and D. R. Upchurch. 2000.** *Canopy temperature characterizations of corn and cotton water status.* Trans. of the ASAE. 43:867-875.
- Willmott, C. J. 1982.** *Some comments on the evaluation of model performance.* Bull. Am. Meteorol. Soc. 63:1309-1313.
- Yang, H. S., A. Dobermann, J. L. Lindquist, D. T. Walters, T. J. Arkebauer and K. G. Gassman. 2004.** *Hybrid-Maize – a maize simulation model that combines two crop modeling approaches.* Field Crops Res. 87:131-154.

CAPÍTULO IV

*Estimación del impacto del cambio climático en el cultivo de
maíz en el estado de Sinaloa*

RESUMEN

El cambio climático es una amenaza para las diferentes actividades de los sectores productivos y genera gran incertidumbre en los métodos de producción a utilizar. Uno de los sectores que se ve amenazado por depender de las variables climáticas para su producción es el sector agrícola, la producción obtenida de este sector subsana en gran medida las necesidades alimentarias y económicas de la sociedad. Una forma de estimar el impacto del cambio climático sobre dicha actividad es la utilización de modelos de simulación de cultivos, los cuales permitan simular el desarrollo del cultivo bajo diferentes condiciones climáticas para alguna región agrícola de interés. En el presente capítulo, se utilizó el modelo AquaCrop para realizar simulaciones de crecimiento en el cultivo de maíz en los distritos de riego del estado de Sinaloa, ya que dicho modelo considera aumentos en la concentración de CO₂ para años futuros y expresa sus resultados con base en los datos climáticos y agronómicos. Además, se consideraron los escenarios A1B y A2 para el estado de Sinaloa, tomando un punto representativo de cada distrito de riego para generar la respuesta del cultivo para los períodos de 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2098, obteniendo el rendimiento, la producción de biomasa y la duración promedio del ciclo del cultivo, y la evapotranspiración de referencia (ET_o) promedio para el presente siglo en cada distrito de riego.

Palabras clave: Adaptación, manejo agronómico, simulación, variables climáticas.

ABSTRACT

The climate change is a threat for the different activities of the productive sectors and generates great uncertainty in the production methods to use. One of the productive sectors that is threatened because depends on the climatic variables is the agriculture, the agricultural production satisfied the food and economic necessities of the society. A form of estimating the impact of the climate change on this activity is the use of simulation crops models, which allow simulating the development of the crop under different climatic conditions for an agricultural region of interest. In this chapter the AquaCrop model was used to carry out simulations of corn growth in the irrigation districts of the Sinaloa state. This model considers increases in the concentration of CO₂ for futures year's and expresses results based in the climatic and agronomic data. The scenarios A1B and A2 were considered for Sinaloa, taking a representative point of each irrigation district and simulated the crop growth for periods of 2011-2040, 2041-2070 and 2071-2098, it was obtained the yield, the biomass production, the average duration of the crop season and the average reference evapotranspiration (ET_o) for the present century for each irrigation district.

Key words: Adaptation, agronomic management, climatic variables, simulation.

4.1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, 2001) las proyecciones de cambio climático indican un incremento global consistente, con una variabilidad espacial y temporal a nivel regional tanto de la temperatura como de la concentración de bióxido de carbono (CO₂). El fenómeno del cambio climático es un hecho incuestionable a nivel mundial, el cual genera mucha incertidumbre para el futuro por los posibles efectos a ocasionar en los diversos sectores productivos y en la sociedad en general. Uno de los sectores productivos más susceptibles a estos posibles efectos es el agrícola, el cual depende en gran medida de las variables climáticas para la producción de los cultivos. Aunque globalmente se espera que la precipitación incremente, se pronostica una disminución de esta variable en la mayor parte de México pero en sí, no existe un pronóstico conciso o estimación de los posibles efectos para los principales cultivos establecidos en las diferentes regiones agrícolas del país. Además, una de las cuestiones en este sentido es que la agricultura mexicana enfrenta con mayor frecuencia el impacto de eventos climáticos extremos como sequías, ciclones y lluvias torrenciales (Lawlor, 2005).

Como varias zonas productivas del país han experimentado con mayor frecuencia y severidad la presencia de este tipo de eventos climáticos extremos, se han puesto a prueba la sustentabilidad de los procesos productivos del sector agrícola y especialmente sobre la agricultura de temporal presentando contingencias a niveles intolerables por los productores (Conde *et al.*, 2006). Por otro lado, las sequías han restringido las dotaciones normales de riego y han disminuido la superficie cultivable en estas zonas generando disminuciones en la generación de empleos por ser un sector ligado a los ciclos naturales (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2008). En toda investigación, la información base o histórica que se tiene disponible es muy importante y sobretodo, en los estudios de cambio climático en donde la información climática adquiere una especial relevancia, no sólo la histórica sino también la pronosticada (IPCC, 2007). Debido a lo anterior, es necesario contar con una base de datos climáticos lo más completamente posible para tener una mayor confiabilidad en los resultados. Como se mencionó en capítulos anteriores de la presente tesis, Sinaloa es el estado agrícola de México porque se establecen los principales cultivos y se obtienen los mejores rendimientos a nivel nacional.

Por lo tanto, una de las tantas características de Sinaloa es su ubicación geográfica, en la cual se presentan diversos tipos de climas a lo largo y ancho del territorio estatal generando condiciones impredecibles para la producción de los cultivos por la constante variabilidad climática (Flores-Gallardo, 2007), haciendo susceptible las actividades productivas a los efectos del cambio climático. Una de las grandes incertidumbres ante el cambio climático en el sector agrícola es la respuesta y efectos posibles a ocasionar en los cultivos pero de acuerdo con Elías y Castellví (2001) la información fenológica acumulada a lo largo de los años es una herramienta que puede ser utilizada para estudios sobre cambio climático. Lo interesante es que también se deben realizar estudios sobre los efectos en las demandas hídricas debido a las presiones por el recurso agua en los diferentes sectores productivos (Martínez-Austria y Aguilar-Chávez, 2008), sobre el comportamiento de las especies o variedades sembradas por aumento de la temperatura y reducción de la precipitación (Alvarado *et al.*, 2002). Según Delthier *et al.* (1975), la estrategia futura se orientará en el sentido de relacionar la información de los cultivos a partir de satélites y sistemas de información geográfica.

El cultivo de maíz es de gran importancia alimenticia para la humanidad y la expansión de su uso a nivel industrial lo hace aún más importante en la economía mundial. Se espera que la productividad del cultivo de maíz sea afectada como consecuencia del cambio climático en diferentes regiones del mundo (Parry *et al.*, 1999). Lo cual se debe a que los impactos afectaran el crecimiento y producción del cultivo por el incremento de los niveles de CO₂, por cambios en los patrones de precipitación, de la temperatura, de plagas y de enfermedades (Khaliq, 2008).

El objetivo principal de la presente investigación es presentar los cambios esperados para el cultivo de maíz en los escenarios futuros de cambio climático mediante simulaciones realizadas con modelos de crecimiento de cultivos para las condiciones predominantes de todos los distritos de riego de Sinaloa, ya que los modelos matemáticos para simular el crecimiento de los cultivos son una herramienta cuantitativa de gran utilidad para entender como funcionan los agroecosistemas bajo diferentes condiciones de manejo y poder diseñar de esta forma mejores estrategias de producción (Wallach *et al.*, 2006).

4.2. MATERIALES Y MÉTODOS

En la presente investigación se realizó una estimación del impacto del cambio climático en el cultivo de maíz utilizando el modelo AquaCrop para los diferentes distritos de riego del estado de Sinaloa. Para llevar a cabo las simulaciones se consideró el mismo manejo del cultivo (realizado en la actualidad); densidades de población, parámetros conservativos del cultivo, aplicación de riegos, fertilización, etc., y posteriormente se seleccionó una coordenada representativa para cada distrito de riego, la cual se extrajo de la base de datos climática utilizada en el **CAPÍTULO II** de la presente tesis. Cada coordenada geográfica de la base de datos contiene información sobre las anomalías anuales promedio de temperatura y de precipitación para los períodos futuros de 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2098 correspondientes a los escenarios A1B y A2. Es importante señalar que la base de datos climática contiene la información en una malla a resolución de 0.5° x 0.5° (latitud y longitud) y por lo tanto, en el **Cuadro 4.1** se presentan las coordenadas representativas consideradas para cada distrito de riego de Sinaloa.

Cuadro 4.1. Coordenadas geográficas para cada punto representativo de los distritos de riego.

Distrito de riego	Coordenadas geográficas	
	Latitud N	Longitud W
010 “Culiacán-Humaya”	24° 50’	107° 00’
063 “Guasave”	25° 00’	108° 50’
074 “Mocorito”	25° 50’	108° 00’
075 “Río Fuerte”	26° 00’	109° 00’
076 “Valle del Carrizo”	26° 50’	109° 50’
108 “Elota-Piactla”	24° 00’	107° 50’
109 “Río San Lorenzo”	24° 50’	107° 50’
111 “Baluarte-Presidio”	22° 50’	105° 50’

Como se mencionó anteriormente, los datos contenidos en esta base son de temperaturas y precipitación. Por lo tanto, se realizó una estimación del impacto del cambio climático en maíz para cada período y escenario climático considerado mediante la simulación de crecimiento del cultivo utilizando la temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación y manejo convencional utilizado en la actualidad: fecha de siembra del 24 de noviembre, densidad de población, láminas de riego, fertilización y cobertura de suelo (rastreo incorporado).

Para complementar el cálculo por el modelo AquaCrop se necesita de la variable ETo y la cual se estimó mediante el método de Penman-Monteith utilizando el software desarrollado por Swennenhuis (2009) “CROPWAT 8.0” (**Figura 4.1**) para los períodos futuros de cambio climático considerados, ya que este software considera las coordenadas geográficas para estimar la radiación global. Además, es importante mencionar que se calculó un promedio de las variables de velocidad del viento, humedad relativa y horas sol para cada distrito de riego mediante la red nacional de estaciones estatales agroclimatológicas de la Coordinadora Nacional de las Fundaciones Produce y el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias como complemento del cálculo de la ETo.

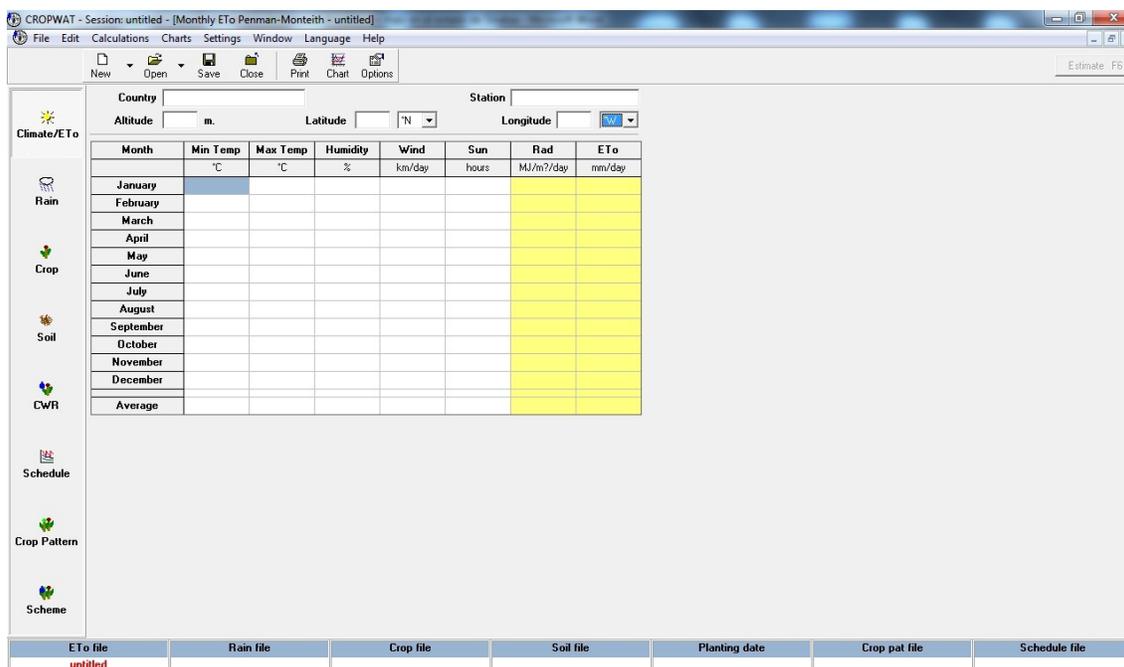


Figura 4.1. Pantalla del software “CROPWAT 8.0” para realizar el cálculo de la ETo.

4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.3.1. Evapotranspiración de referencia (ETo) promedio bajo cambio climático

A continuación se ilustra el resultado del cálculo y comportamiento promedio de la evapotranspiración de referencia (ETo) para el presente siglo bajo los escenarios A1B y A2 de cambio climático en cada distrito de riego (**Figura 4.2 y 4.3**).

Estimación del impacto del cambio climático en el cultivo de maíz en el estado de Sinaloa

Para el escenario A1B la ETo estará dentro del rango de 3.2 a 5.7 mm mientras que en el escenario A2 estará de 3.5 a 6.5 mm, lo cual generara condiciones para una mayor demanda hídrica por parte de los cultivos.

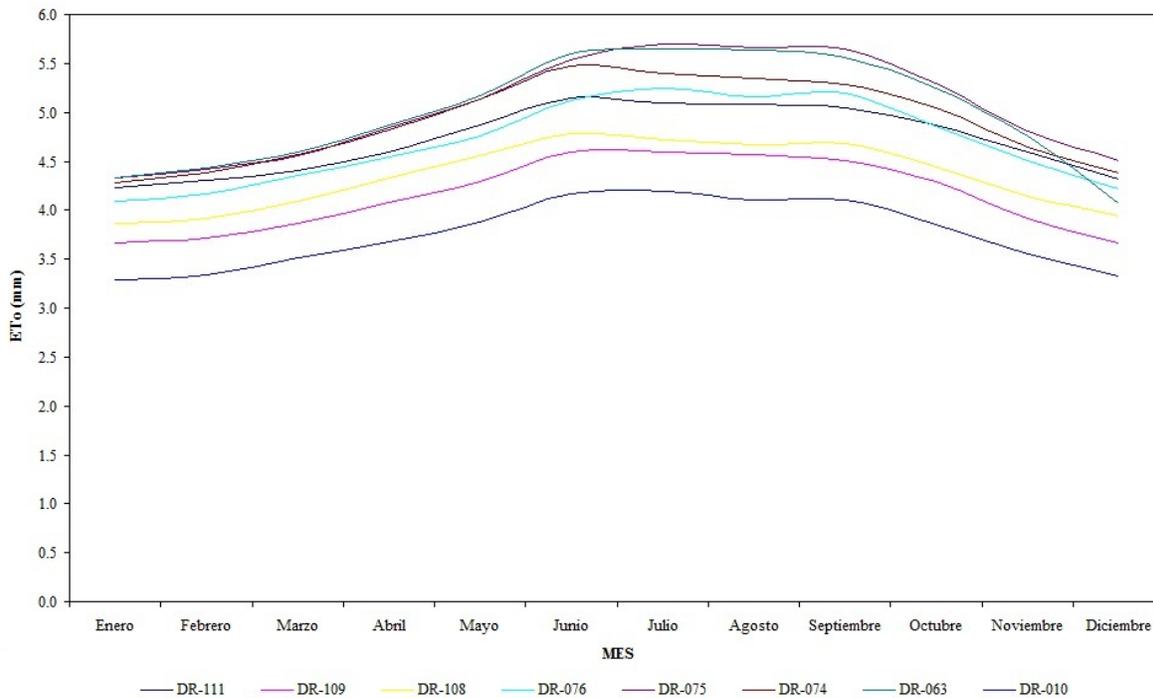


Figura 4.2. Evapotranspiración de referencia (ETo) promedio para el escenario A1B.

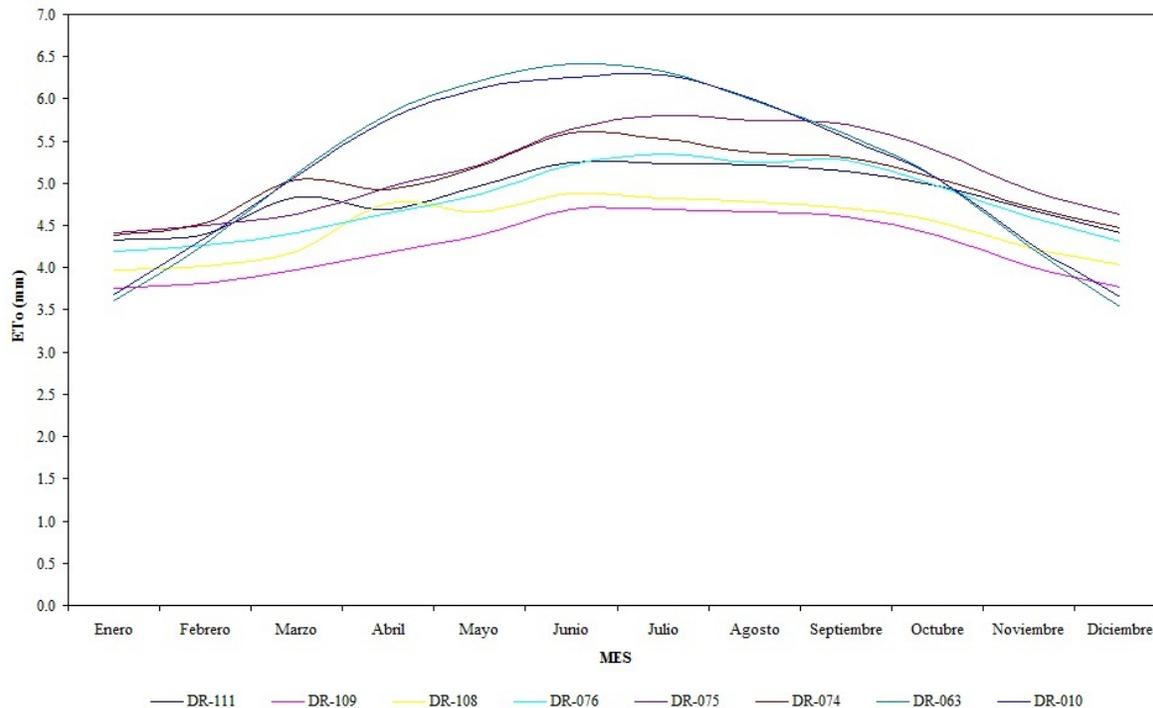


Figura 4.3. Evapotranspiración de referencia (ETo) promedio para el escenario A2.

4.3.2. Respuesta del cultivo de maíz para el escenario A1B

Se obtuvo la respuesta del cultivo referente al rendimiento promedio (**Figura 4.4**), a la producción de biomasa (**Figura 4.5**) y a la duración promedio del ciclo del cultivo (**Figura 4.6**) mediante simulaciones realizadas bajo el manejo convencional actual con respecto a las proyecciones de cambio climático generadas para el escenario A1B en los períodos futuros comprendidos de 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2098 para cada distrito de riego de Sinaloa. Para las diferentes simulaciones se puede observar que el aumento en la temperatura impacta en el rendimiento, en la producción de biomasa y en el ciclo del cultivo debido al estrés térmico ocasionado en el cultivo así como una mayor demanda hídrica.

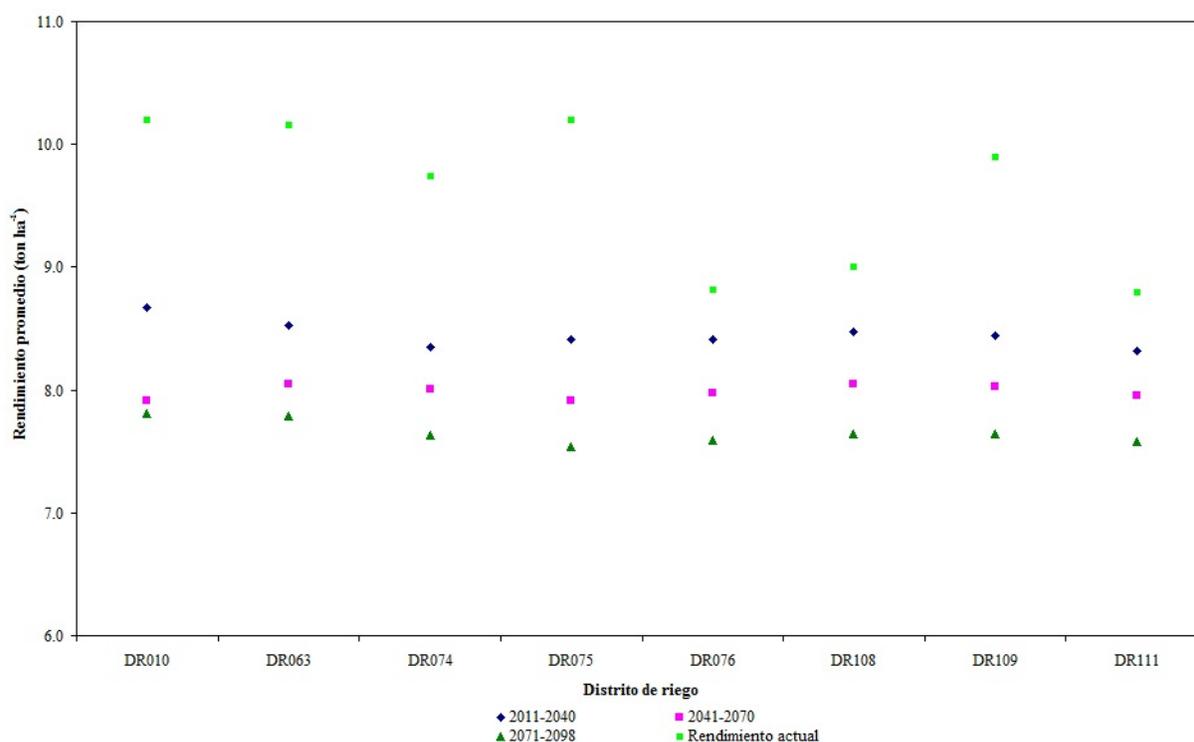


Figura 4.4. Obtención del rendimiento promedio bajo cambio climático para el escenario A1B.

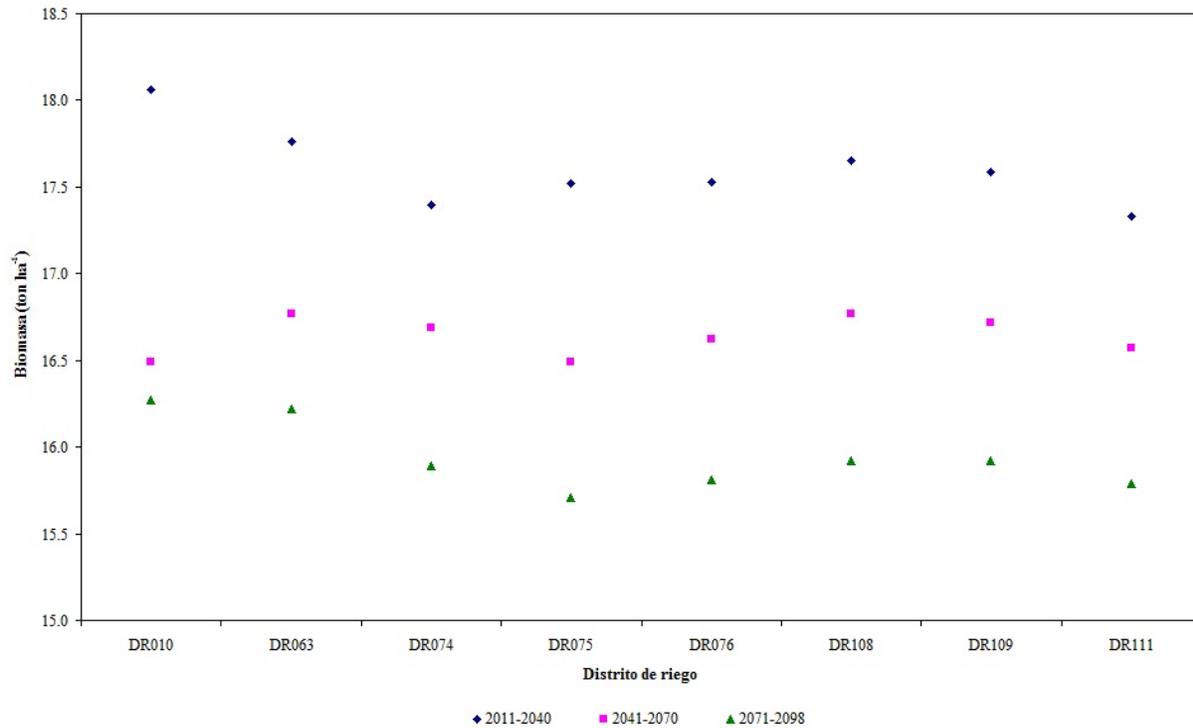


Figura 4.5. Obtención de la biomasa promedio bajo cambio climático para el escenario A1B.

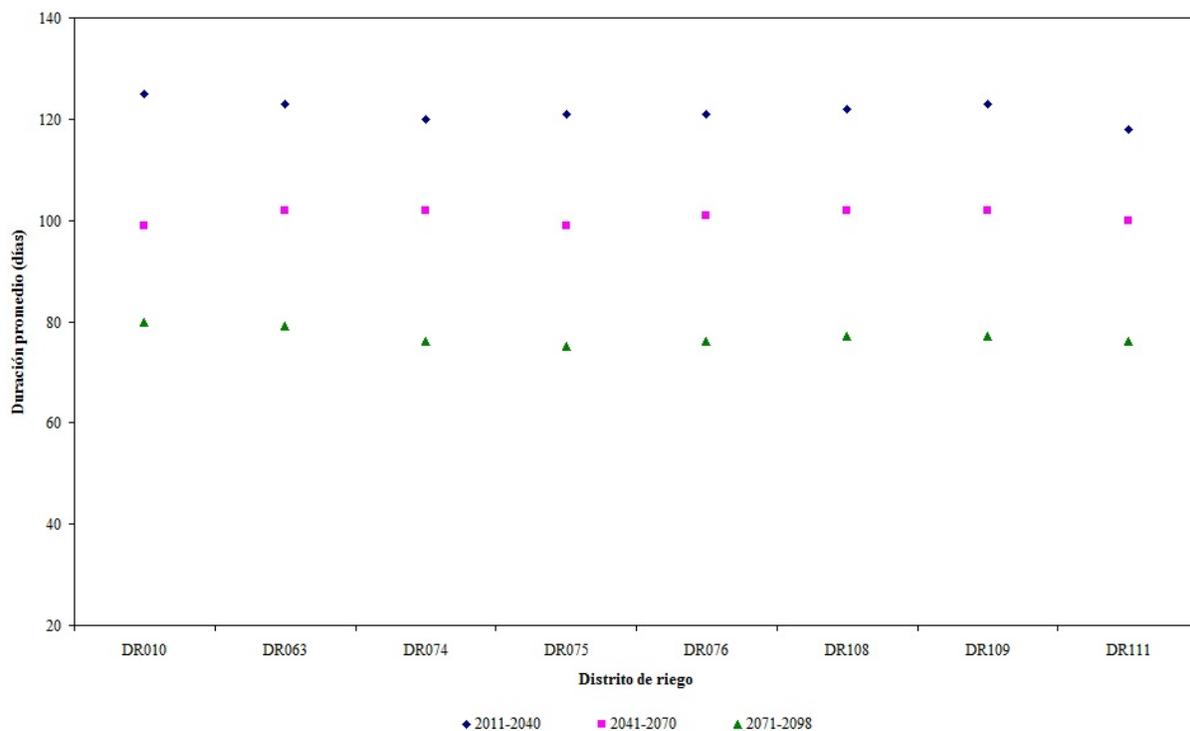


Figura 4.6. Obtención de la duración del ciclo promedio bajo cambio climático para el escenario A1B.

4.3.3. Respuesta del cultivo de maíz para el escenario A2

También se obtuvo la respuesta cultivo para el rendimiento promedio (**Figura 4.7**), la producción de biomasa (**Figura 4.8**) y la duración promedio del ciclo del cultivo (**Figura 4.9**) mediante simulaciones realizadas bajo el mismo manejo convencional con respecto a las proyecciones de cambio climático generadas para el escenario A2 en los períodos futuros comprendidos de 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2098 para cada distrito de riego de Sinaloa. A diferencia del escenario A1B que se considera más optimista, las condiciones de crecimiento del cultivo son más desfavorables debido a que hay mayores temperaturas y lo cual impacta en el desarrollo del cultivo por el estrés térmico ocasionado.

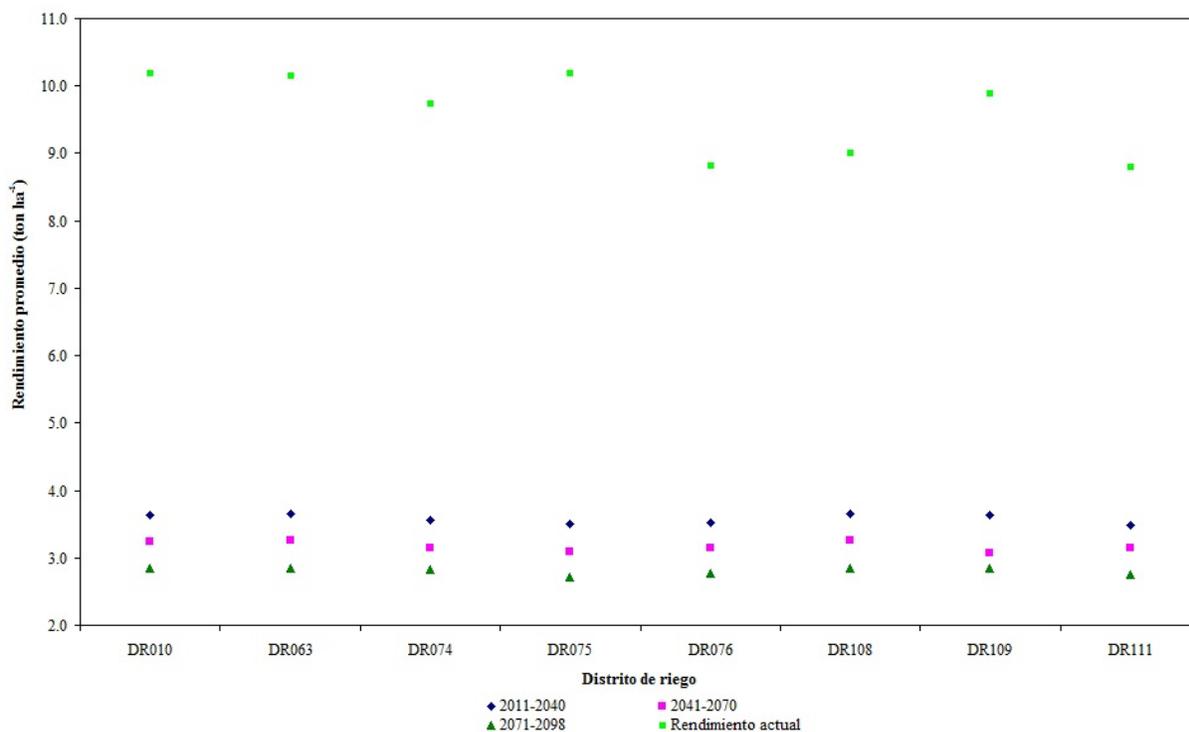


Figura 4.7. Obtención del rendimiento promedio bajo cambio climático para el escenario A2.

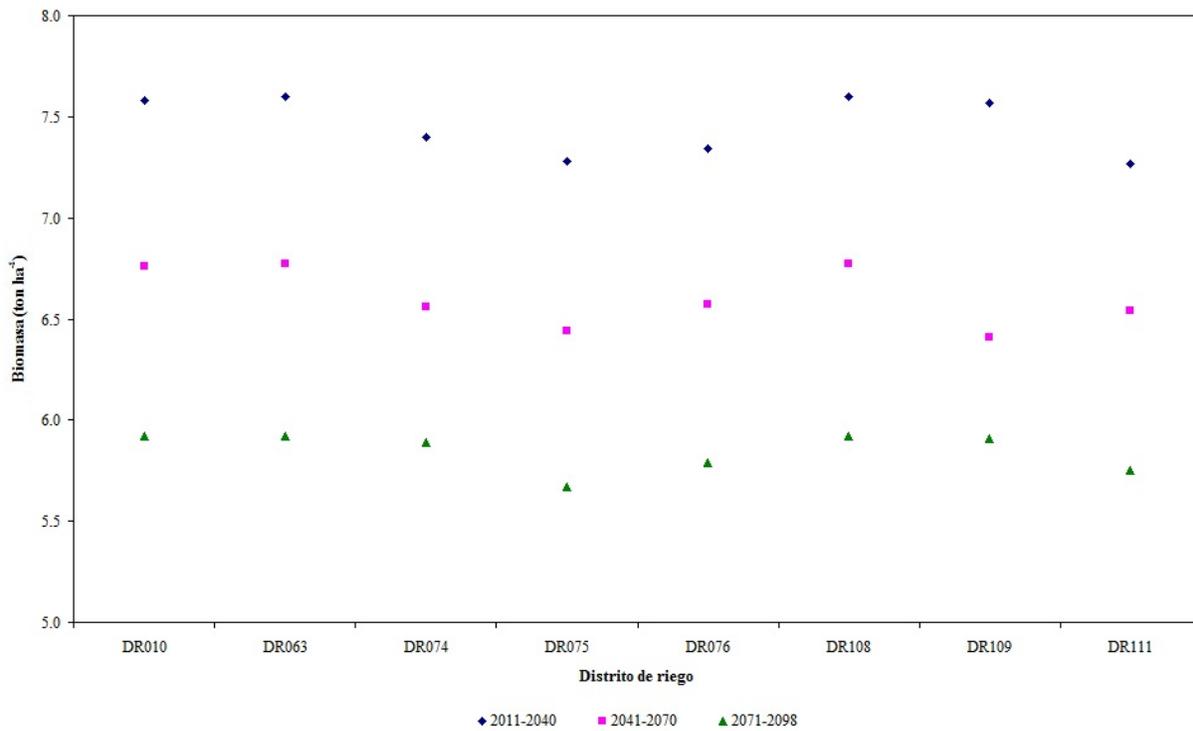


Figura 4.8. Obtención de la biomasa promedio bajo cambio climático para el escenario A2.

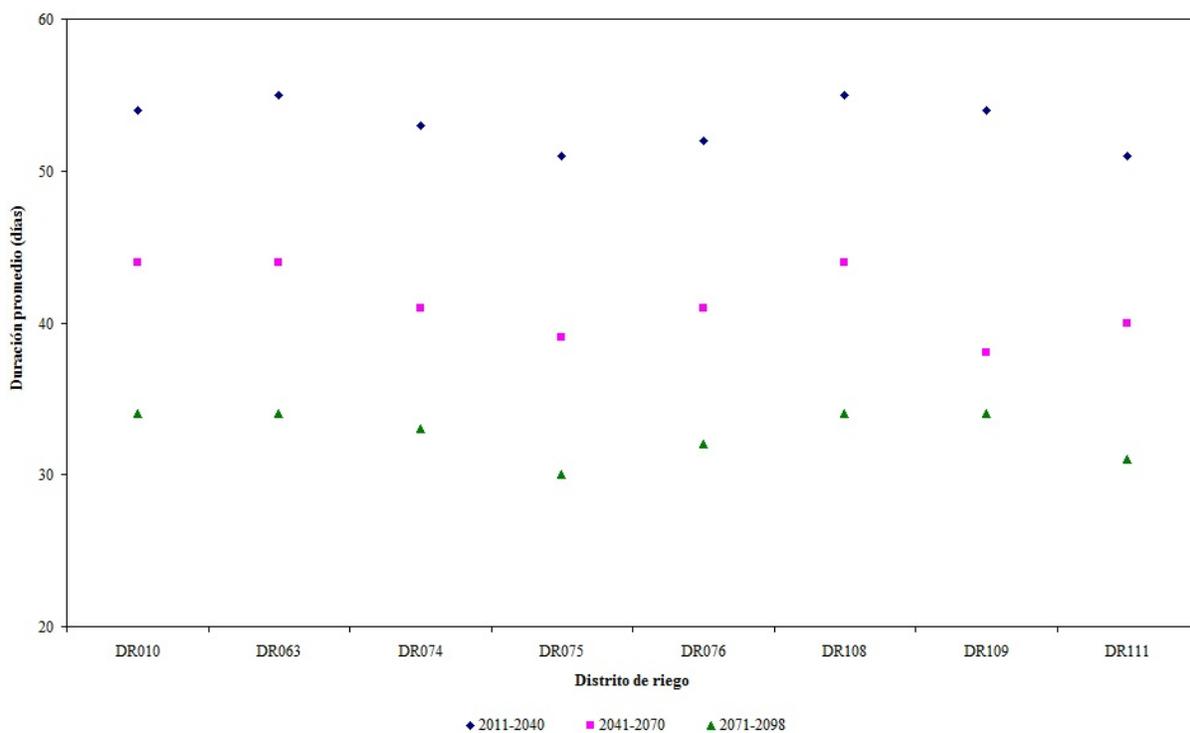


Figura 4.9. Obtención de la duración del ciclo promedio bajo cambio climático para el escenario A2.

4.4. CONCLUSIONES

El comportamiento del maíz para los escenarios A1B y A2 de cambio climático se vera afectado por el aumento de la temperatura y reducción de la precipitación para cada zona agrícola del estado de Sinaloa. Lo anterior repercute en gran medida sobre el rendimiento, la biomasa y la duración del ciclo fenológico, requiriendo de la generación de variedades más resistentes al estrés térmico, al estrés hídrico y de ciclo más corto. También es importante buscar fechas de siembra que comprendan períodos más fríos debido a que las variedades existentes producen mejor con un ciclo fenológico más largo.

La agricultura mexicana y en especial, la del estado de Sinaloa deben tomar medidas de adaptación y elaborar estrategias que conduzcan a planificar y reducir los efectos ocasionados por el cambio climático mediante la adaptación y la mitigación. Lo anterior genera la necesidad de diseñar mejores estrategias para conservar los recursos naturales y permitir que la actividad agrícola sea económicamente viable para el presente siglo porque las simulaciones indican un decremento aproximado al 60% en el rendimiento para el escenario A2 y para el A1B alrededor del 20%.

El incremento sustancial en la superficie regable es sin duda una gran contribución a la intensificación del cambio climático, lo cual se debe a la transformación de zonas no agrícolas a regadas generando un cambio drástico en el balance energético de dichas zonas. Ante este panorama, el impacto del cambio climático puede ser catastrófico si no se toman las medidas necesarias porque muchas zonas agrícolas del país se encuentran en su nivel máximo de tolerancia y Sinaloa no es la excepción, debido a la variabilidad climática que se presenta a lo largo y ancho del territorio estatal.

4.5. LITERATURA CITADA

- Alvarado, M., Foroughbakhch, R., Jurado, E. y Rocha, A. 2002.** *El cambio climático y la fenología de las plantas*. Ciencia UANL. 5(4):493-500.
- Conde, C., Ferrer, R. and Orozco, S. 2006.** *Climate change and climate variability impacts on rainfed agricultural activities and possible adaptation measures “A Mexican case study”*. *Atmósfera*. 19(3):181-194.
- Delthier, B. E., Ashley, M. D., Blair, B. O., Caprio, J. M., Hoop, R. J. and Rouse Jr., J. W. 1975.** *Satellite sensing of phenological events*. Search. Ithaca, Cornell Agr. Exp. Station. 6(1):1-46.
- Elías, F. C. y Castellví, F. S. 2001.** *Agrometeorología*. Ediciones Mundi-Prensa. 2^{da} edición. Madrid, España. 517 p.
- Flores-Gallardo, H. 2007.** *Validación de un modelo basado en el concepto grados día (°D) para el pronóstico del riego en el cultivo de papa (*Solanum tuberosum L.*) en el norte de Sinaloa*. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Sinaloa - Escuela Superior de Agricultura del Valle del Fuerte. Juan José Ríos, Ahome, Sinaloa, México. 115 pp.
- IPCC. 2001.** *Tercer informe de evaluación “La base científica”*. Grupo I del Tercer Grupo Intergubernamental para el Cambio Climático. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.
- IPCC. 2007.** *Climate change 2007: The physical science basis*. Report of the Group I of the IPCC. 987 pp.
- Khaliq, T. 2008.** *Modeling the impact of climate change on maize (*Zea mays L.*) productivity in the Punjab*. Doctor of Philosophy Thesis. University of Agriculture Faisalabad, Pakistan. 183 pp.
- Lawlor, D. W. 2005.** *Plant responses to climate change: impacts and adaptation*. In: *Plant responses to air pollution and global change*. Omasa, K., Nouchi, I. and De Kok, L. J. (eds.). Tokyo, Japan. Pp. 81-88.
- Martínez-Austria, P. F. y Aguilar-Chávez, A. 2008.** *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México “volumen II”*. Instituto Mexicano de Tecnología del agua. Jiutepec, Morelos, México. 118 pp.
- Ojeda-Bustamante, W., Martínez-Austria, P. y Hernández-Barrios, L. 2008.** *Repercusiones del cambio climático en la agricultura de riego*. In: *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México “volumen II”*. Martínez y Aguilar (eds.). Instituto Mexicano de Tecnología del agua. Jiutepec, Morelos, México. Pp. 76-83.

Parry, M. I., Rosenzweig, C., Iglesias, A., Fischer, G. and Livermore, M. 1999. *Climate change and world food security: a new assessment global environ. Change.* 9:51-67.

Swennenhuis, J. 2009. *CROPWAT v8.0.* Water Resources Development and Management Service of FAO. FAO, Rome, Italy.

Wallach, D., Makowski, D. and Jones, J. W. 2006. *Working with dynamic crop models "Evaluation, analysis, parameterization and applications"*. ELSEIVIER Editorial. United Kingdom. 447 pp.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

En el estado de Sinaloa, el cultivo de maíz será impactado por el cambio climático en el rendimiento, en la producción de biomasa y en la duración fenológica debido al estrés térmico e hídrico ocasionado por el aumento en las temperaturas y reducción en la precipitación.

De acuerdo con los resultados obtenidos en los diferentes capítulos de la presente tesis habrá posibilidades para el establecimiento de nuevos cultivos pero con una aceleración en la maduración y menor producción por acortamiento del ciclo fenológico. Lo anterior incrementará la ETo y reducirá la ETr generando la necesidad de producir nuevas variedades resistentes al estrés térmico e hídrico.

El cambio climático implica diferentes riesgos para los diferentes sectores productivos y en especial, para el sector agrícola en una escala espacial y temporal. Por lo tanto, las decisiones a tomar se realizarán con incertidumbre porque sólo se conocen las direcciones y magnitudes de los cambios en las variables climáticas. No hay pronósticos de cambio climático concisos, sólo escenarios de cómo se podría ver el mundo en un futuro dependiendo de las decisiones y medidas que se tomen por parte de los principales actores en la actualidad. Lo cual requerirá de un ajuste en los paquetes tecnológicos actuales para garantizar la viabilidad económica de la agricultura mexicana.

APÉNDICE I

En el presente apéndice, se presenta la información obtenida de los informes estadísticos elaborados por CNA-IMTA y CONAGUA “*Estadísticas agrícolas de los distritos de riego*” para cada distrito de riego de Sinaloa en cuanto a la superficie sembrada, la superficie cosechada (**Figura A.1.1** a la **Figura A.1.80**) y el rendimiento promedio (**Figura A.1.81** a la **Figura A.1.161**) obtenido por cultivo establecido (jitomate, papa, melón, sandía, alfalfa, caña, frijol, sorgo, garbanzo, pepino, trigo, arroz, cebolla, chile, tomate de cáscara, calabaza, cártamo y algodón) en los ciclos agrícolas otoño-invierno (OI), primavera-verano (PV) y perennes para el período comprendido del año agrícola 1970-1971 hasta el año agrícola 2007-2008. En el **CAPÍTULO I** se mostró información similar a la que se presenta en éste apéndice pero sólo la referente para el cultivo de maíz en los dos ciclos agrícolas en que se establece.

A.1.1. Evaluación de la superficie sembrada y superficie cosechada de los principales cultivos en los distritos de riego de Sinaloa

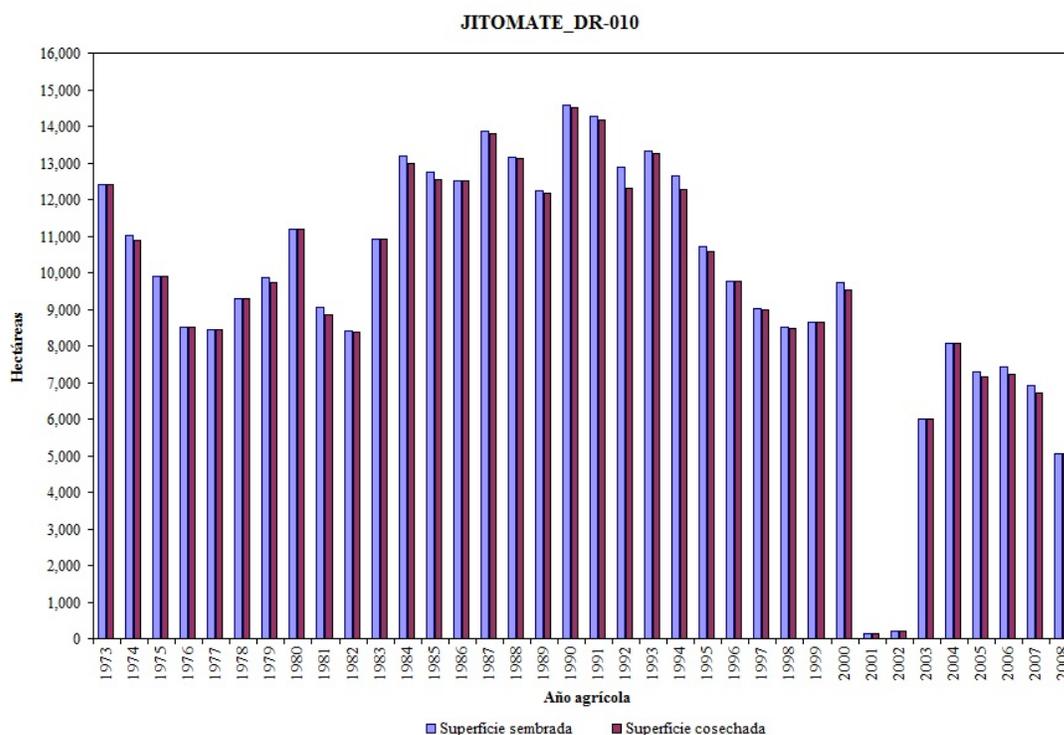


Figura A.1.1. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de jitomate en el DR-010 para el ciclo OI.

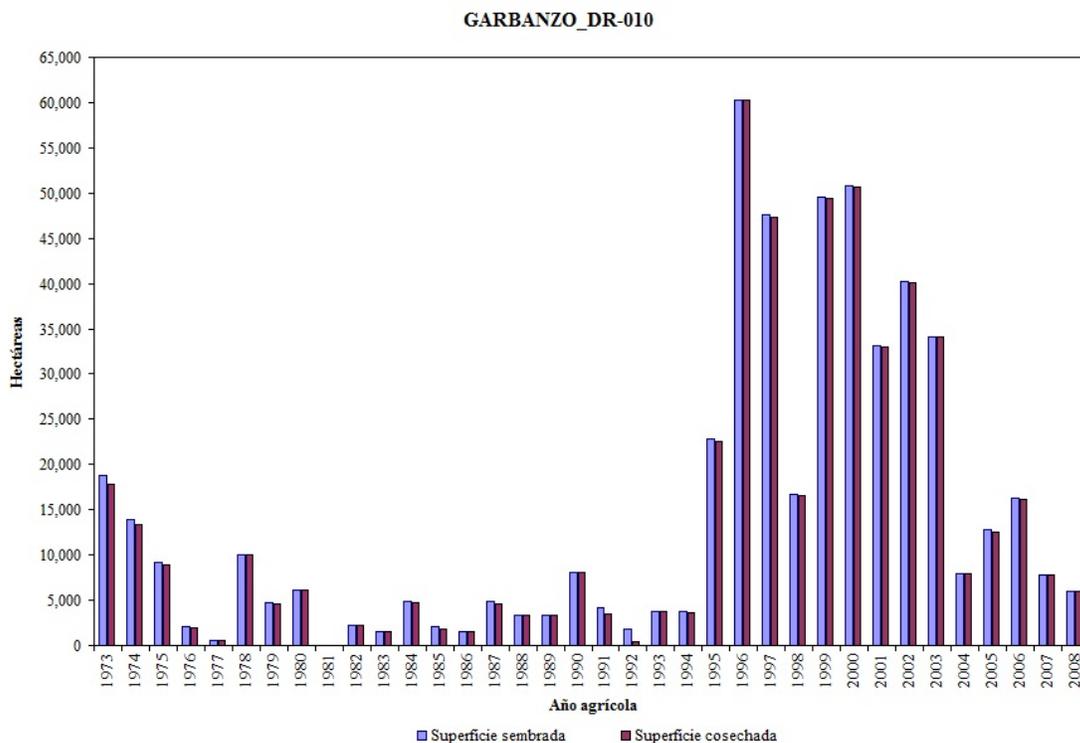


Figura A.1.2. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de garbanzo en el DR-010 para el ciclo OI.

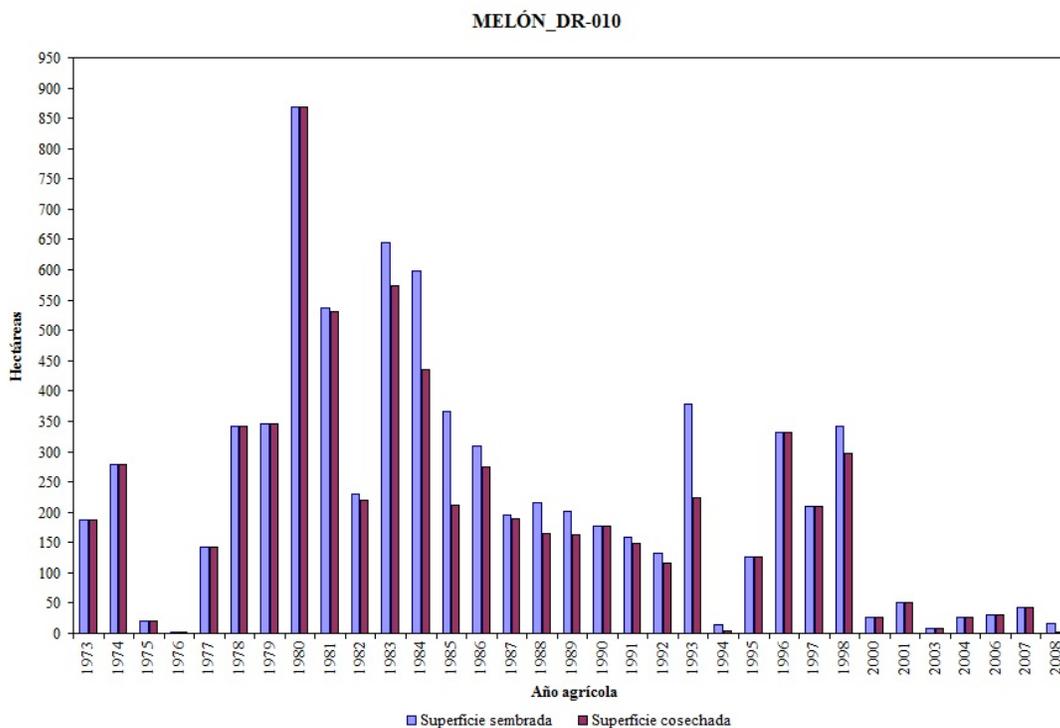


Figura A.1.3. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de melón en el DR-010 para el ciclo OI.

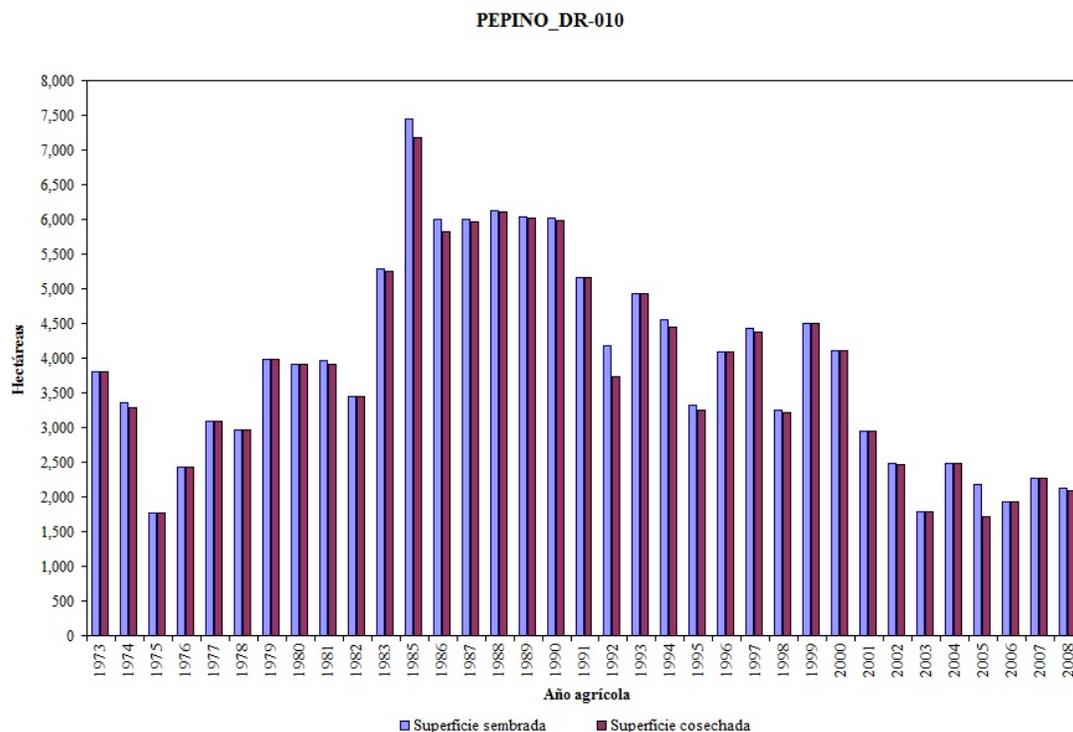


Figura A.1.4. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de pepino en el DR-010 para el ciclo OI.

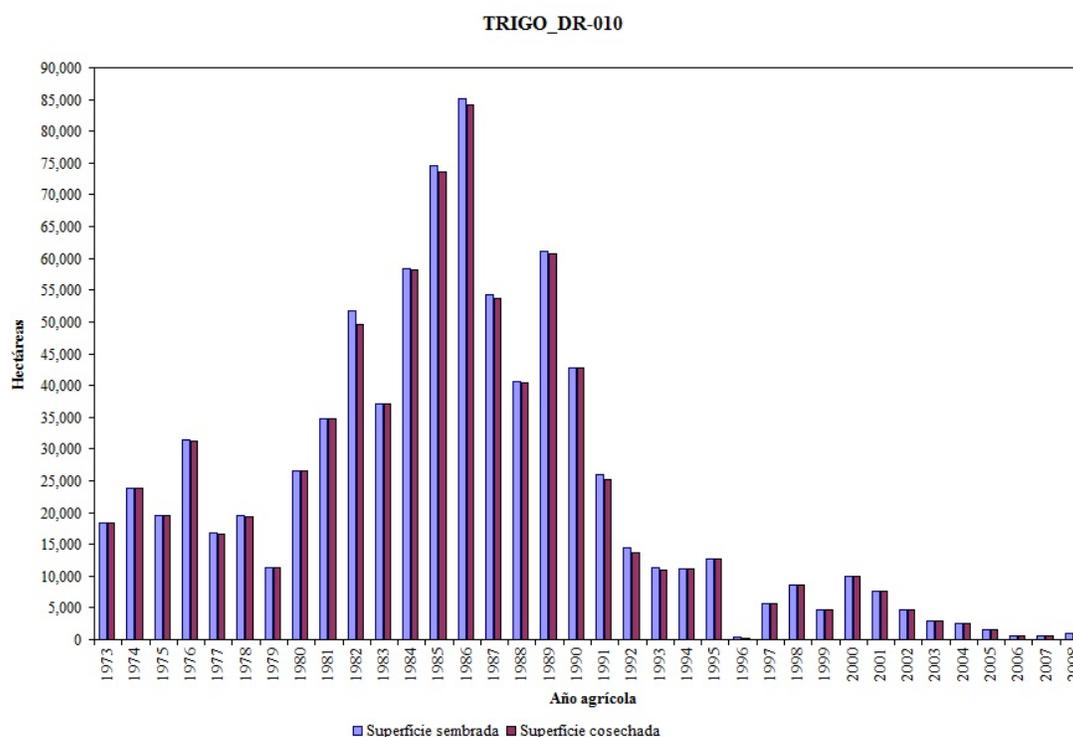


Figura A.1.5. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de trigo en el DR-010 para el ciclo OI.

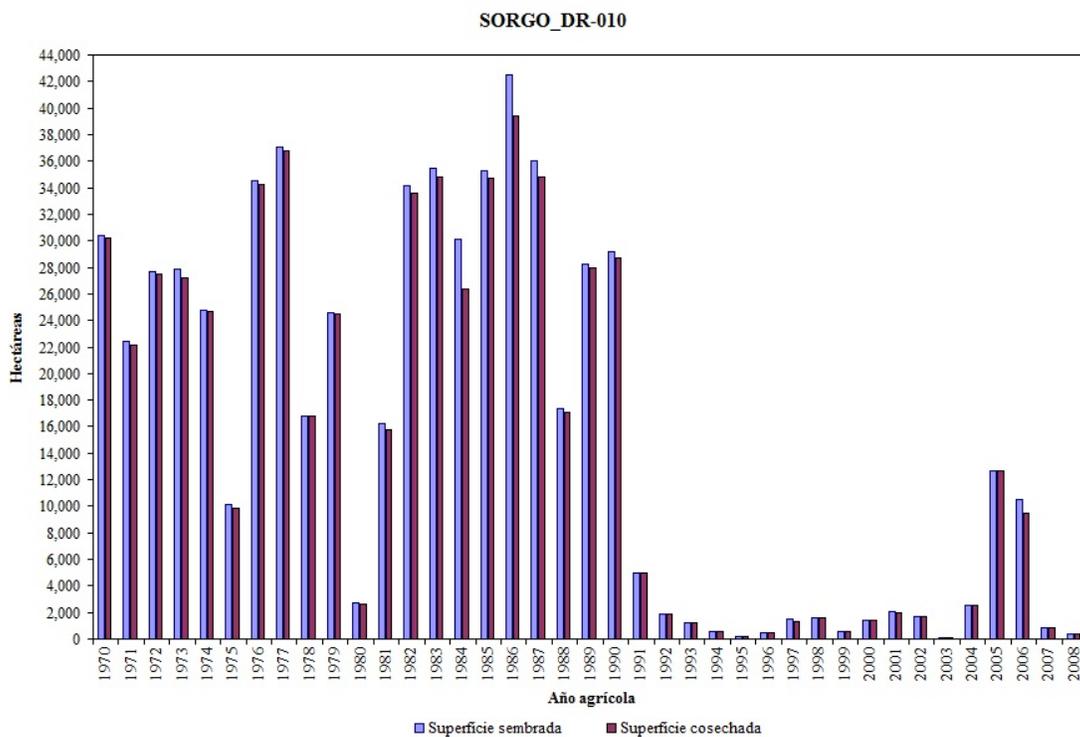


Figura A.1.6. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de sorgo en el DR-010 para el ciclo PV.

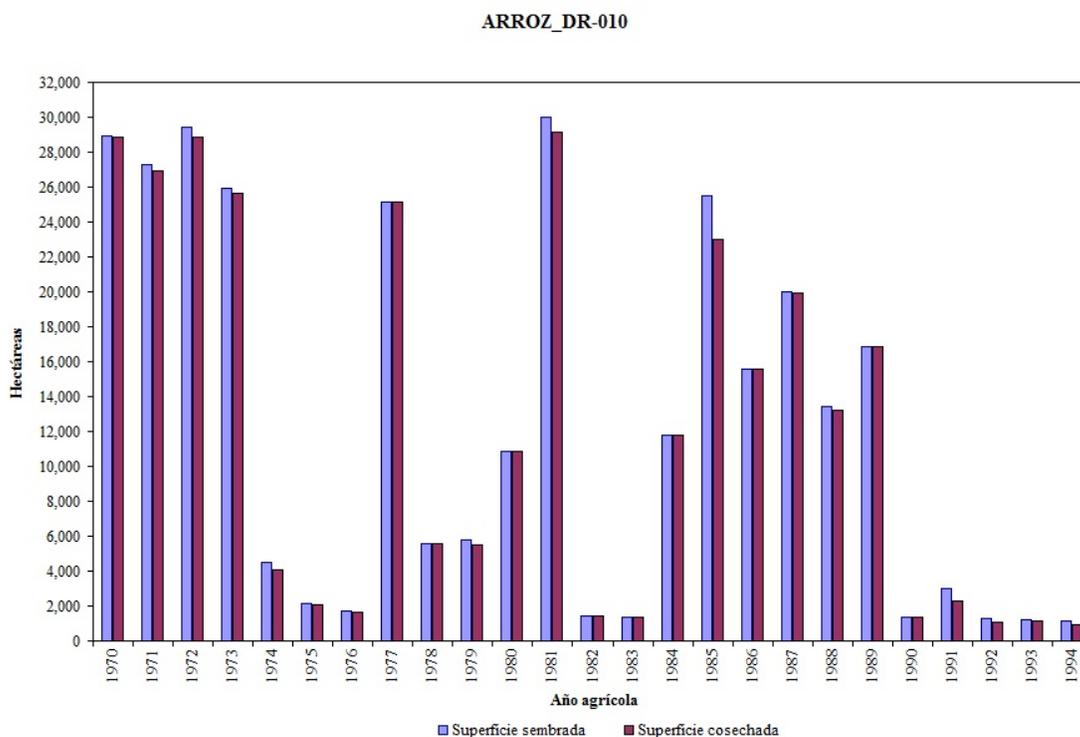


Figura A.1.7. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de arroz en el DR-010 para el ciclo PV.

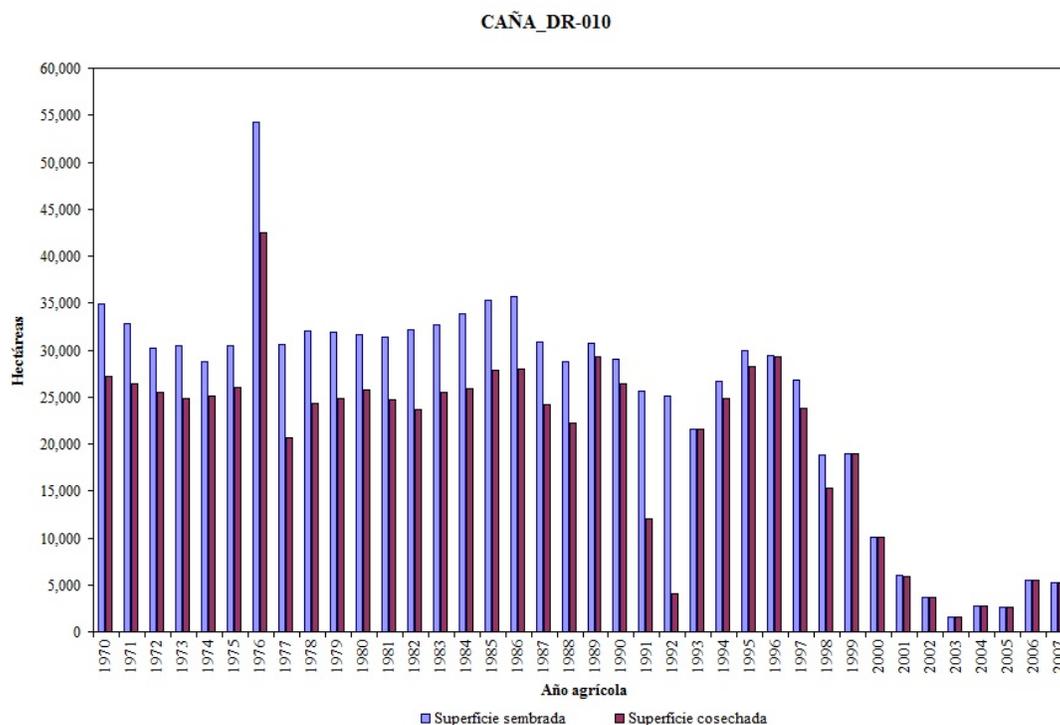


Figura A.1.8. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de caña en el DR-010 para el ciclo Perenne.

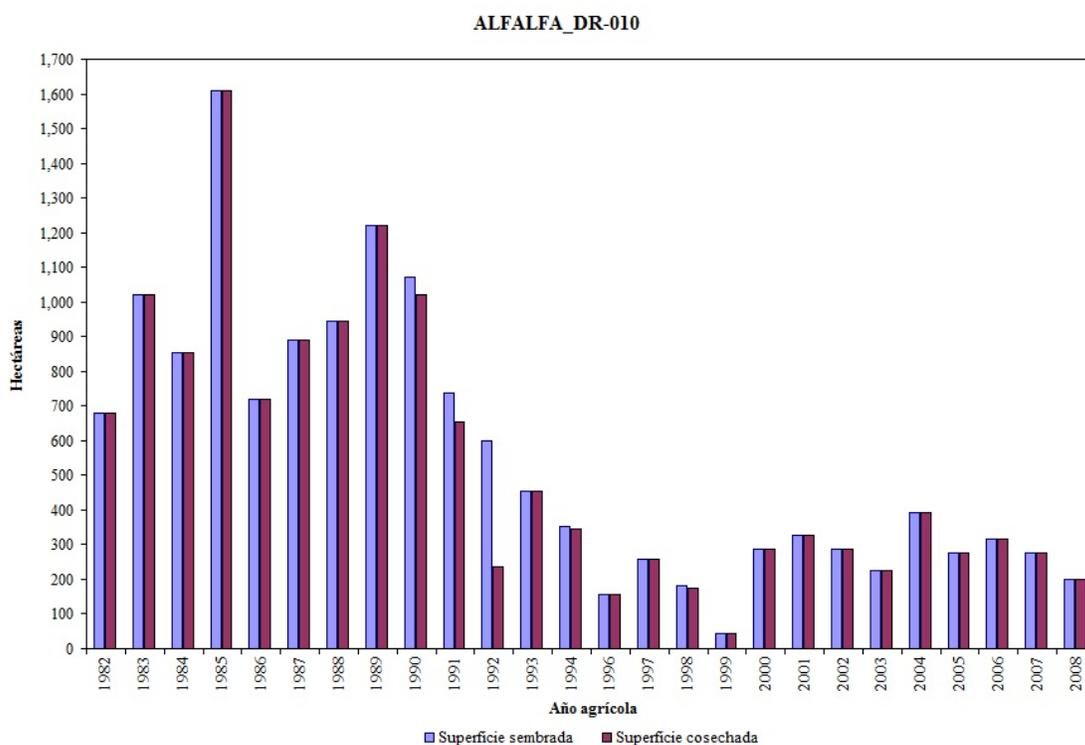


Figura A.1.9. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de alfalfa en el DR-010 para el ciclo Perenne.

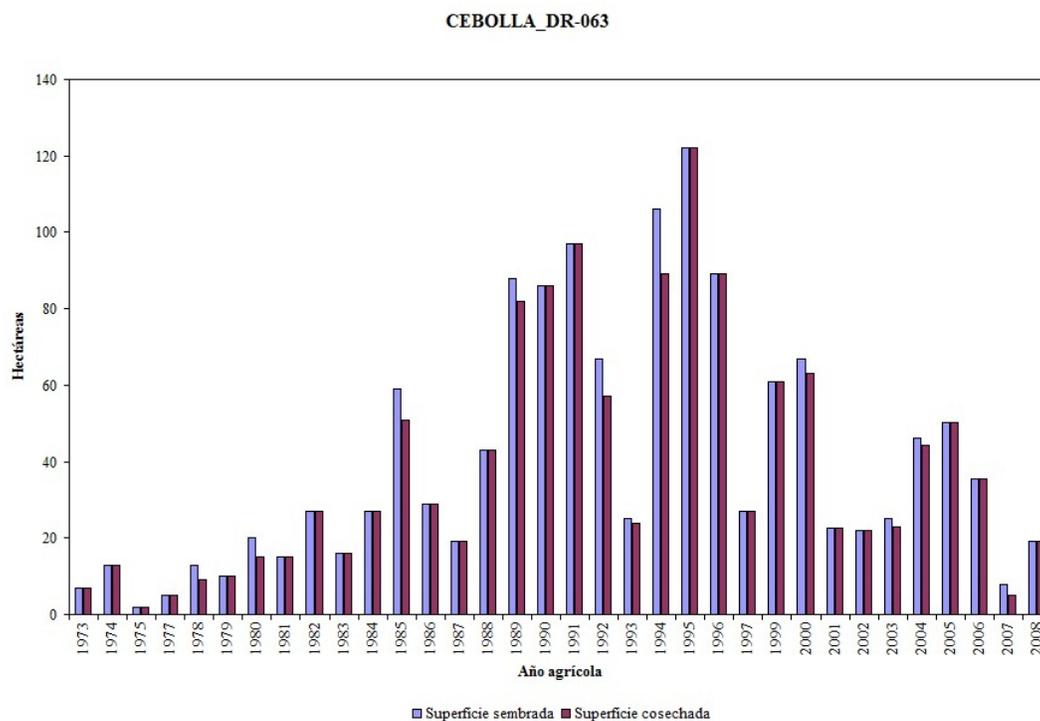


Figura A.1.10. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de cebolla en el DR-063 para el ciclo OI.

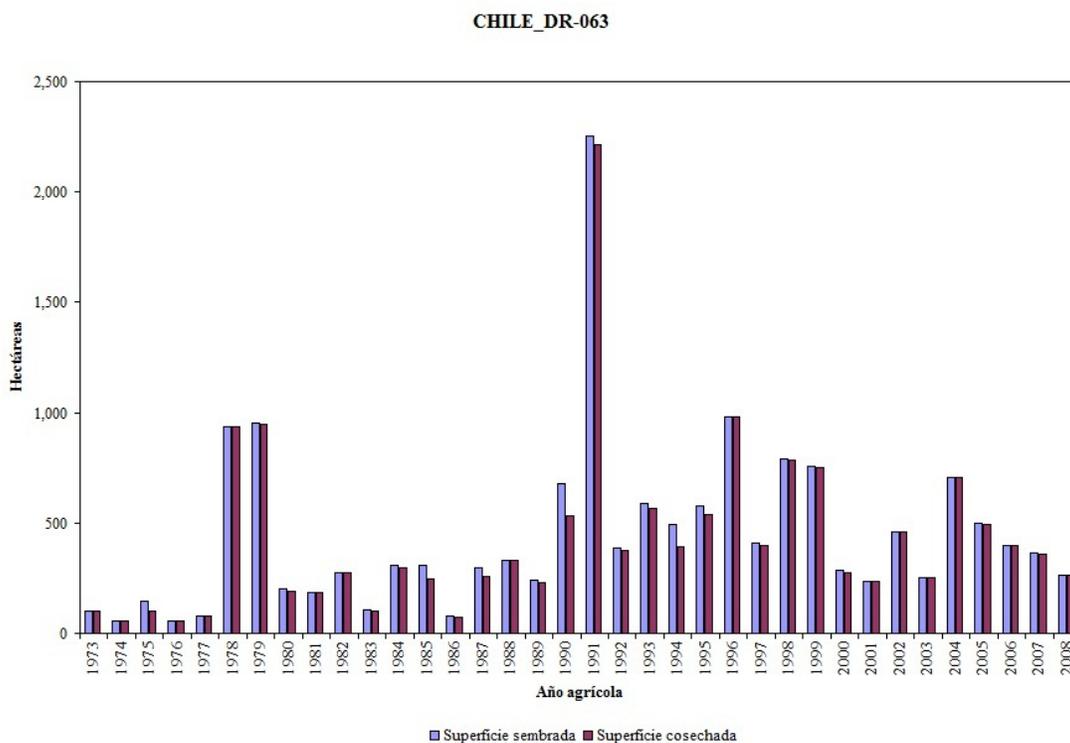


Figura A.1.11. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de chile en el DR-063 para el ciclo OI.

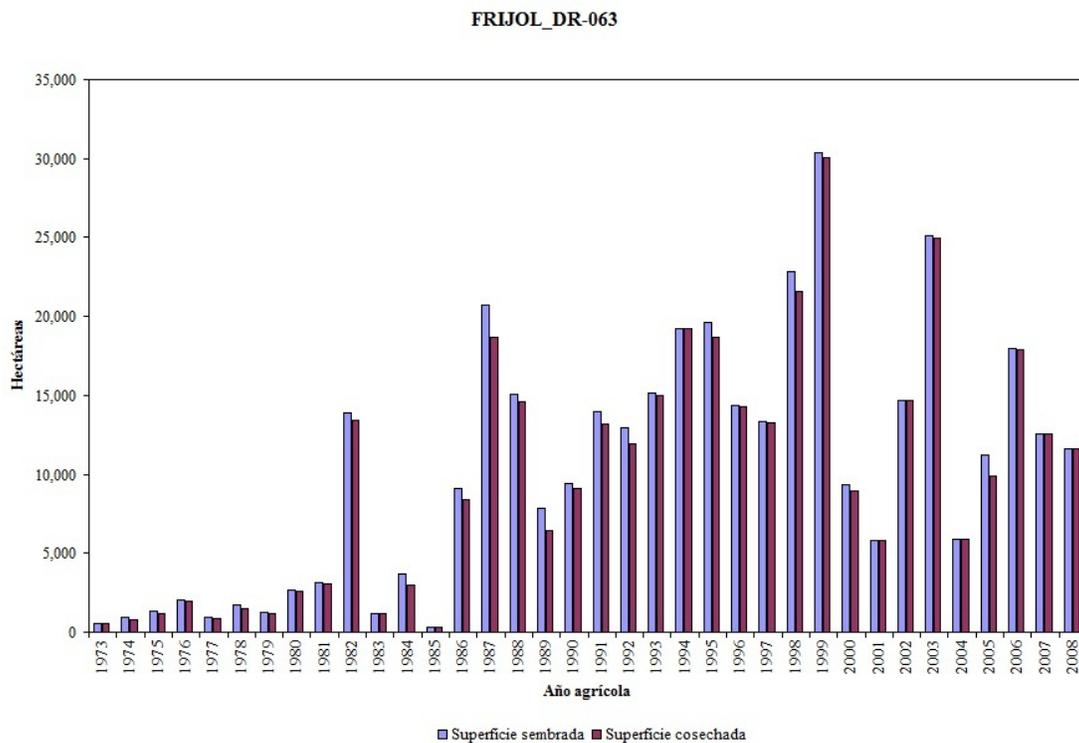


Figura A.1.12. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de frijol en el DR-063 para el ciclo OI.

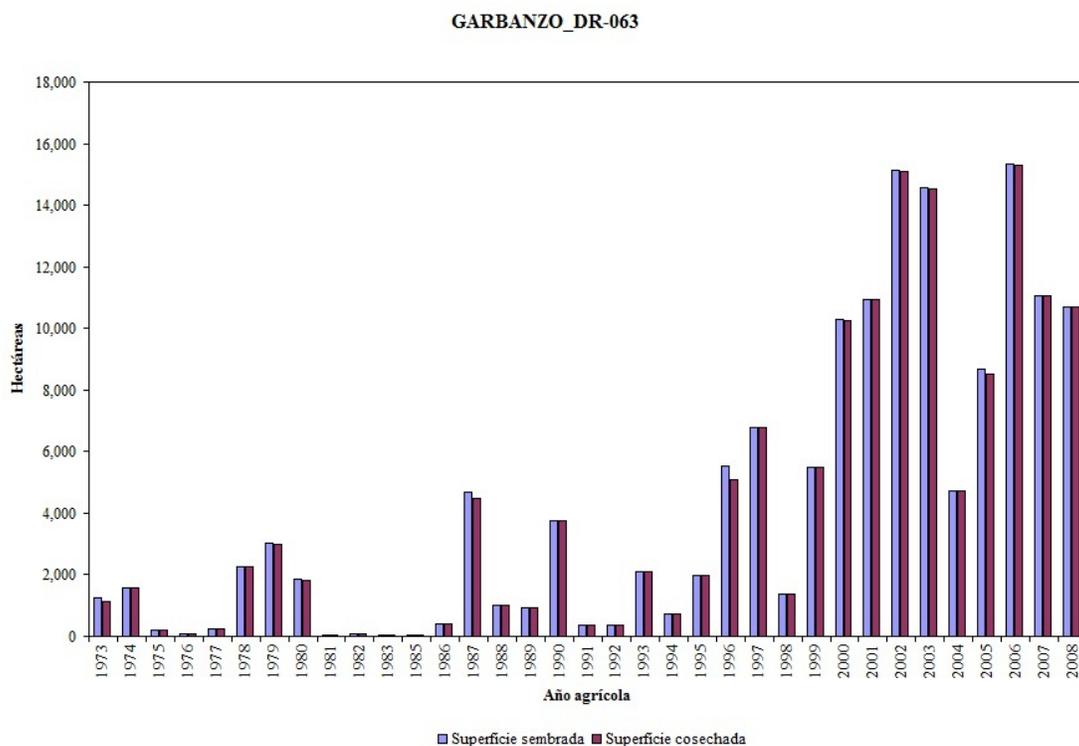


Figura A.1.13. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de garbanzo en el DR-063 para el ciclo OI.

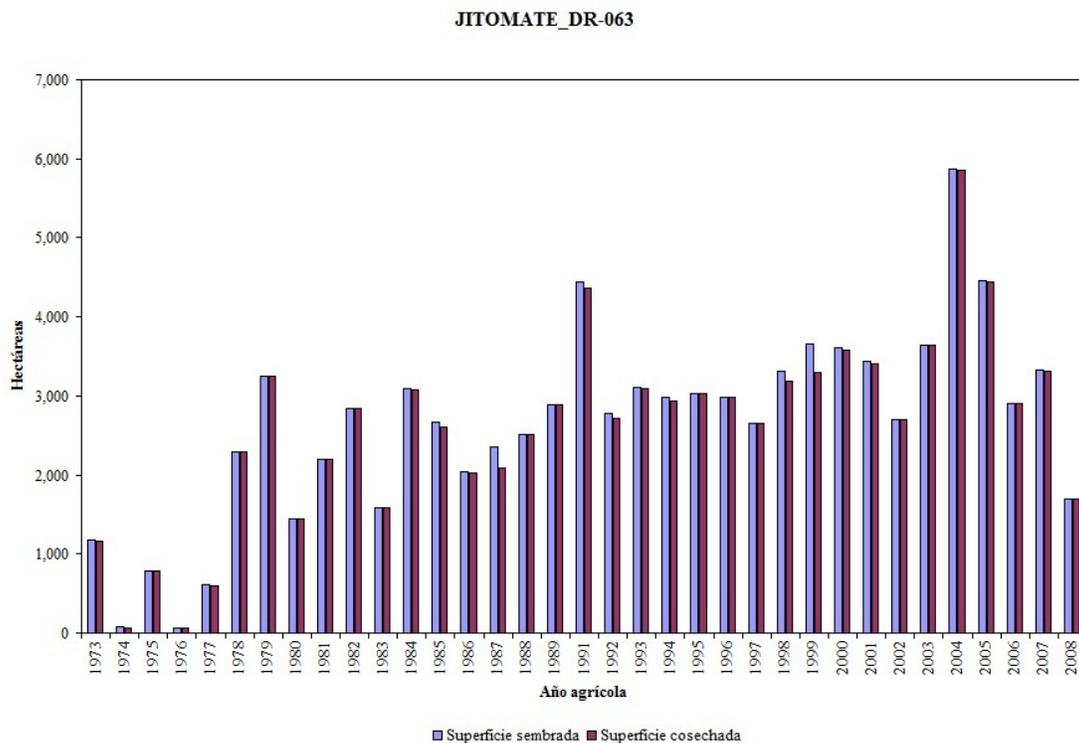


Figura A.1.14. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de jitomate en el DR-063 para el ciclo OI.

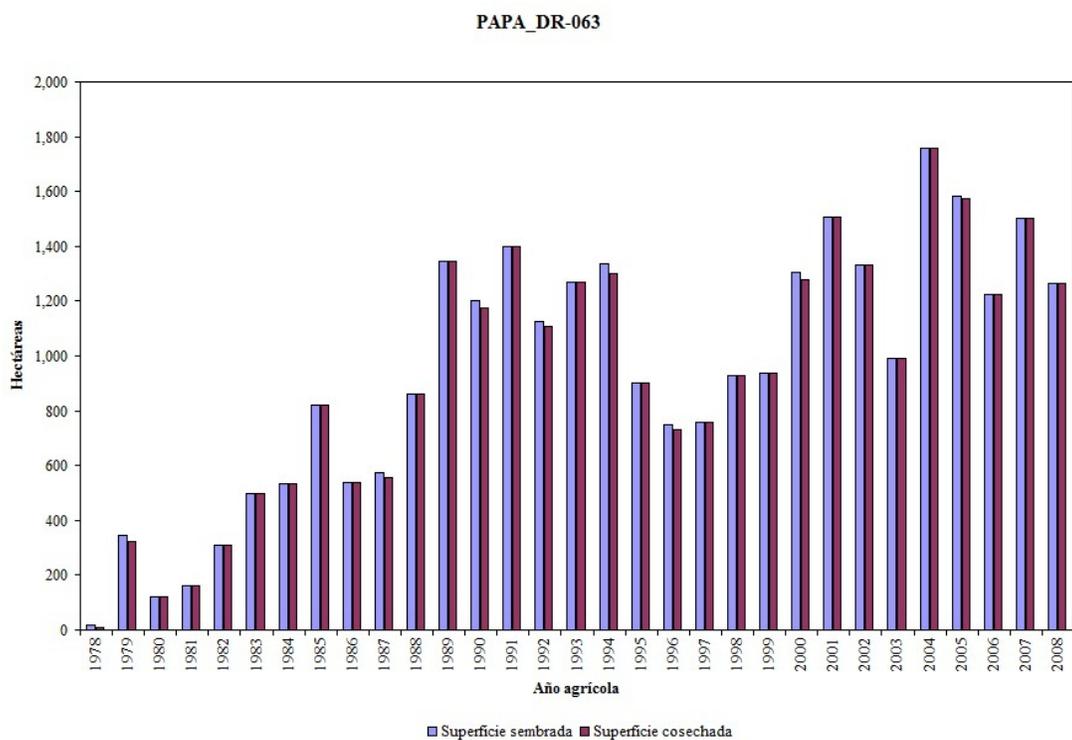


Figura A.1.15. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de papa en el DR-063 para el ciclo OI.

PEPINO_DR-063

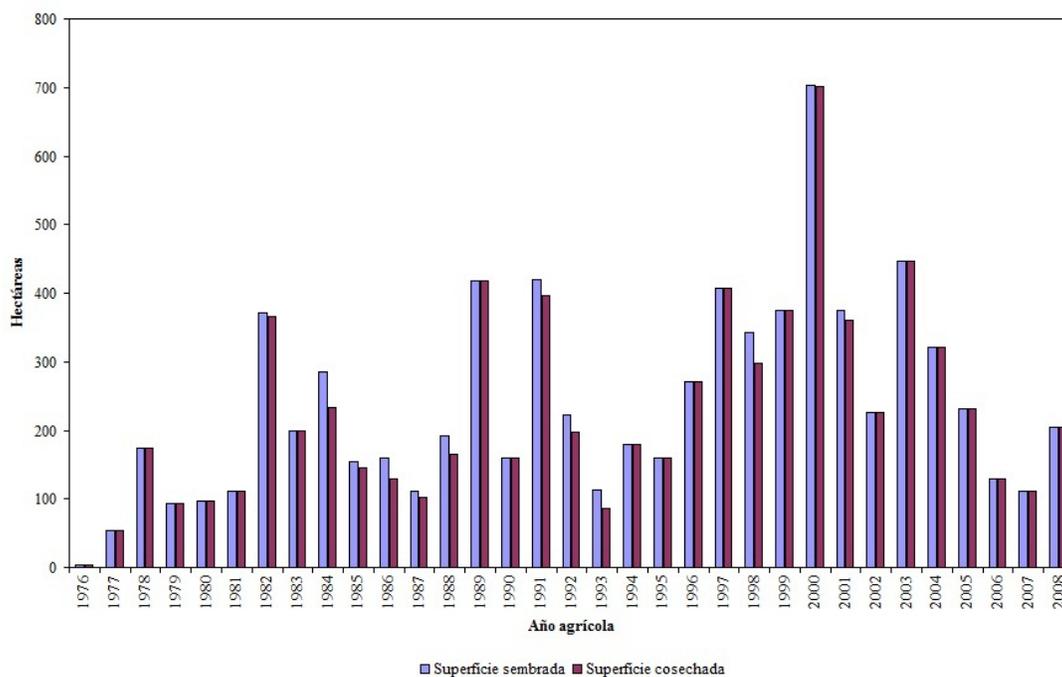


Figura A.1.16. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de pepino en el DR-063 para el ciclo OI.

SANDIA_DR-063

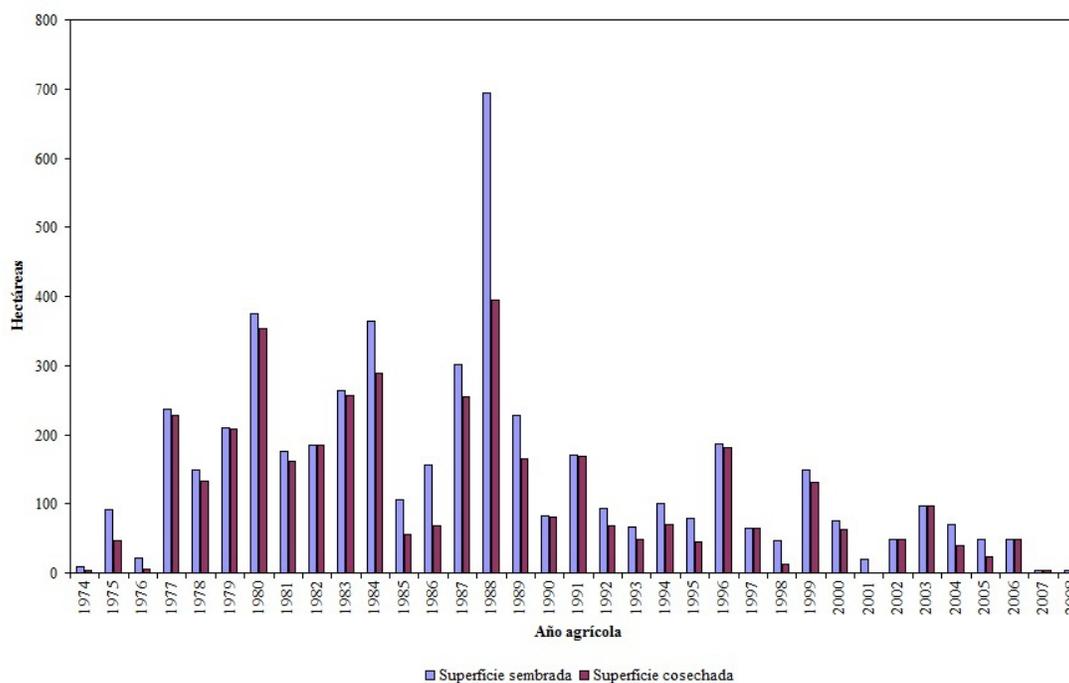


Figura A.1.17. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de sandia en el DR-063 para el ciclo OI.

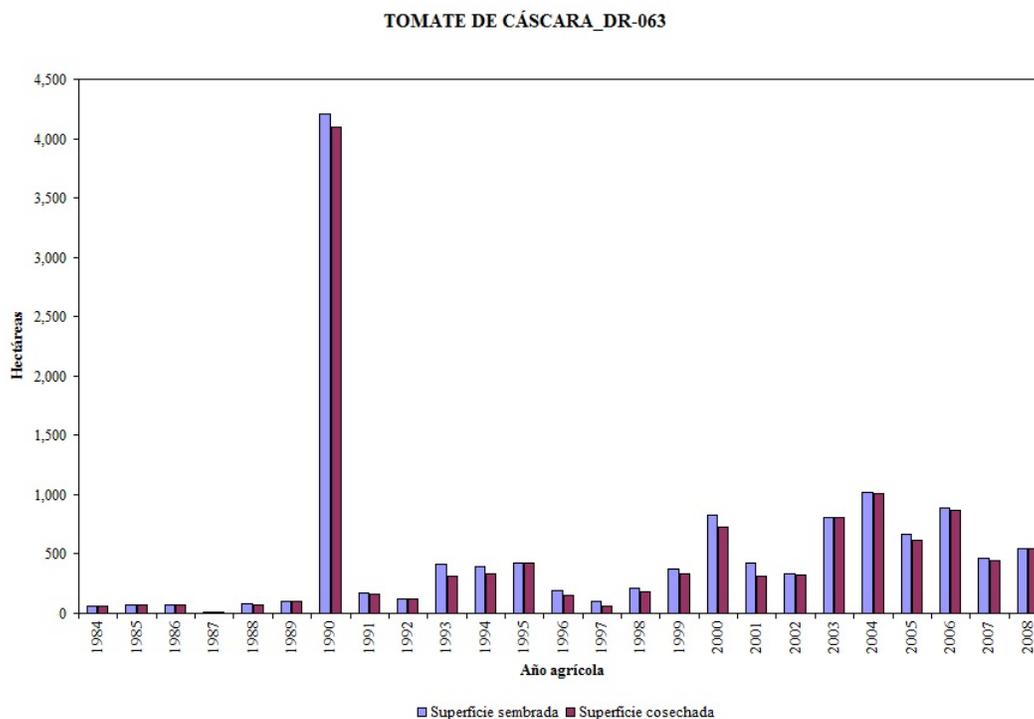


Figura A.1.18. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de tomate de cáscara en el DR-063 para el ciclo OI.

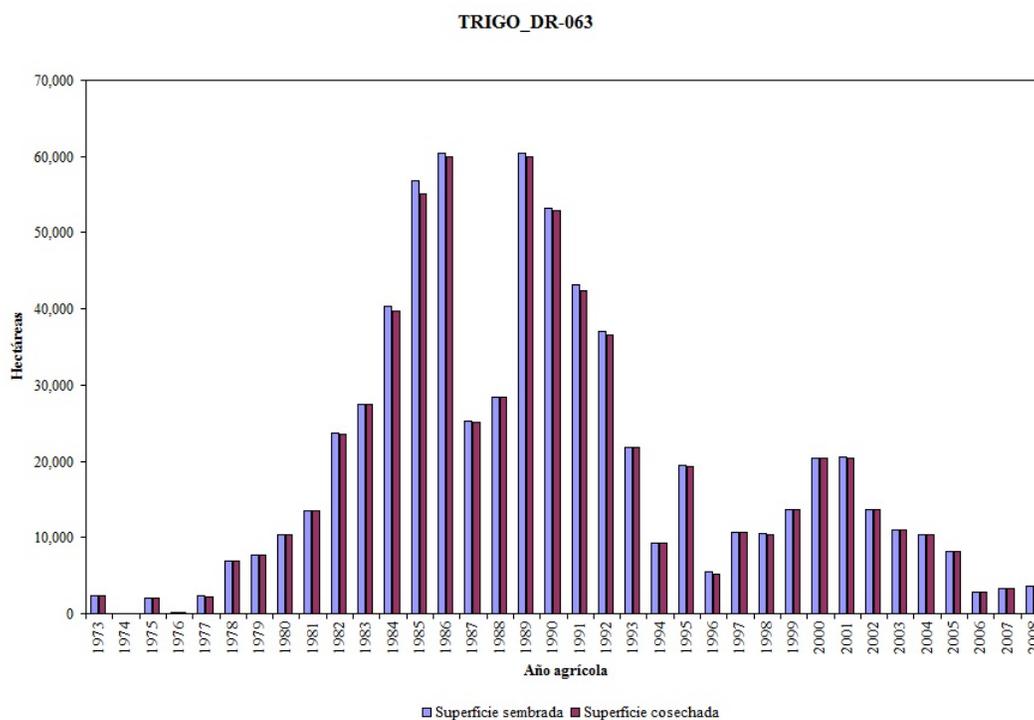


Figura A.1.19. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de trigo en el DR-063 para el ciclo OI.

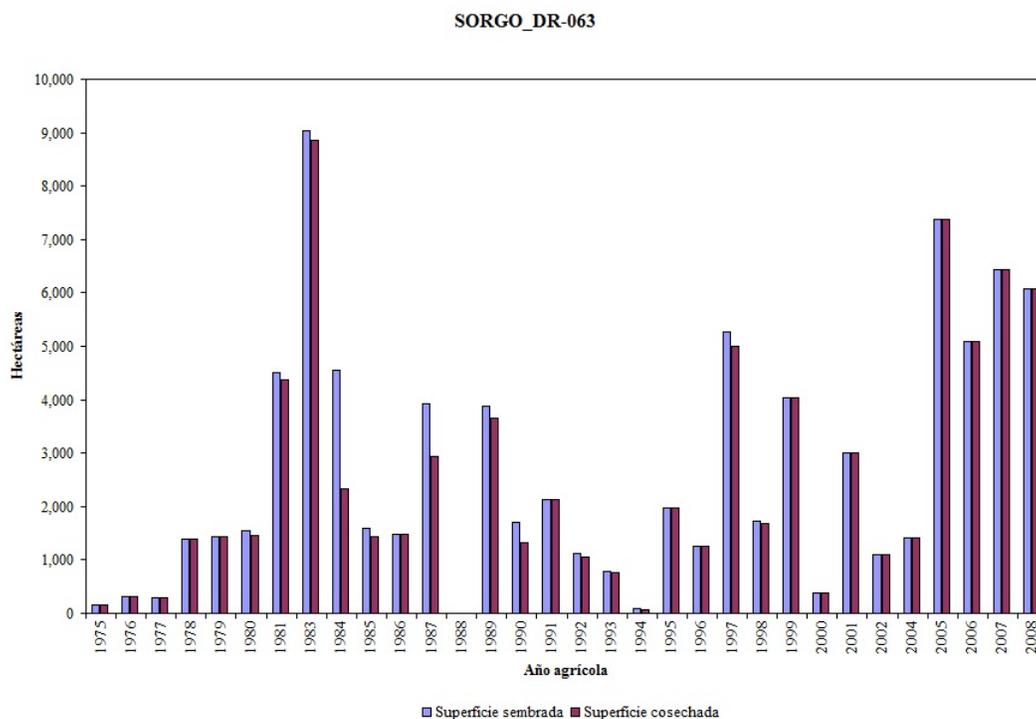


Figura A.1.20. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de sorgo en el DR-063 para el ciclo PV.

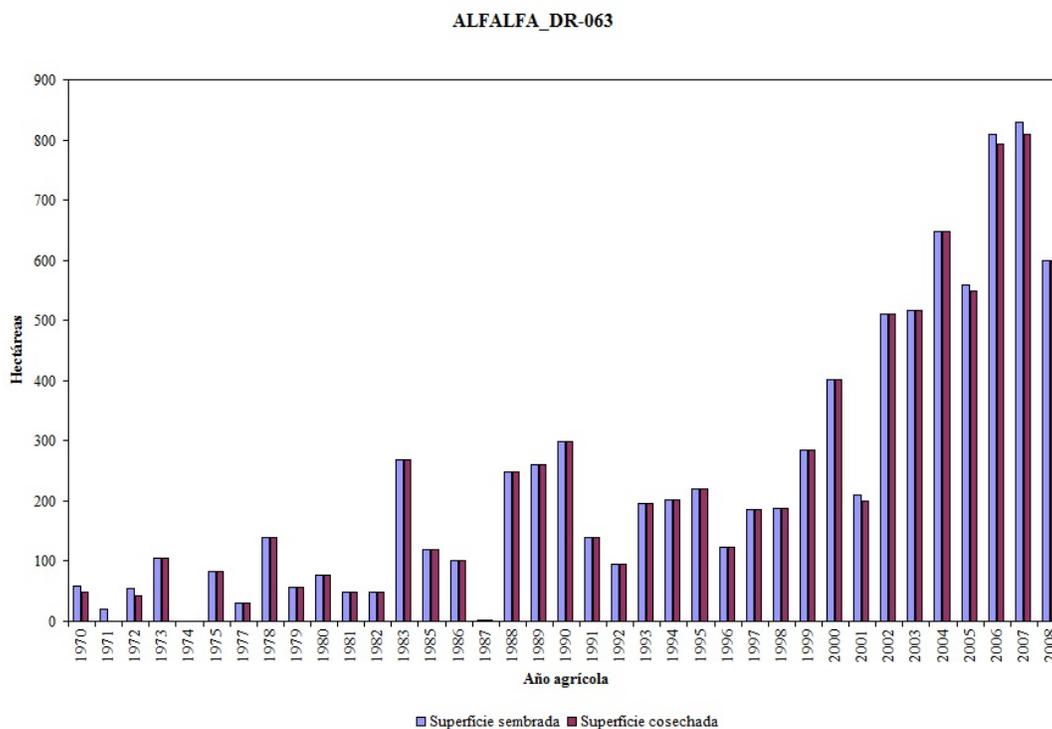


Figura A.1.21. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de alfalfa en el DR-063 para el ciclo Perenne.

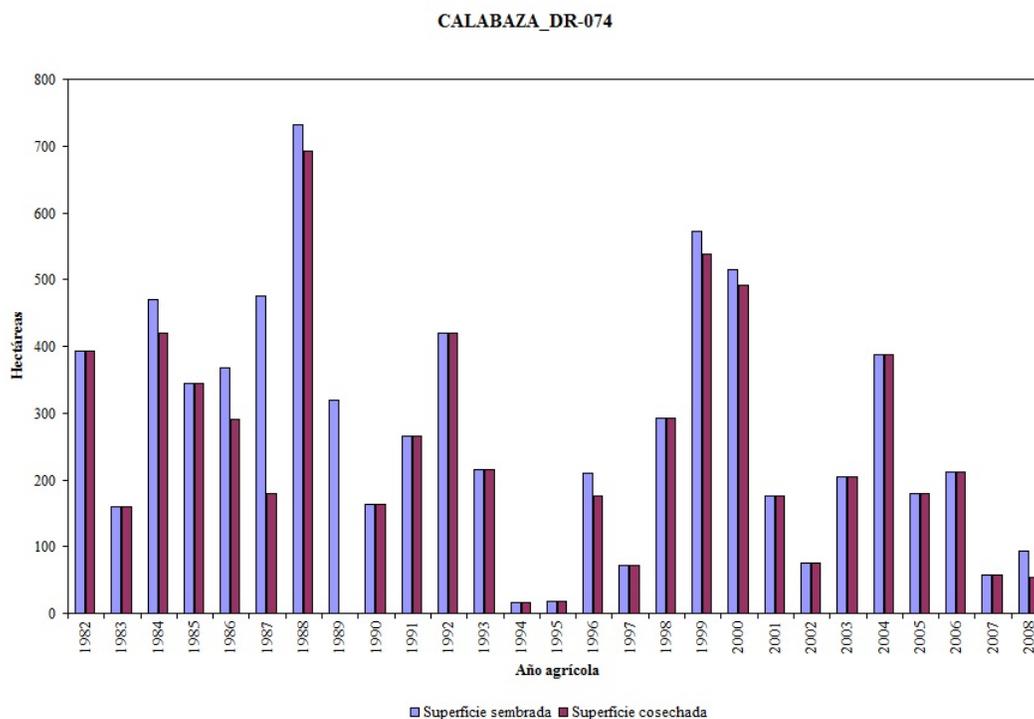


Figura A.1.22. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de calabaza en el DR-074 para el ciclo OI.

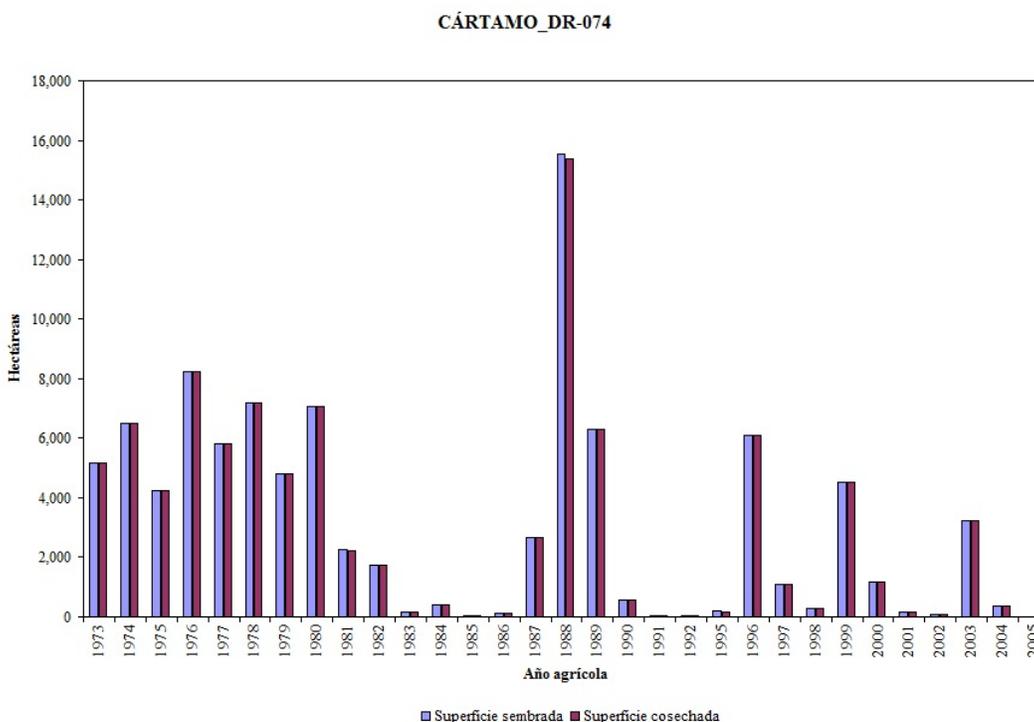


Figura A.1.23. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de cártamo en el DR-074 para el ciclo OI.

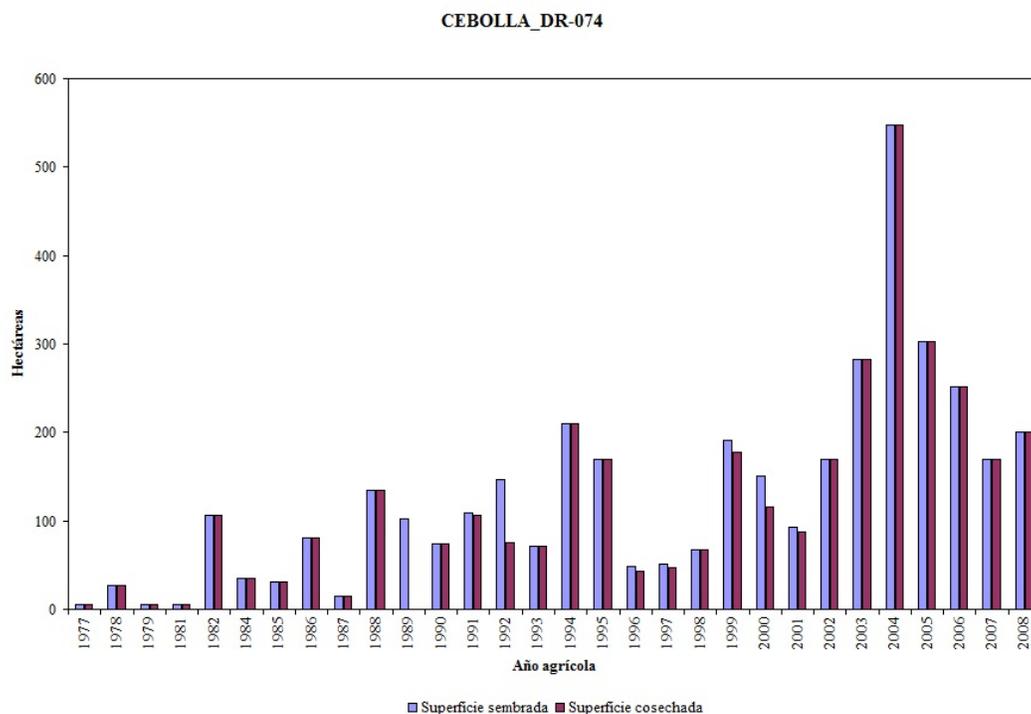


Figura A.1.24. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de cebolla en el DR-074 para el ciclo OI.

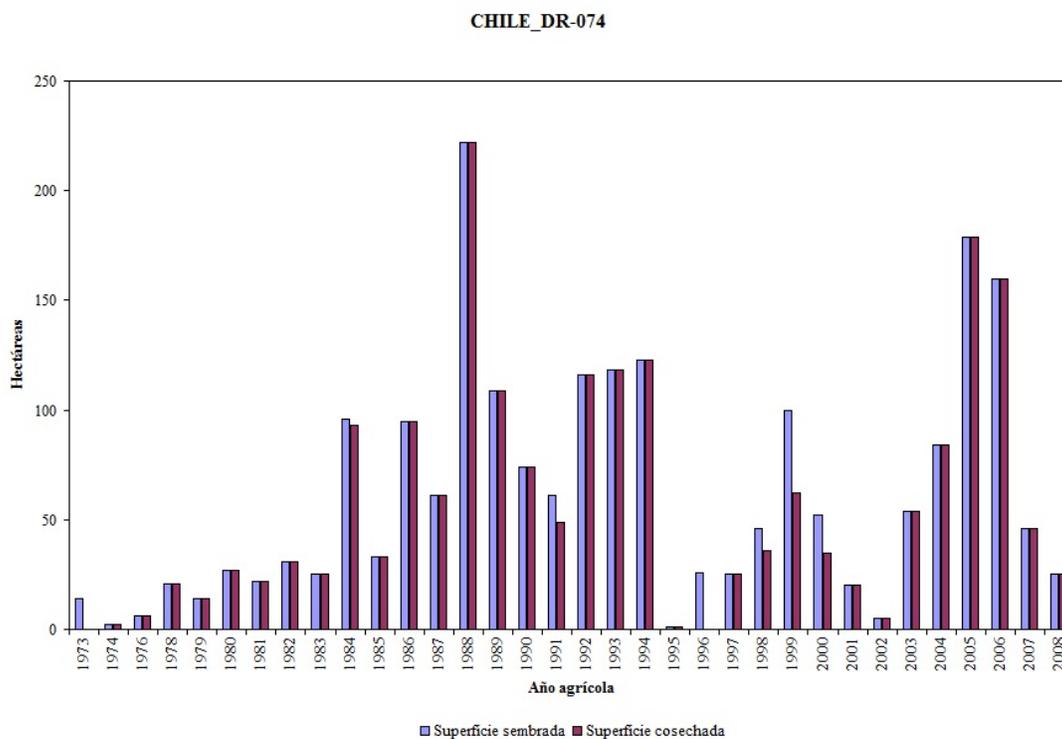


Figura A.1.25. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de chile en el DR-074 para el ciclo OI.

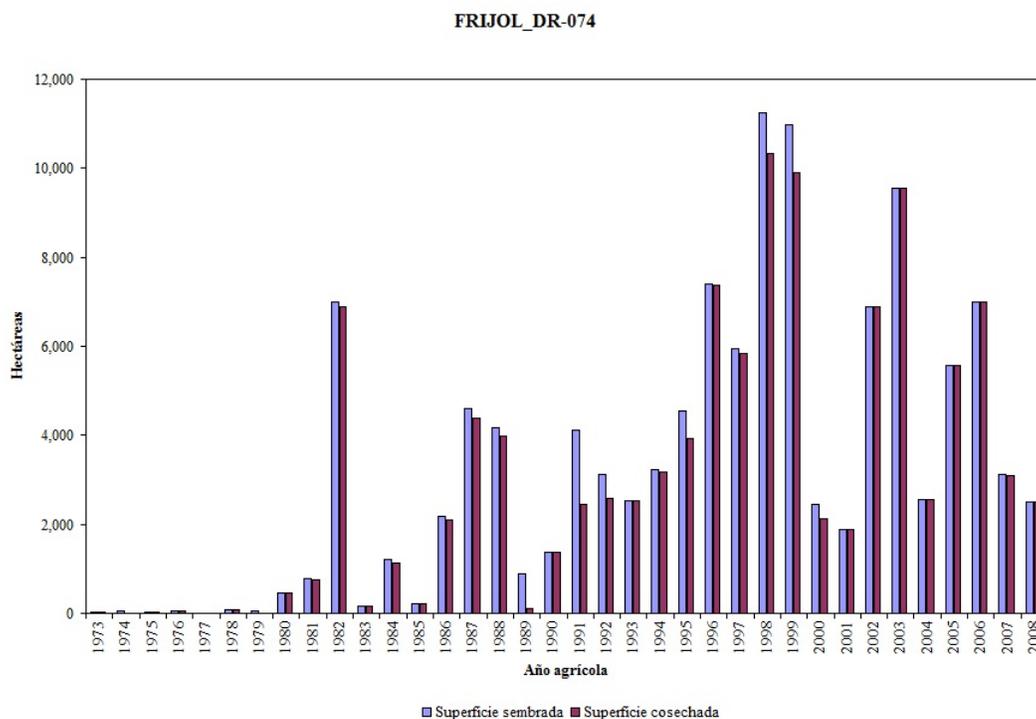


Figura A.1.26. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de frijol en el DR-074 para el ciclo OI.

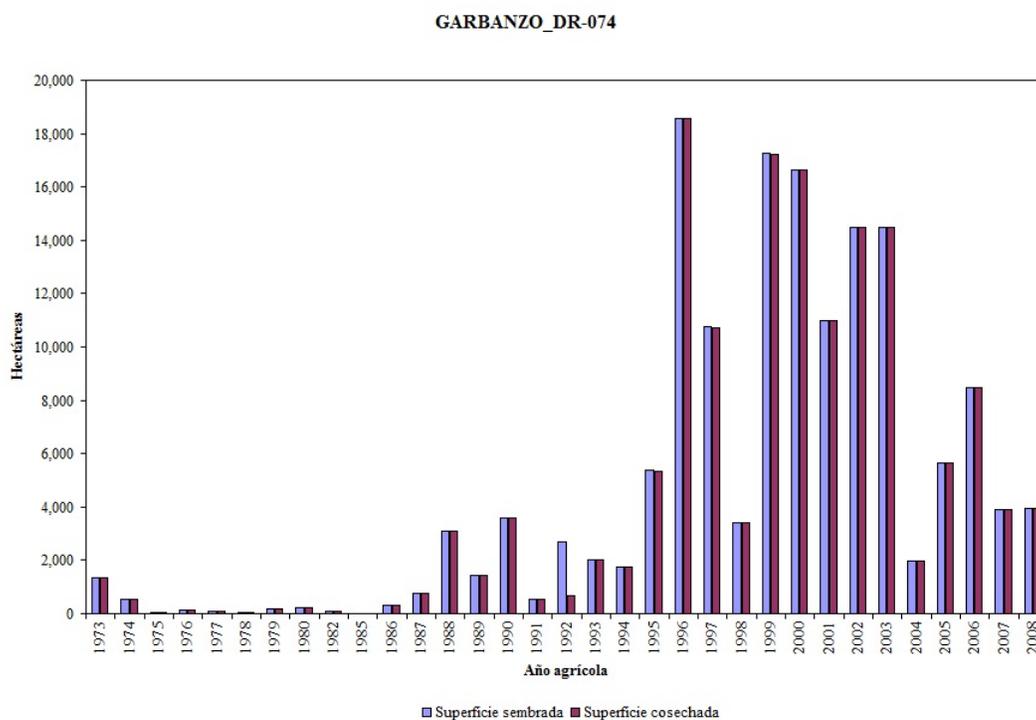


Figura A.1.27. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de garbanzo en el DR-074 para el ciclo OI.

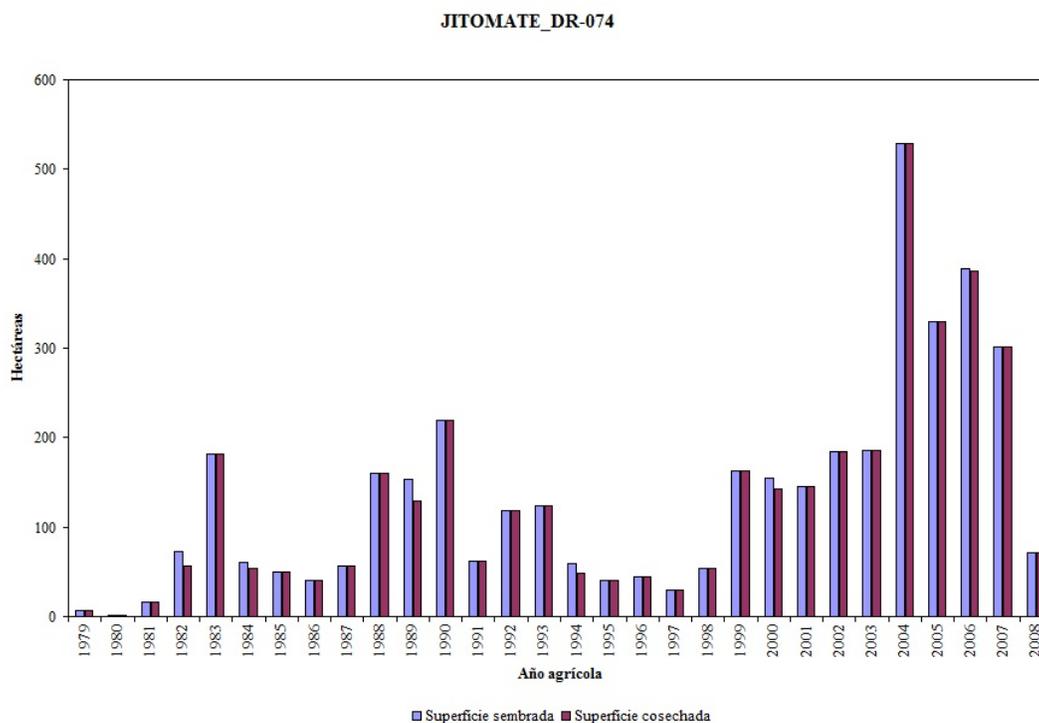


Figura A.1.28. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de jitomate en el DR-074 para el ciclo OI.

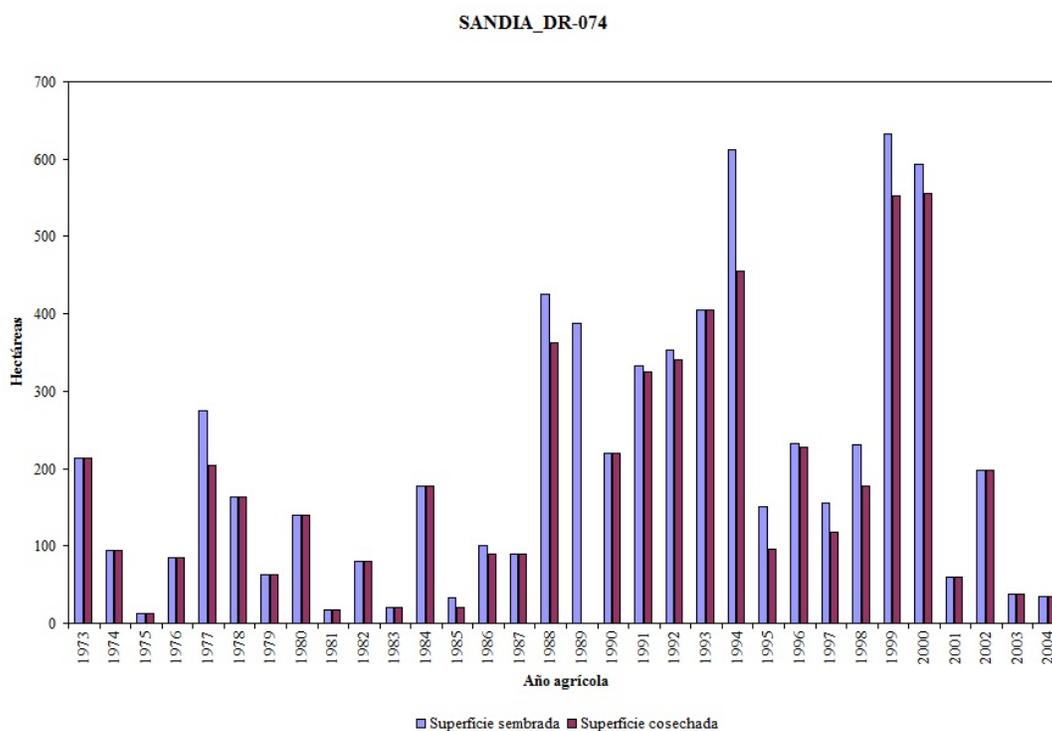


Figura A.1.29. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de sandia en el DR-074 para el ciclo OI.

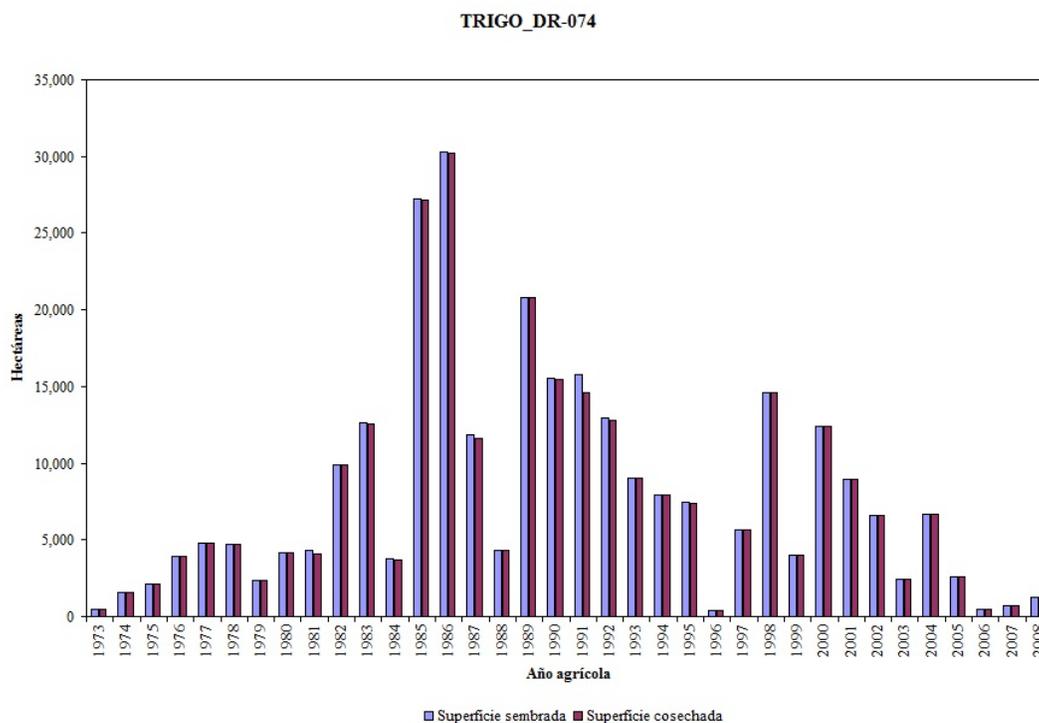


Figura A.1.30. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de trigo en el DR-074 para el ciclo OI.

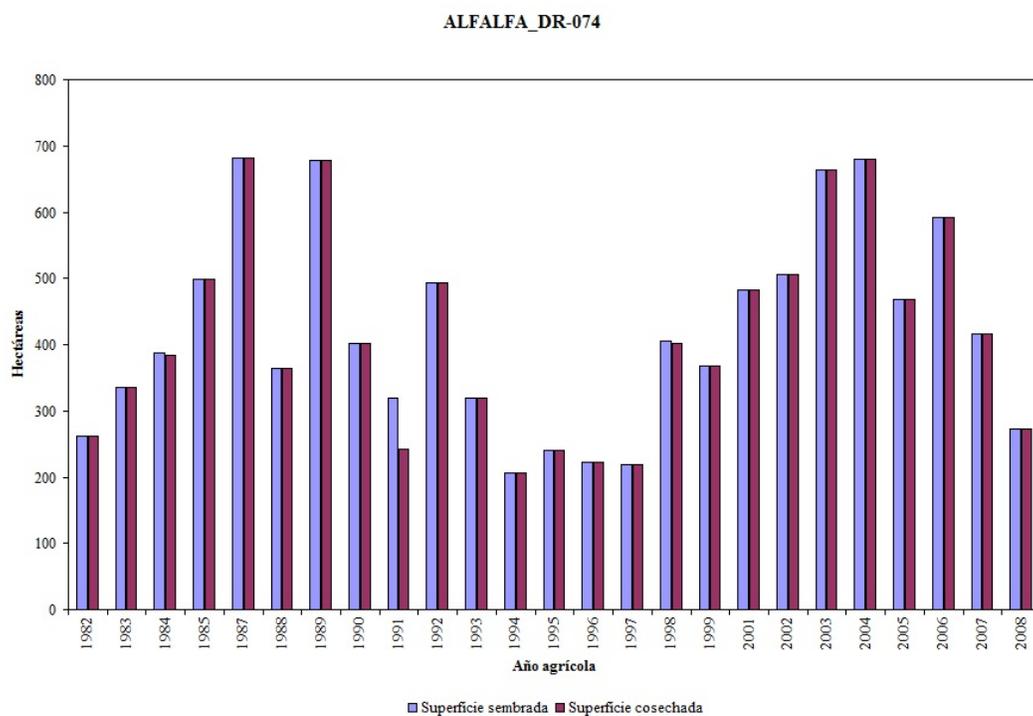


Figura A.1.31. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de alfalfa en el DR-074 para el ciclo Perenne.

ALGODÓN_DR-075

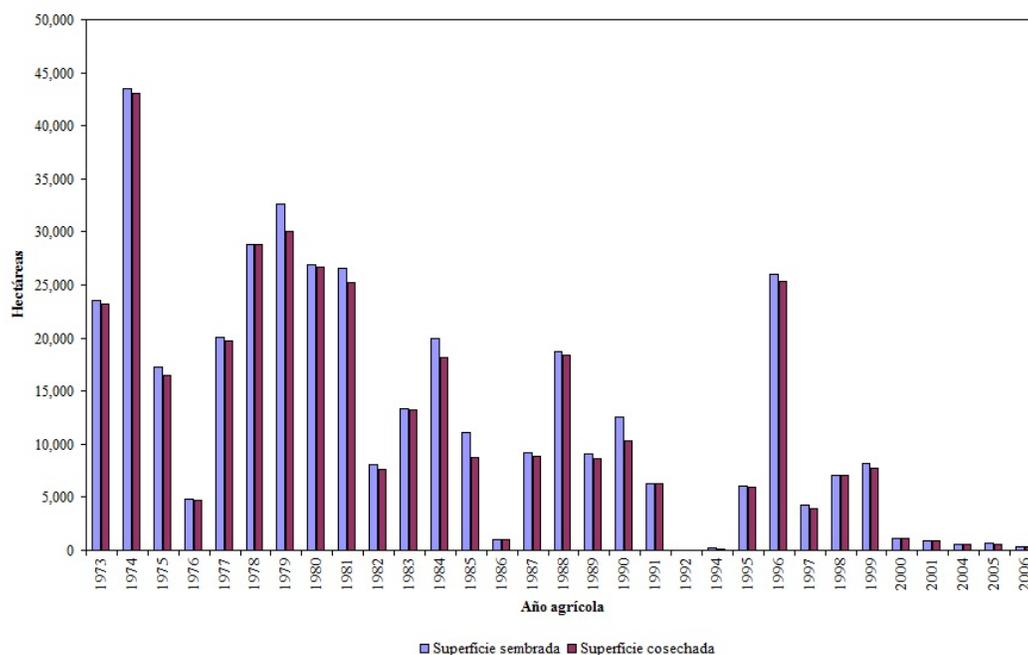


Figura A.1.32. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de algodón en el DR-075 para el ciclo OI.

CALABAZA_DR-075

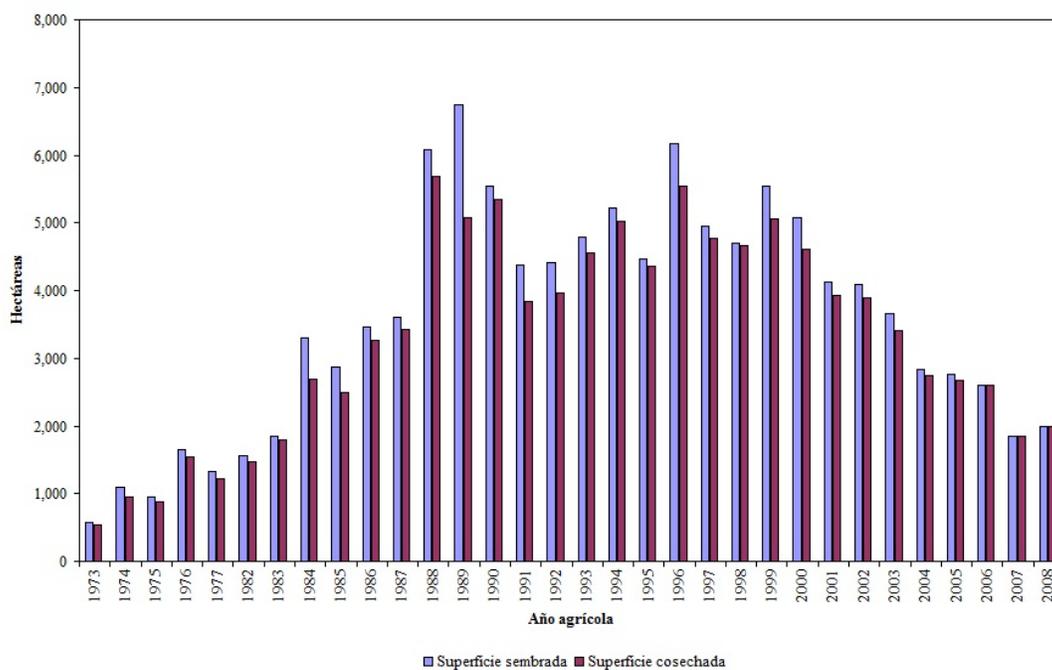


Figura A.1.33. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de calabaza en el DR-075 para el ciclo OI.

CÁRTAMO_DR-075

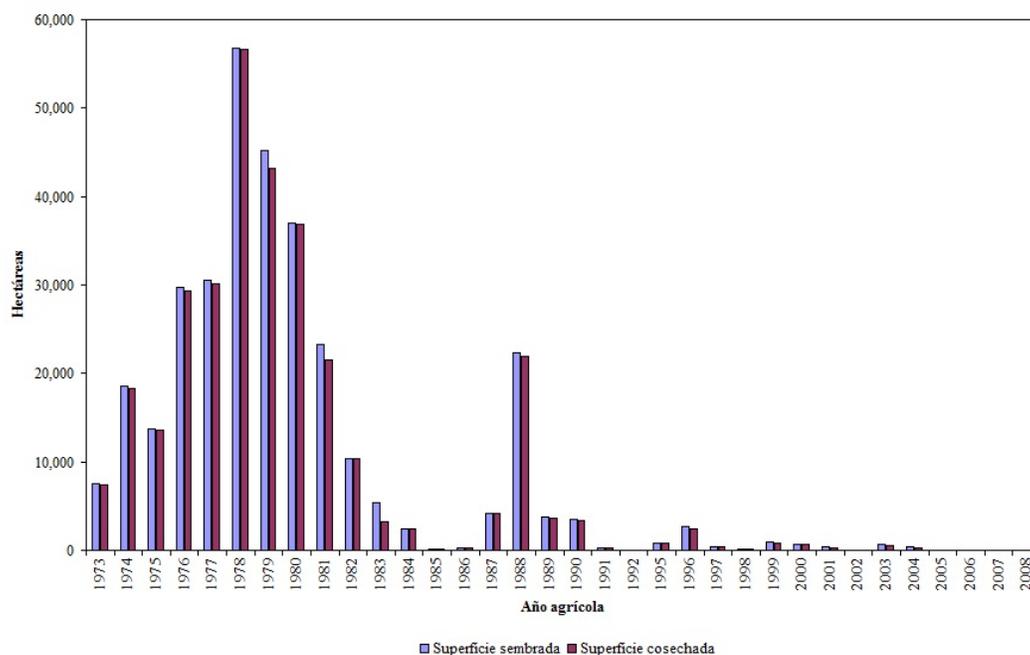


Figura A.1.34. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de cártamo en el DR-075 para el ciclo OI.

CEBOLLA_DR-075

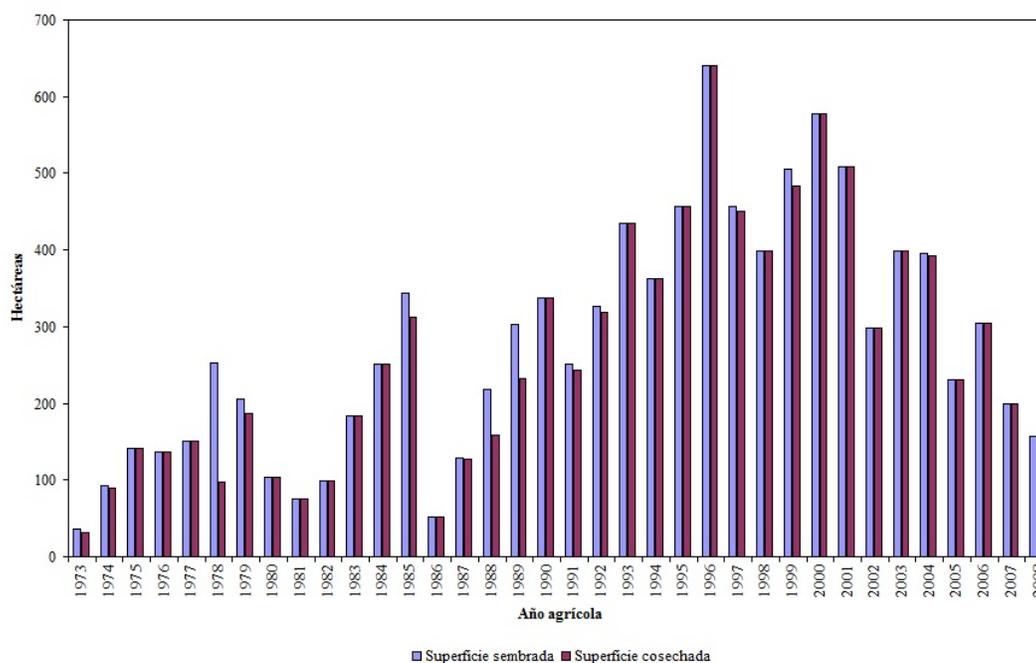


Figura A.1.35. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de cebolla en el DR-075 para el ciclo OI.

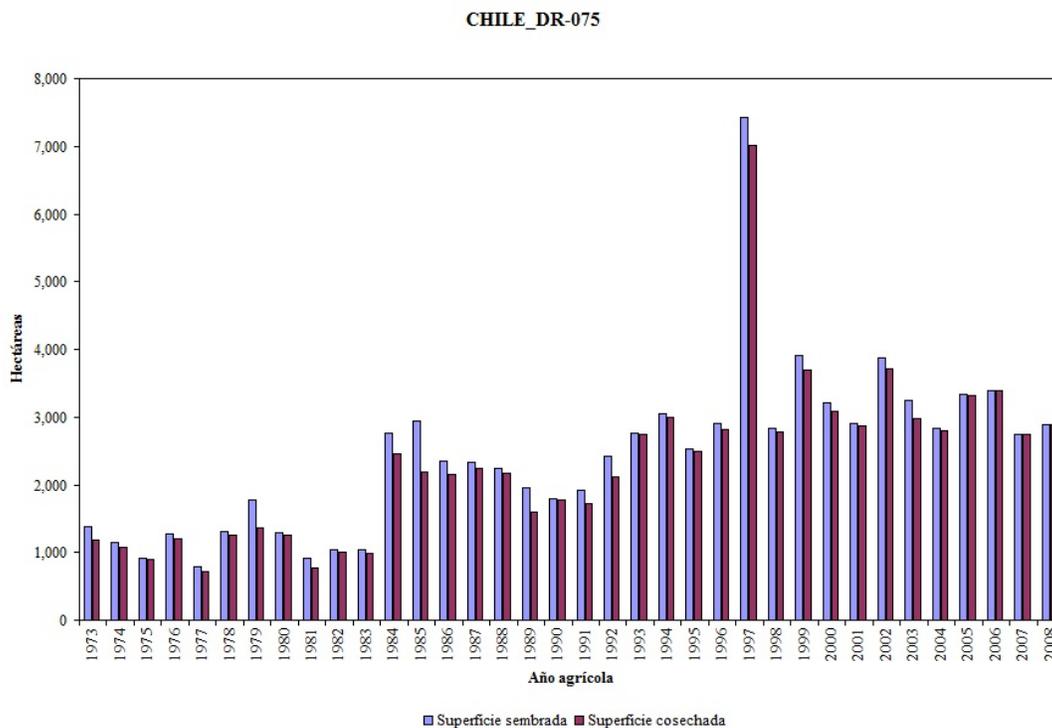


Figura A.1.36. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de chile en el DR-075 para el ciclo OI.

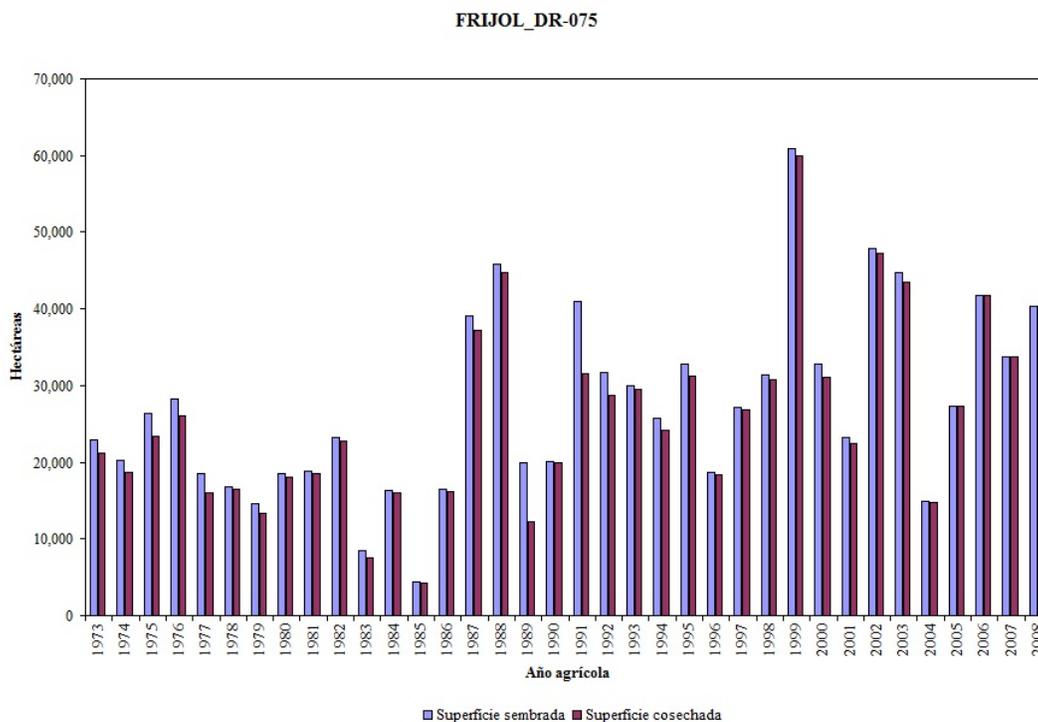


Figura A.1.37. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de frijol en el DR-075 para el ciclo OI.

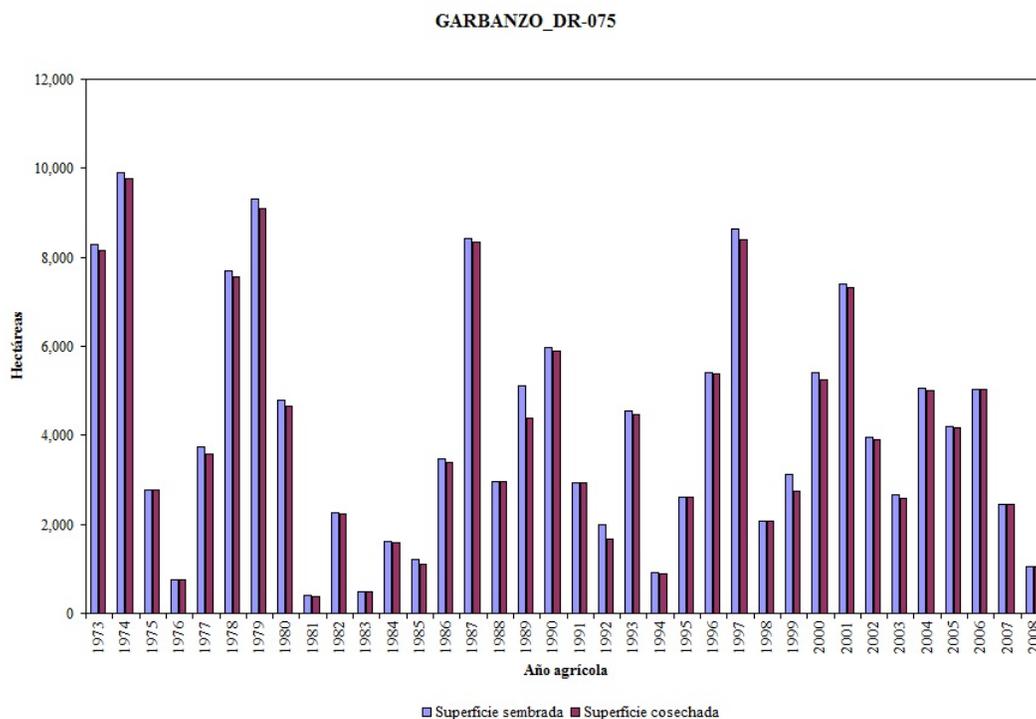


Figura A.1.38. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de garbanzo en el DR-075 para el ciclo OI.

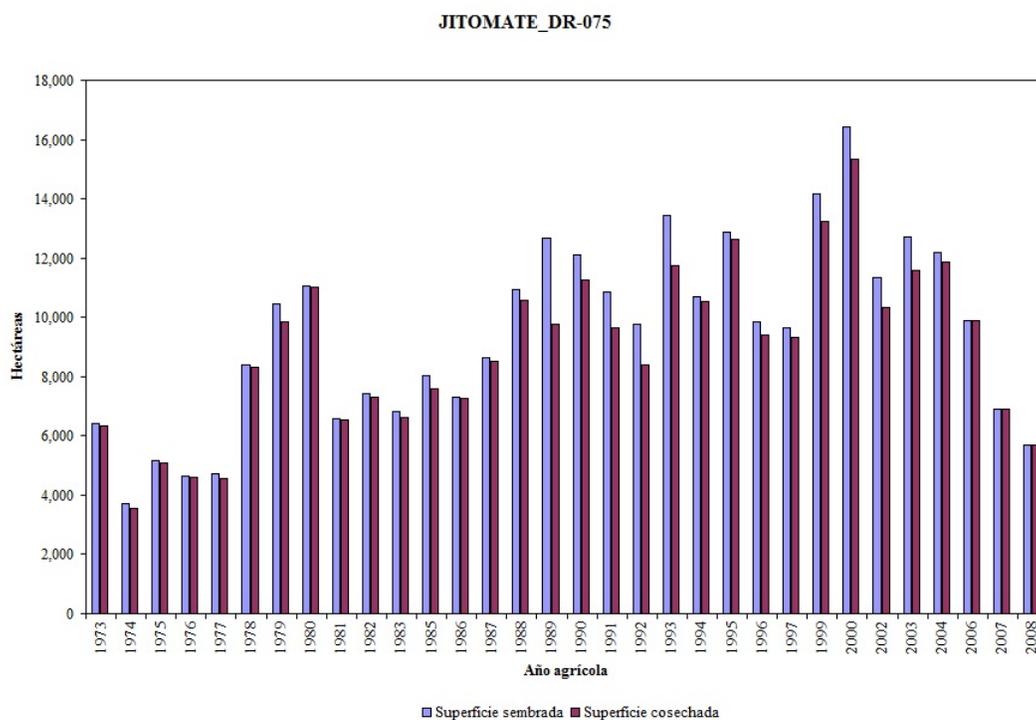


Figura A.1.39. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de jitomate en el DR-075 para el ciclo OI.

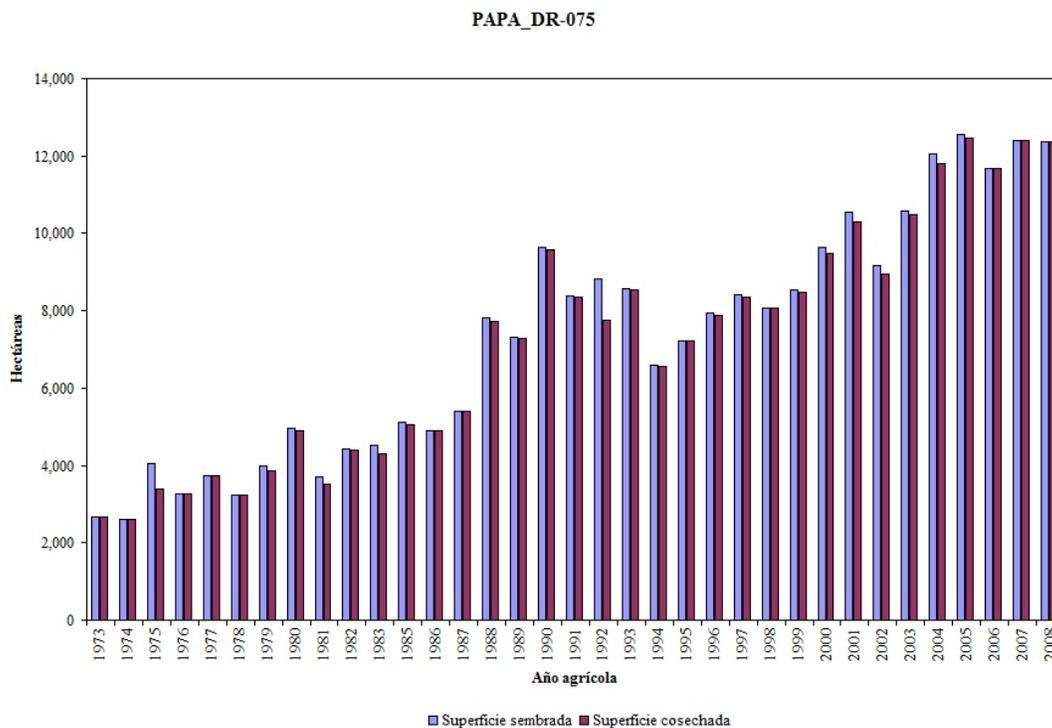


Figura A.1.40. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de papa en el DR-075 para el ciclo OI.

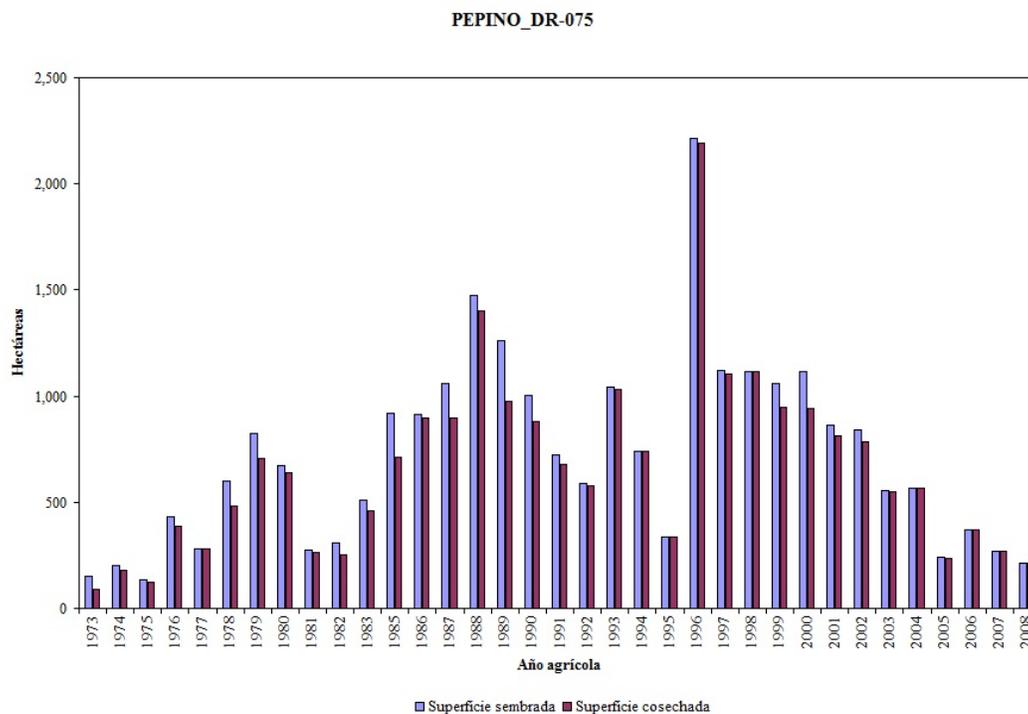


Figura A.1.41. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de pepino en el DR-075 para el ciclo OI.

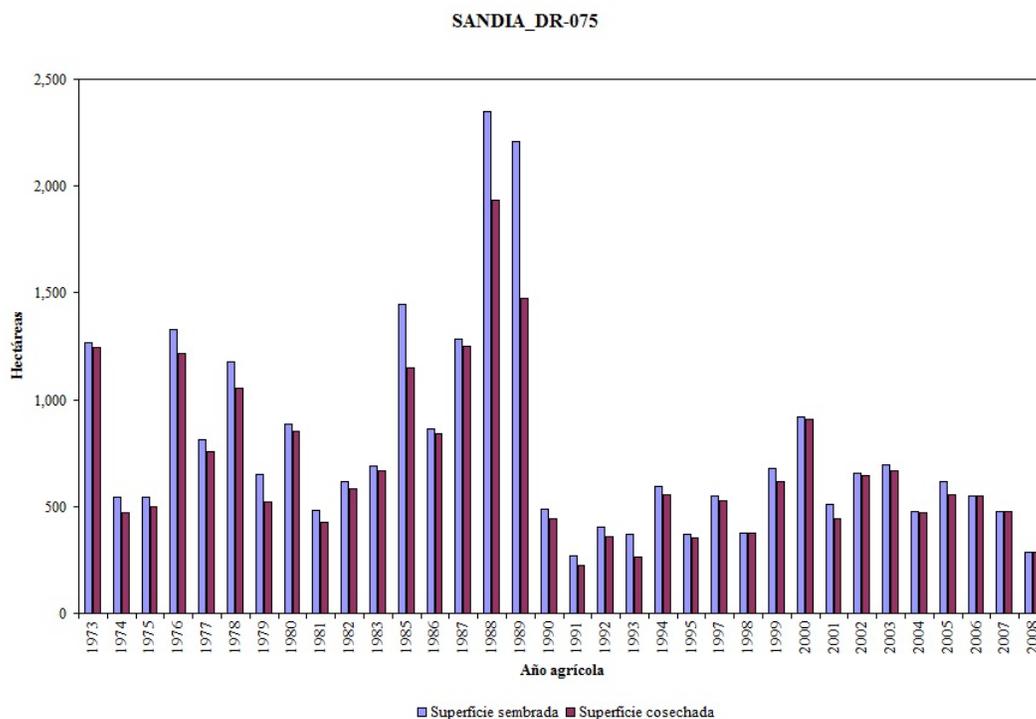


Figura A.1.42. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de sandia en el DR-075 para el ciclo OI.

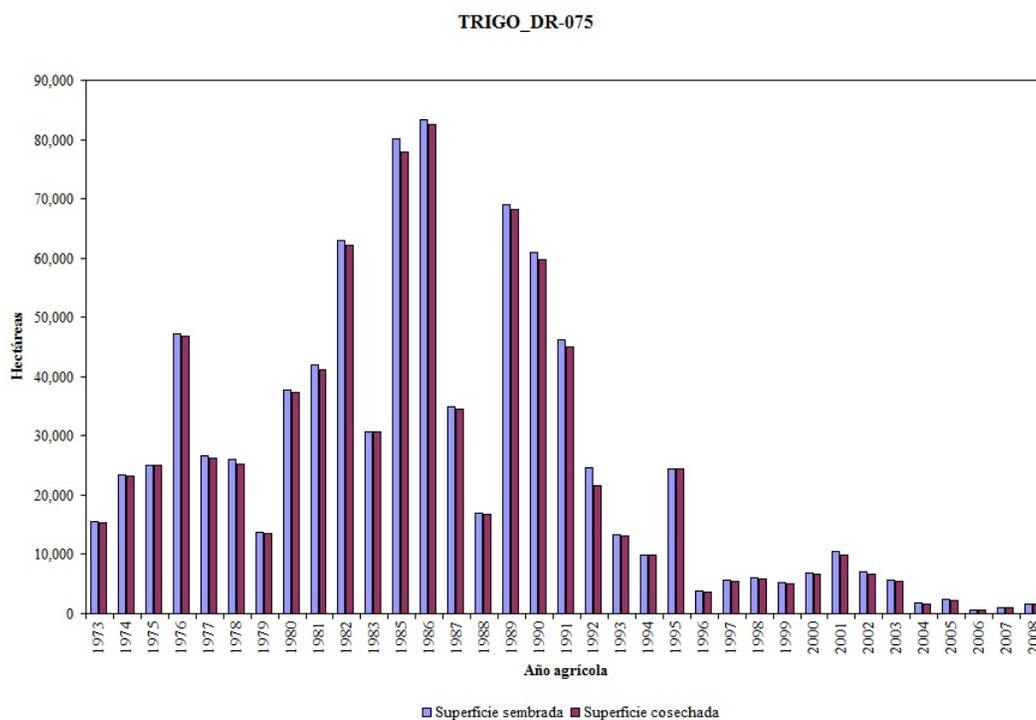


Figura A.1.43. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de trigo en el DR-075 para el ciclo OI.

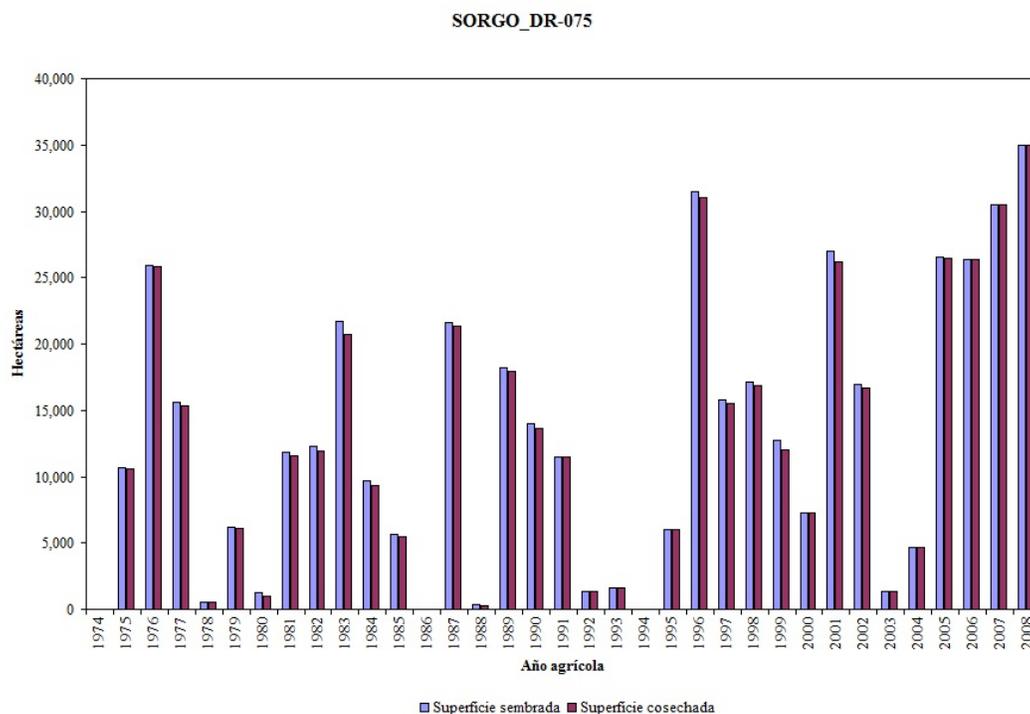


Figura A.1.44. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de sorgo en el DR-075 para el ciclo PV.

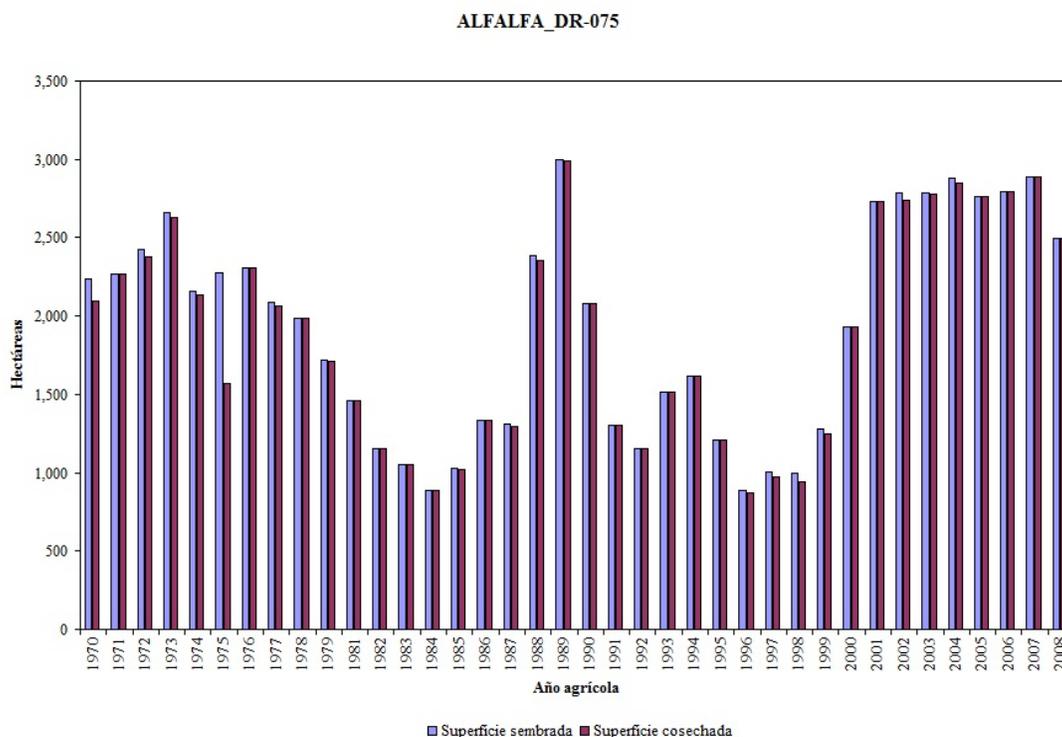


Figura A.1.45. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de alfalfa en el DR-075 para el ciclo Perenne.

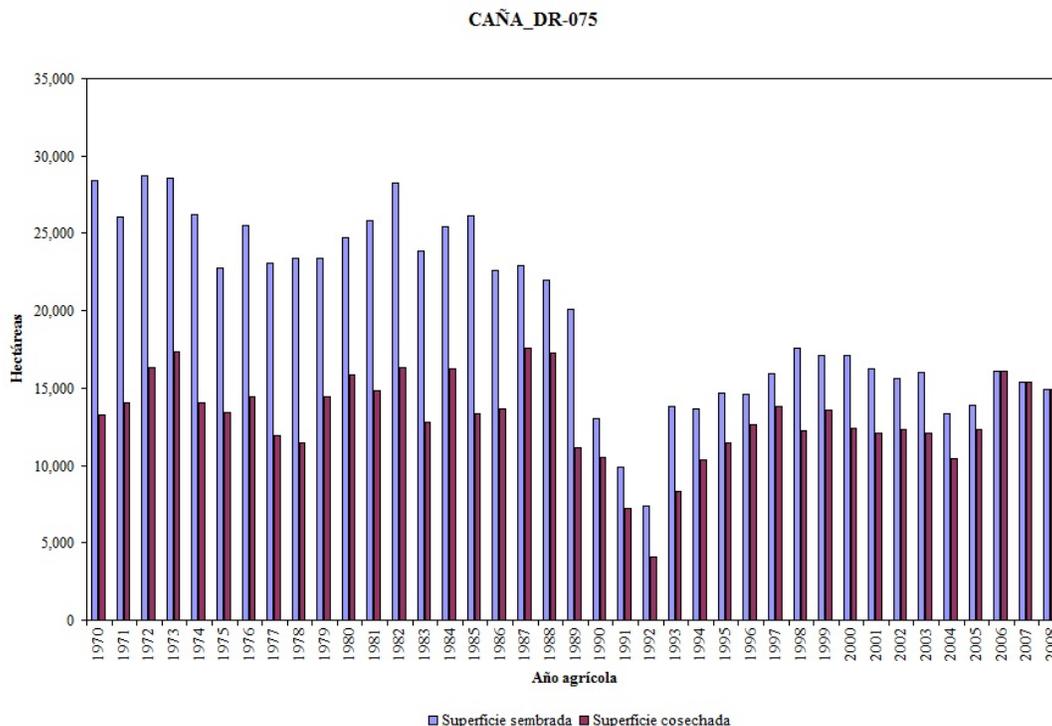


Figura A.1.46. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de caña en el DR-075 para el ciclo Perenne.

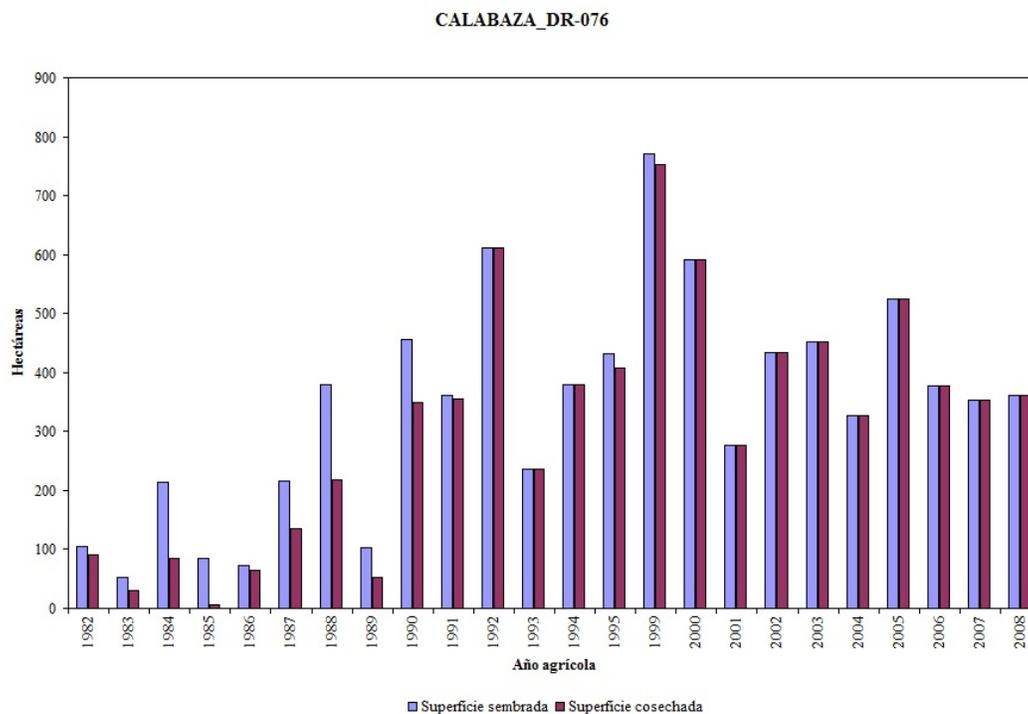


Figura A.1.47. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de calabaza en el DR-076 para el ciclo OI.

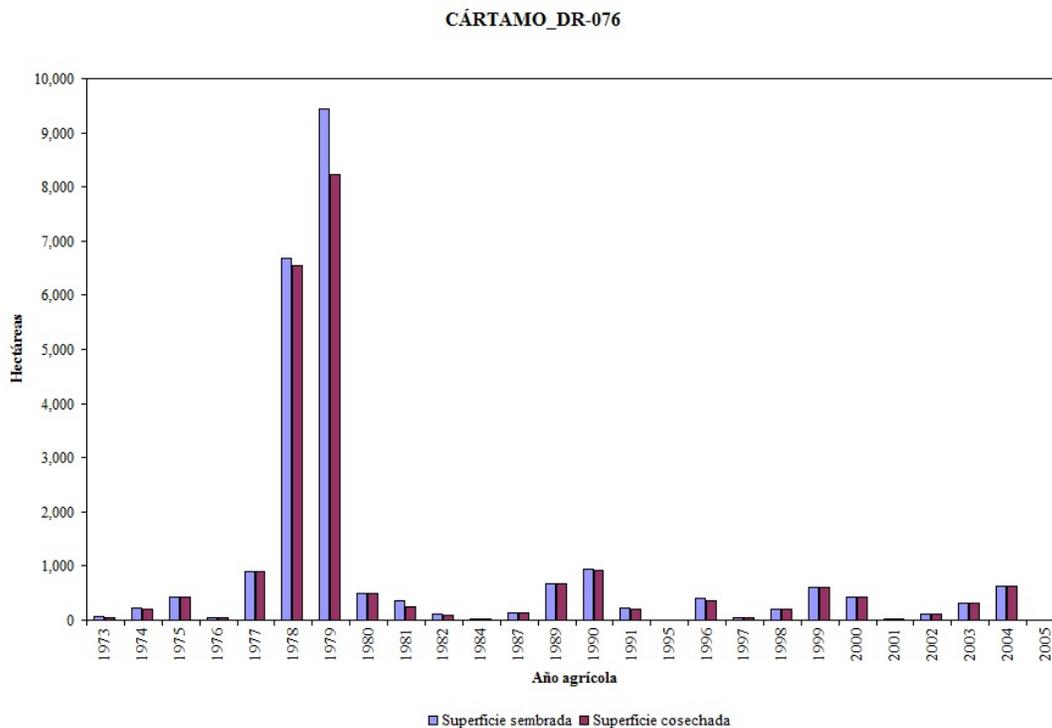


Figura A.1.48. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de cártamo en el DR-076 para el ciclo OI.

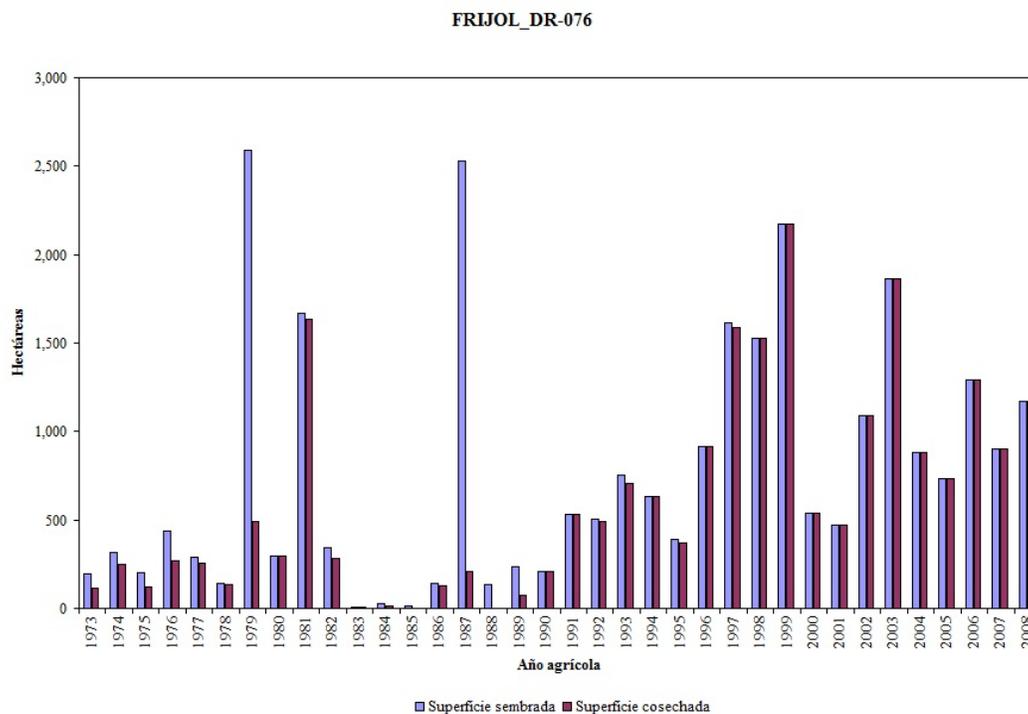


Figura A.1.49. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de frijol en el DR-076 para el ciclo OI.

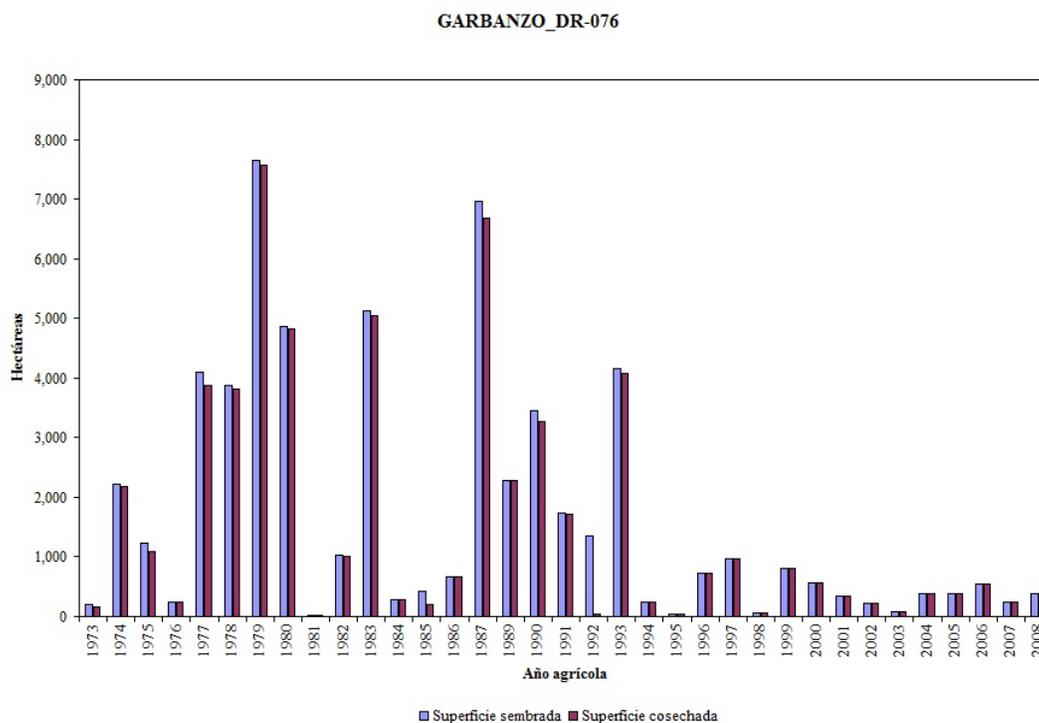


Figura A.1.50. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de garbanzo en el DR-076 para el ciclo OI.

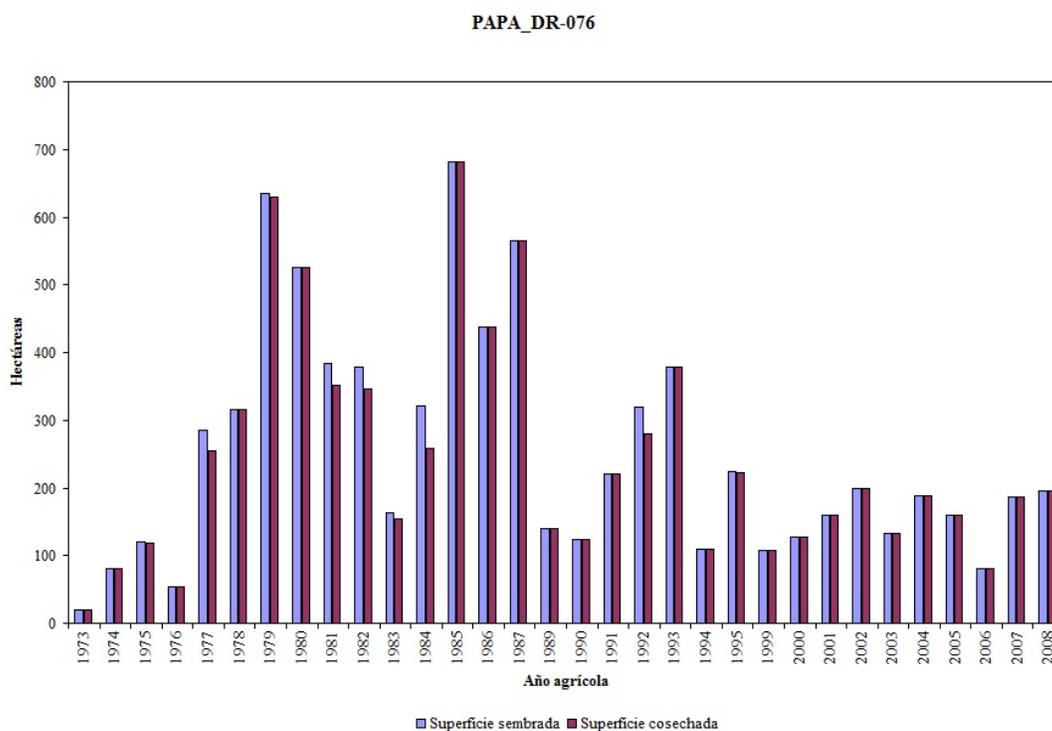


Figura A.1.51. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de papa en el DR-076 para el ciclo OI.

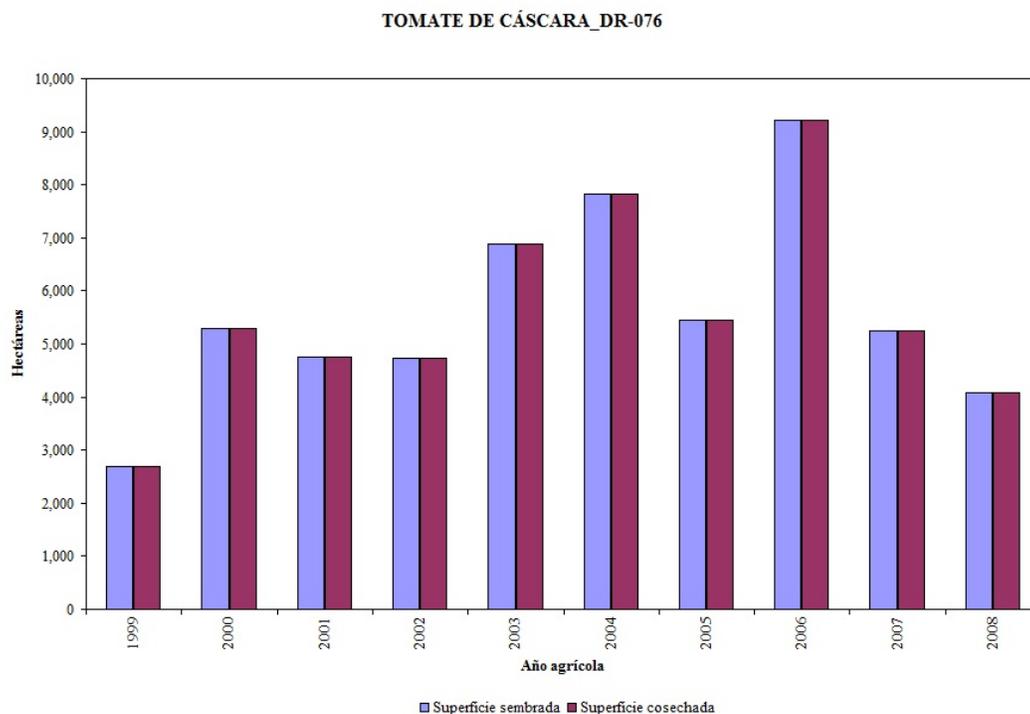


Figura A.1.52. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de tomate de cáscara en el DR-076 para el ciclo OI.

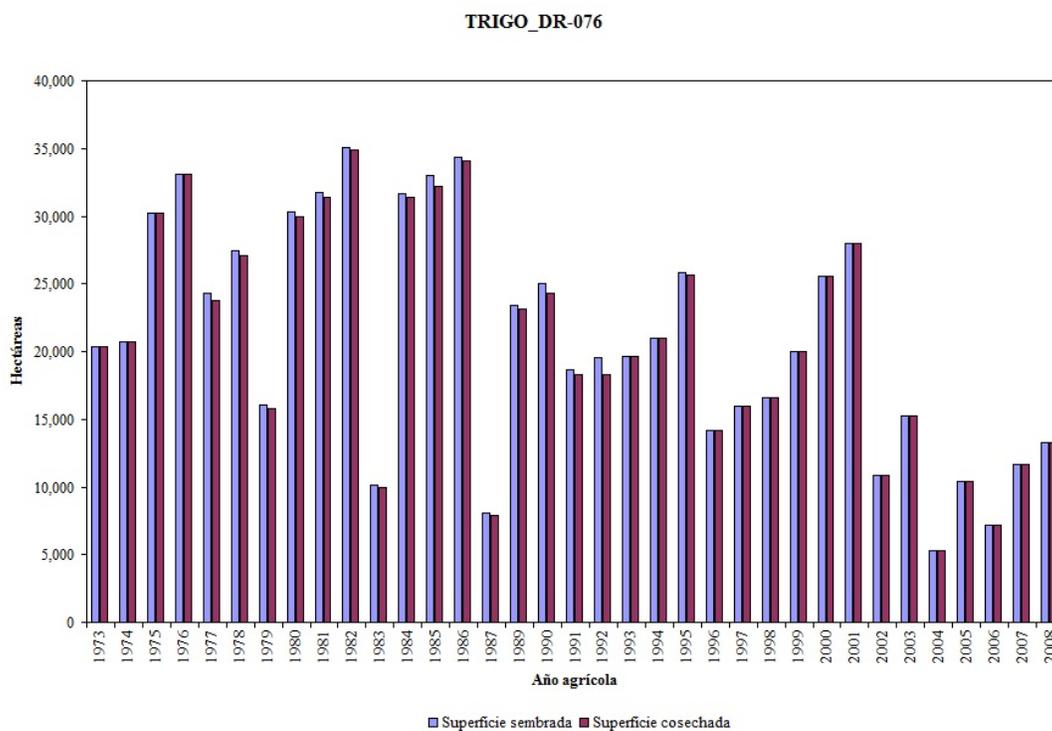


Figura A.1.53. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de trigo en el DR-076 para el ciclo OI.

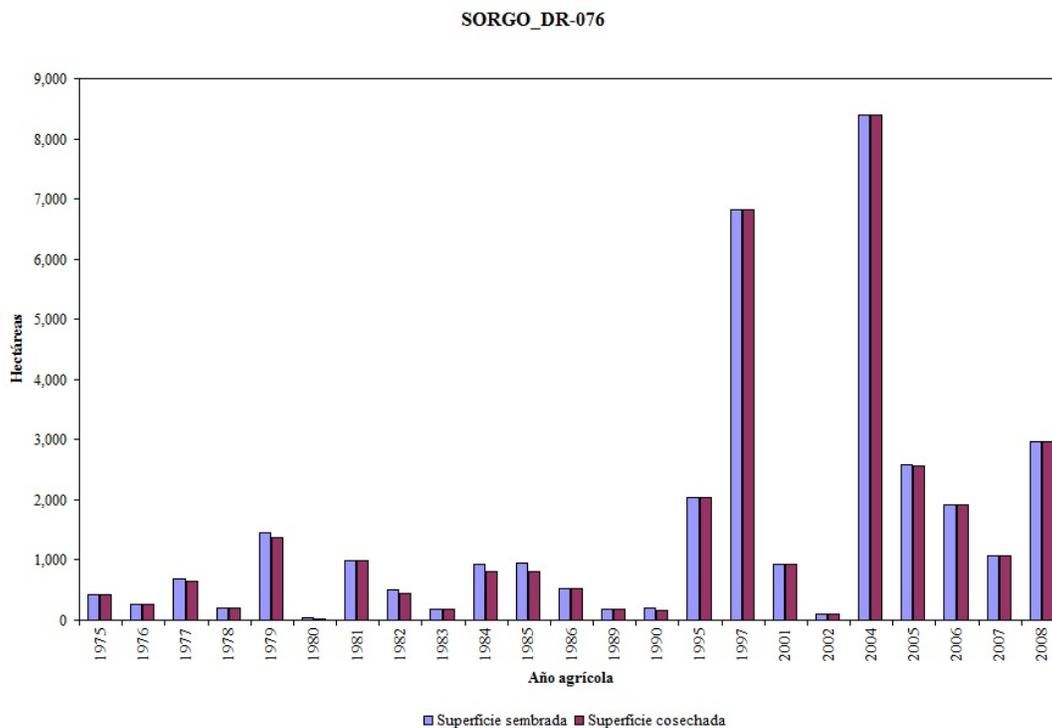


Figura A.1.54. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de sorgo en el DR-076 para el ciclo PV.

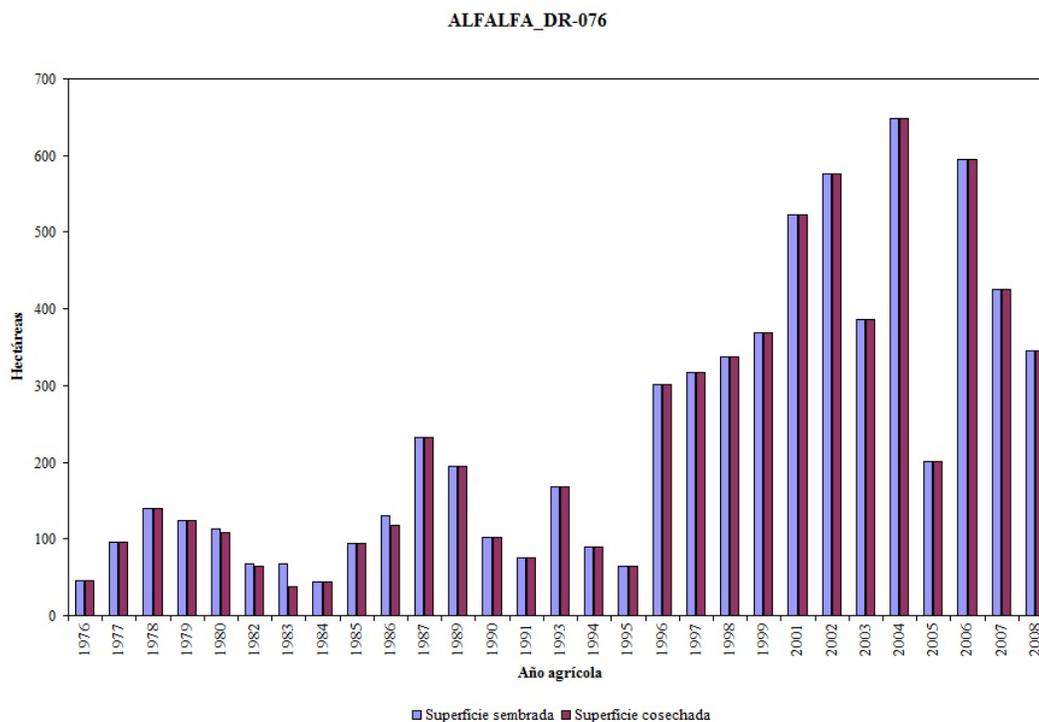


Figura A.1.55. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de alfalfa en el DR-076 para el ciclo Perenne.

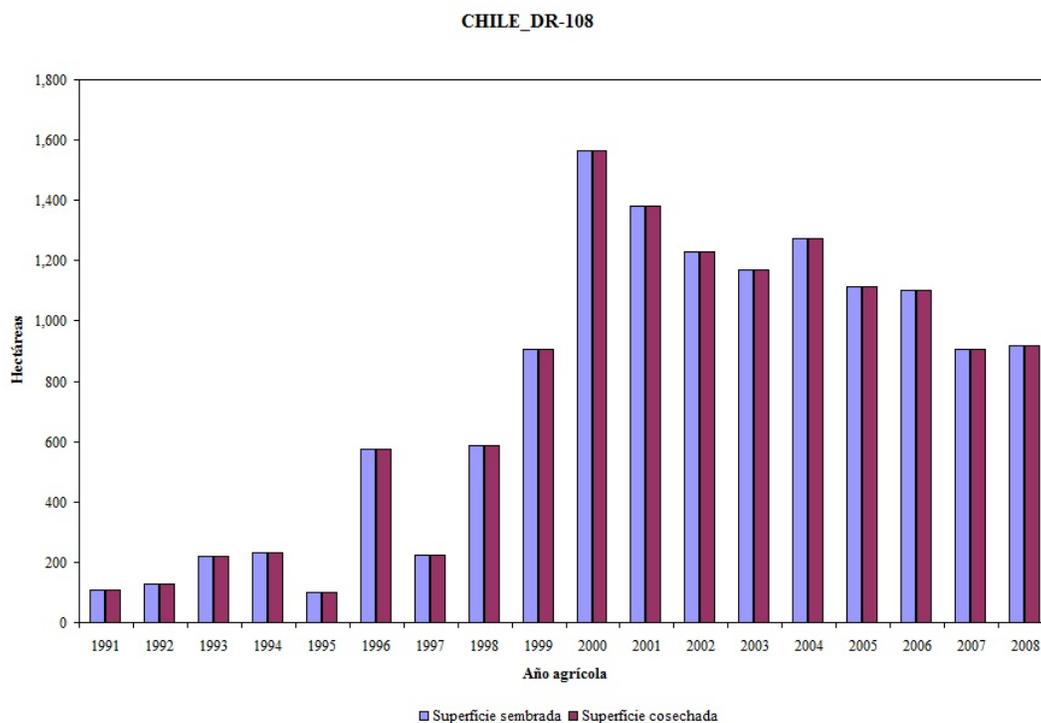


Figura A.1.56. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de chile en el DR-108 para el ciclo OI.

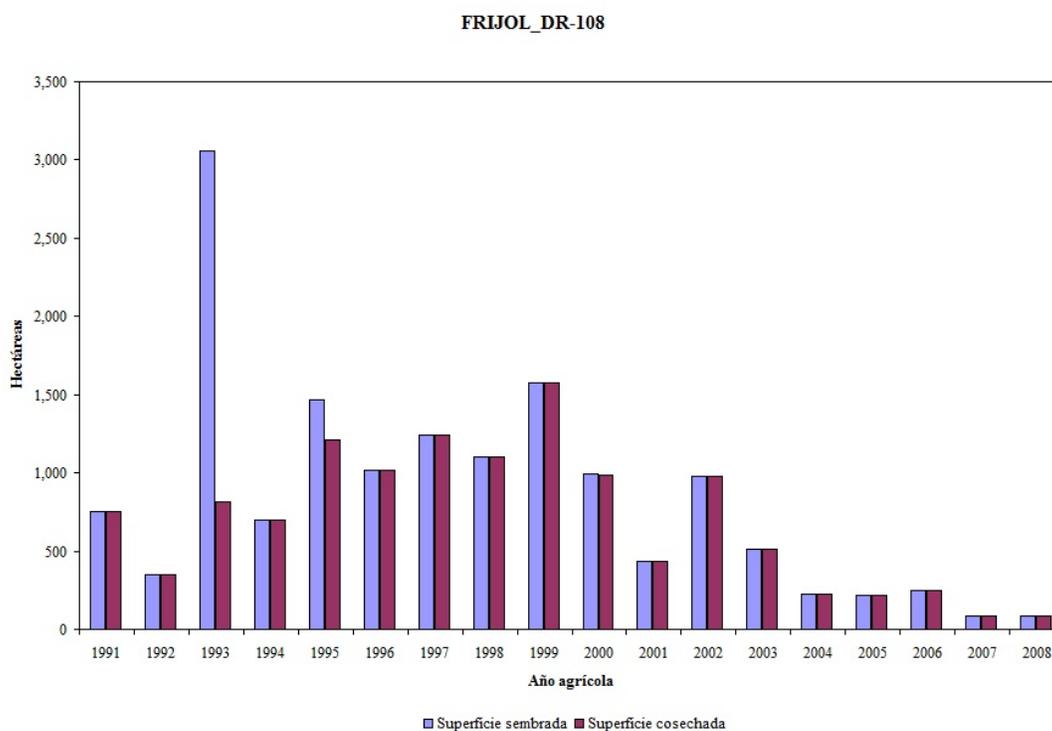


Figura A.1.57. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de frijol en el DR-108 para el ciclo OI.

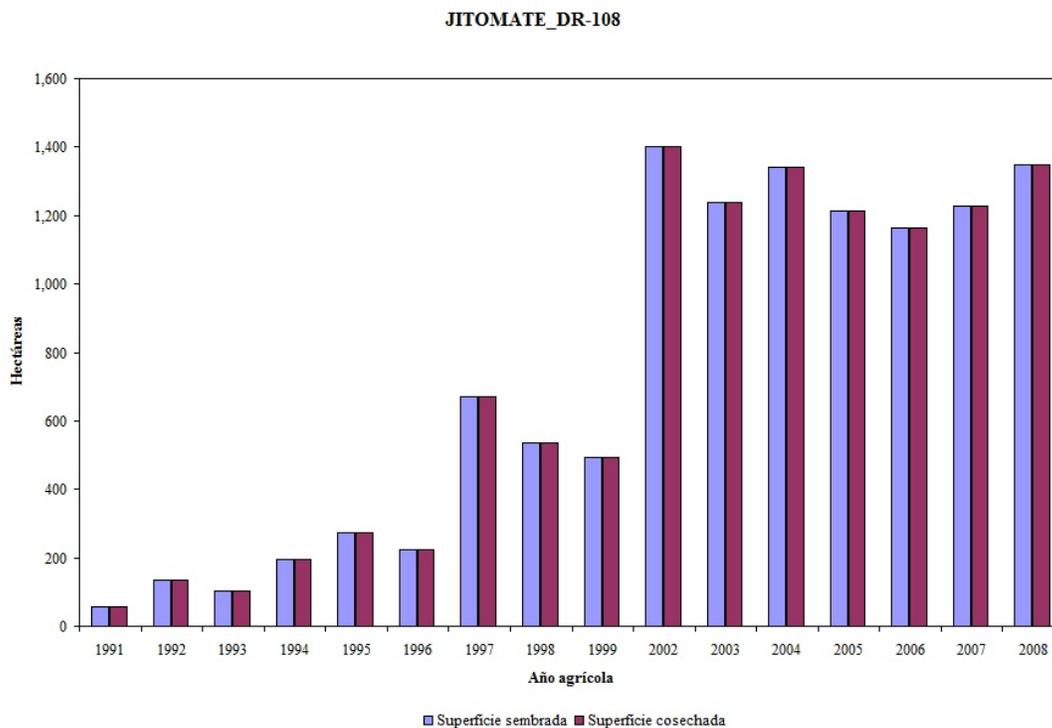


Figura A.1.58. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de jitomate en el DR-108 para el ciclo OI.

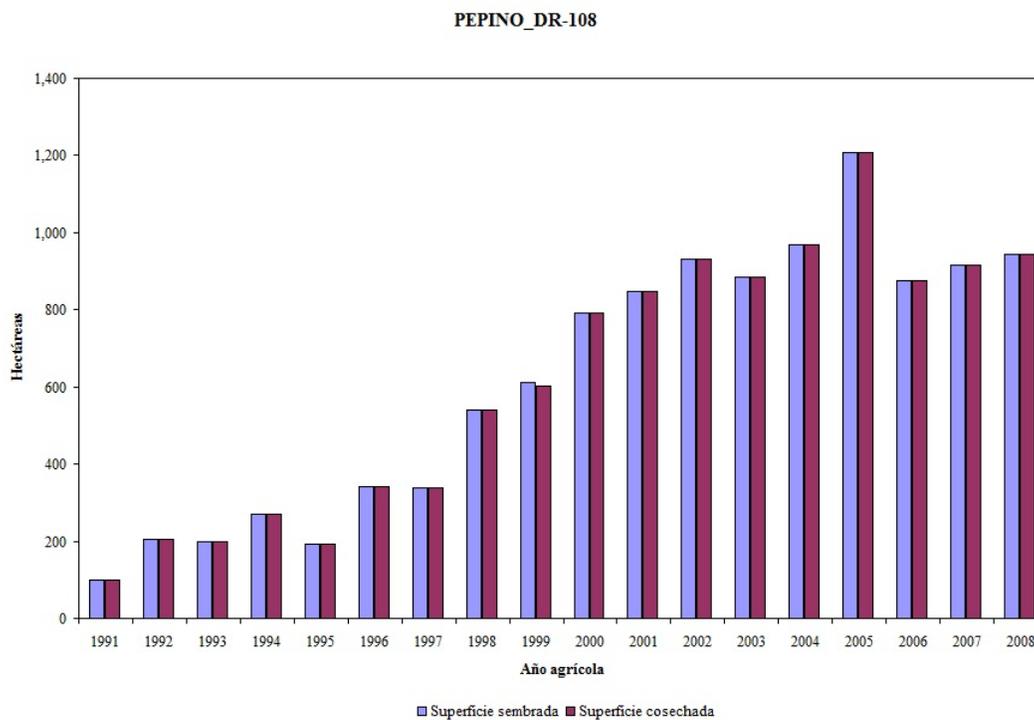


Figura A.1.59. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de pepino en el DR-108 para el ciclo OI.

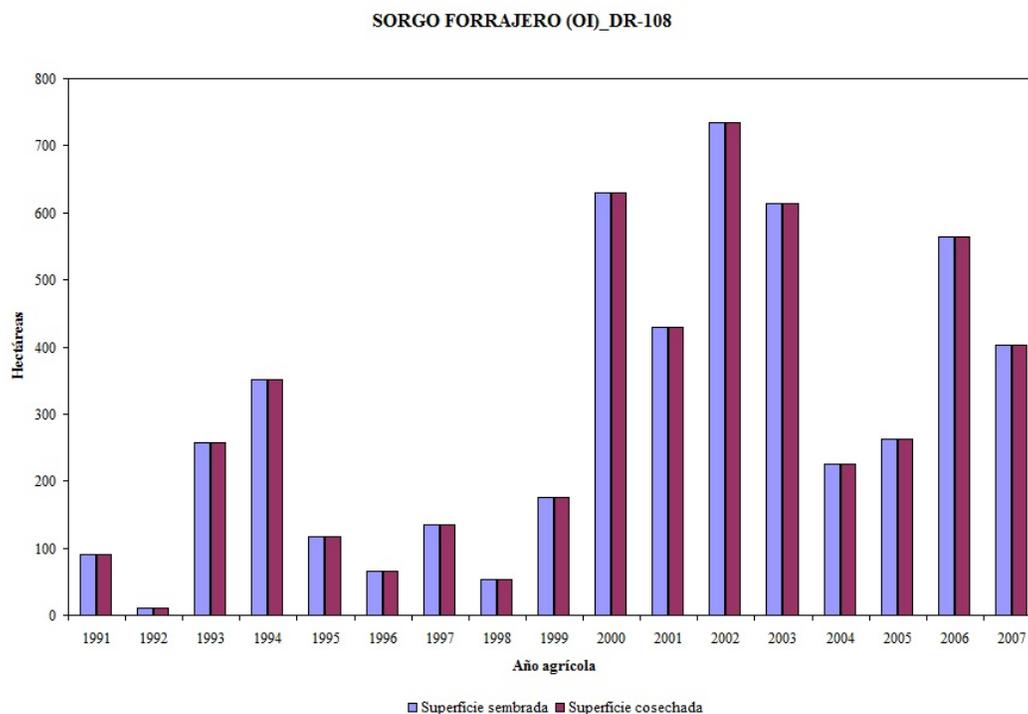


Figura A.1.60. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de sorgo forrajero en el DR-108 para el ciclo OI.

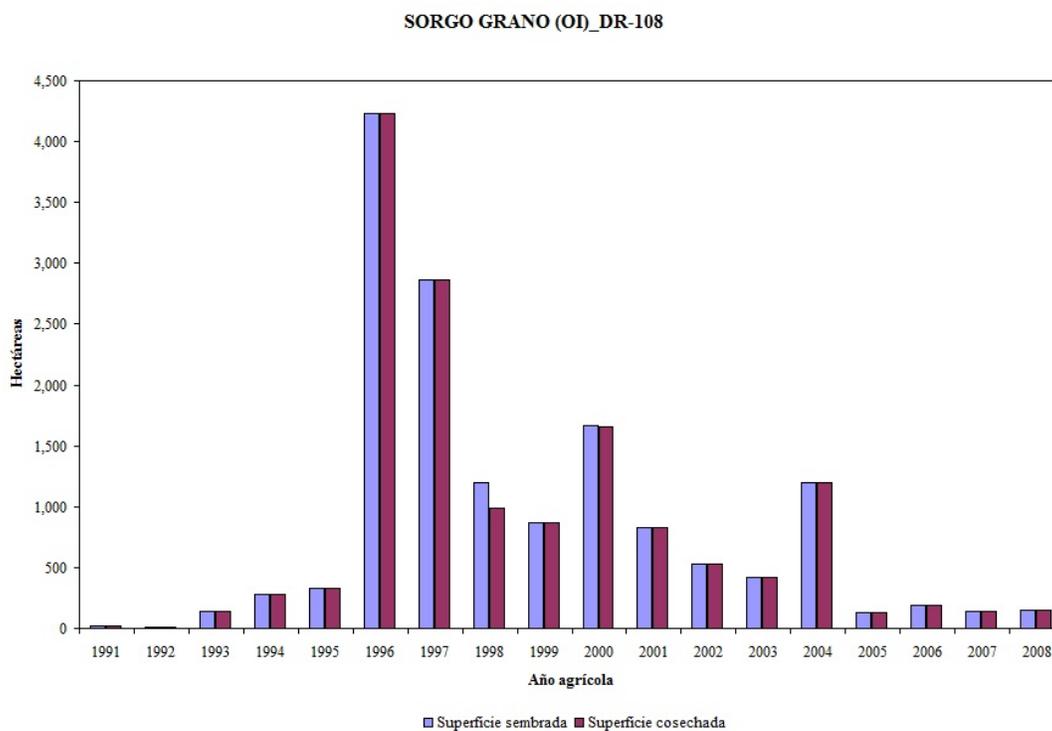


Figura A.1.61. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de sorgo para grano en el DR-108 para el ciclo OI.

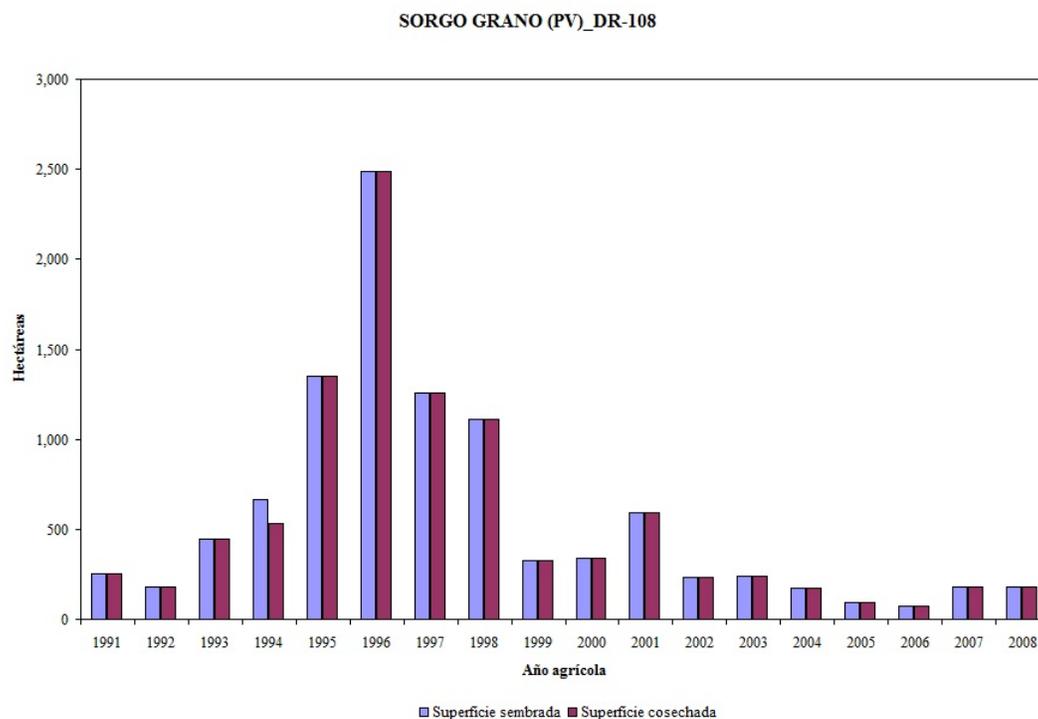


Figura A.1.62. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de sorgo para grano en el DR-108 para el ciclo PV.

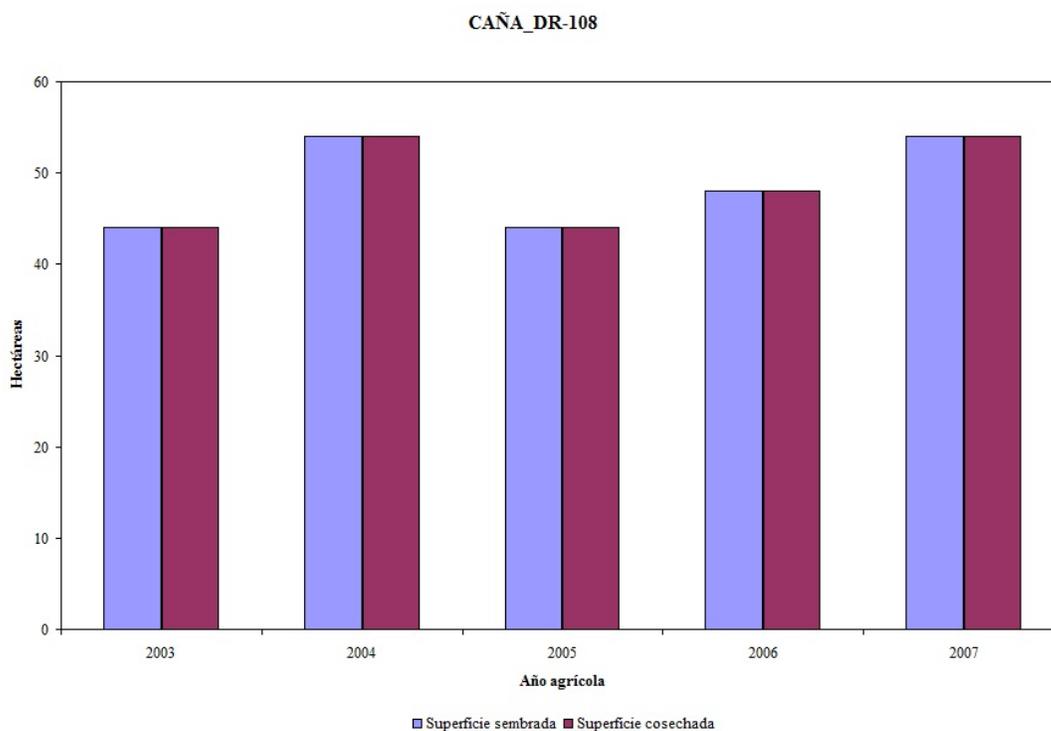


Figura A.1.63. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de caña en el DR-108 para el ciclo Perenne.

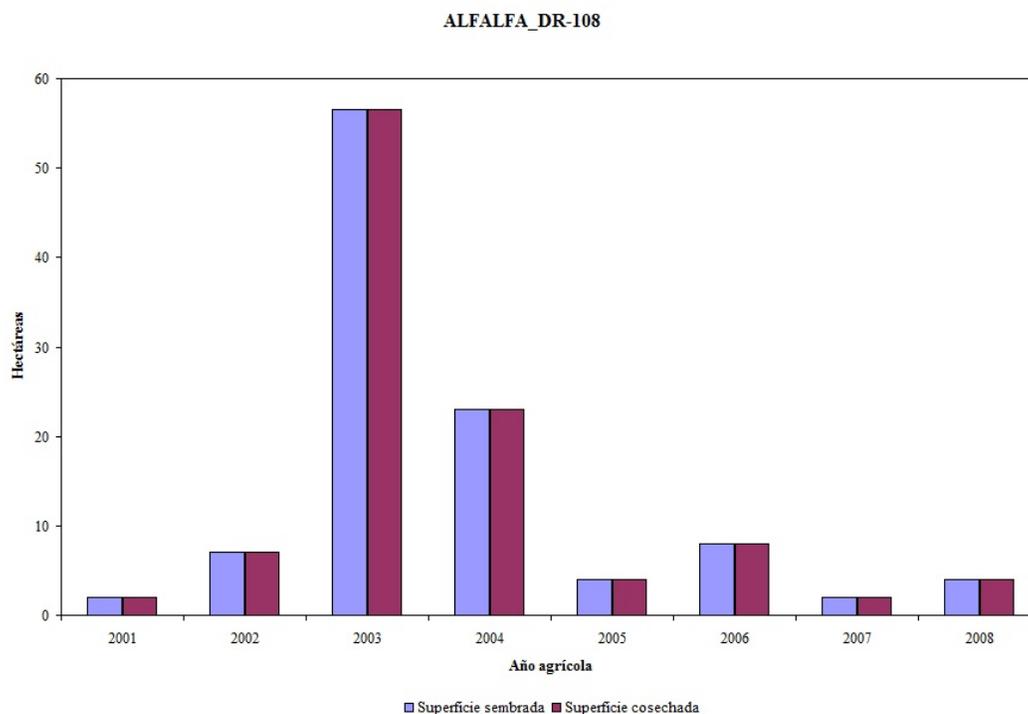


Figura A.1.64. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de alfalfa en el DR-108 para el ciclo Perenne.

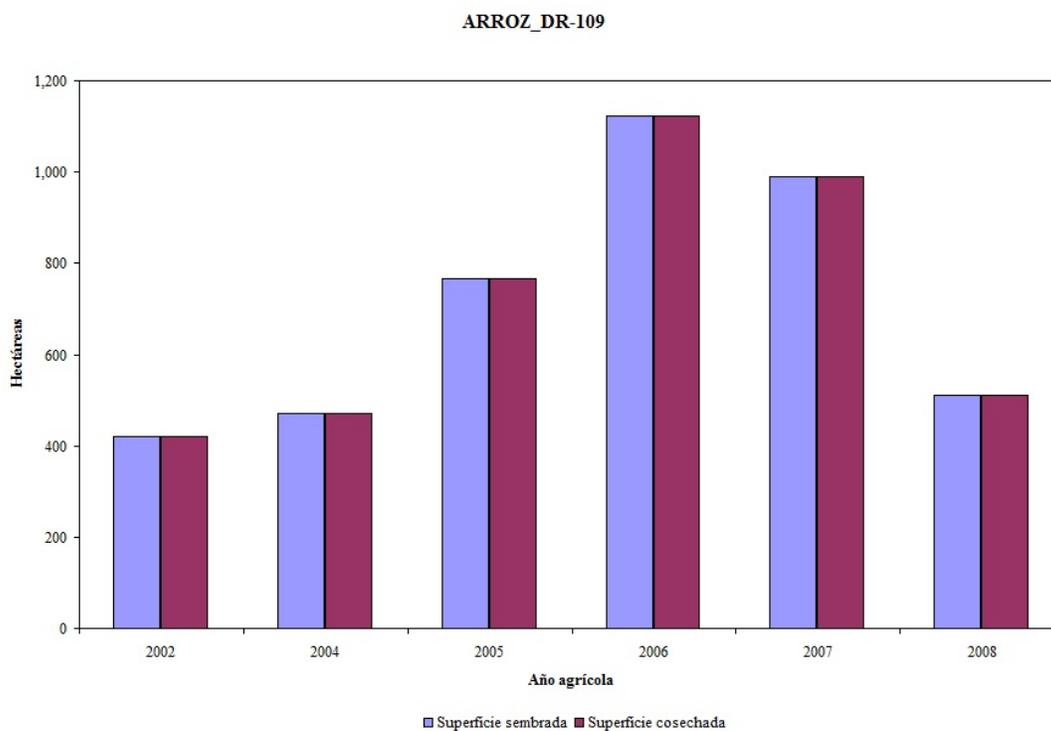


Figura A.1.65. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de arroz en el DR-109 para el ciclo OI.

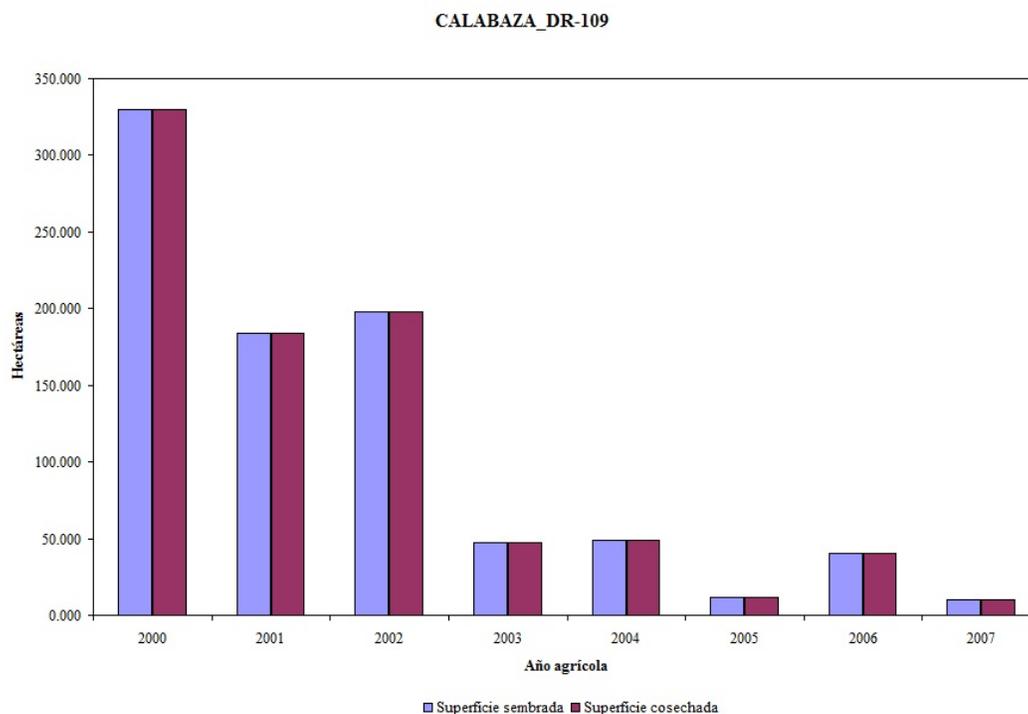


Figura A.1.66. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de calabaza en el DR-109 para el ciclo OI.

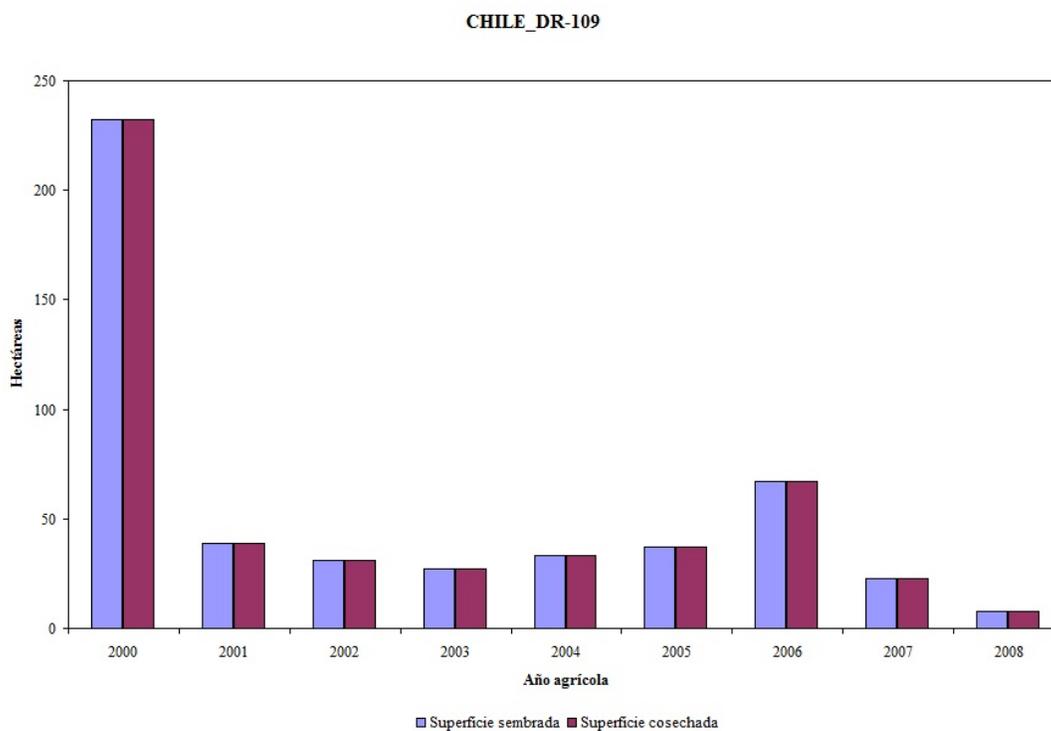


Figura A.1.67. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de chile en el DR-109 para el ciclo OI.

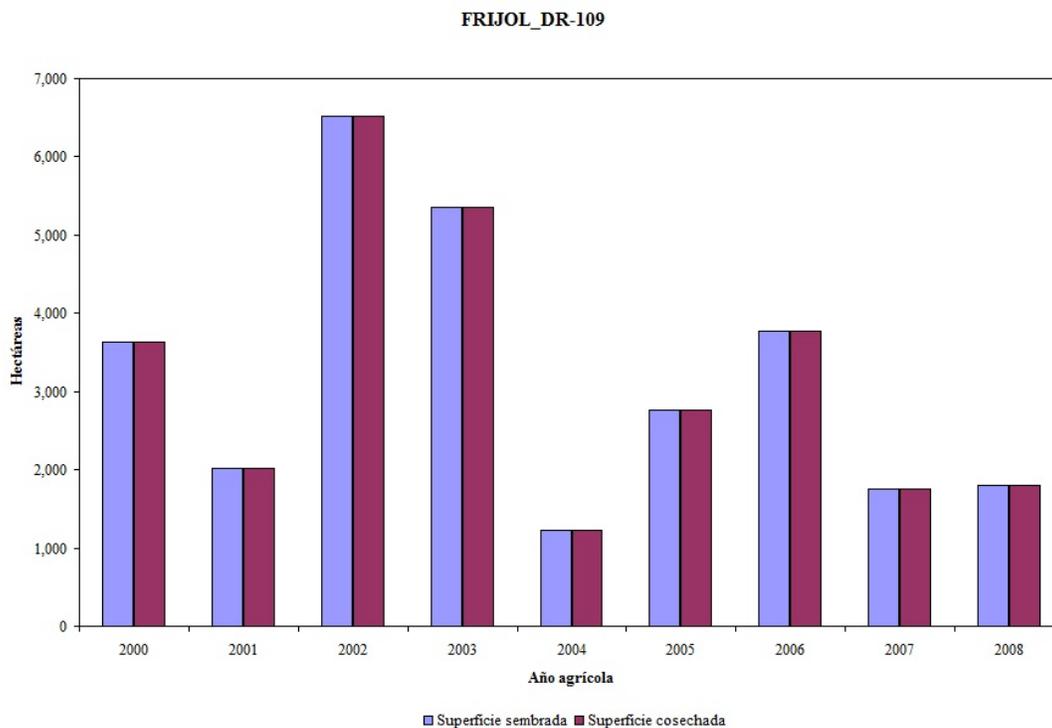


Figura A.1.68. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de frijol en el DR-109 para el ciclo OI.

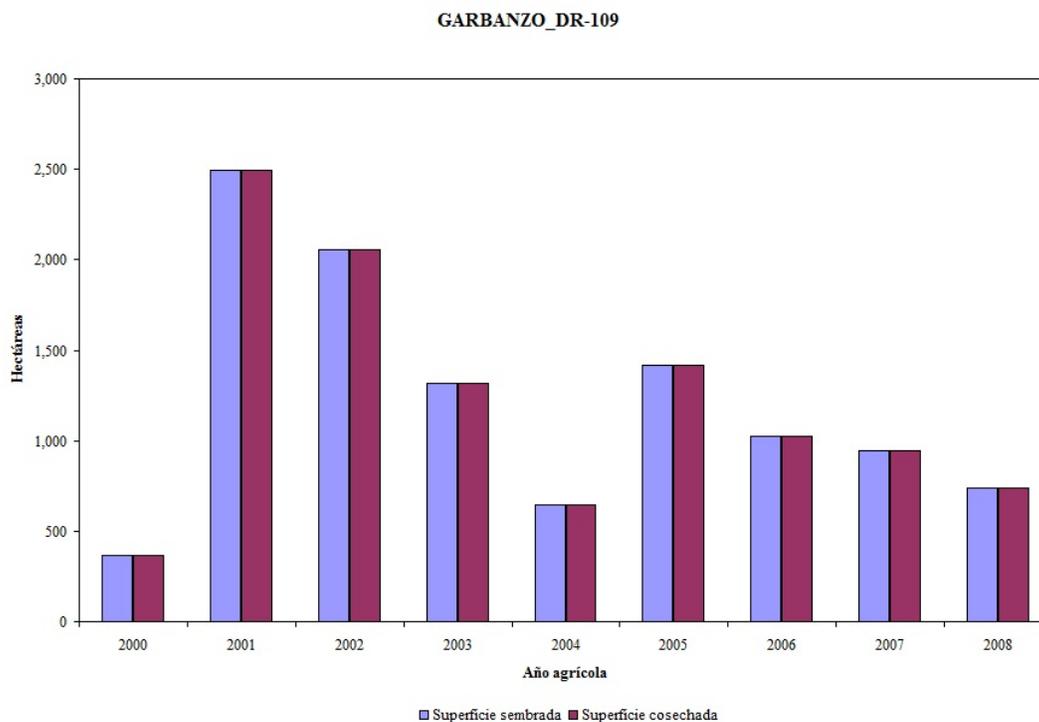


Figura A.1.69. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de garbanzo en el DR-109 para el ciclo OI.

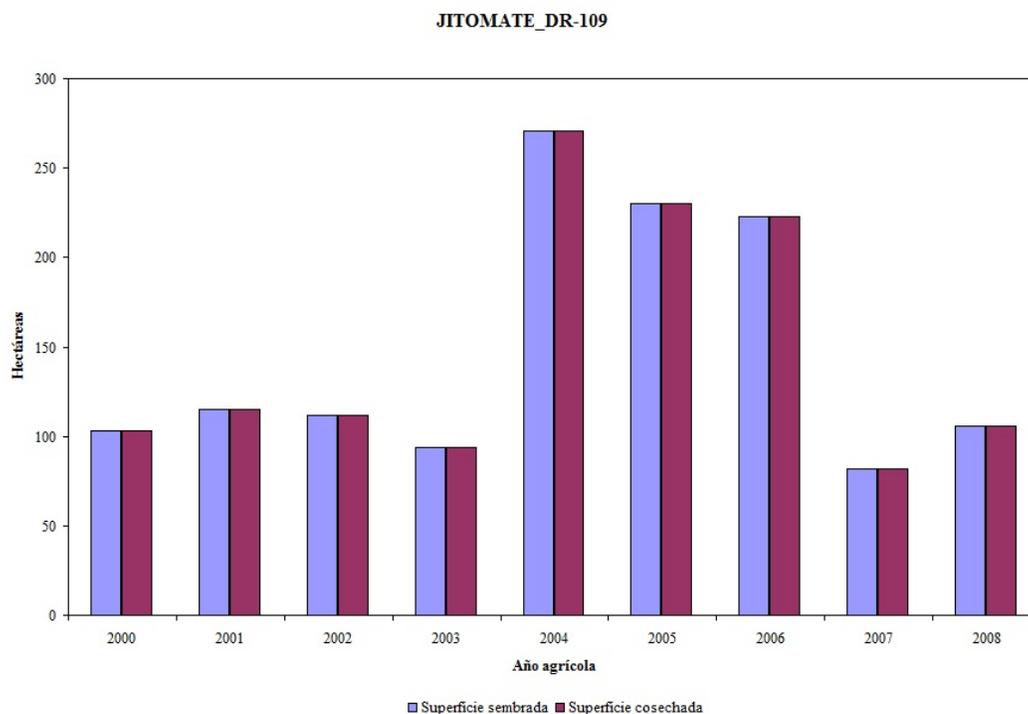


Figura A.1.70. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de jitomate en el DR-109 para el ciclo OI.

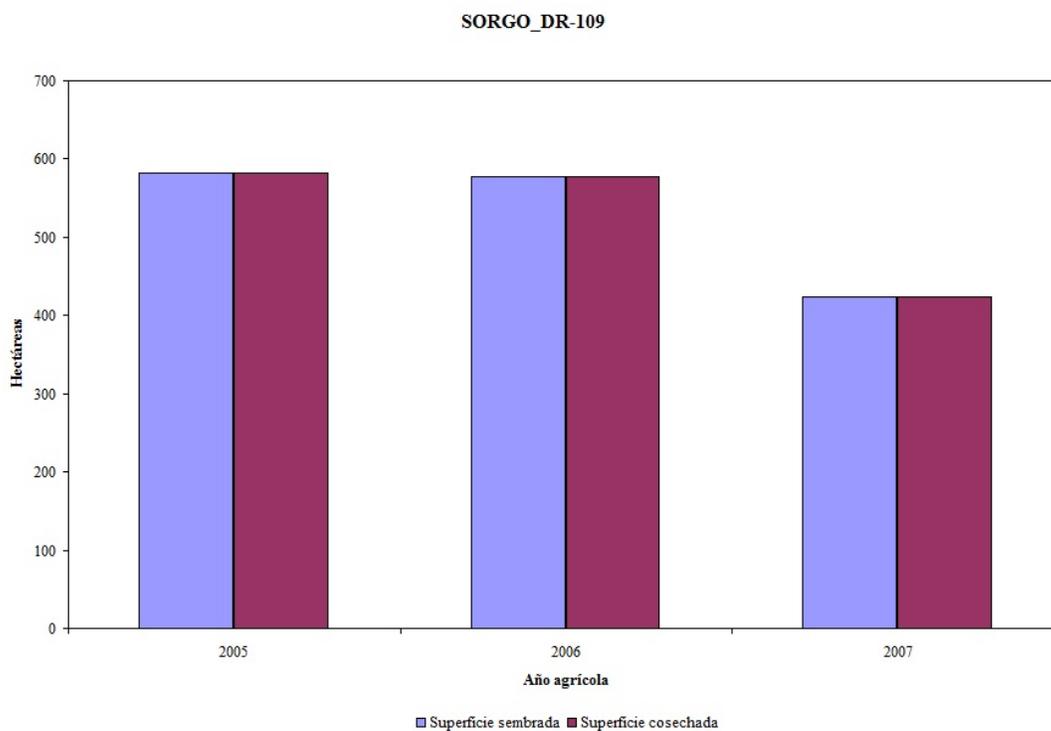


Figura A.1.71. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de sorgo en el DR-109 para el ciclo PV.

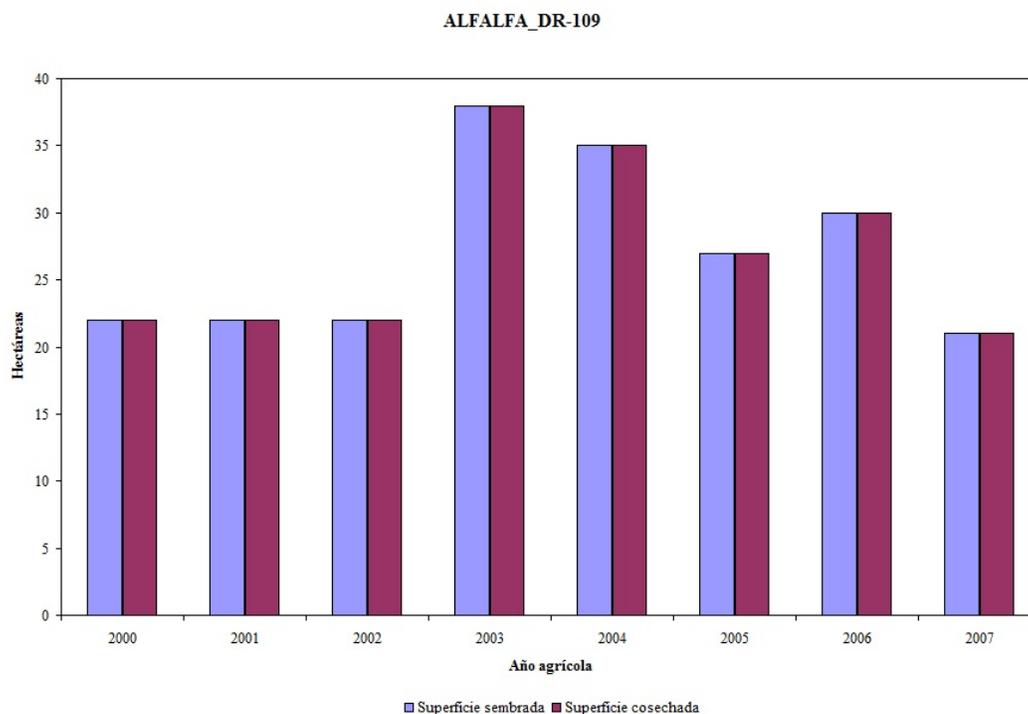


Figura A.1.72. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de alfalfa en el DR-109 para el ciclo Perenne.

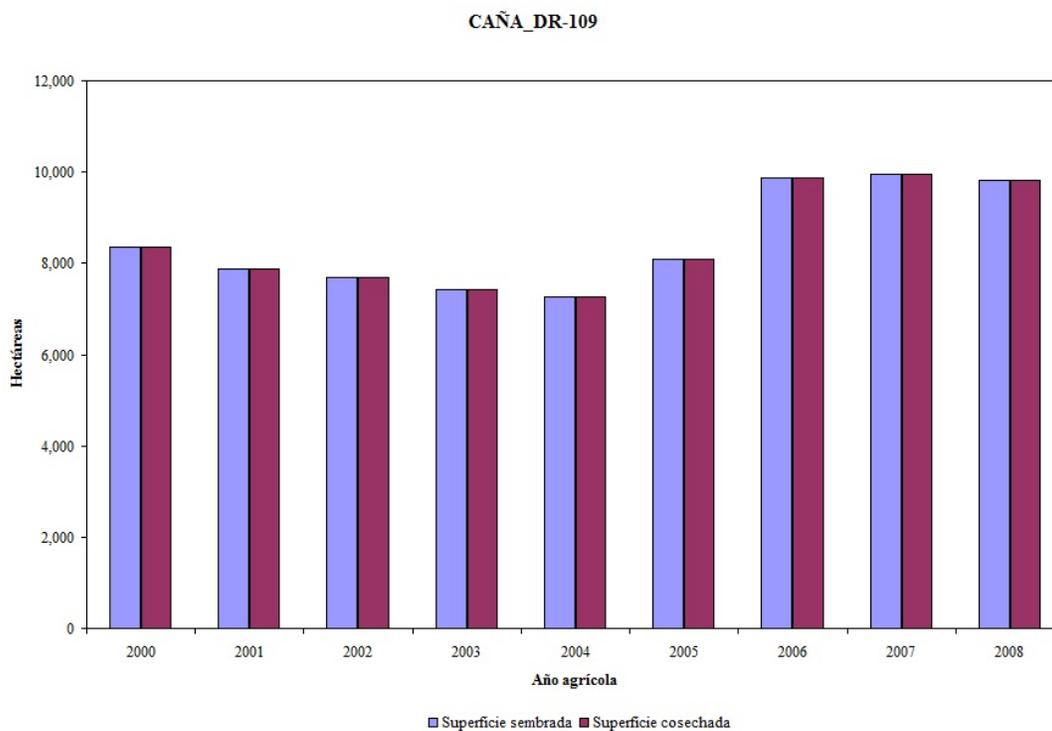


Figura A.1.73. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de caña en el DR-109 para el ciclo Perenne.

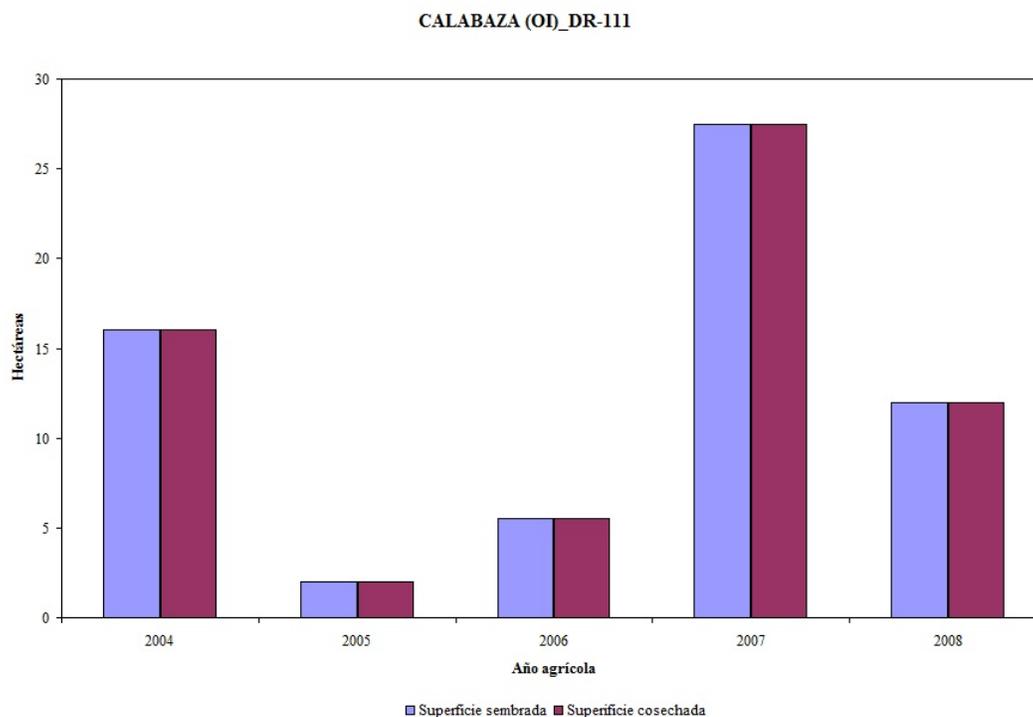


Figura A.1.74. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de calabaza en el DR-111 para el ciclo OI.

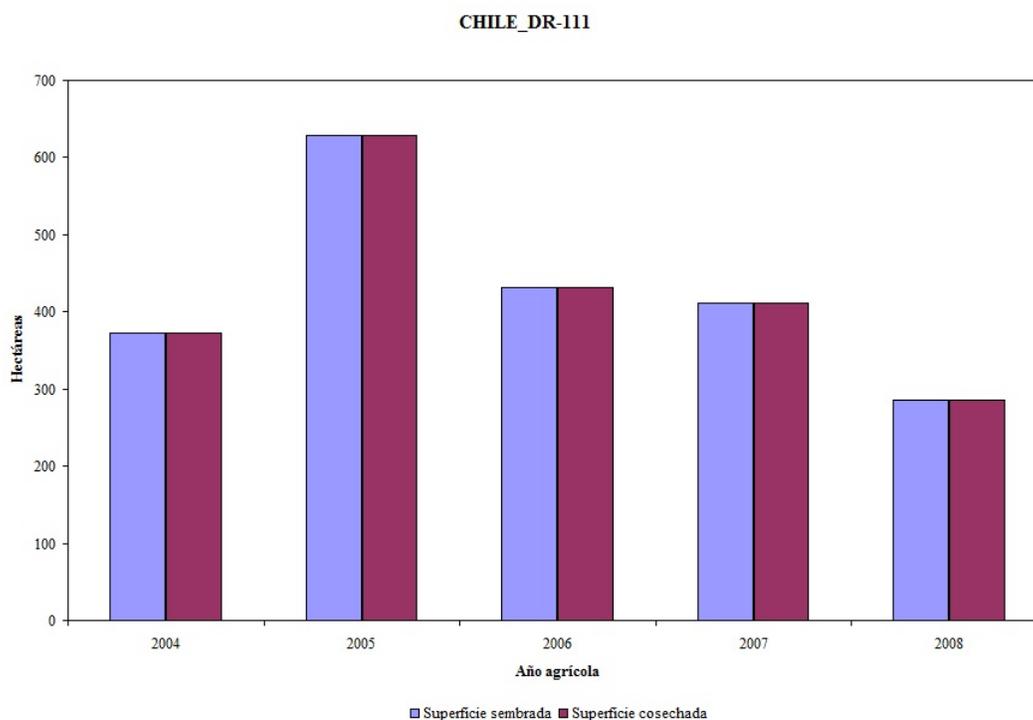


Figura A.1.75. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de chile en el DR-111 para el ciclo OI.

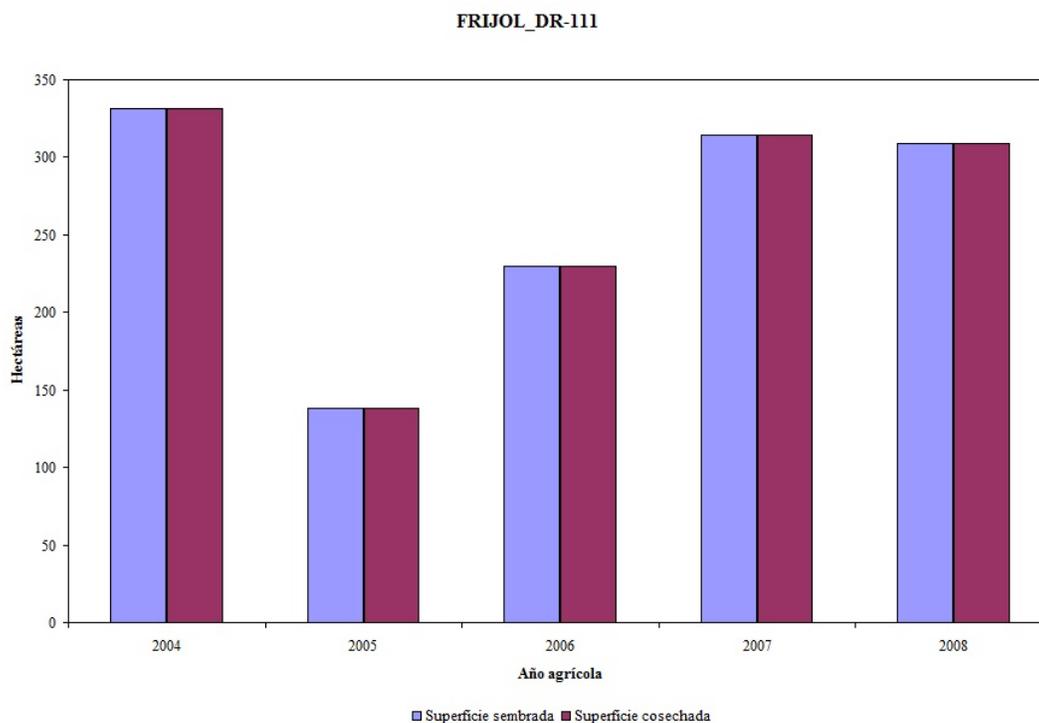


Figura A.1.76. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de frijol en el DR-111 para el ciclo OI.

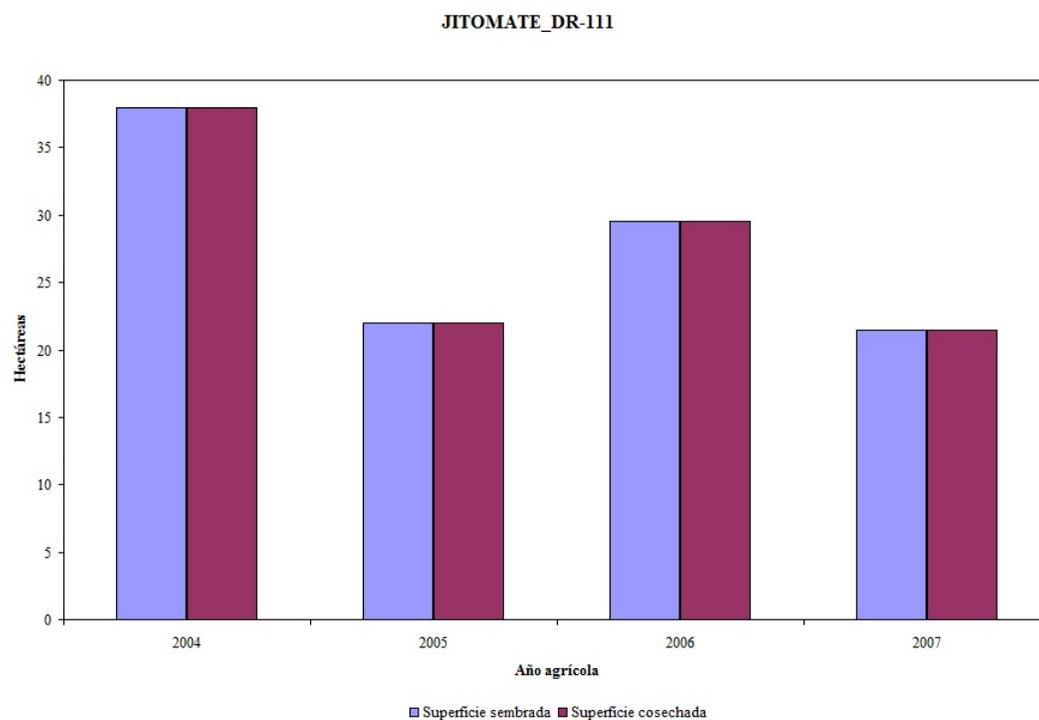


Figura A.1.77. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de jitomate en el DR-111 para el ciclo OI.

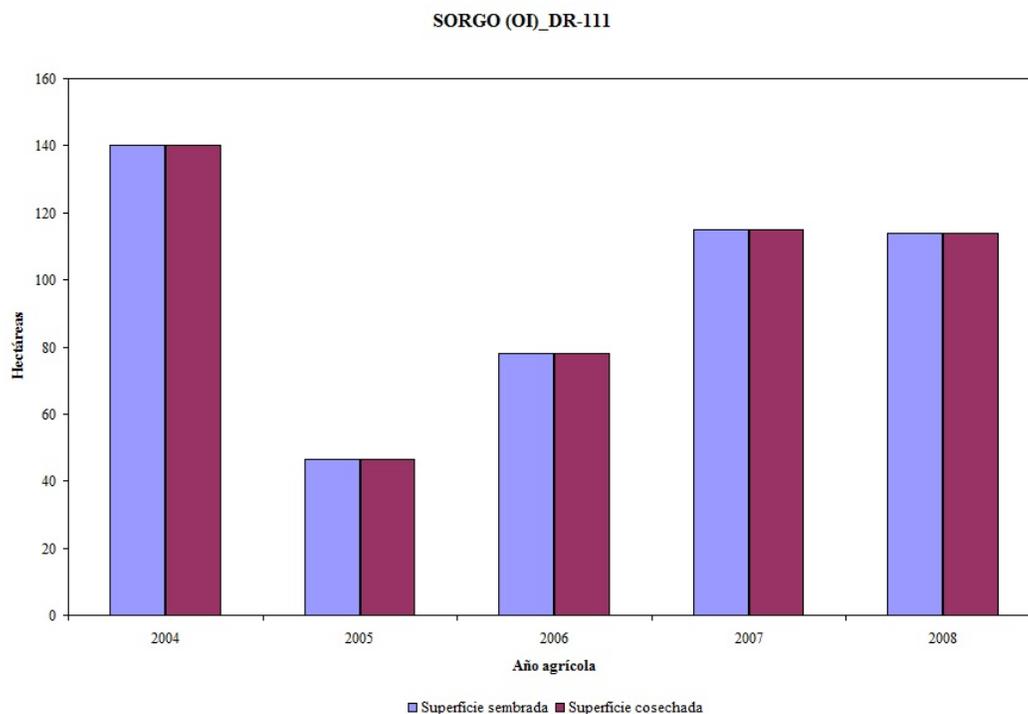


Figura A.1.78. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de sorgo en el DR-111 para el ciclo OI.

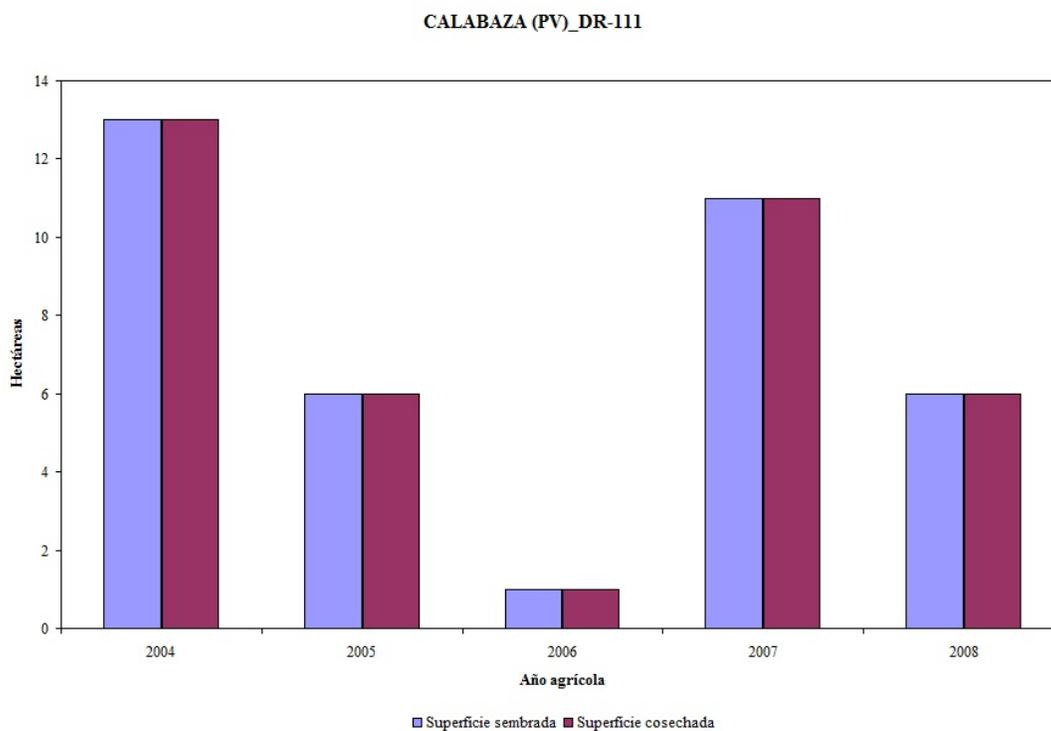


Figura A.1.79. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de calabaza en el DR-111 para el ciclo PV.

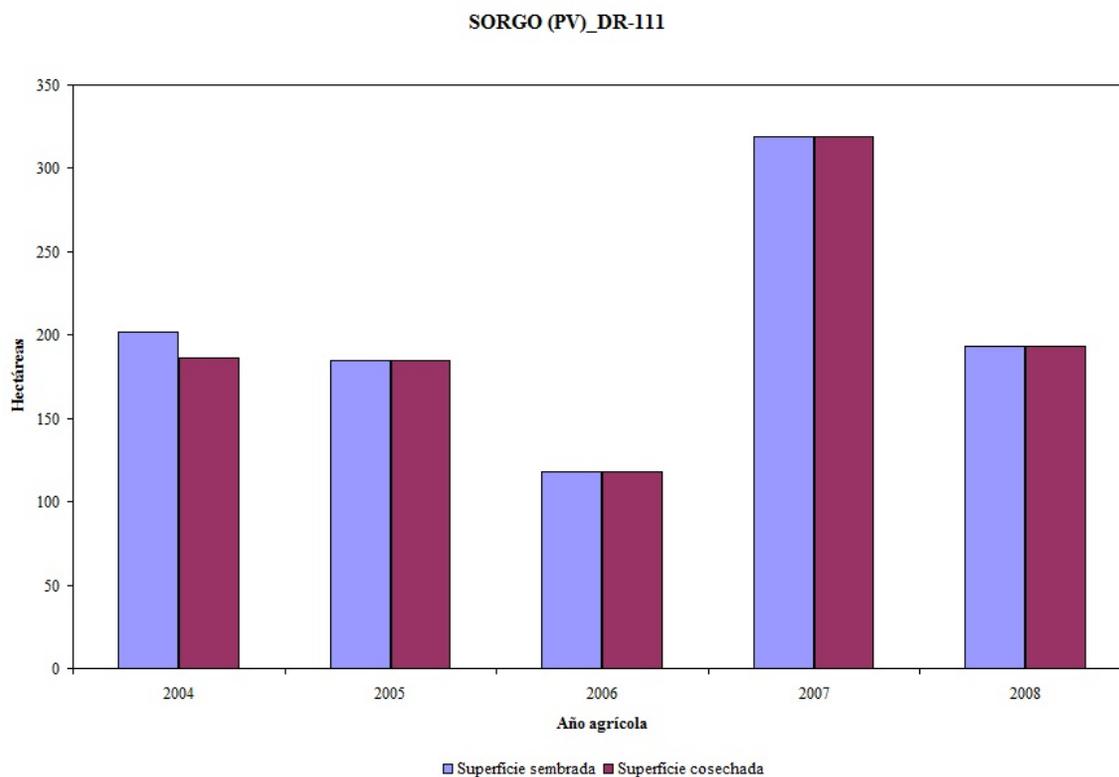


Figura A.1.80. Superficie sembrada y superficie cosechada del cultivo de sorgo en el DR-111 para el ciclo PV.

A.1.2. Evaluación del rendimiento de los principales cultivos en los distritos de riego de Sinaloa

A continuación se presenta el rendimiento promedio (**Figura A.1.81** a la **Figura A.1.160**) para cada cultivo establecido por distrito de riego en Sinaloa de la misma forma que la superficie sembrada y la superficie cosechada que se mostró en el apartado anterior del presente apéndice.

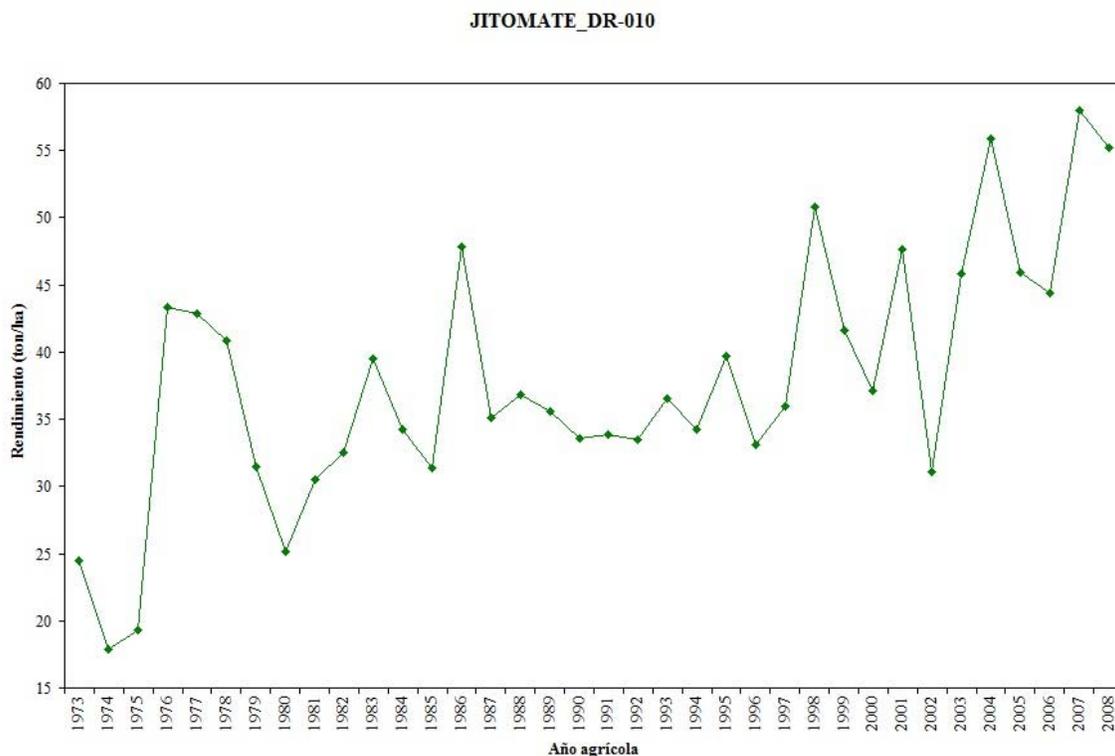


Figura A.1.81. Rendimiento promedio del cultivo de jitomate en el DR-010 para el ciclo OI.

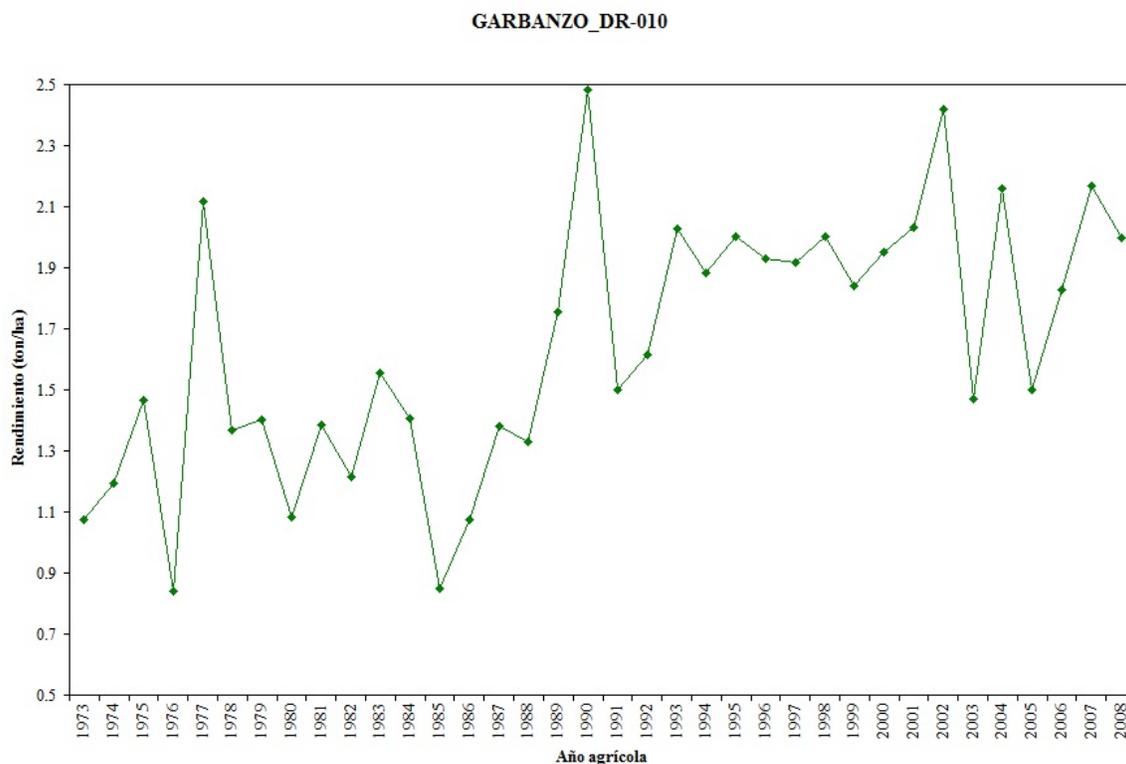


Figura A.1.82. Rendimiento promedio del cultivo de garbanzo en el DR-010 para el ciclo OI.

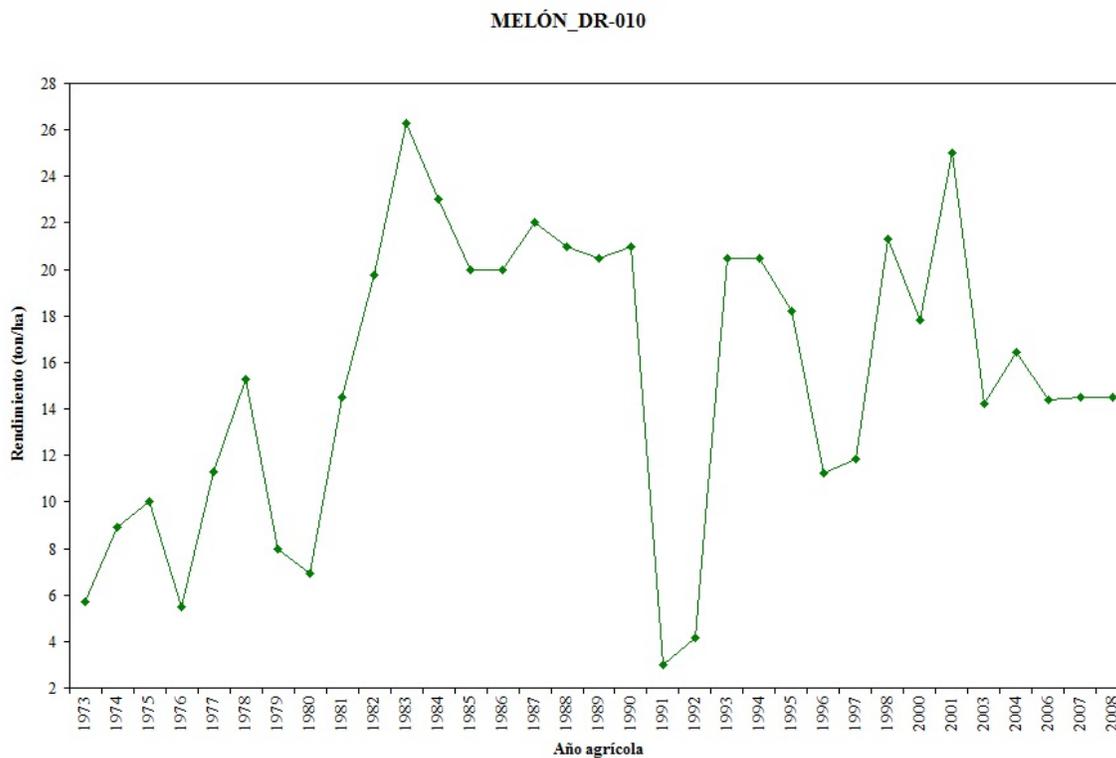


Figura A.1.83. Rendimiento promedio del cultivo de melón en el DR-010 para el ciclo OI.

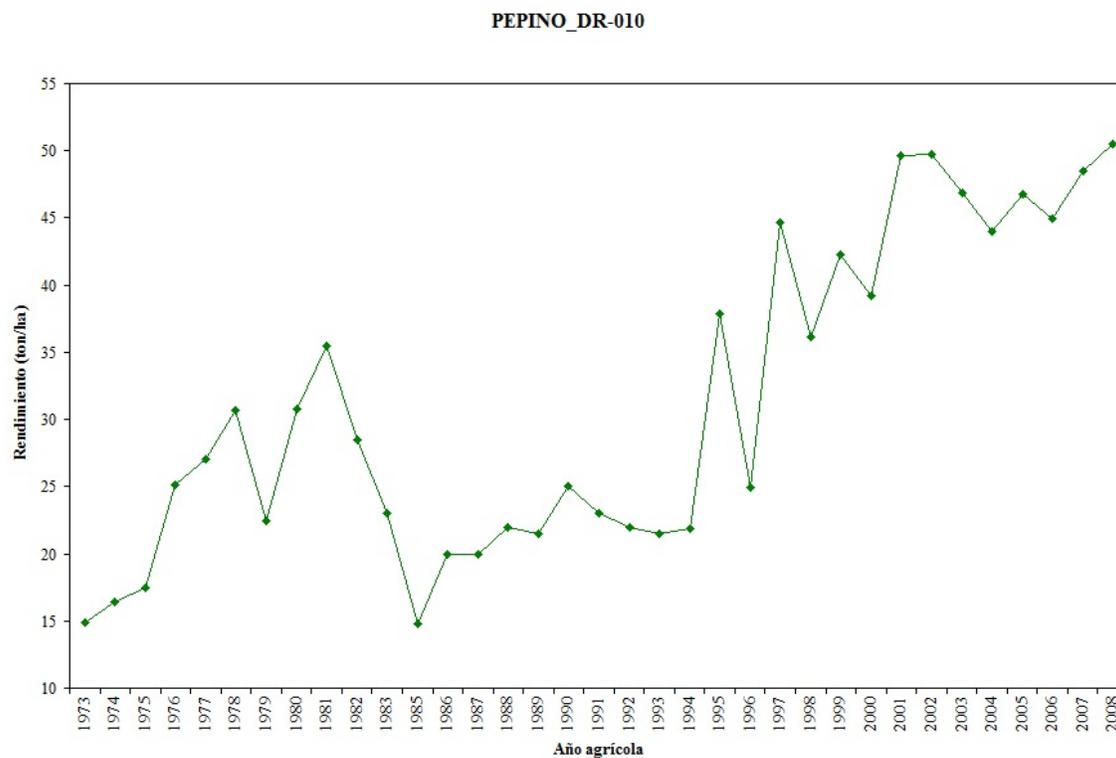


Figura A.1.84. Rendimiento promedio del cultivo de pepino en el DR-010 para el ciclo OI.

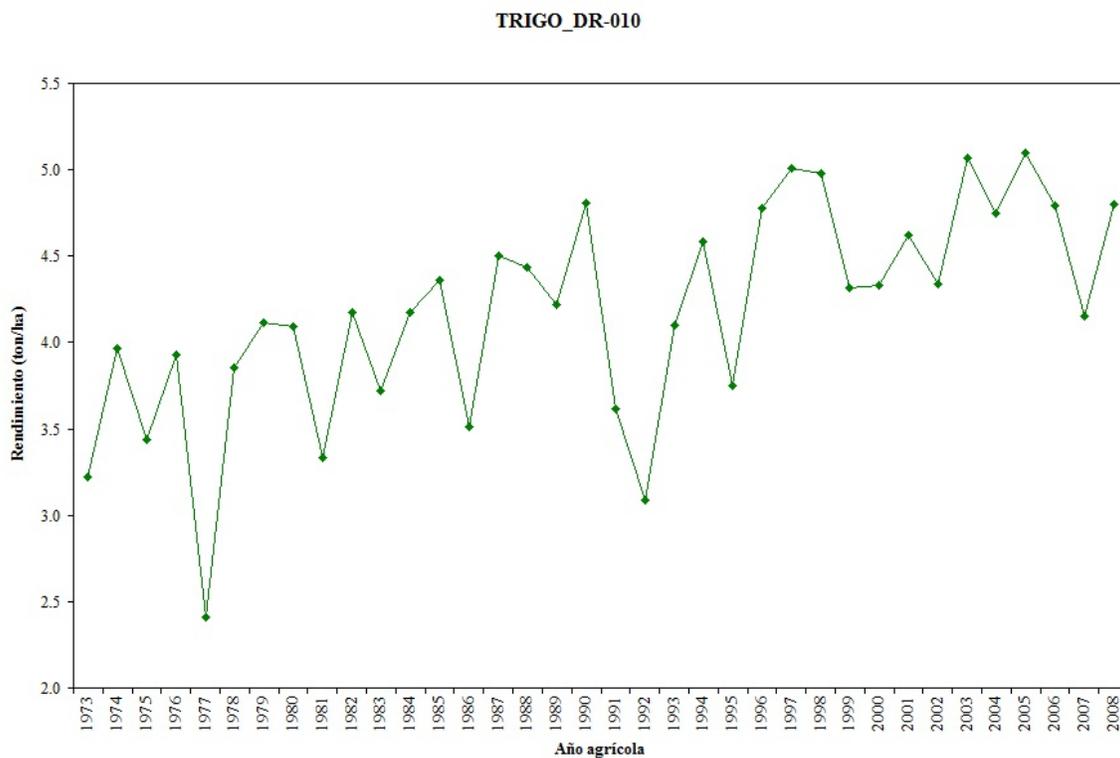


Figura A.1.85. Rendimiento promedio del cultivo de trigo en el DR-010 para el ciclo OI.

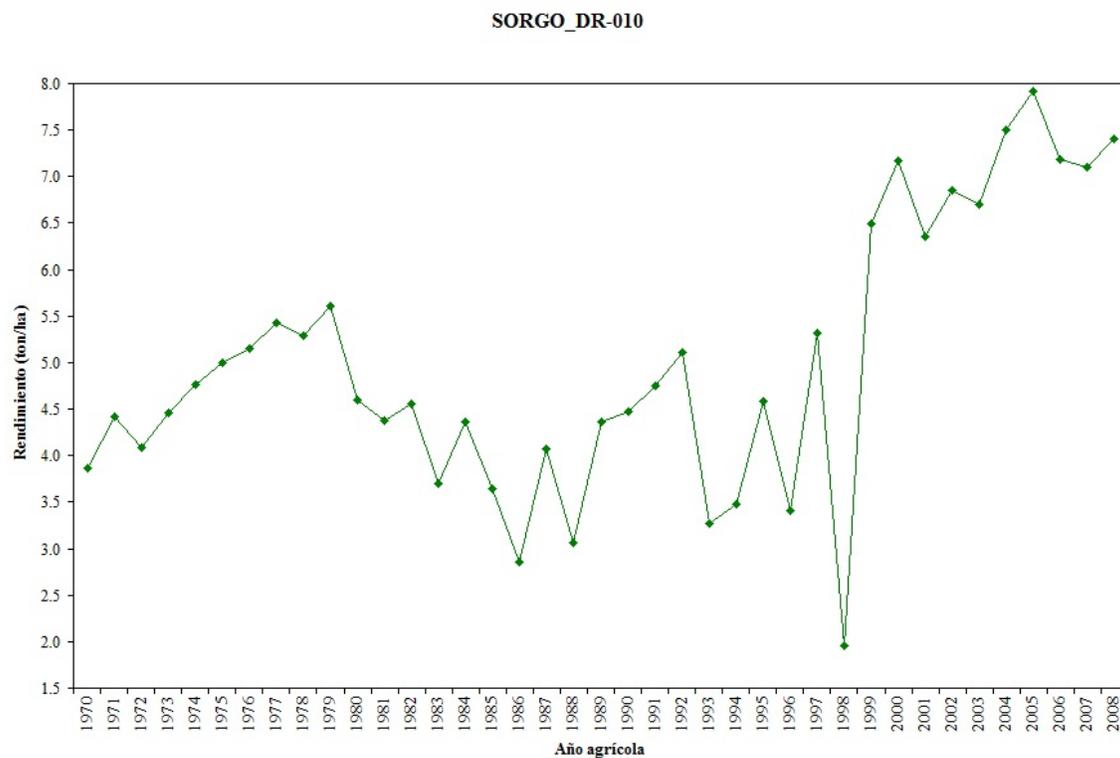


Figura A.1.86. Rendimiento promedio del cultivo de sorgo en el DR-010 para el ciclo PV.

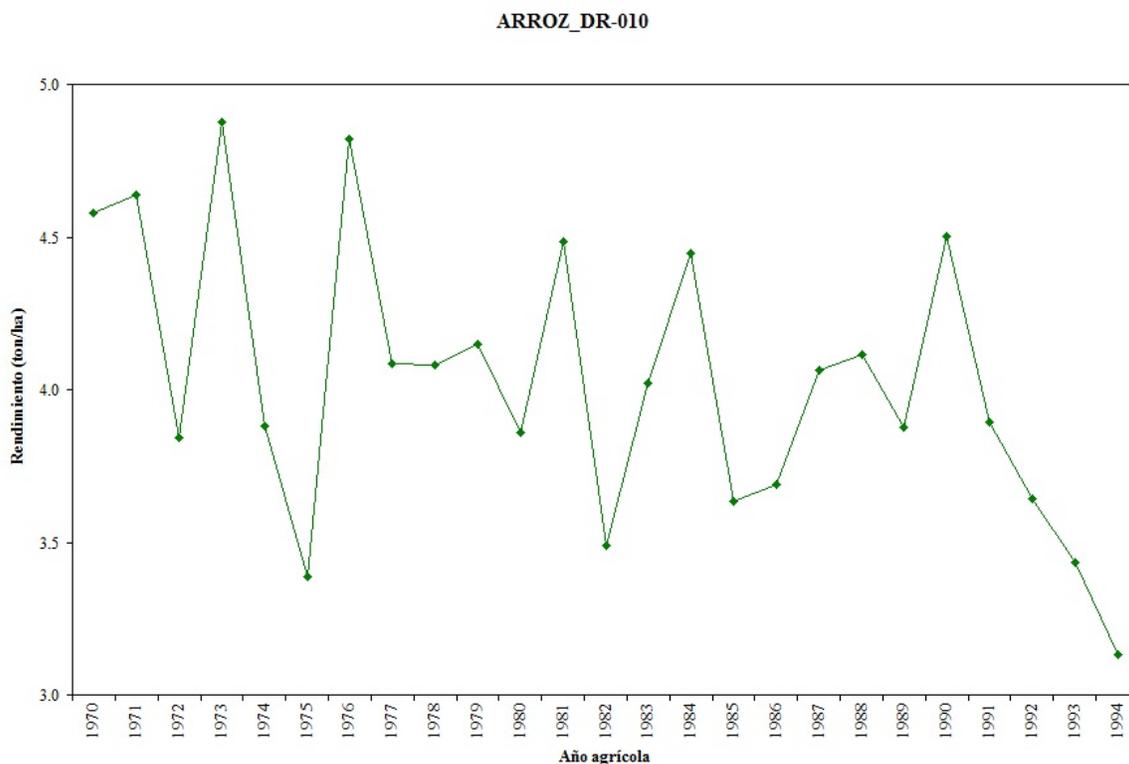


Figura A.1.87. Rendimiento promedio del cultivo de arroz en el DR-010 para el ciclo PV.

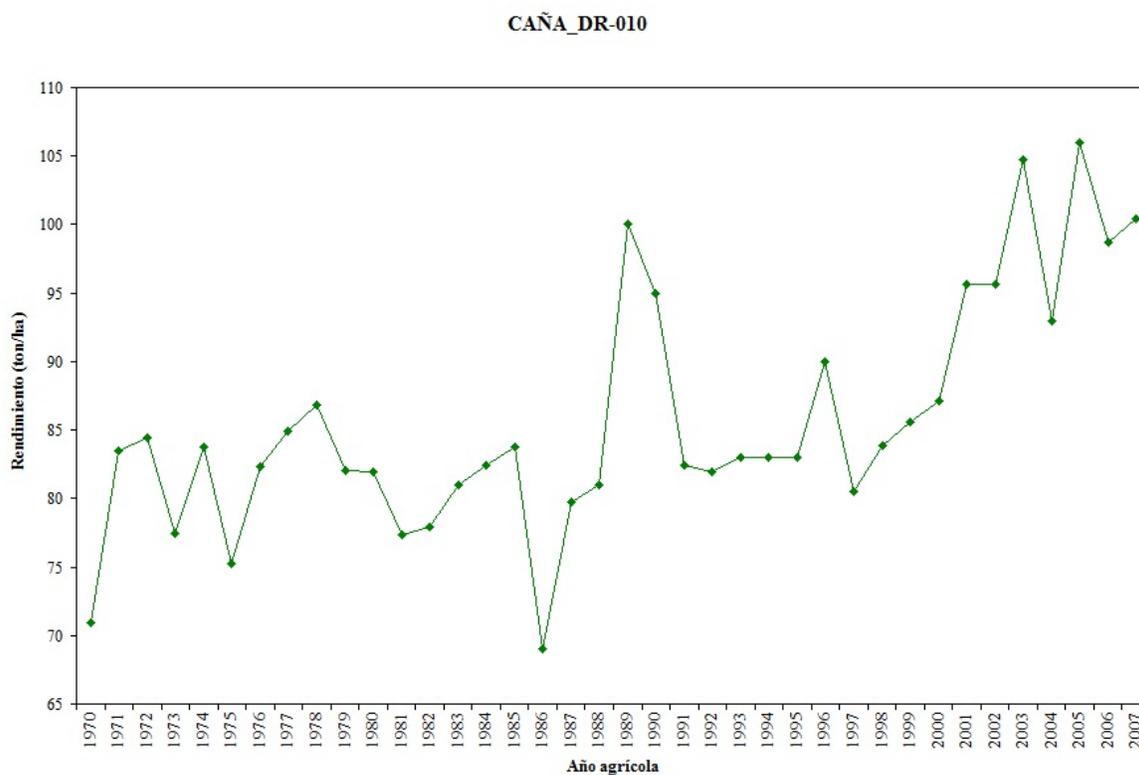


Figura A.1.88. Rendimiento promedio del cultivo de caña en el DR-010 para el ciclo Perenne.

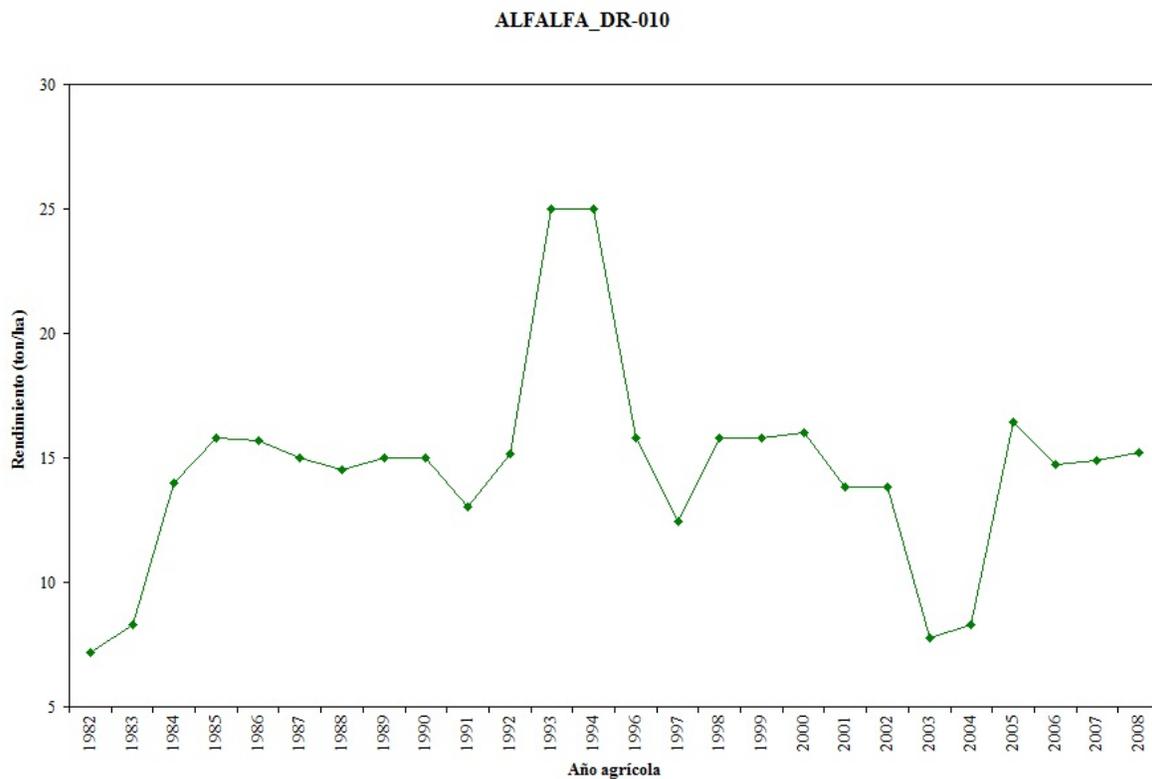


Figura A.1.89. Rendimiento promedio del cultivo de alfalfa en el DR-010 para el ciclo Perenne.

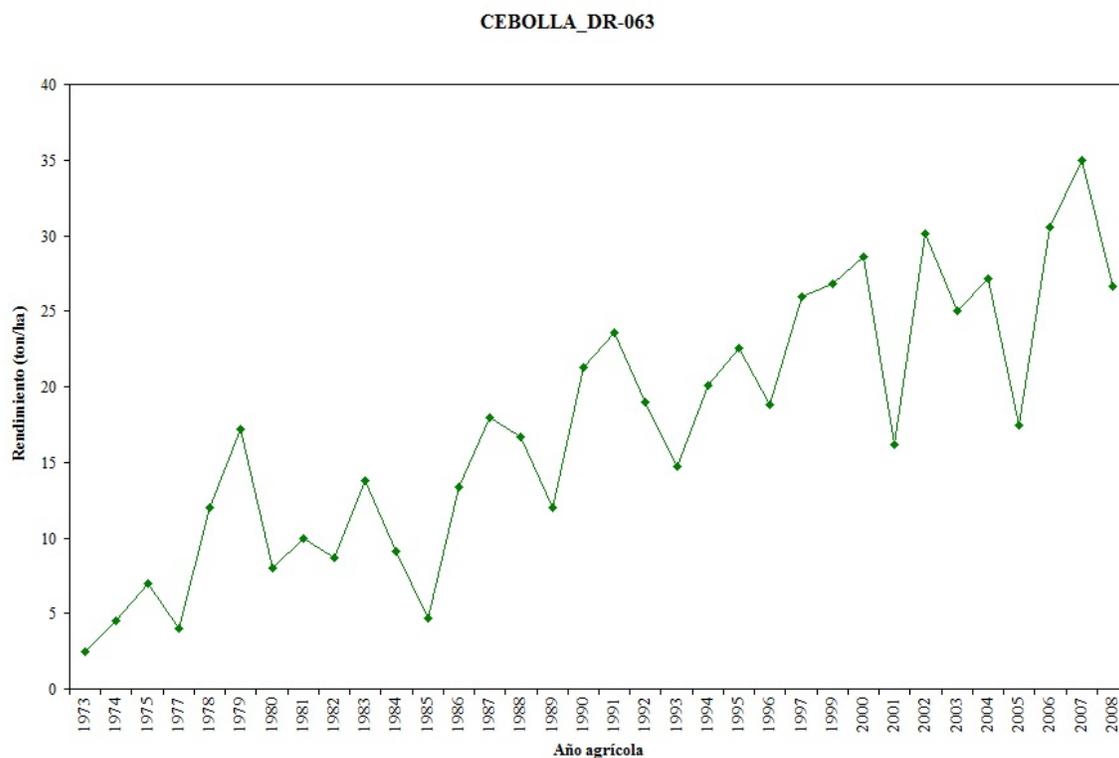


Figura A.1.90. Rendimiento promedio del cultivo de cebolla en el DR-063 para el ciclo OI.

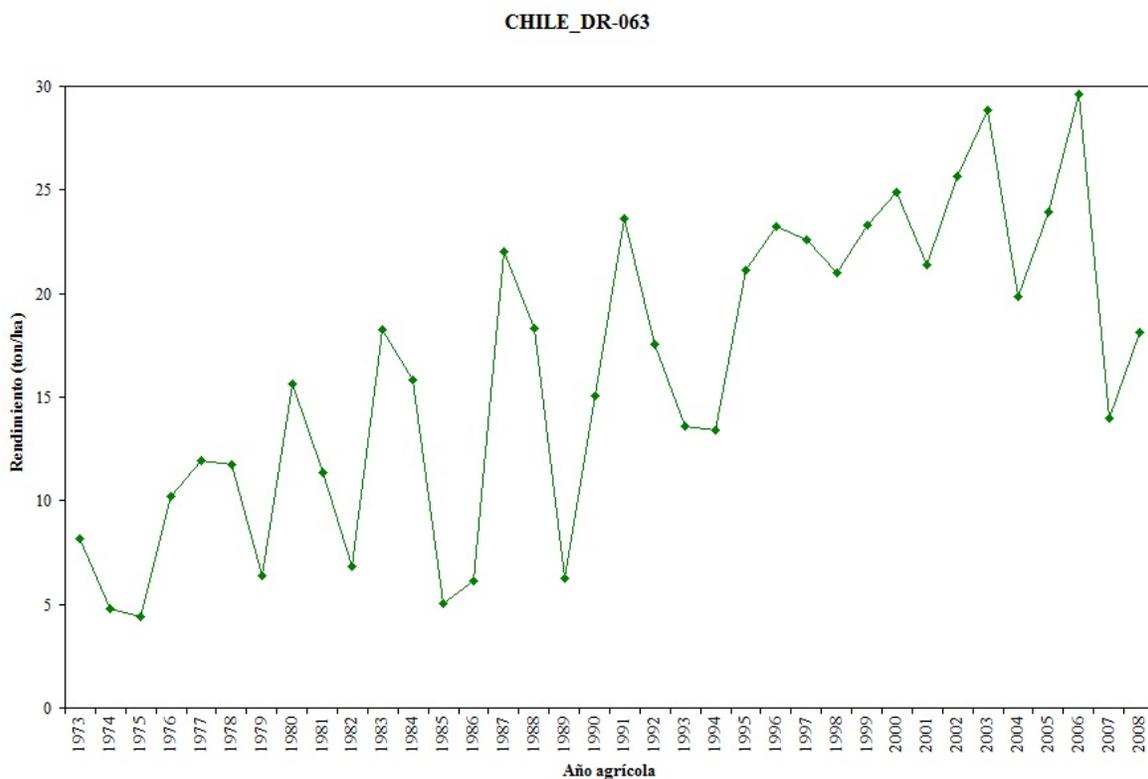


Figura A.1.91. Rendimiento promedio del cultivo de chile en el DR-063 para el ciclo OI.

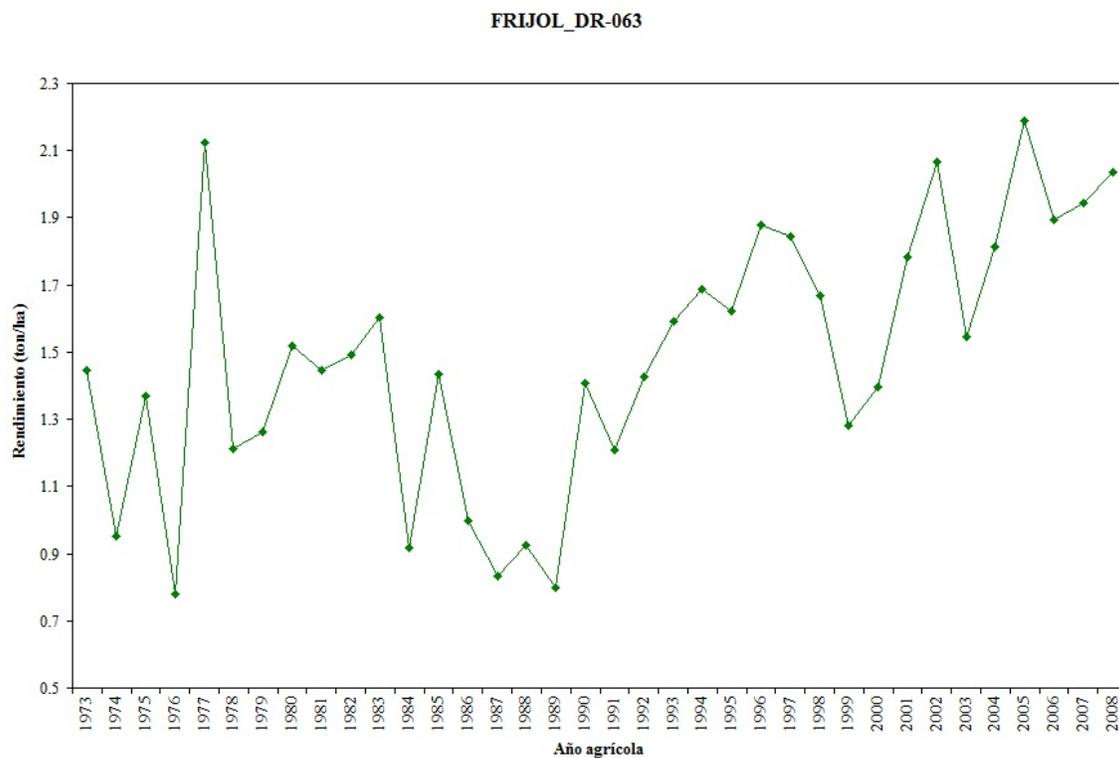


Figura A.1.92. Rendimiento promedio del cultivo de frijol en el DR-063 para el ciclo OI.

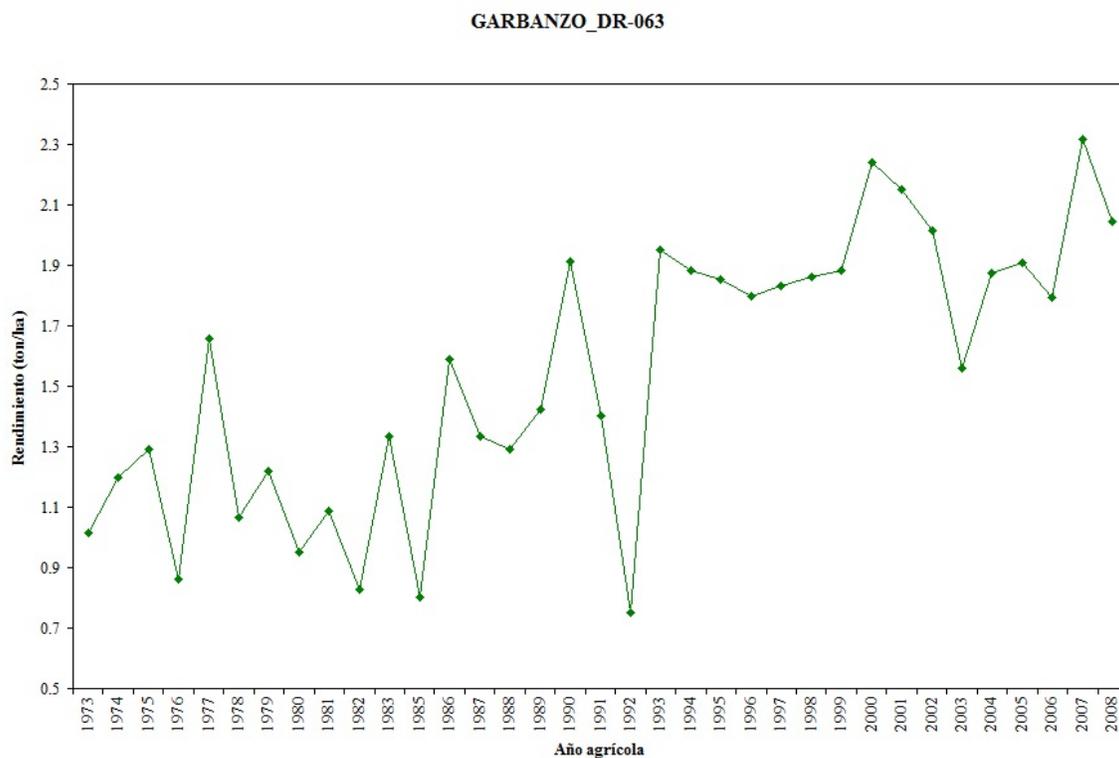


Figura A.1.93. Rendimiento promedio del cultivo de garbanzo en el DR-063 para el ciclo OI.

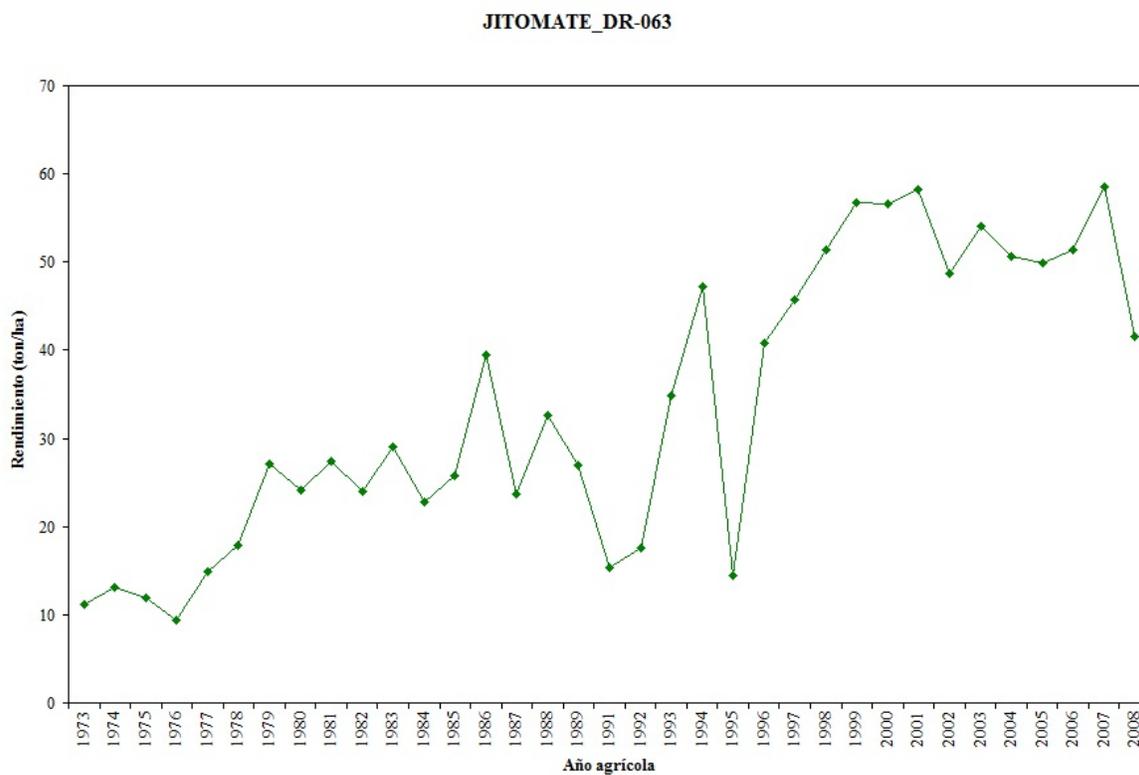


Figura A.1.94. Rendimiento promedio del cultivo de jitomate en el DR-063 para el ciclo OI.

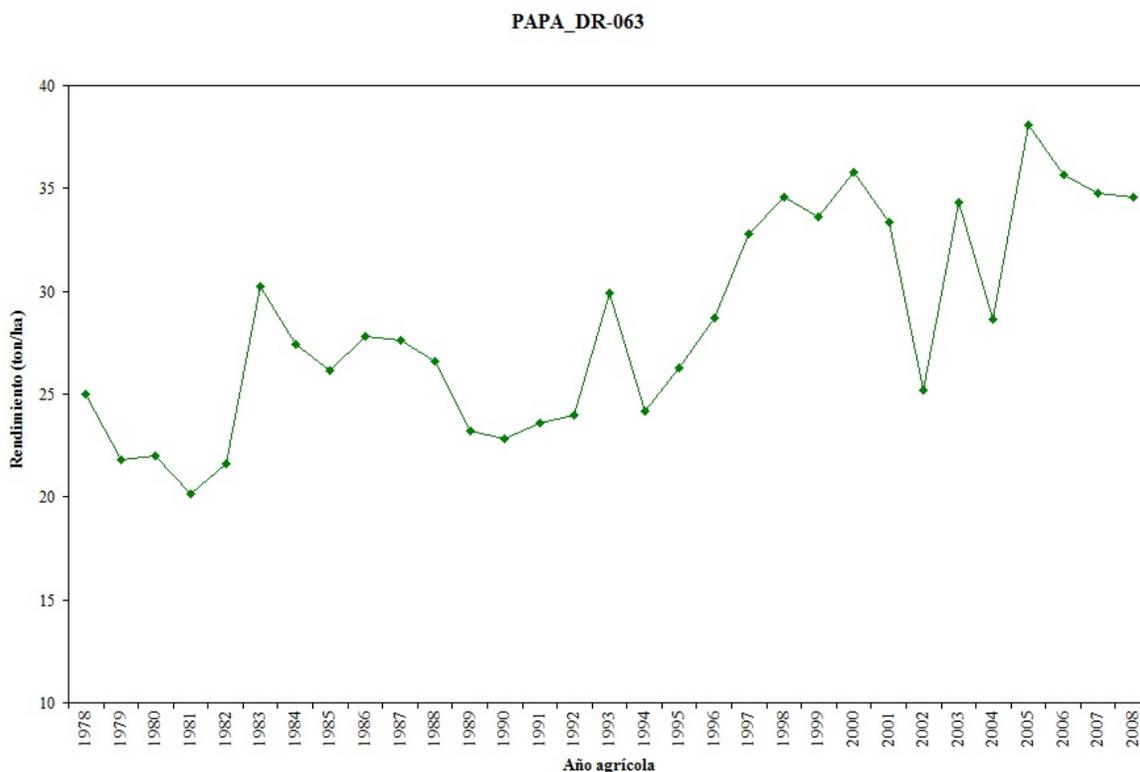


Figura A.1.95. Rendimiento promedio del cultivo de papa en el DR-063 para el ciclo OI.

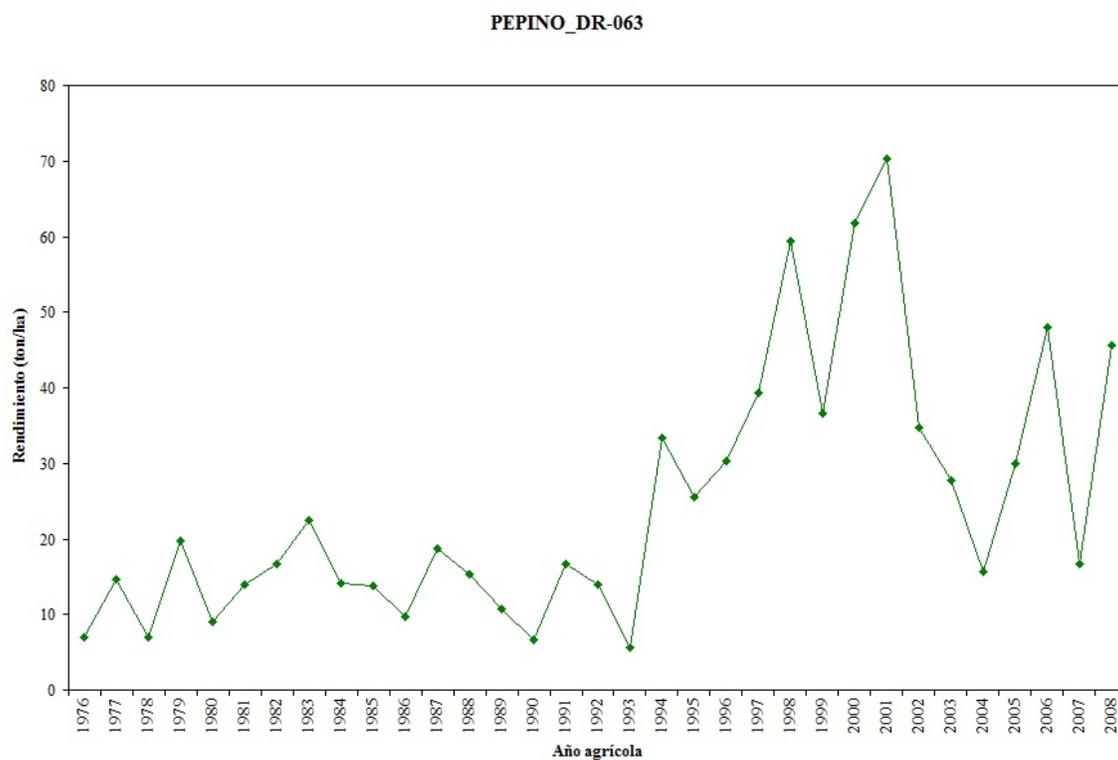


Figura A.1.96. Rendimiento promedio del cultivo de pepino en el DR-063 para el ciclo OI.

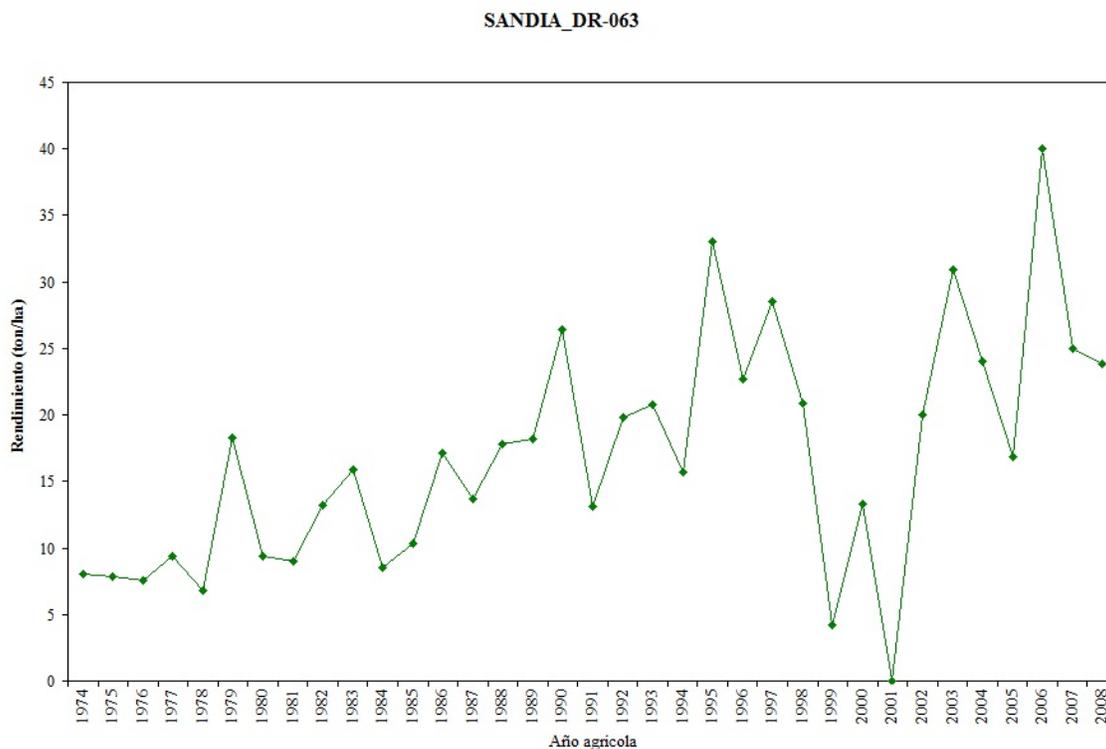


Figura A.1.97. Rendimiento promedio del cultivo de sandia en el DR-063 para el ciclo OI.

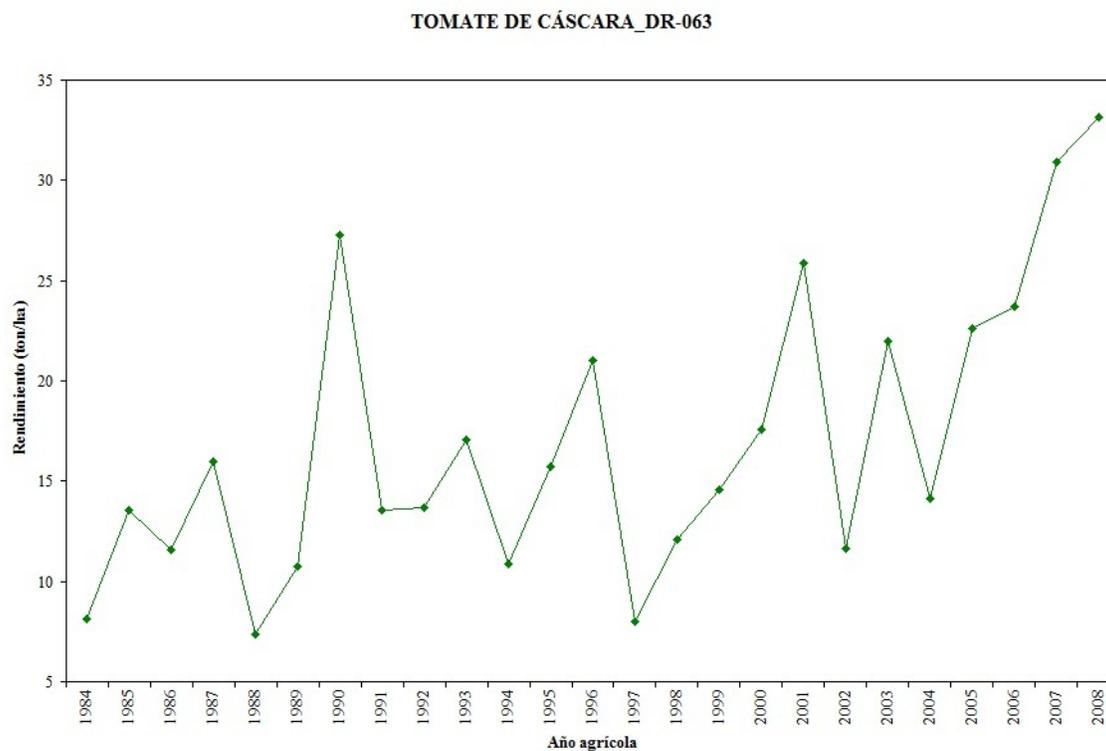


Figura A.1.98. Rendimiento promedio del cultivo de tomate de cáscara en el DR-063 para el ciclo OI.

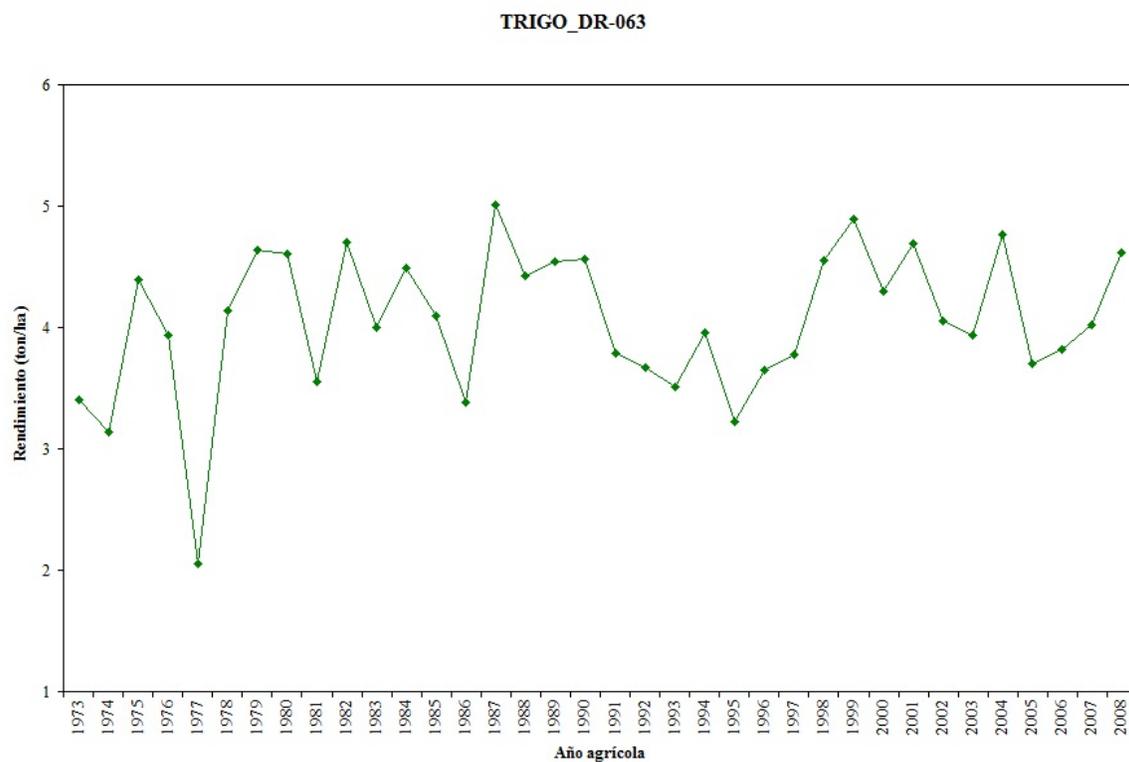


Figura A.1.99. Rendimiento promedio del cultivo de trigo en el DR-063 para el ciclo OI.

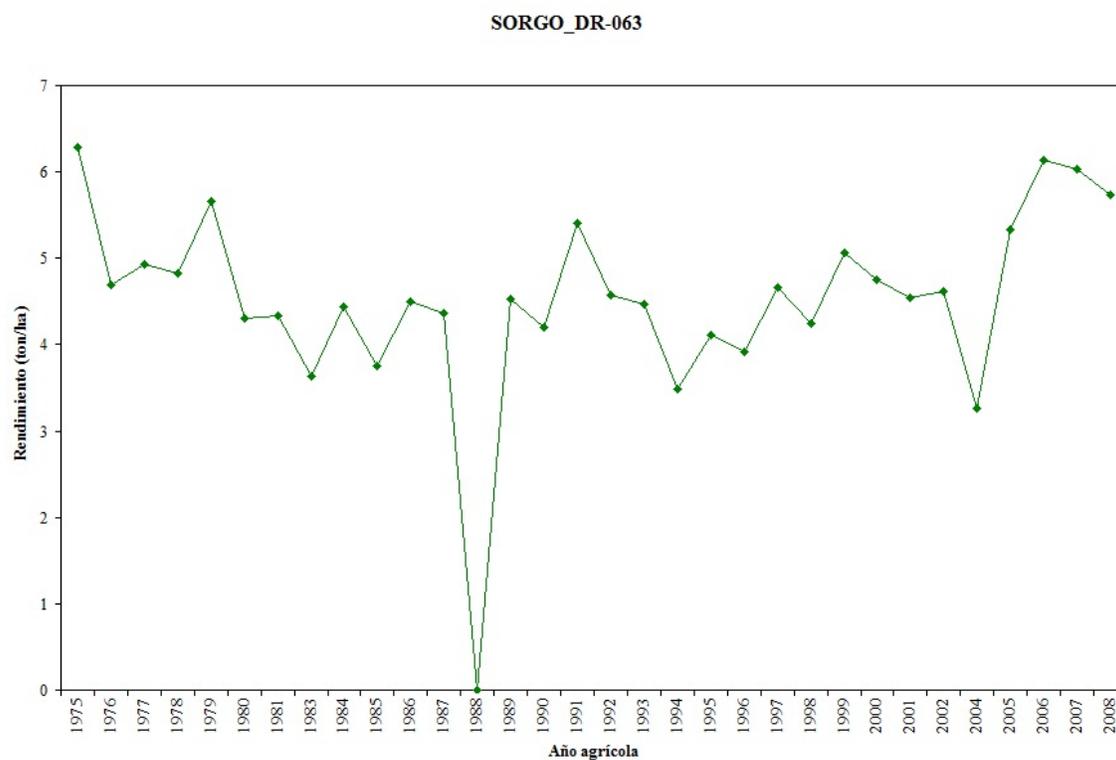


Figura A.1.100. Rendimiento promedio del cultivo de sorgo en el DR-063 para el ciclo PV.

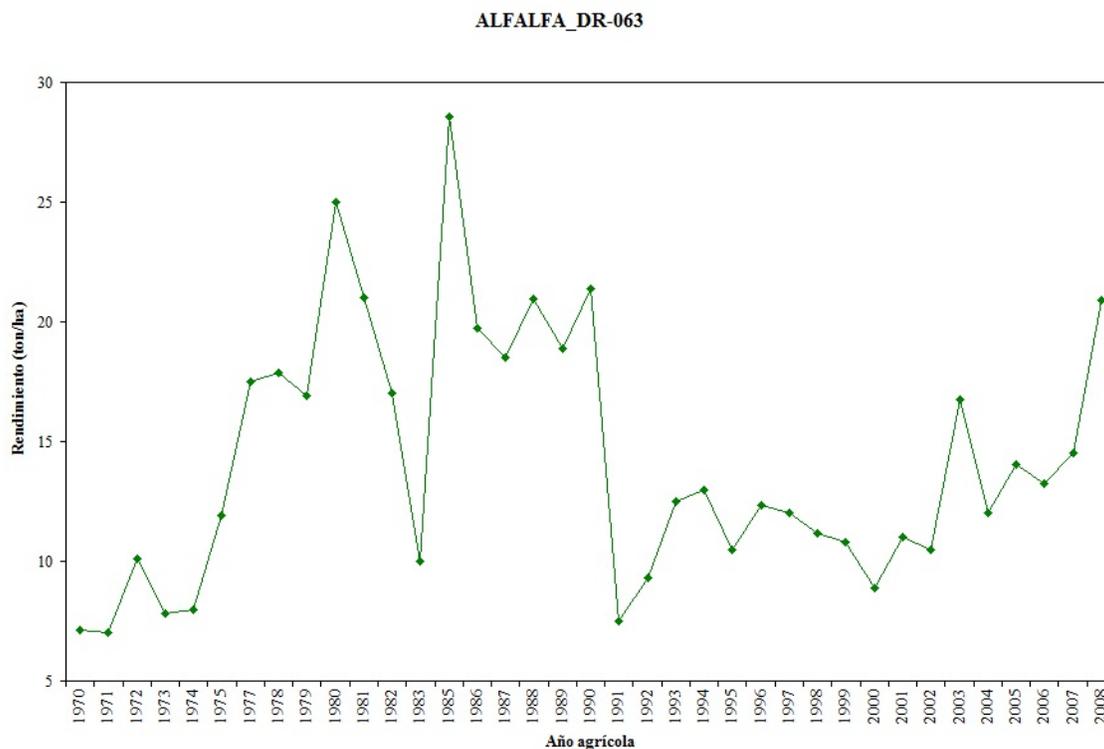


Figura A.1.101. Rendimiento promedio del cultivo de alfalfa en el DR-063 para el ciclo Perenne.

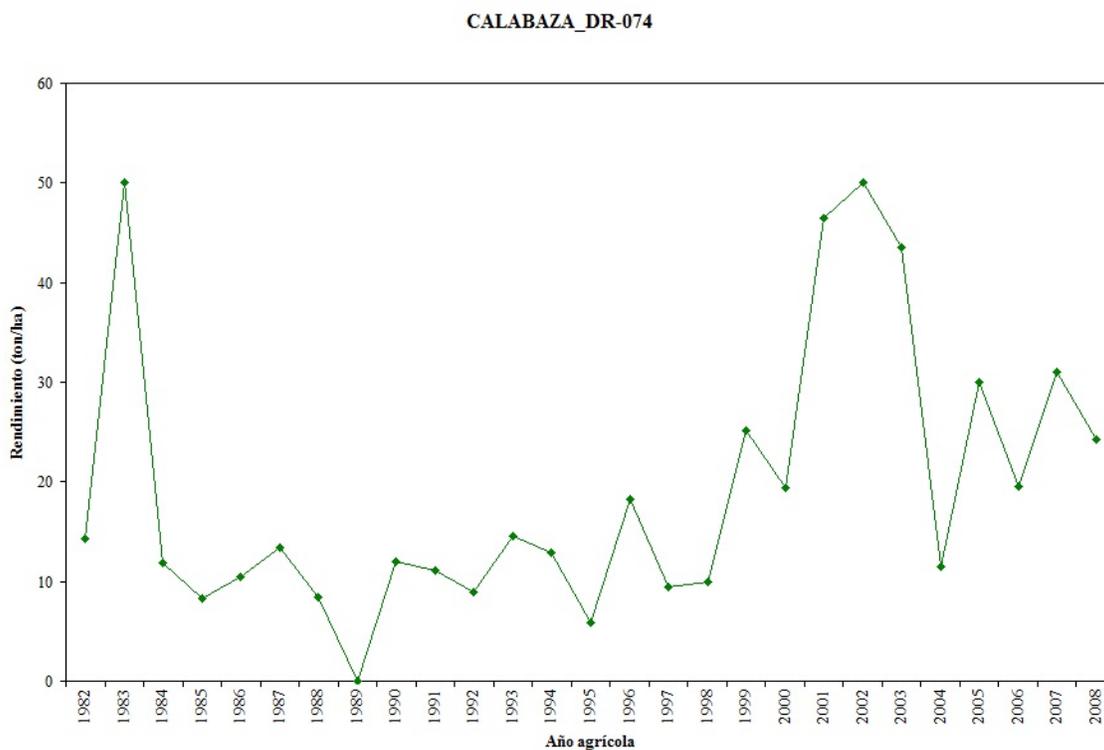


Figura A.1.102. Rendimiento promedio del cultivo de calabaza en el DR-074 para el ciclo OI.

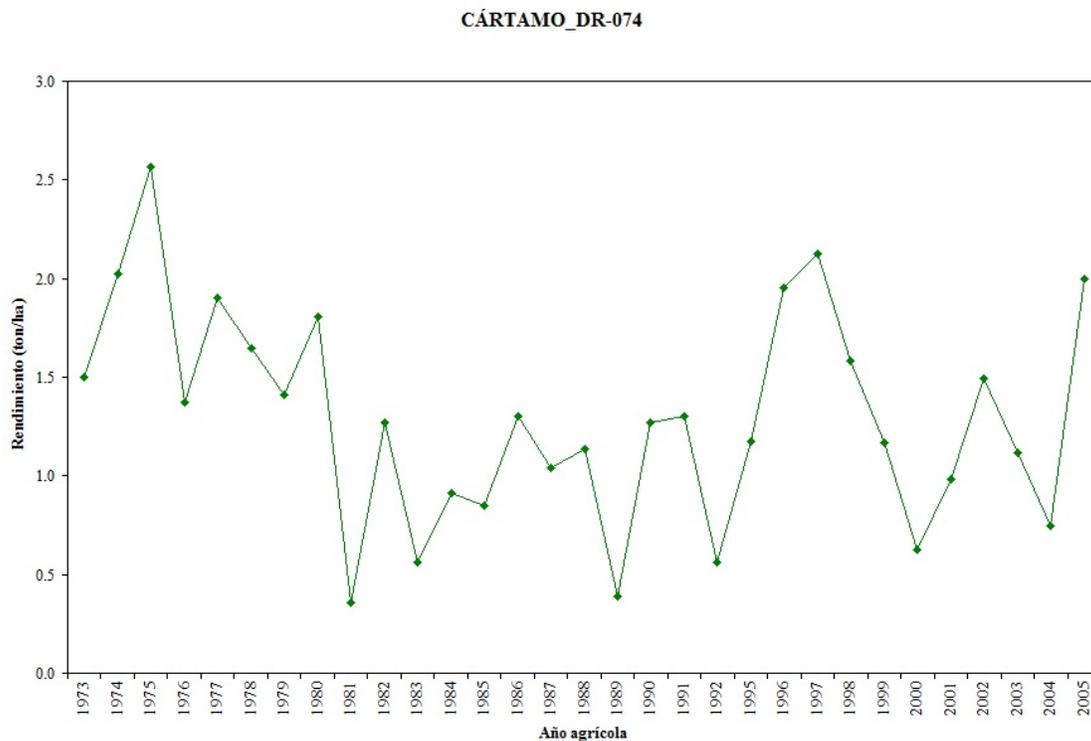


Figura A.1.103. Rendimiento promedio del cultivo de cártamo en el DR-074 para el ciclo OI.

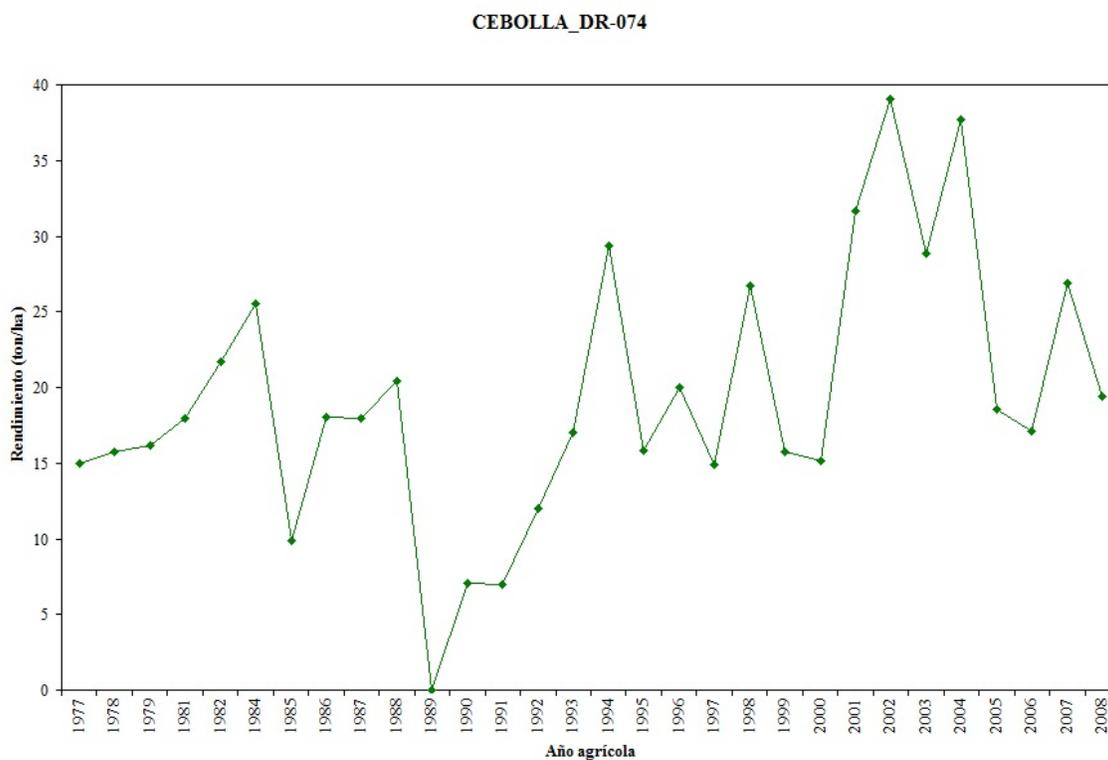


Figura A.1.104. Rendimiento promedio del cultivo de cebolla en el DR-074 para el ciclo OI.

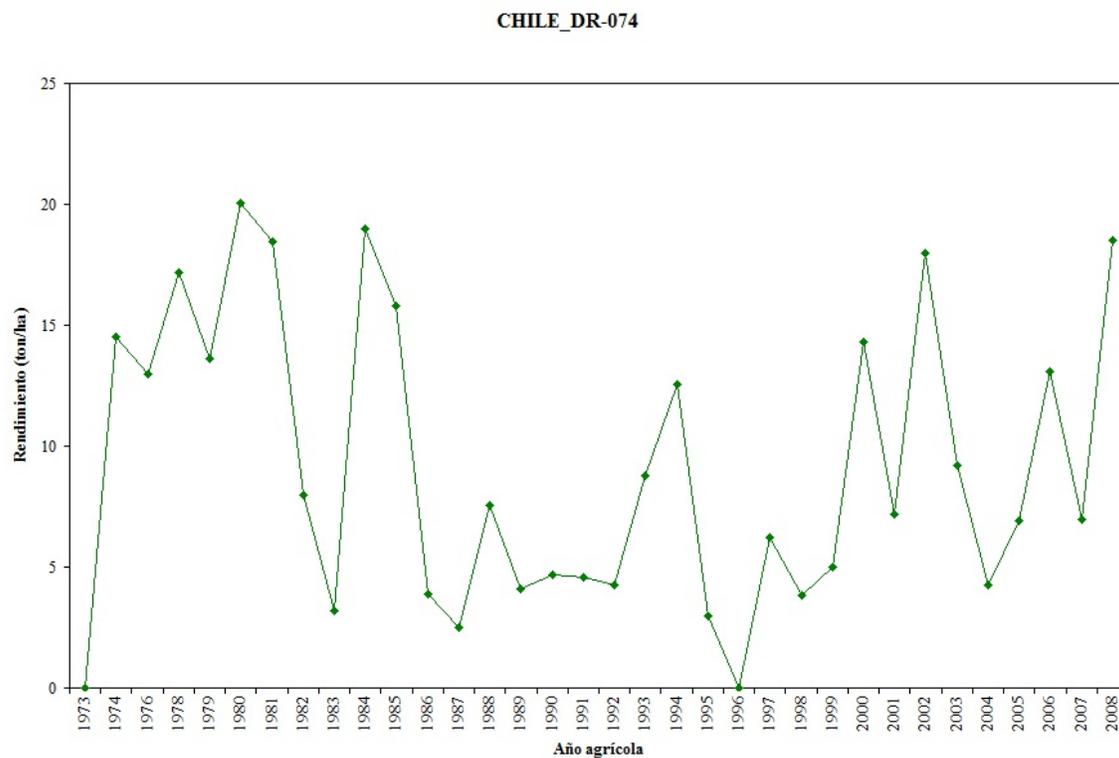


Figura A.1.105. Rendimiento promedio del cultivo de chile en el DR-074 para el ciclo OI.

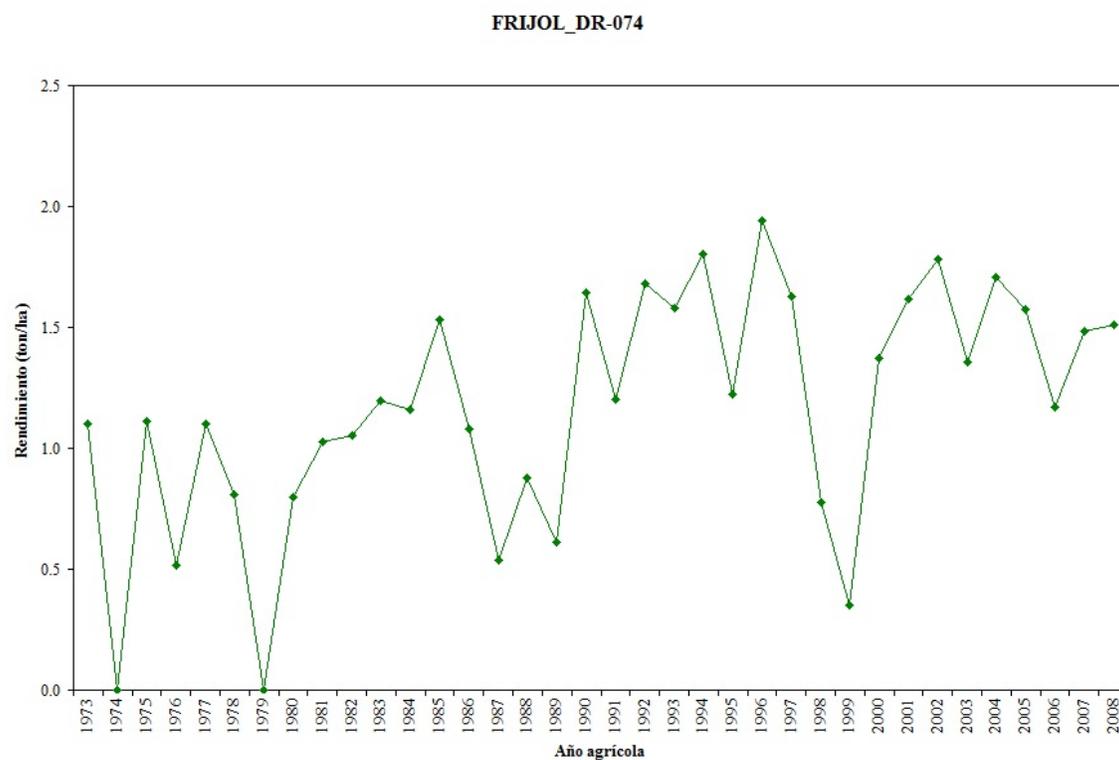


Figura A.1.106. Rendimiento promedio del cultivo de frijol en el DR-074 para el ciclo OI.

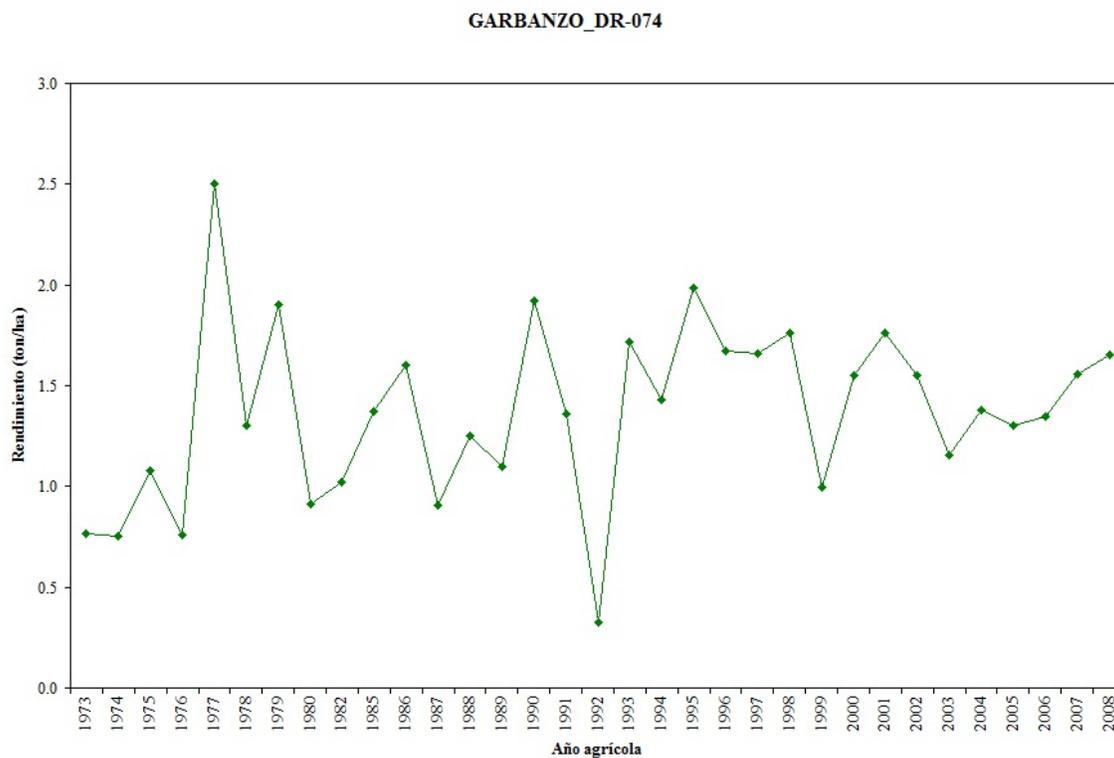


Figura A.1.107. Rendimiento promedio del cultivo de garbanzo en el DR-074 para el ciclo OI.

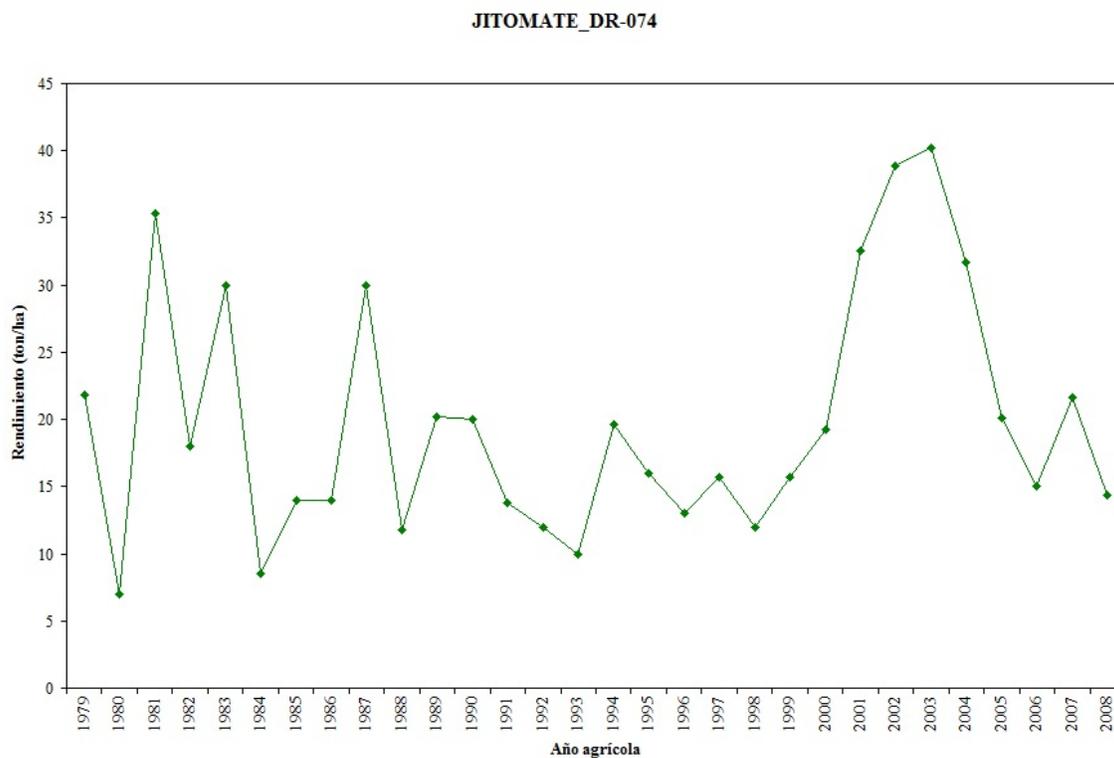


Figura A.1.108. Rendimiento promedio del cultivo de jitomate en el DR-074 para el ciclo OI.

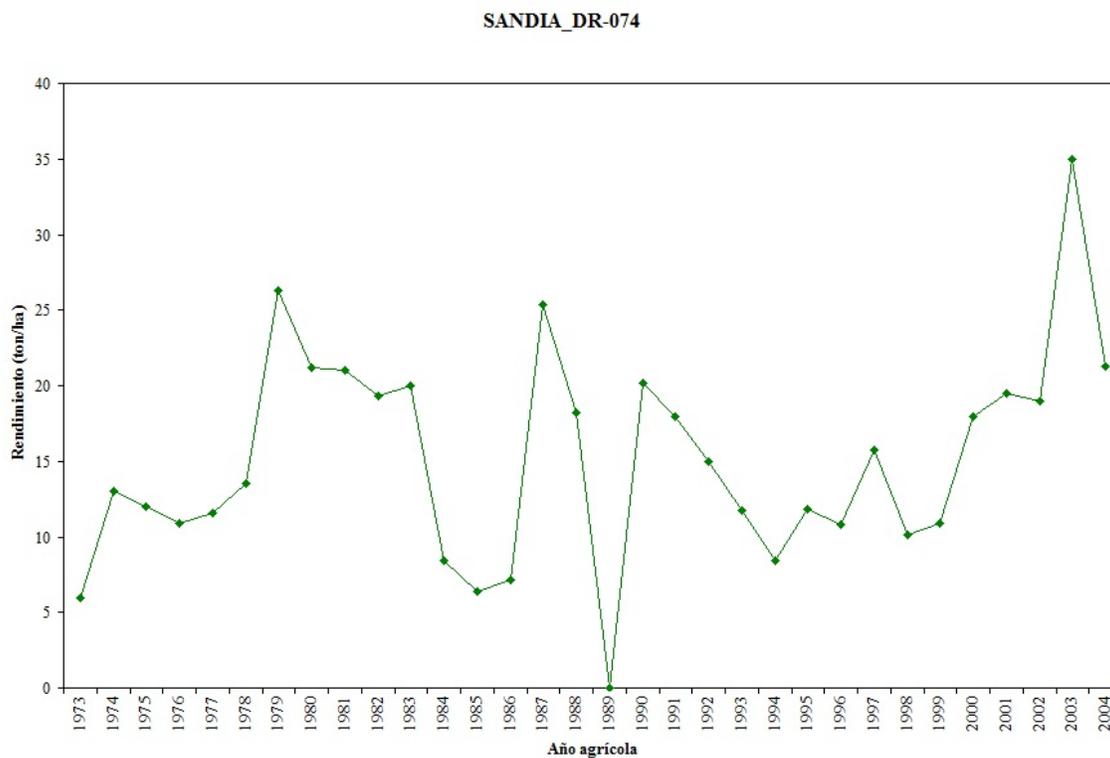


Figura A.1.109. Rendimiento promedio del cultivo de sandia en el DR-074 para el ciclo OI.

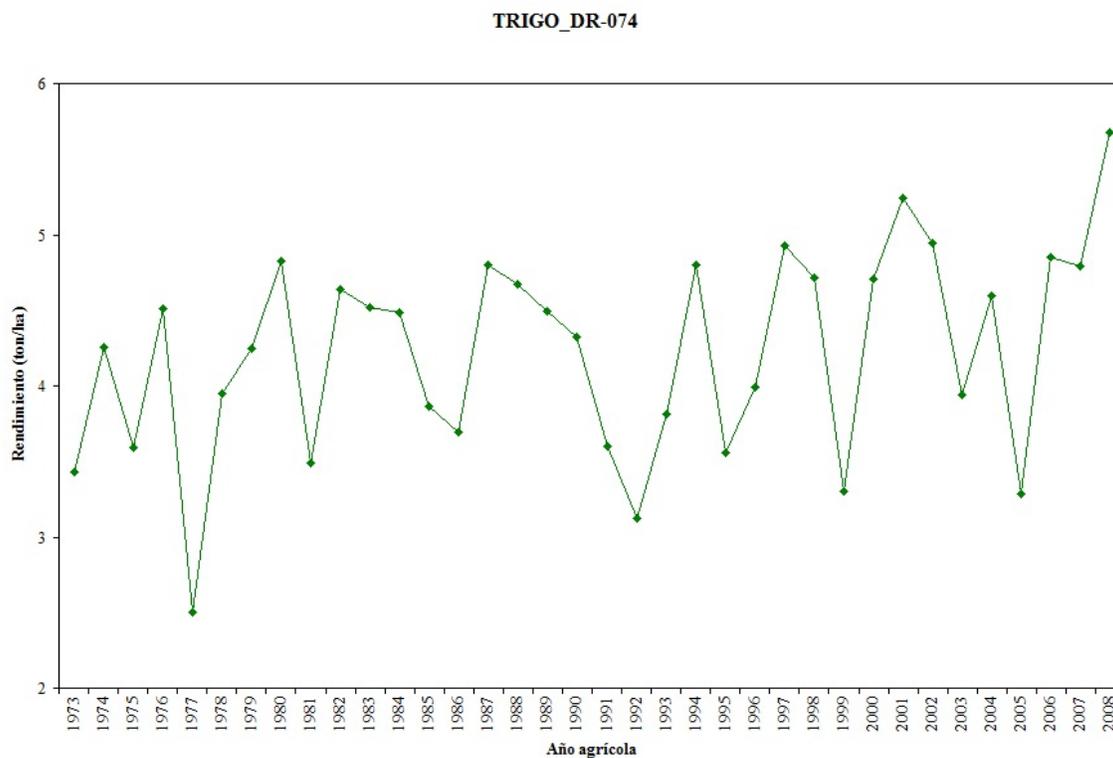


Figura A.1.110. Rendimiento promedio del cultivo de trigo en el DR-074 para el ciclo OI.

ALFALFA_DR-074

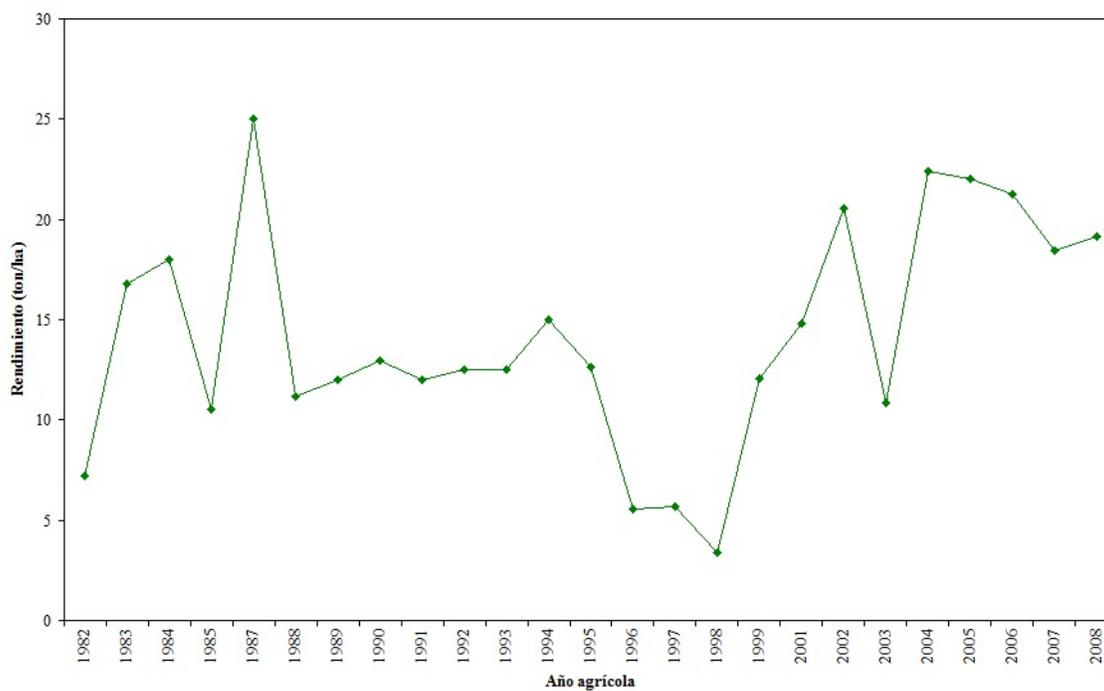


Figura A.1.111. Rendimiento promedio del cultivo de alfalfa en el DR-074 para el ciclo Perenne.

ALGODÓN_DR-075

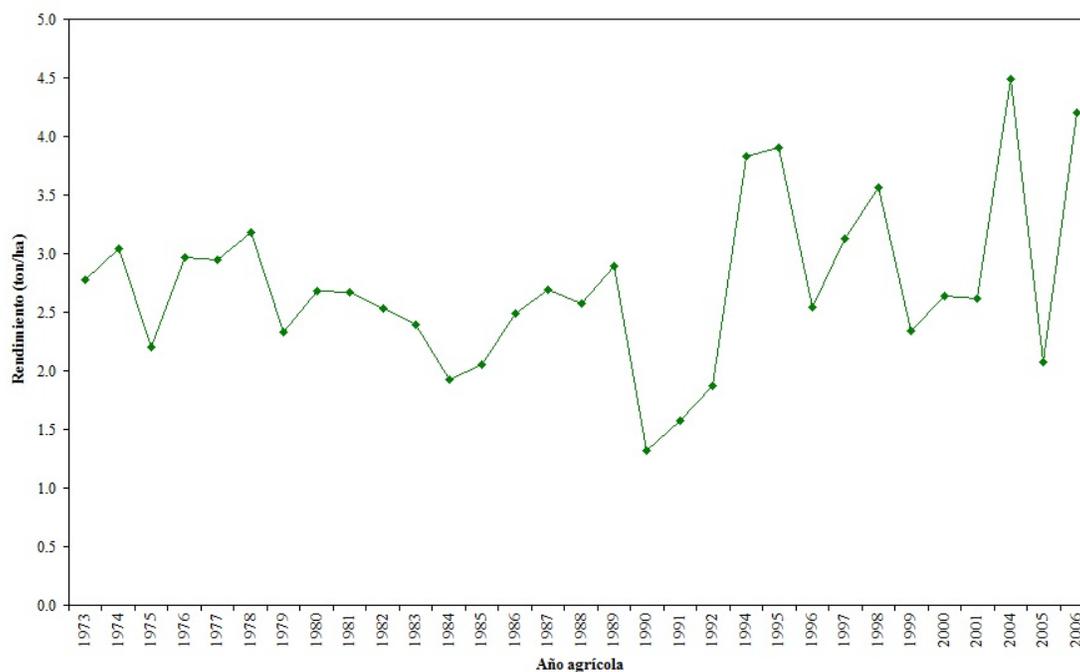


Figura A.1.112. Rendimiento promedio del cultivo de algodón en el DR-075 para el ciclo OI.

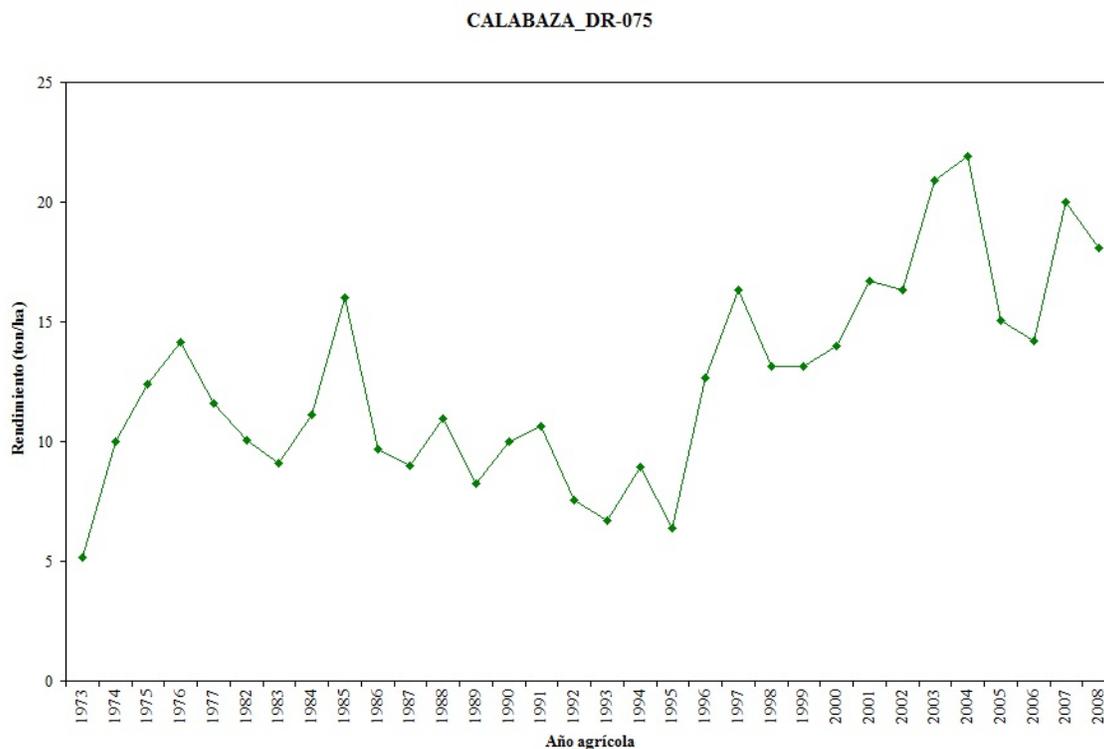


Figura A.1.113. Rendimiento promedio del cultivo de calabaza en el DR-075 para el ciclo OI.

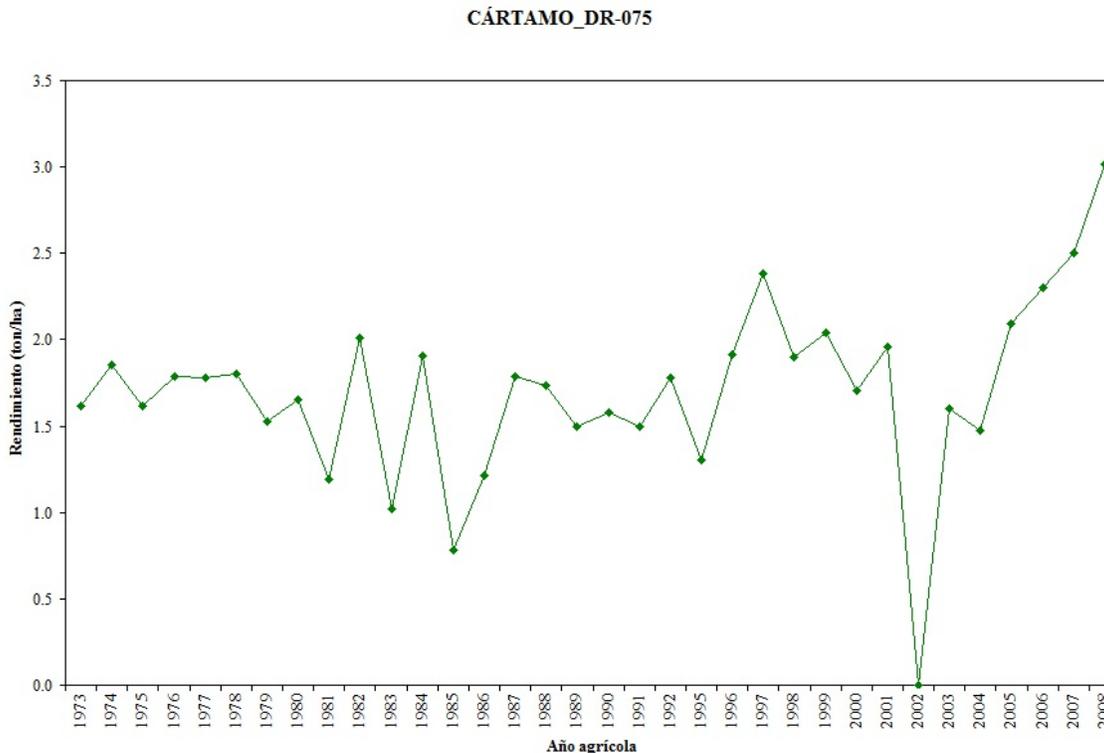


Figura A.1.114. Rendimiento promedio del cultivo de cártamo en el DR-075 para el ciclo OI.

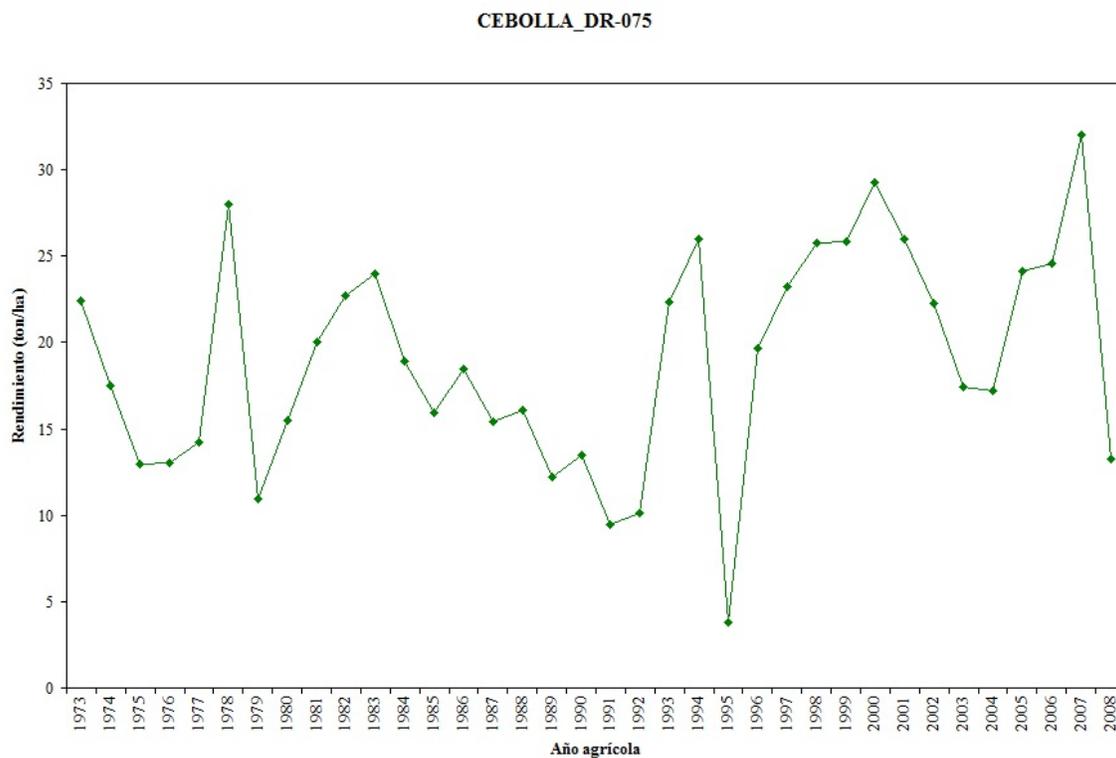


Figura A.1.115. Rendimiento promedio del cultivo de cebolla en el DR-075 para el ciclo OI.

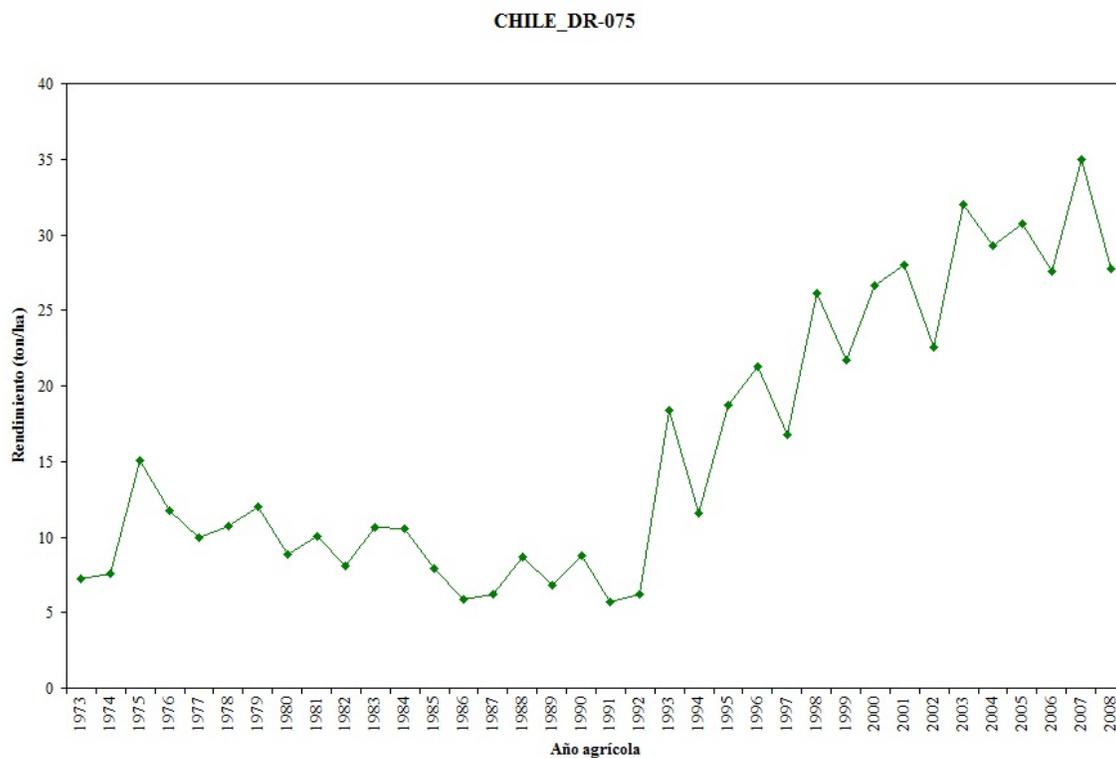


Figura A.1.116. Rendimiento promedio del cultivo de chile en el DR-075 para el ciclo OI.

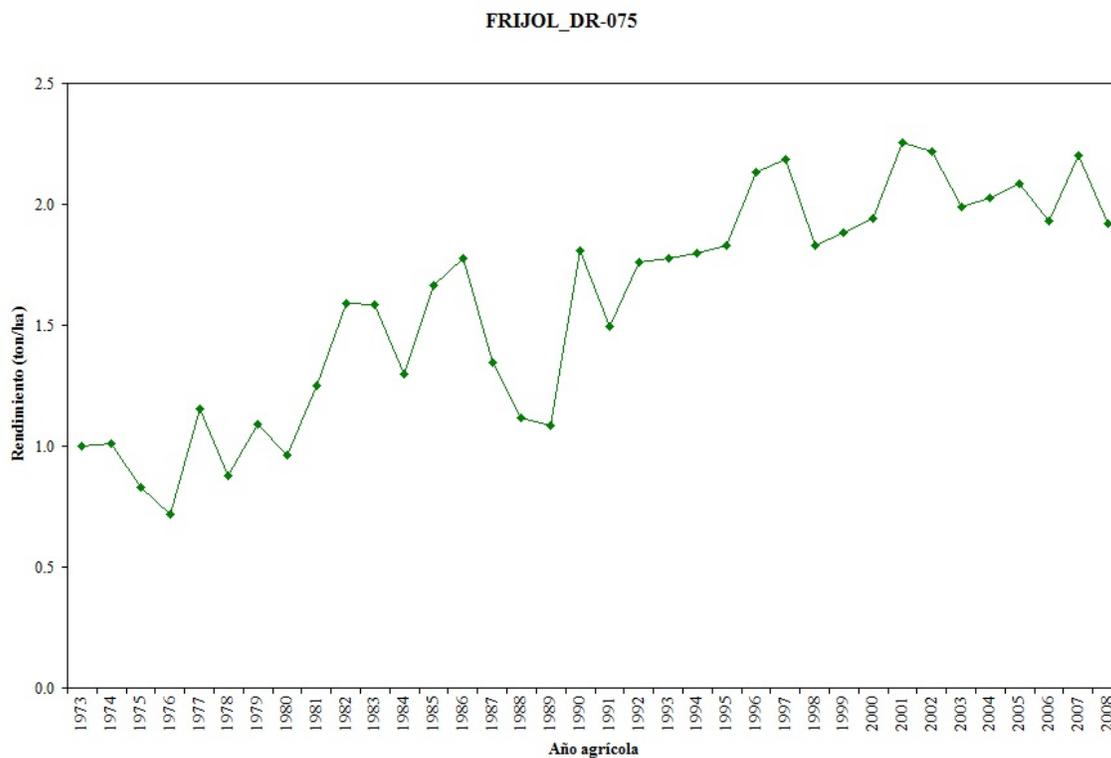


Figura A.1.117. Rendimiento promedio del cultivo de frijol en el DR-075 para el ciclo OI.

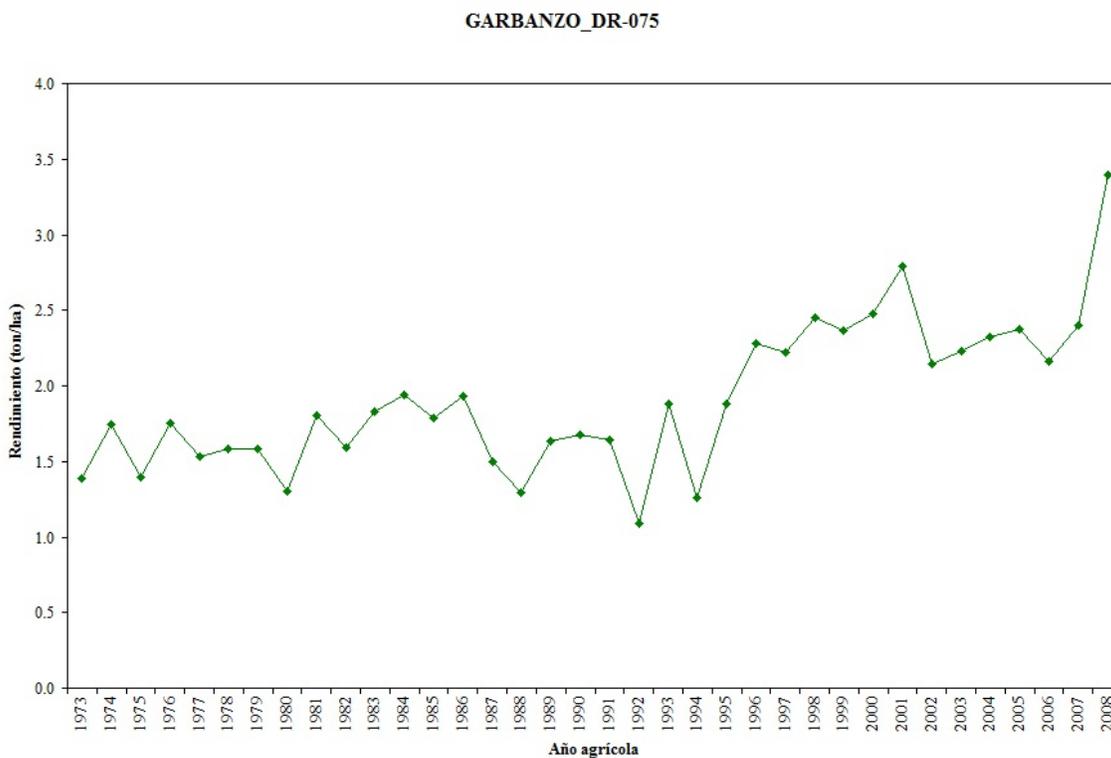


Figura A.1.118. Rendimiento promedio del cultivo de garbanzo en el DR-075 para el ciclo OI.

JITOMATE_DR-075

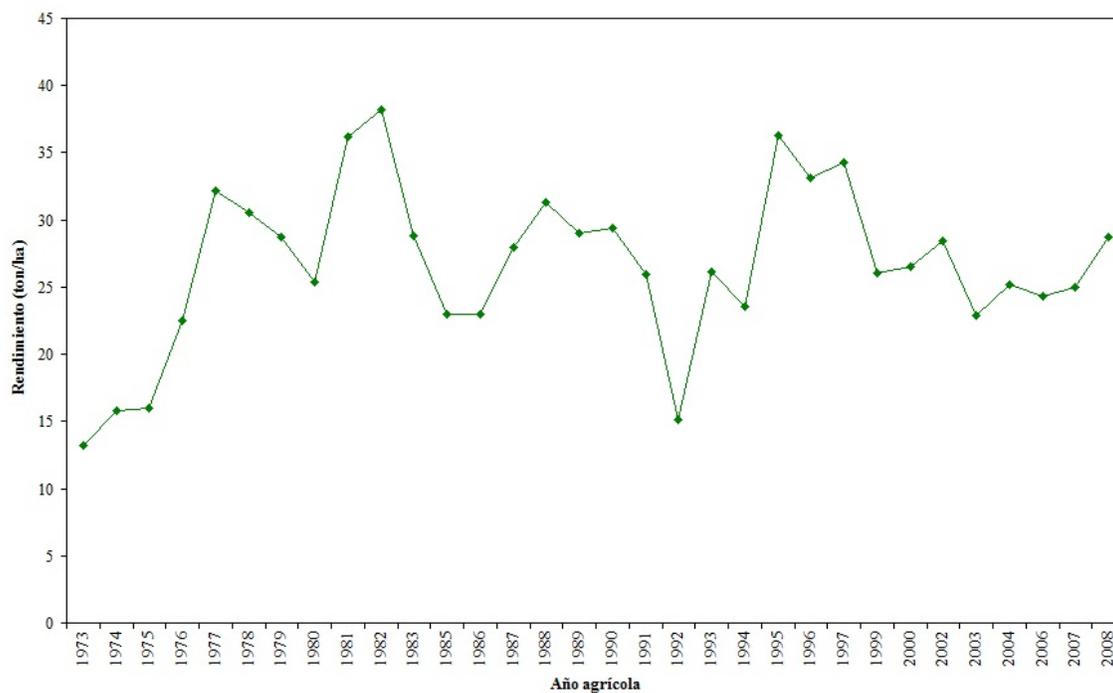


Figura A.1.119. Rendimiento promedio del cultivo de jitomate en el DR-075 para el ciclo OI.

PAPA_DR-075

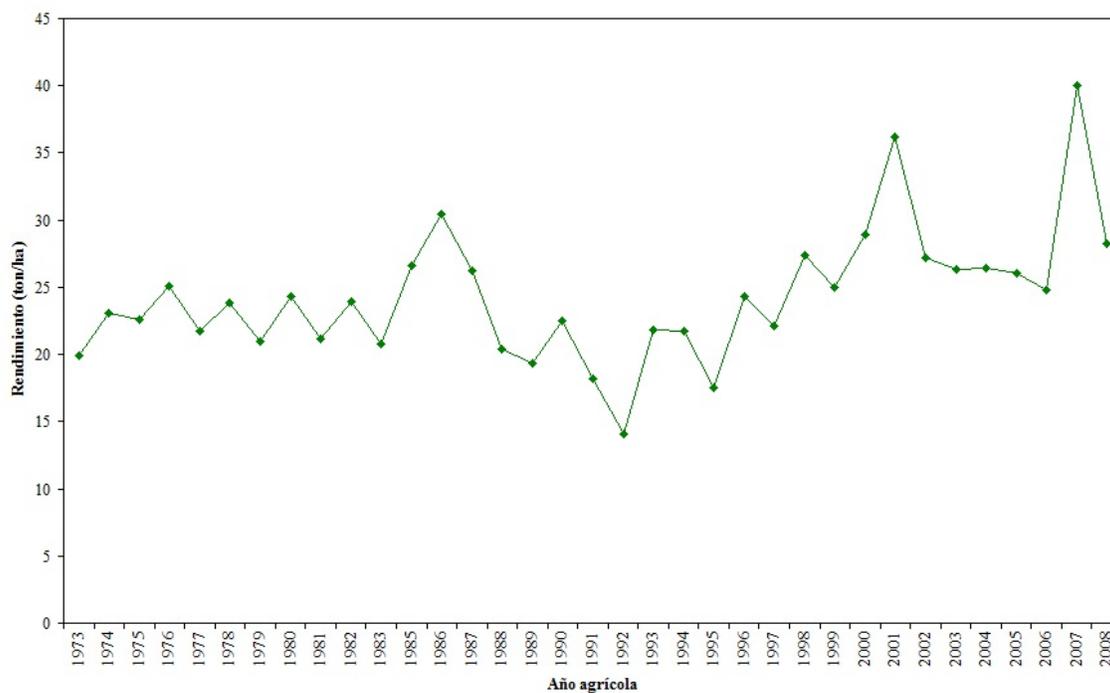


Figura A.1.120. Rendimiento promedio del cultivo de papa en el DR-075 para el ciclo OI.

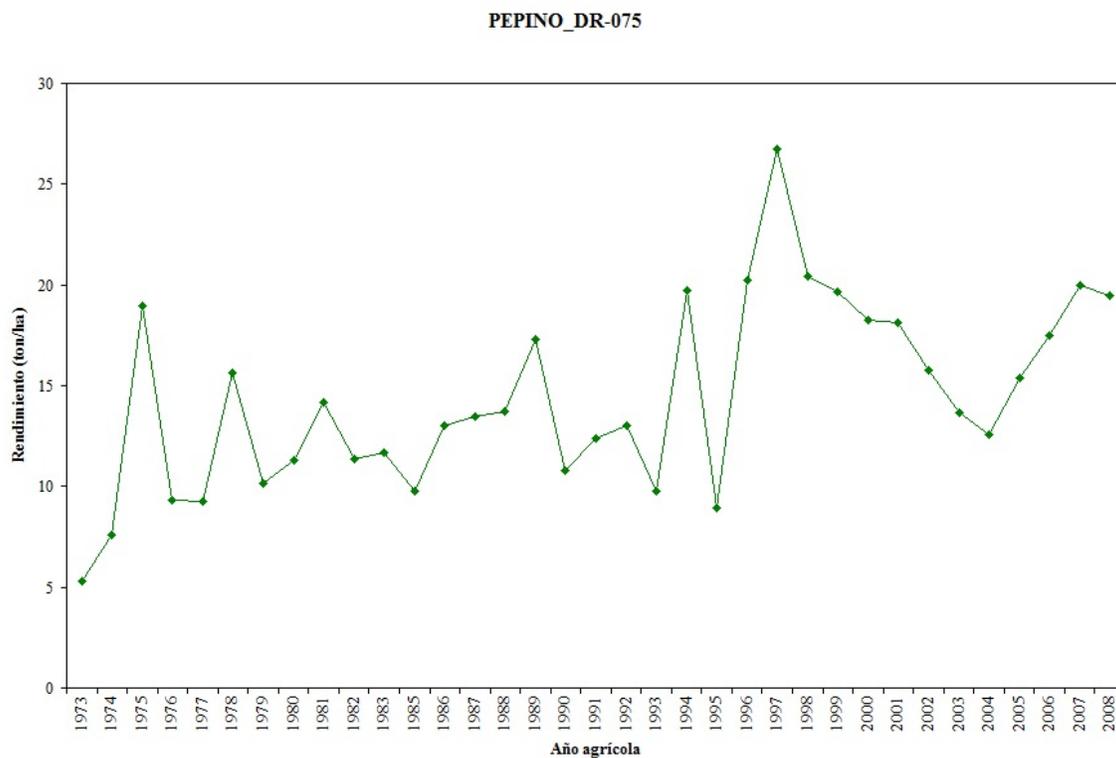


Figura A.1.121. Rendimiento promedio del cultivo de pepino en el DR-075 para el ciclo OI.

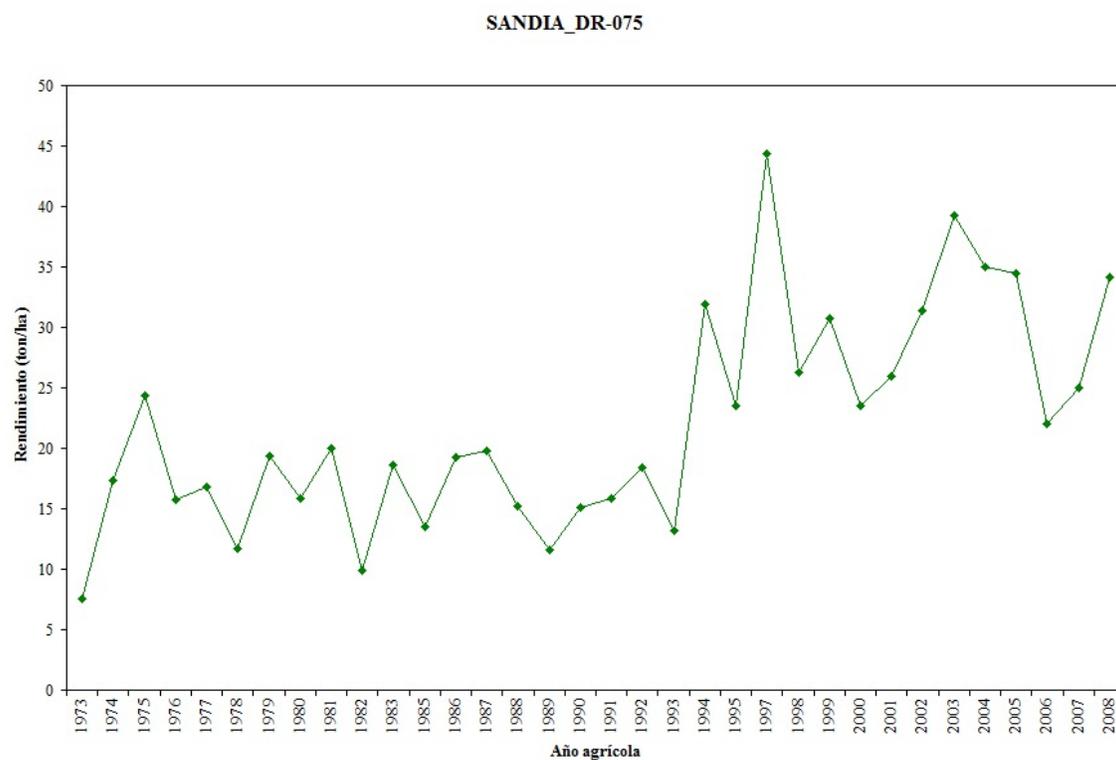


Figura A.1.122. Rendimiento promedio del cultivo de sandia en el DR-075 para el ciclo OI.

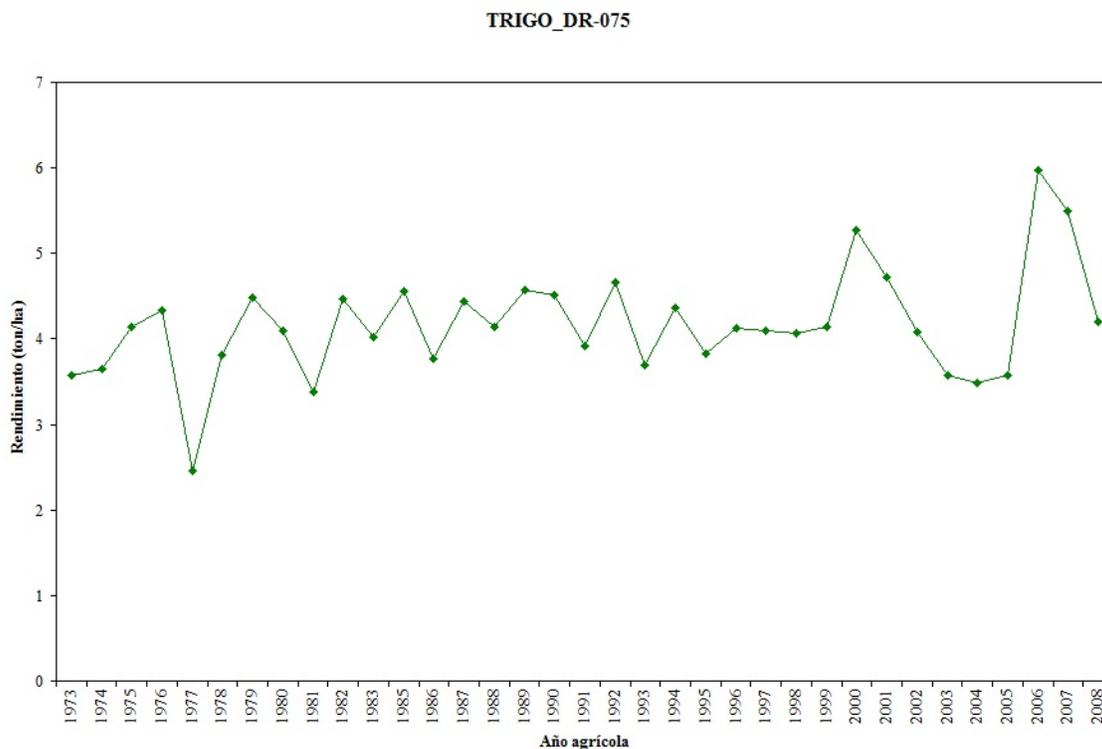


Figura A.1.123. Rendimiento promedio del cultivo de trigo en el DR-075 para el ciclo OI.

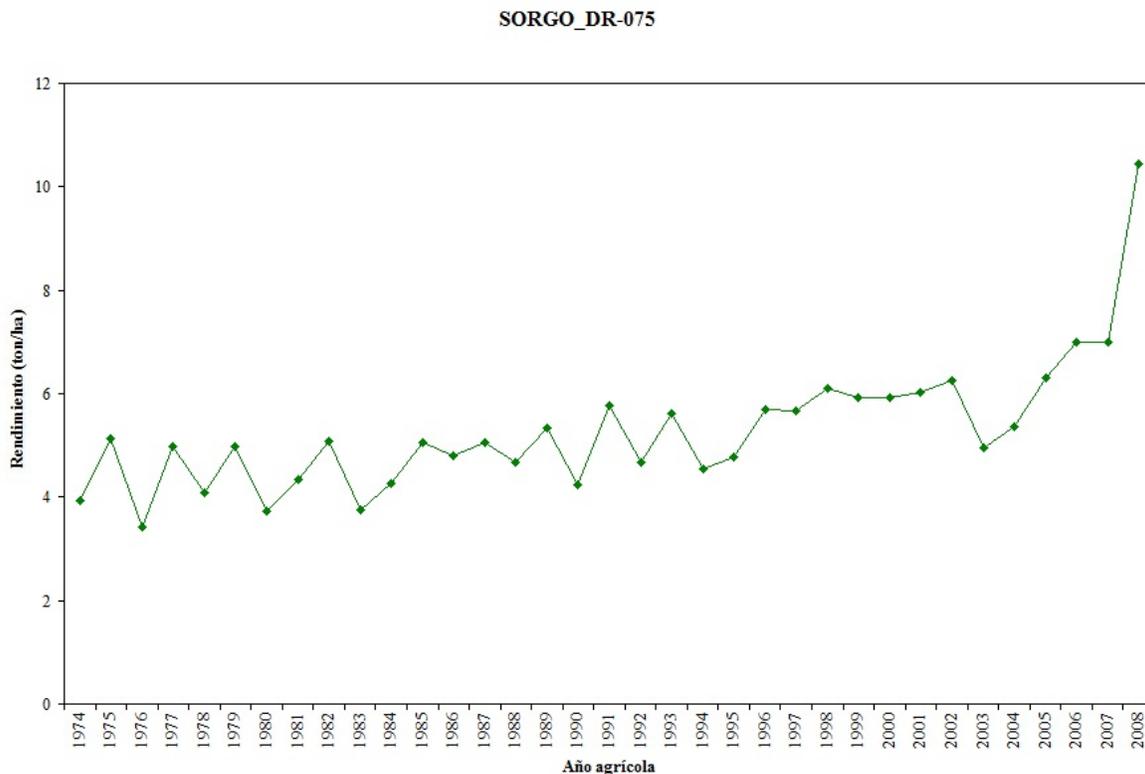


Figura A.1.124. Rendimiento promedio del cultivo de sorgo en el DR-075 para el ciclo PV.

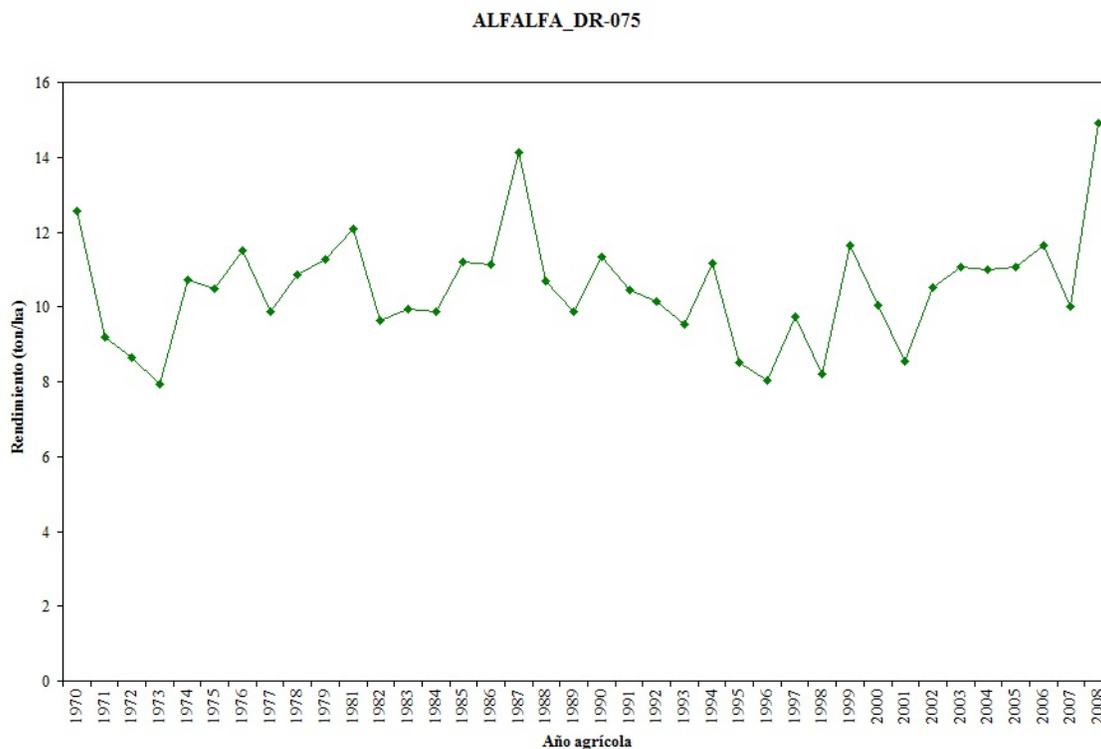


Figura A.1.125. Rendimiento promedio del cultivo de alfalfa en el DR-075 para el ciclo Perenne.

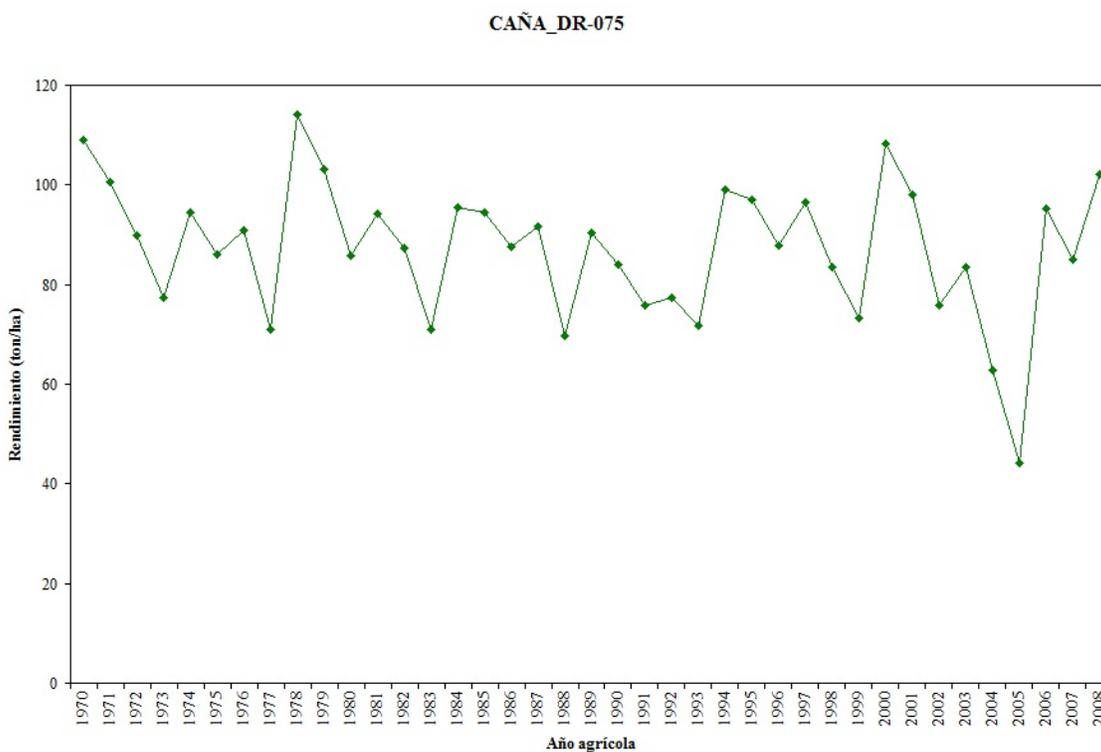


Figura A.1.126. Rendimiento promedio del cultivo de caña en el DR-075 para el ciclo Perenne.

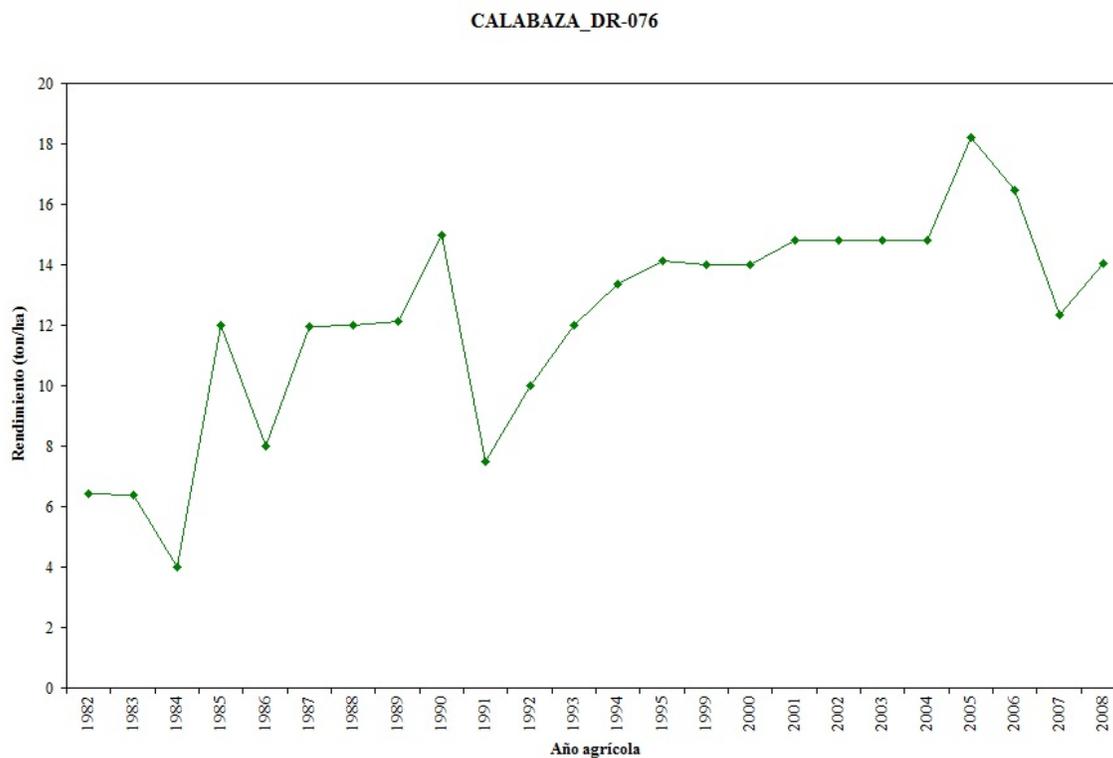


Figura A.1.127. Rendimiento promedio del cultivo de calabaza en el DR-076 para el ciclo OI.

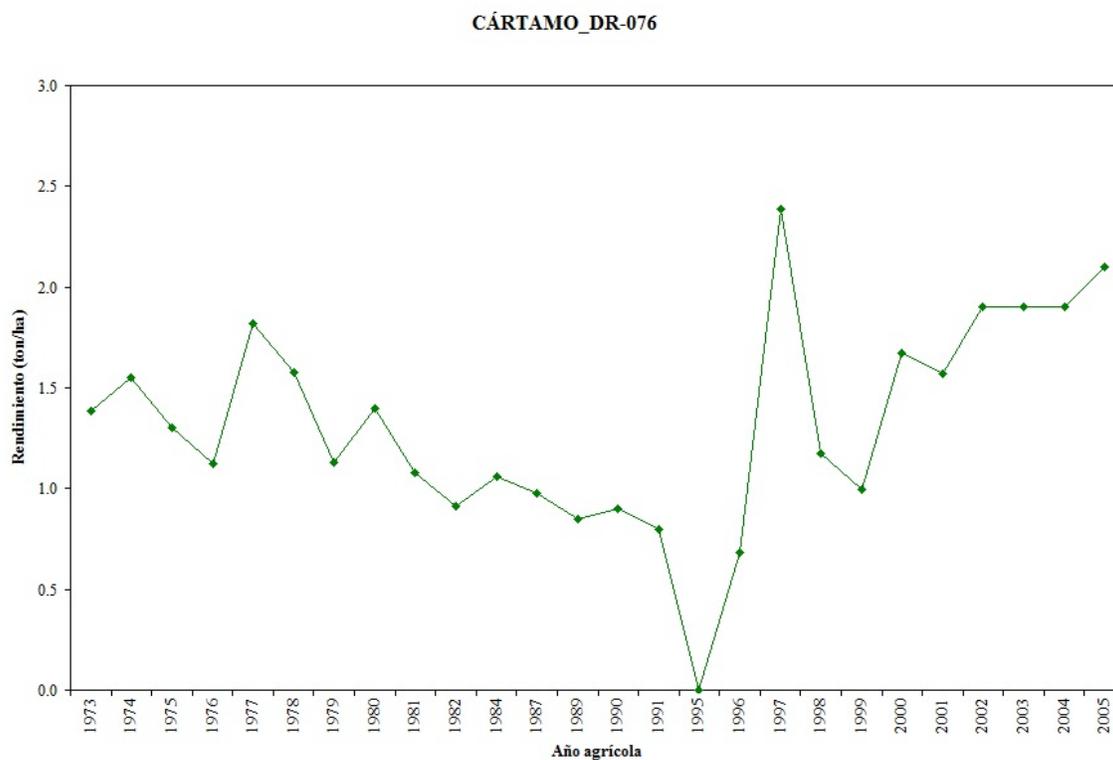


Figura A.1.128. Rendimiento promedio del cultivo de cártamo en el DR-076 para el ciclo OI.

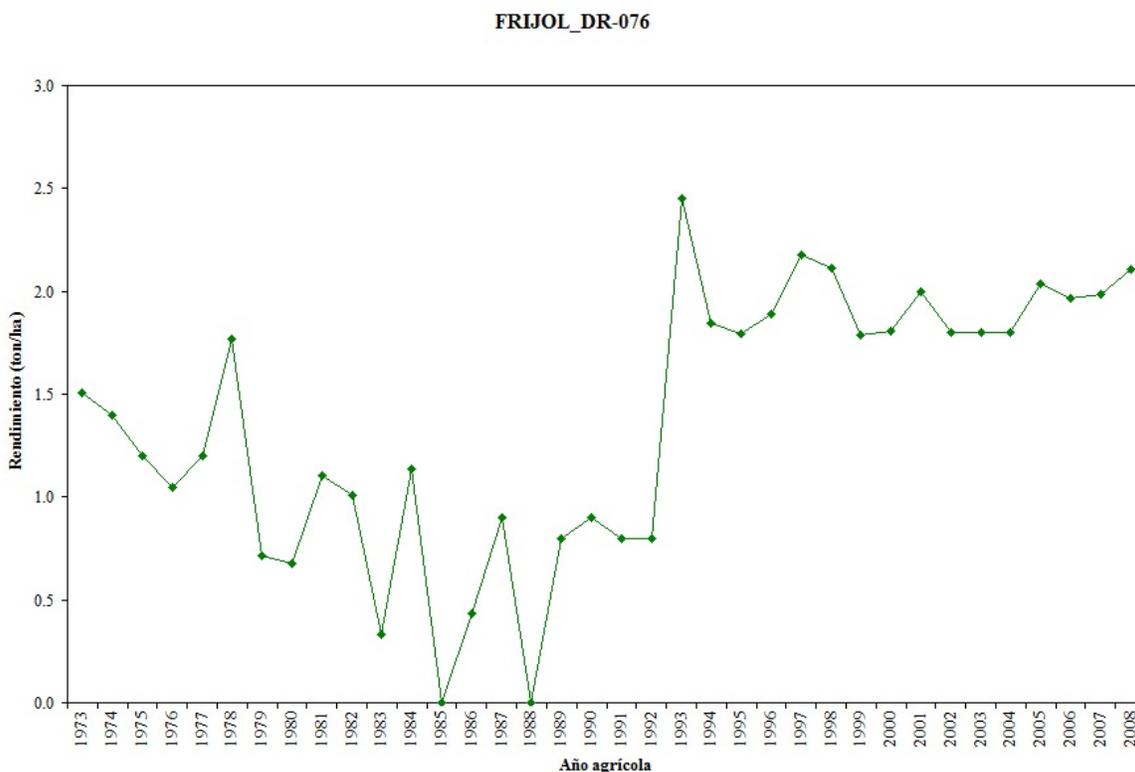


Figura A.1.129. Rendimiento promedio del cultivo de frijol en el DR-076 para el ciclo OI.

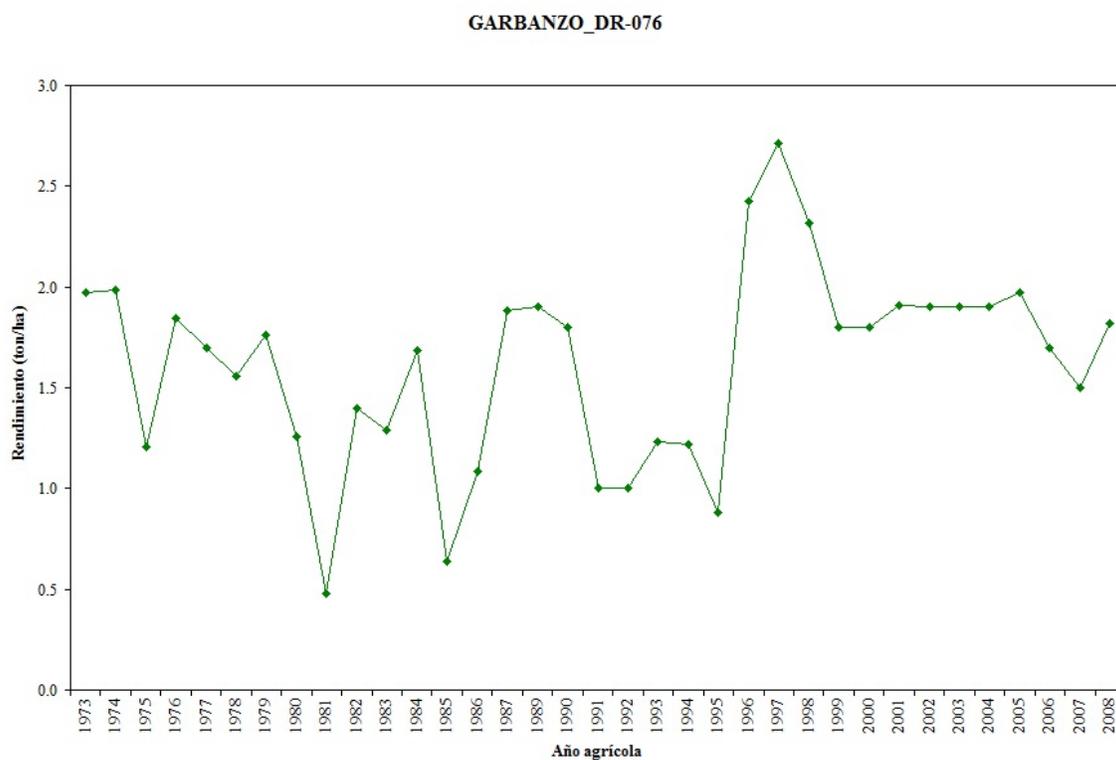


Figura A.1.130. Rendimiento promedio del cultivo de garbanzo en el DR-076 para el ciclo OI.

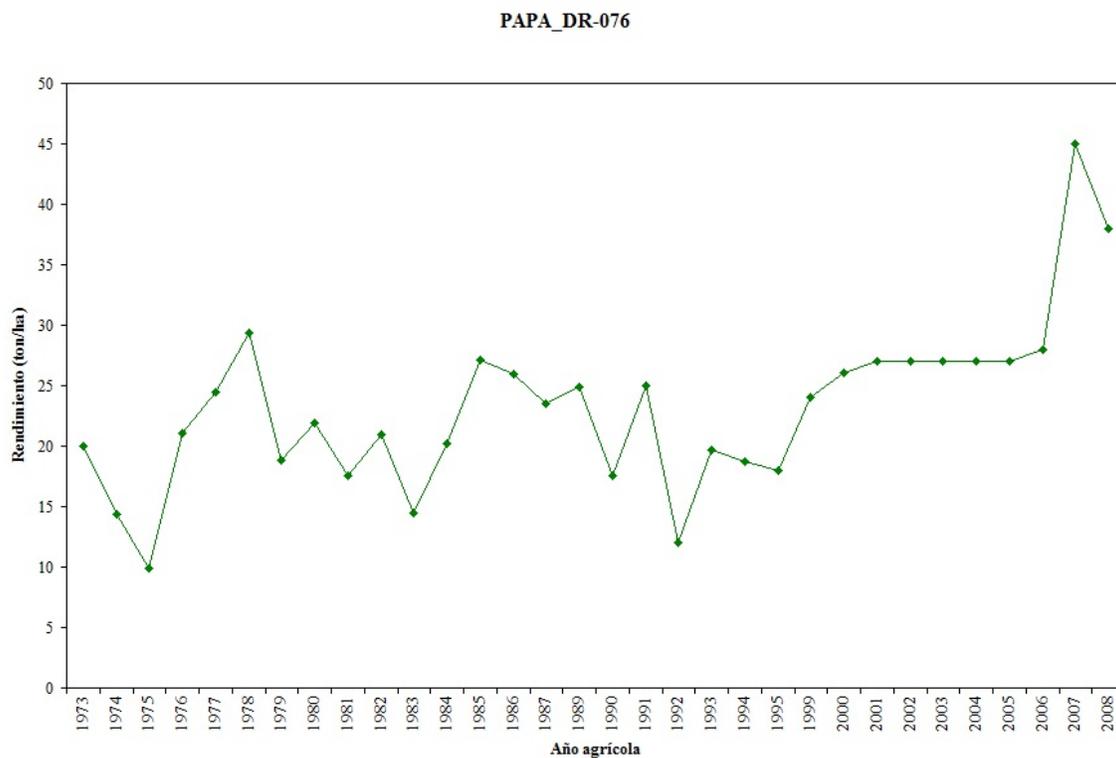


Figura A.1.131. Rendimiento promedio del cultivo de papa en el DR-076 para el ciclo OI.

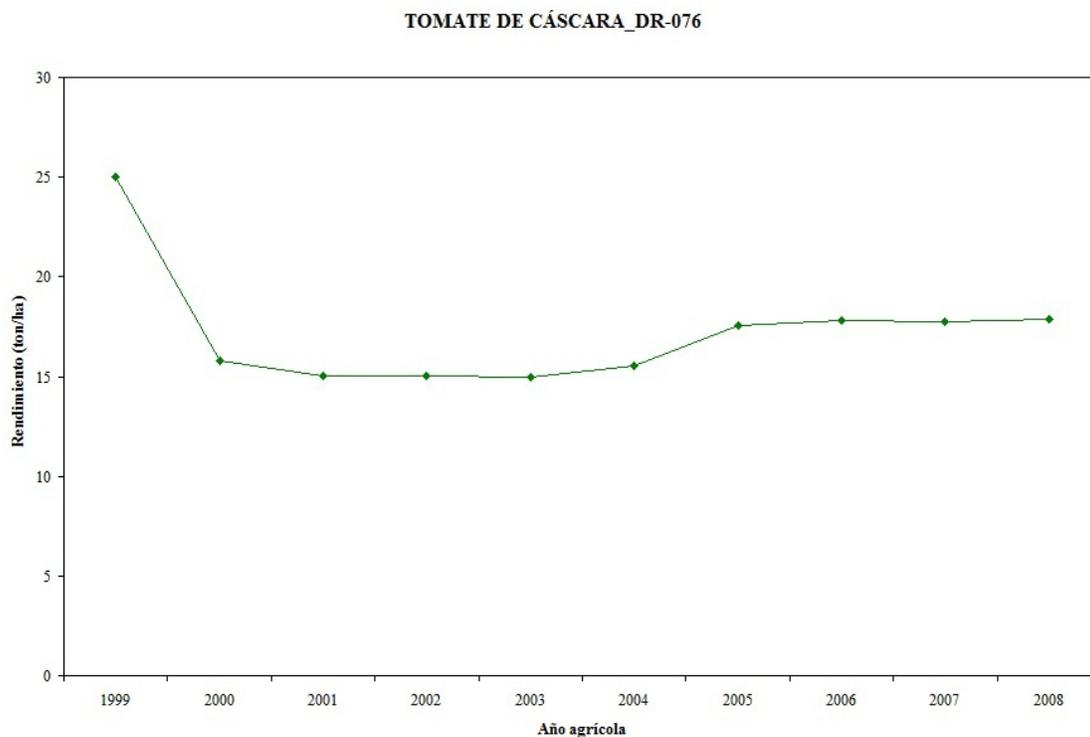


Figura A.1.132. Rendimiento promedio del cultivo de tomate de cáscara en el DR-076 para el ciclo OI.

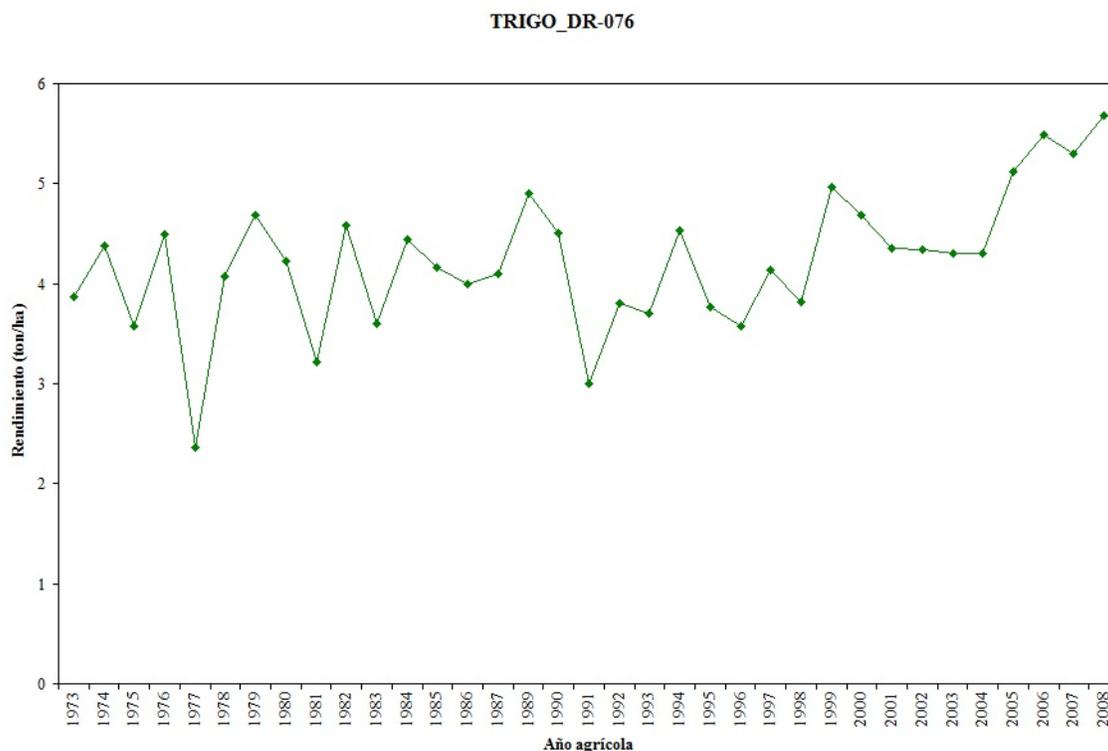


Figura A.1.133. Rendimiento promedio del cultivo de trigo en el DR-076 para el ciclo OI.

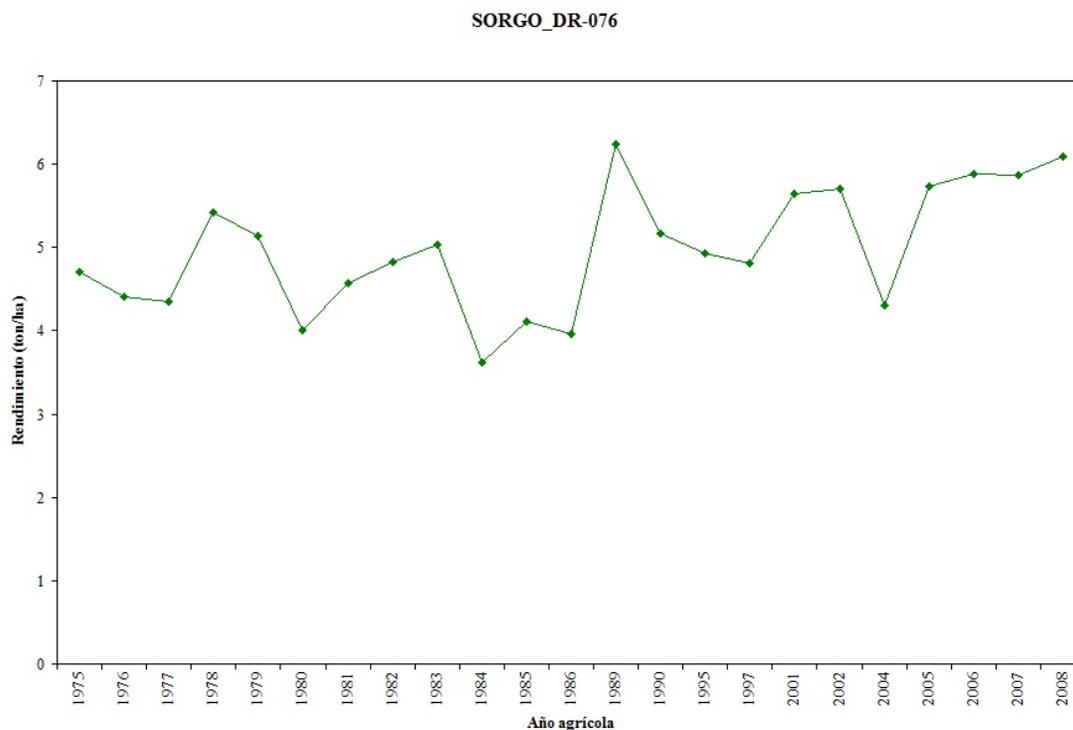


Figura A.1.134. Rendimiento promedio del cultivo de sorgo en el DR-076 para el ciclo PV.

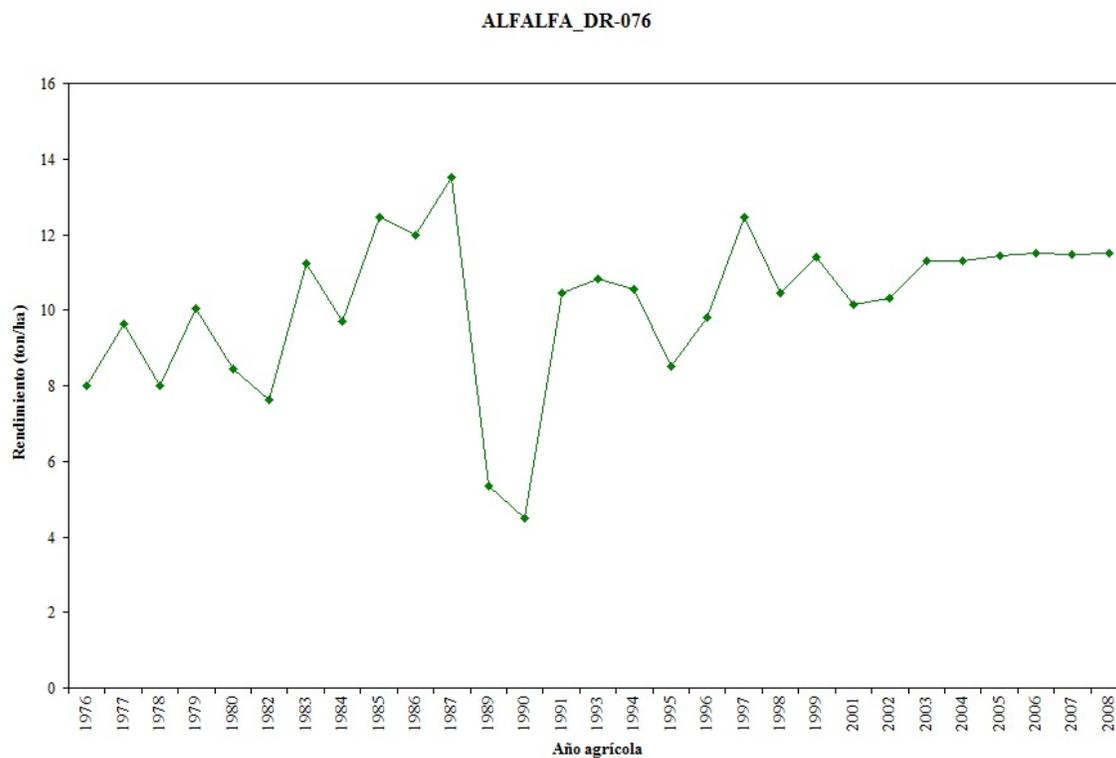


Figura A.1.135. Rendimiento promedio del cultivo de alfalfa en el DR-076 para el ciclo Perenne.

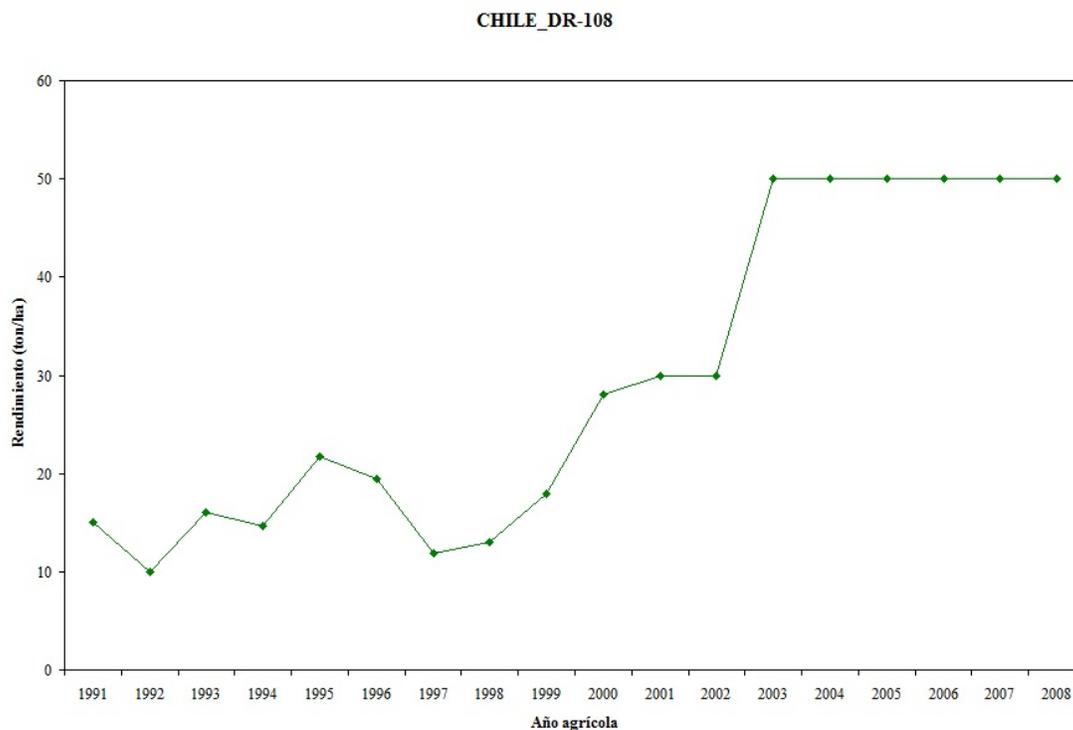


Figura A.1.136. Rendimiento promedio del cultivo de chile en el DR-108 para el ciclo OI.

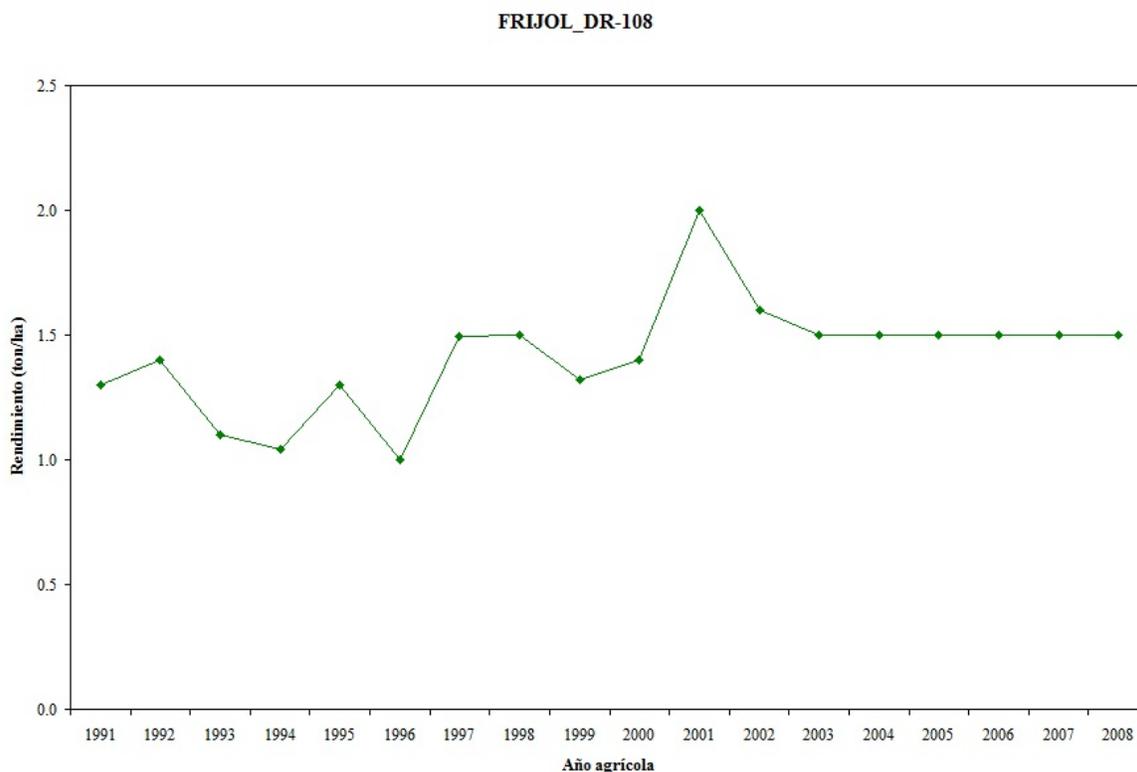


Figura A.1.137. Rendimiento promedio del cultivo de frijol en el DR-108 para el ciclo OI.

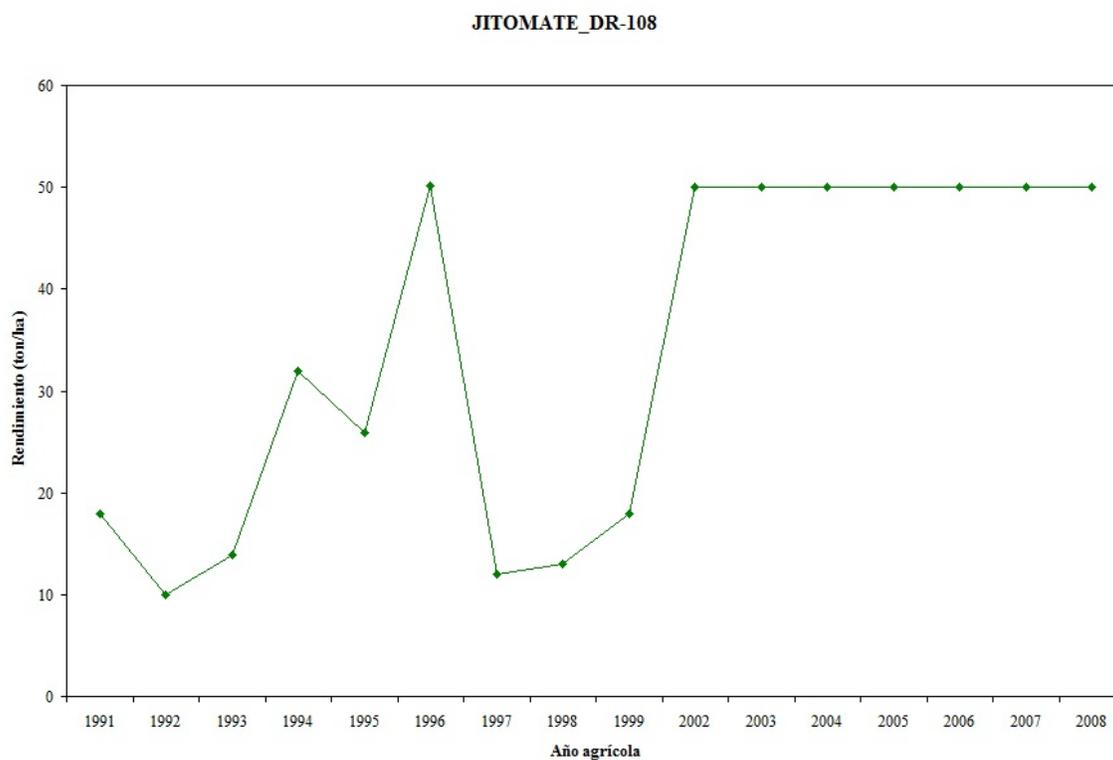


Figura A.1.138. Rendimiento promedio del cultivo de jitomate en el DR-108 para el ciclo OI.

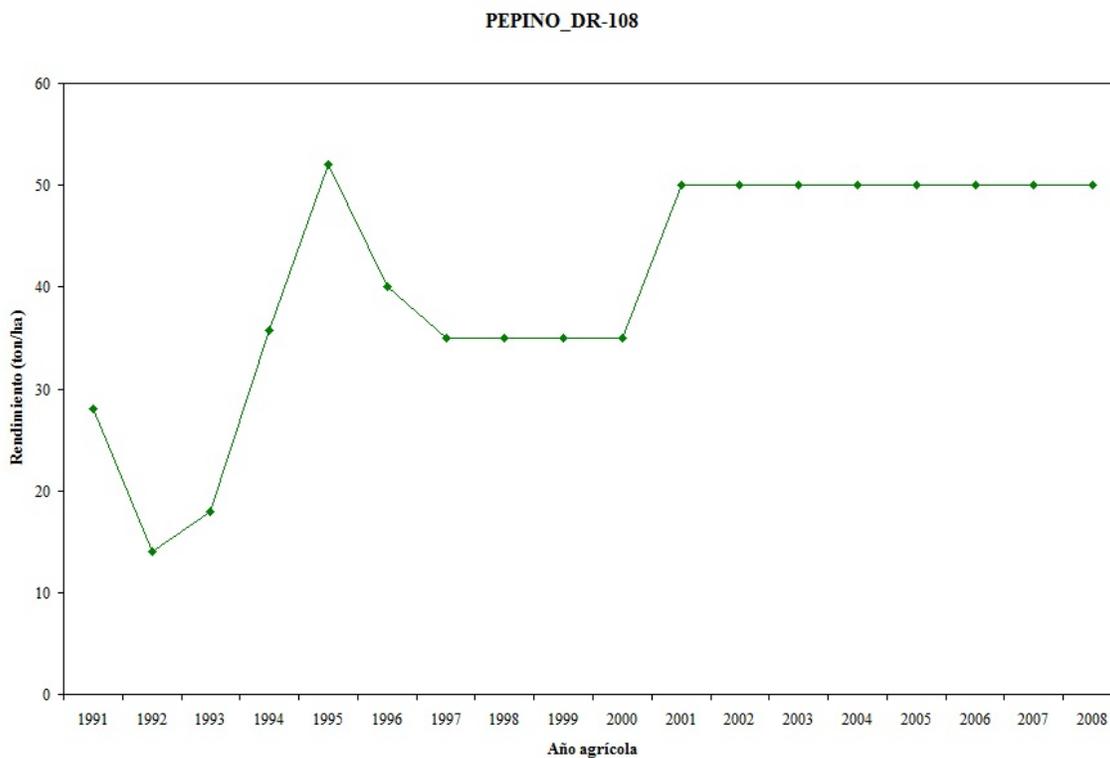


Figura A.1.139. Rendimiento promedio del cultivo de pepino en el DR-108 para el ciclo OI.

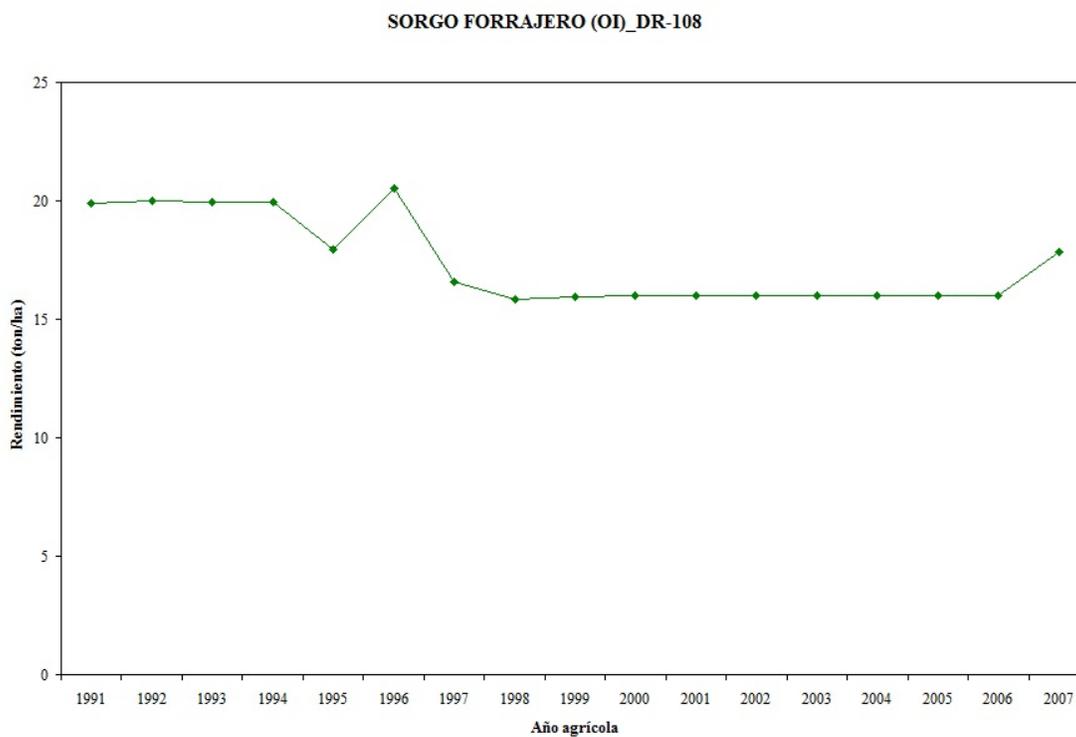


Figura A.1.140. Rendimiento promedio del cultivo de sorgo forrajero en el DR-108 para el ciclo OI.

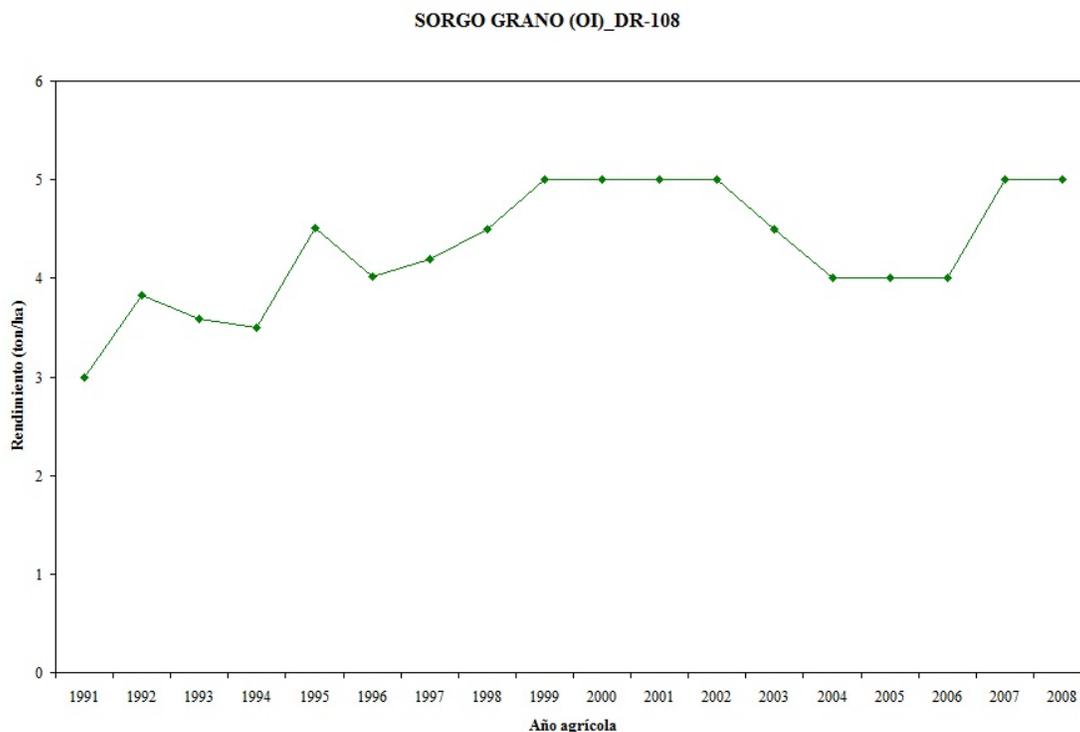


Figura A.1.141. Rendimiento promedio del cultivo de sorgo para grano en el DR-108 para el ciclo OI.

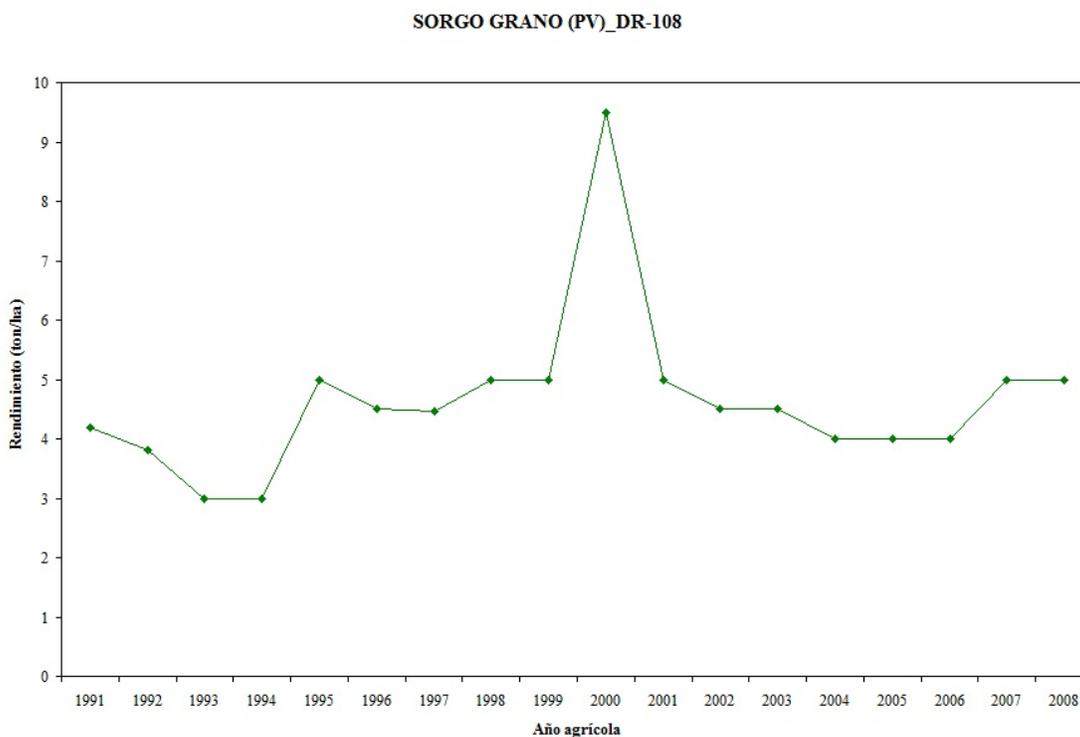


Figura A.1.142. Rendimiento promedio del cultivo de sorgo para grano en el DR-108 para el ciclo PV.

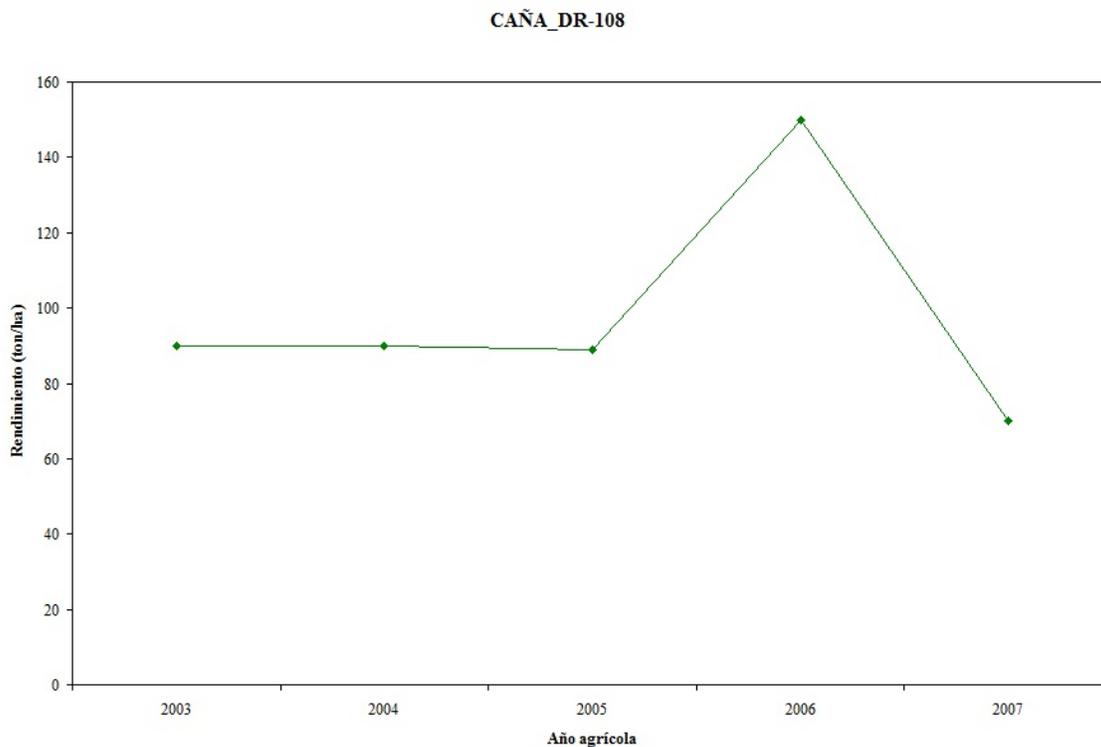


Figura A.1.143. Rendimiento promedio del cultivo de caña en el DR-108 para el ciclo Perenne.

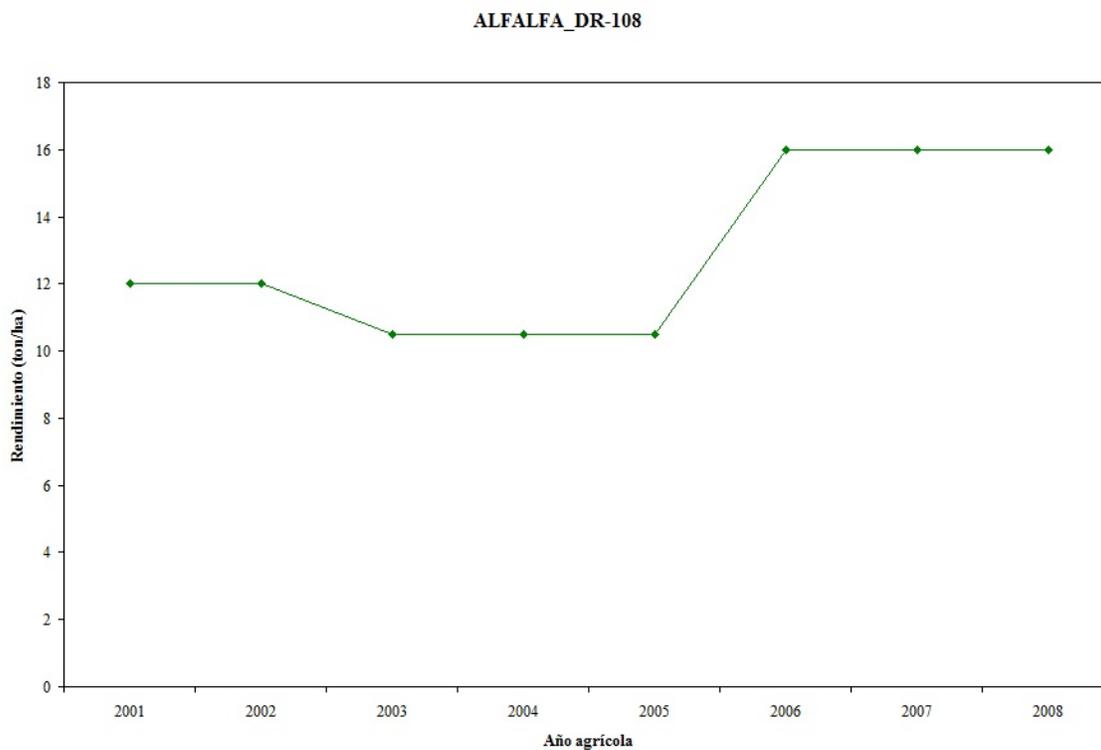


Figura A.1.144. Rendimiento promedio del cultivo de alfalfa en el DR-108 para el ciclo Perenne.

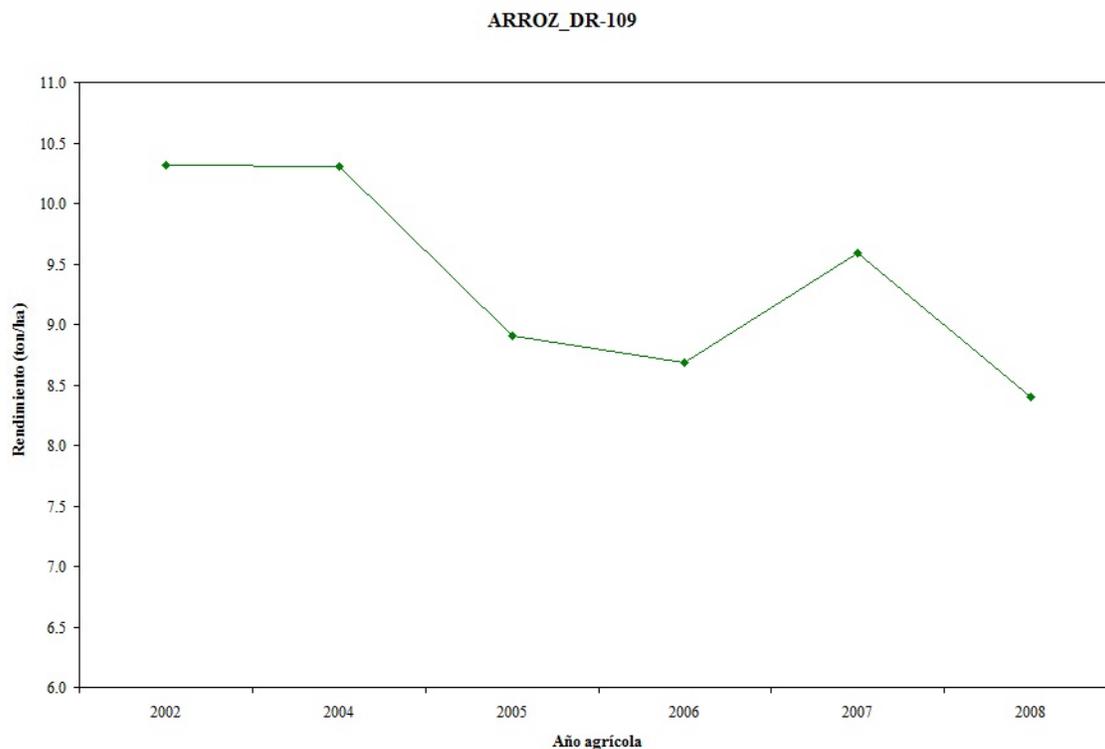


Figura A.1.145. Rendimiento promedio del cultivo de arroz en el DR-109 para el ciclo OI.

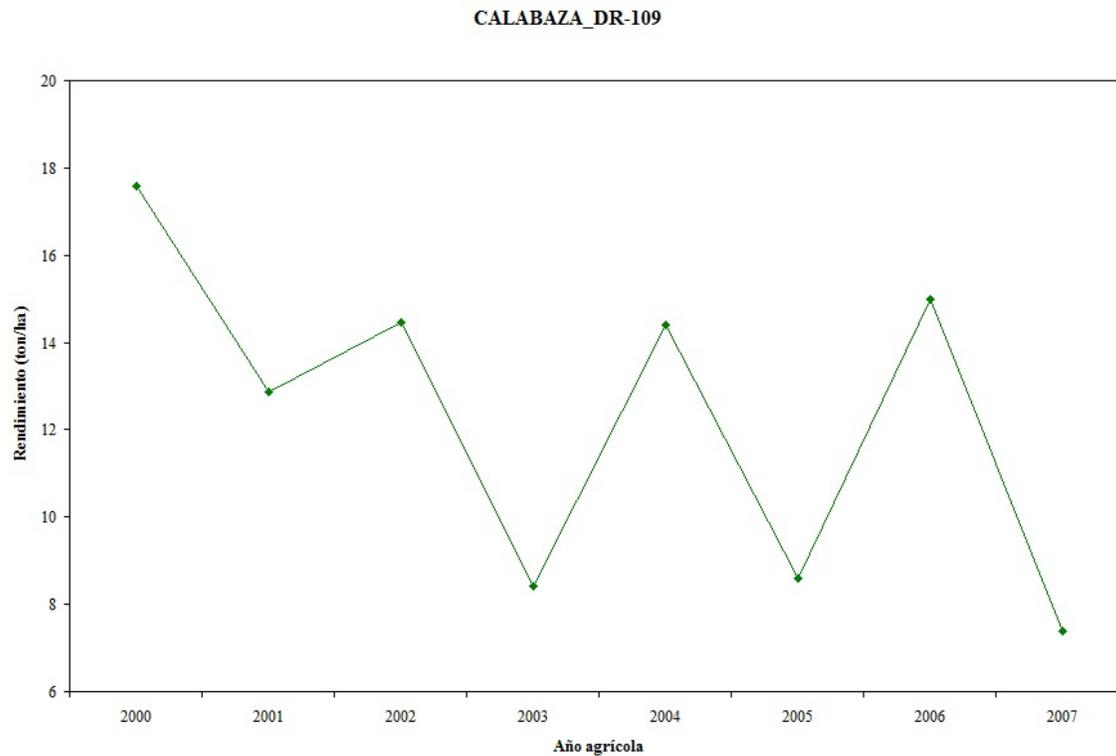


Figura A.1.146. Rendimiento promedio del cultivo de calabaza en el DR-109 para el ciclo OI.

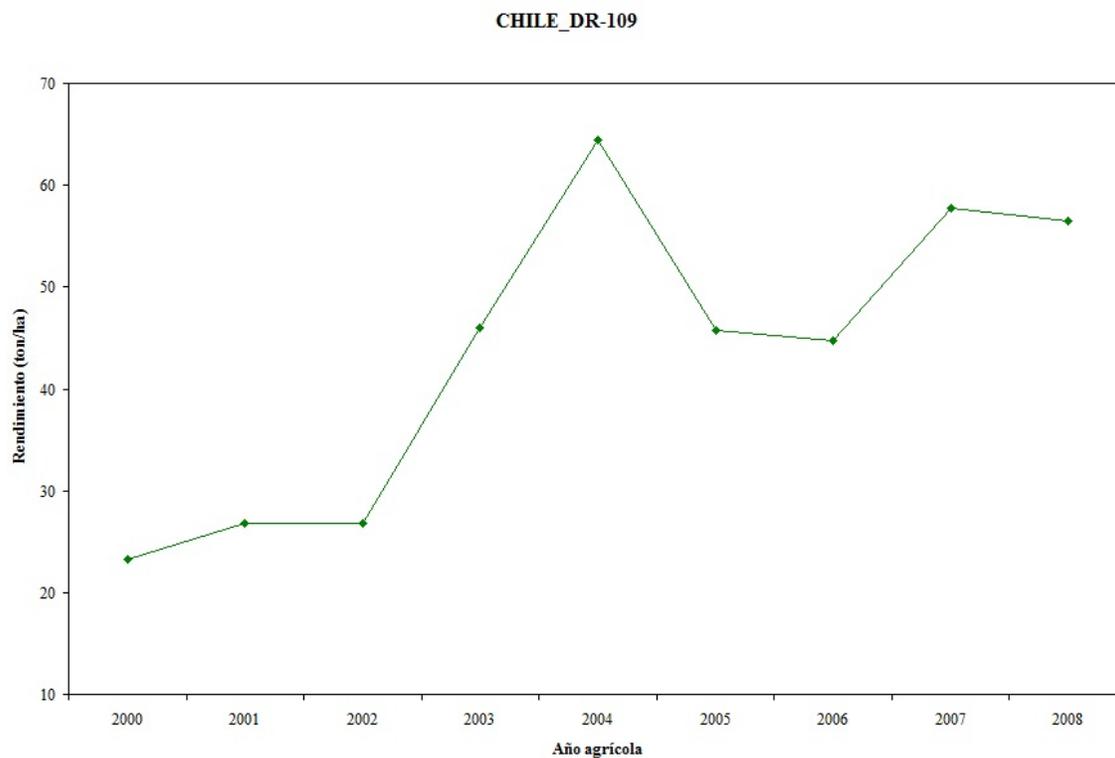


Figura A.1.147. Rendimiento promedio del cultivo de chile en el DR-109 para el ciclo OI.

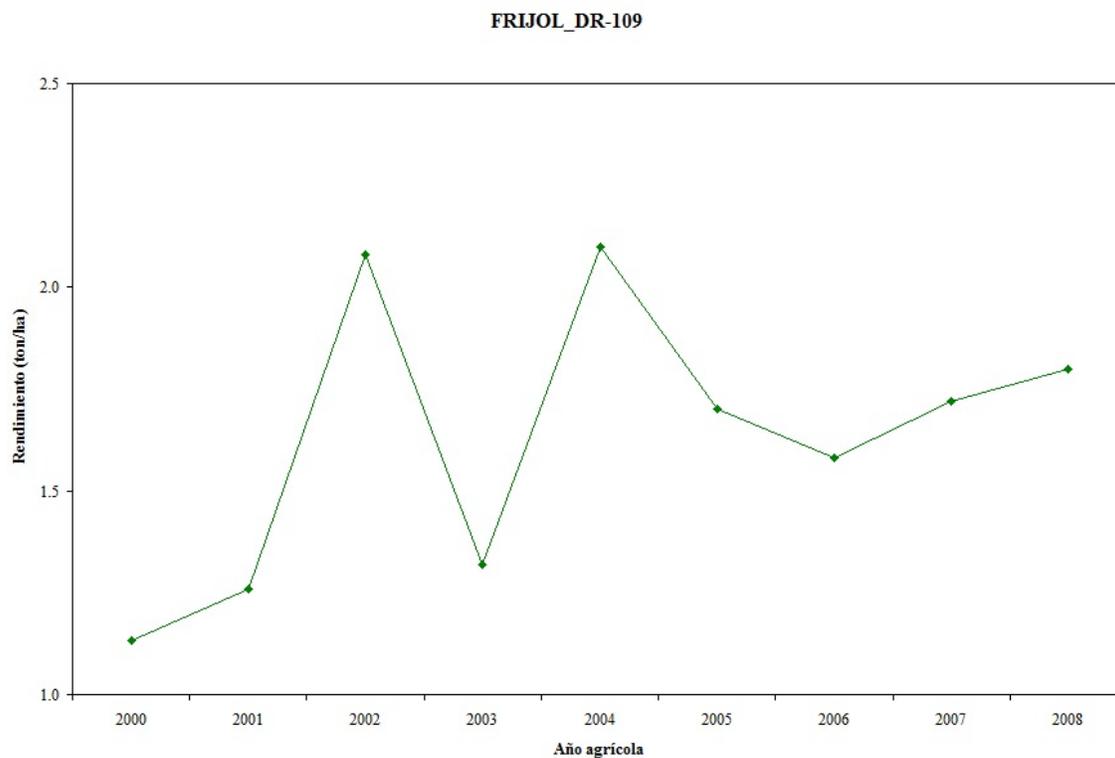


Figura A.1.148. Rendimiento promedio del cultivo de frijol en el DR-109 para el ciclo OI.

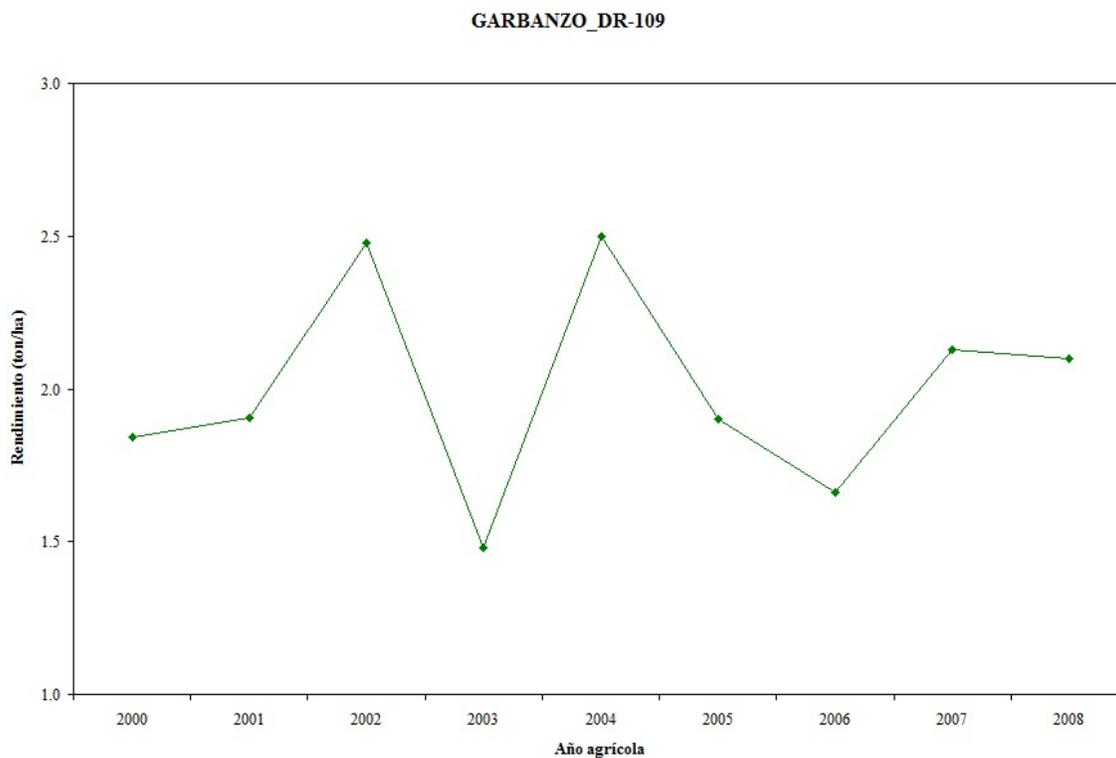


Figura A.1.149. Rendimiento promedio del cultivo de garbanzo en el DR-109 para el ciclo OI.

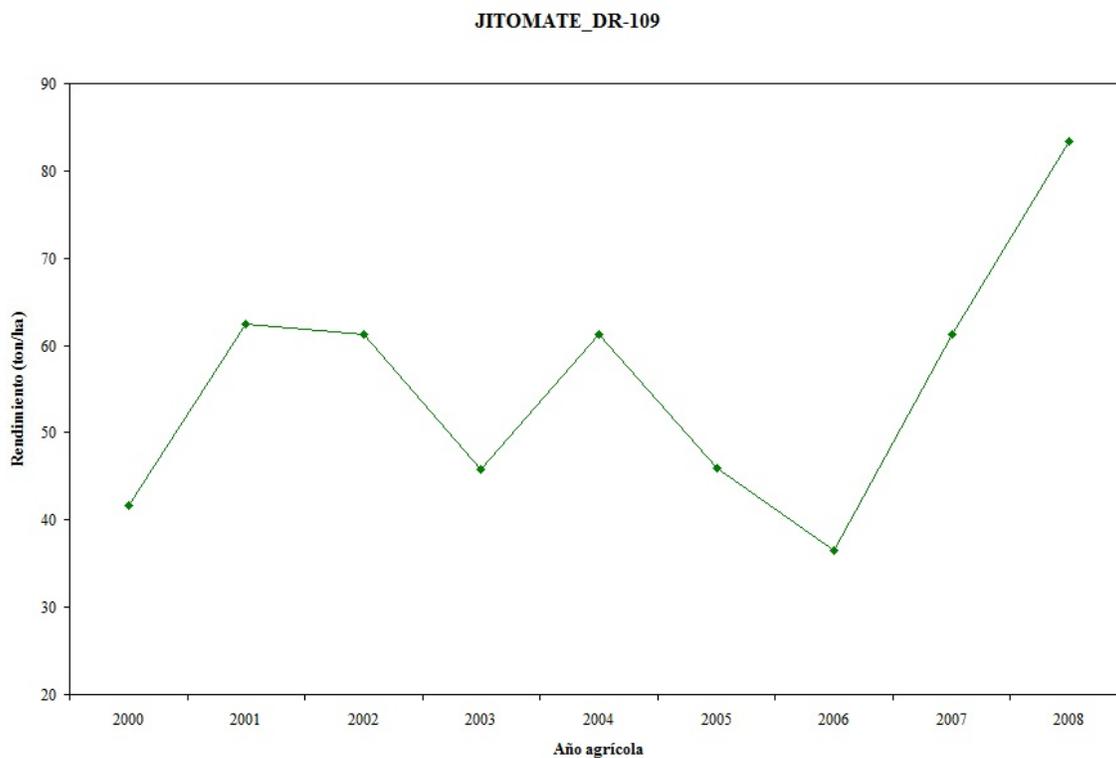


Figura A.1.150. Rendimiento promedio del cultivo de jitomate en el DR-109 para el ciclo OI.

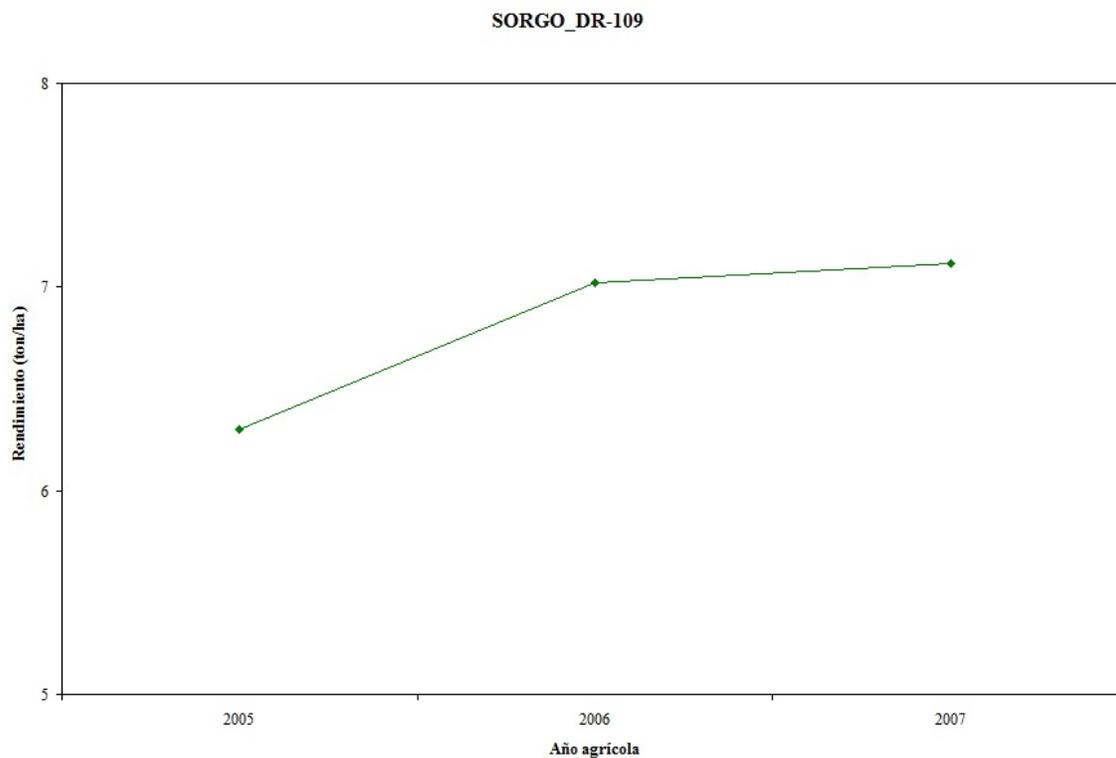


Figura A.1.151. Rendimiento promedio del cultivo de sorgo en el DR-109 para el ciclo PV.

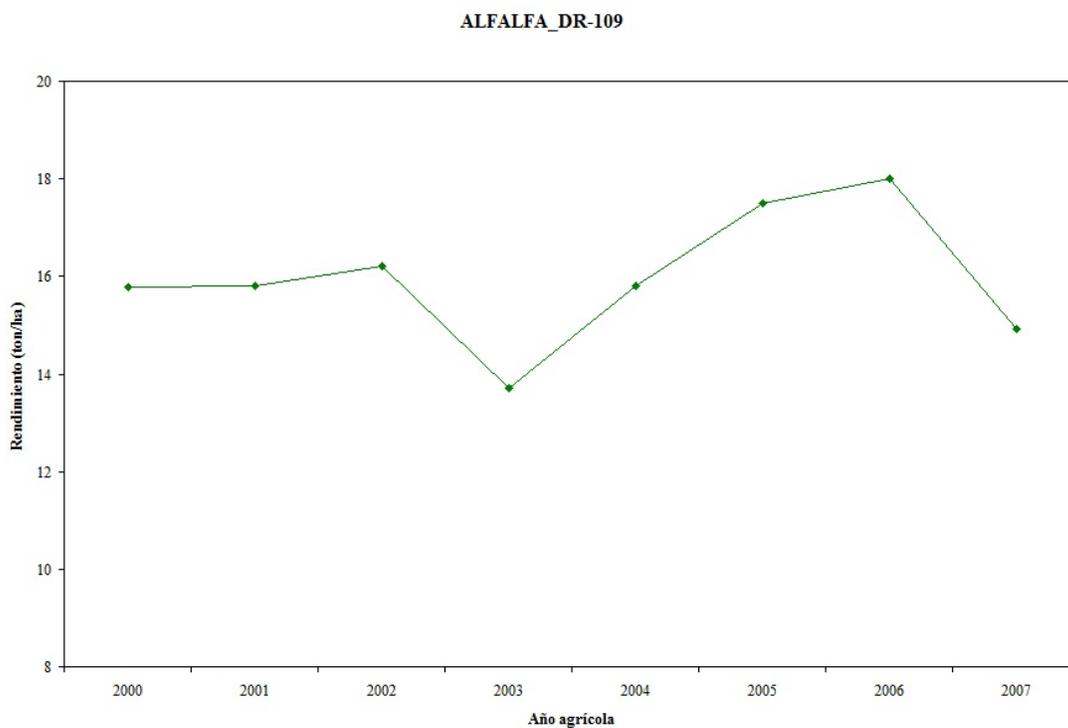


Figura A.1.152. Rendimiento promedio del cultivo de alfalfa en el DR-109 para el ciclo Perenne.

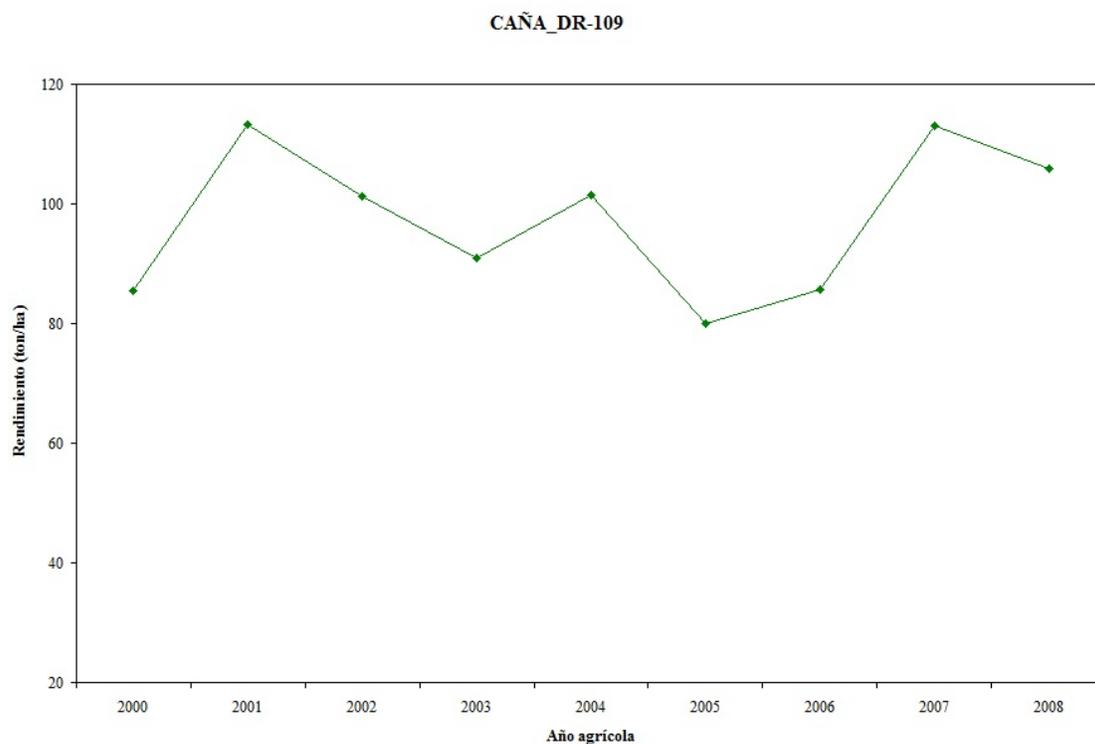


Figura A.1.153. Rendimiento promedio del cultivo de caña en el DR-109 para el ciclo Perenne.

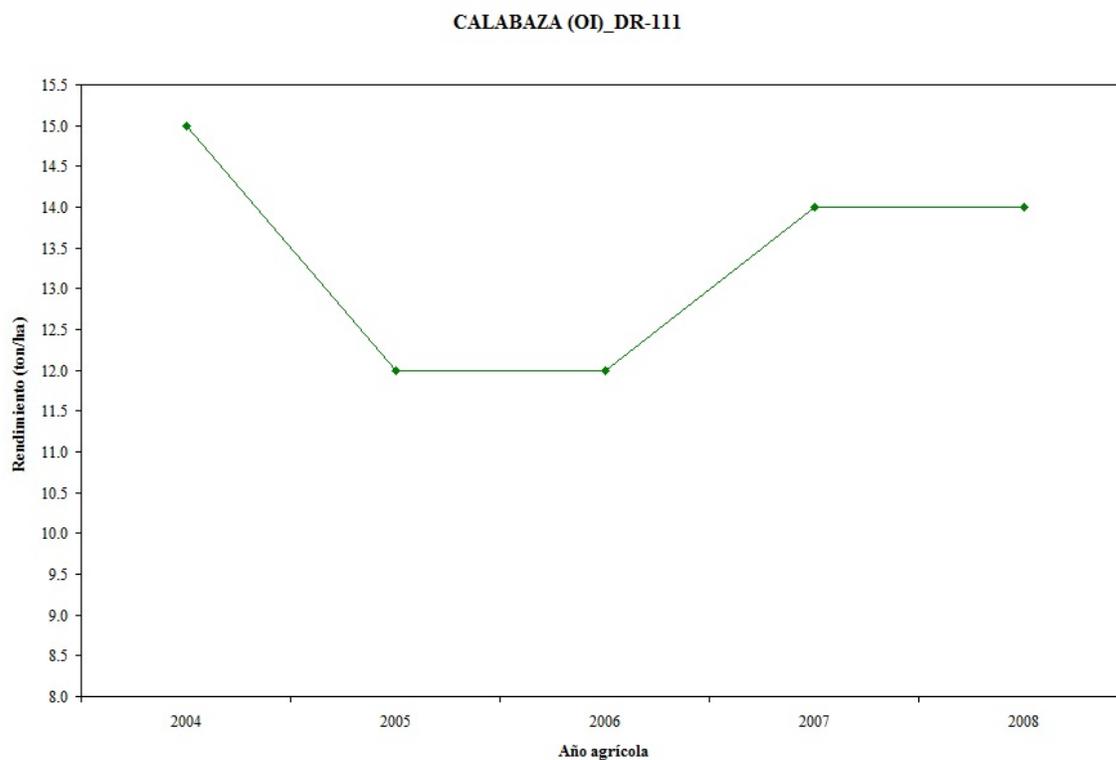


Figura A.1.154. Rendimiento promedio del cultivo de calabaza en el DR-111 para el ciclo OI.

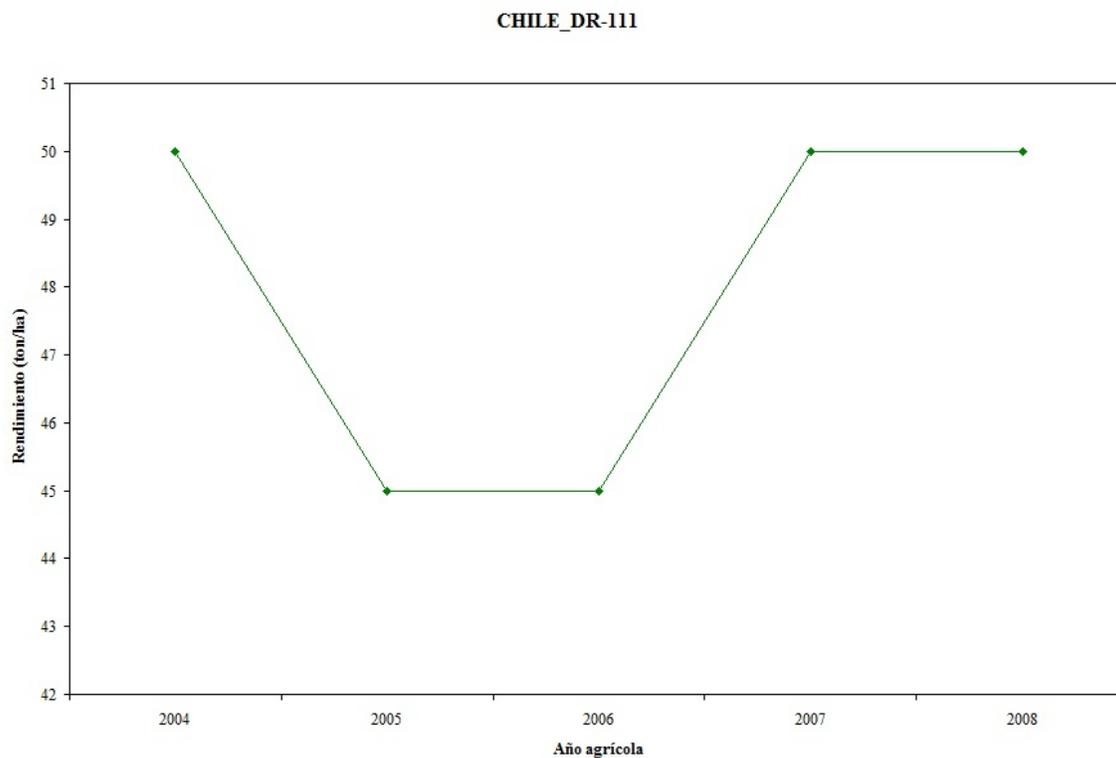


Figura A.1.155. Rendimiento promedio del cultivo de chile en el DR-111 para el ciclo OI.

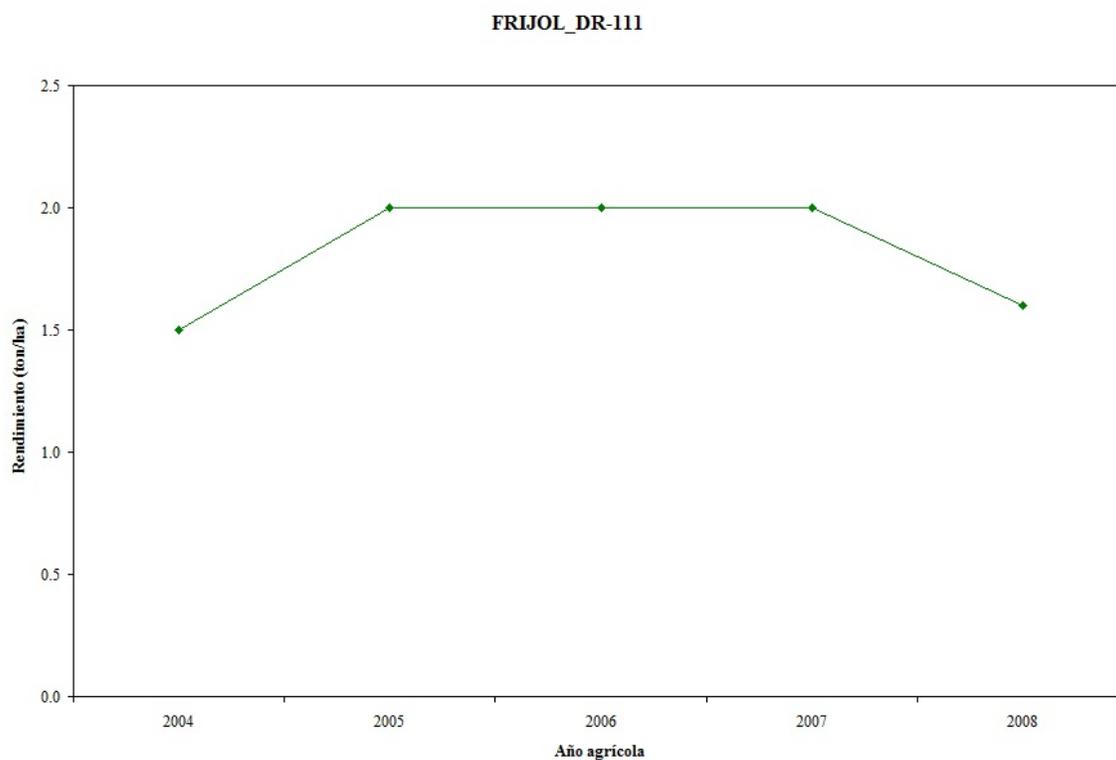


Figura A.1.156. Rendimiento promedio del cultivo de frijol en el DR-111 para el ciclo OI.

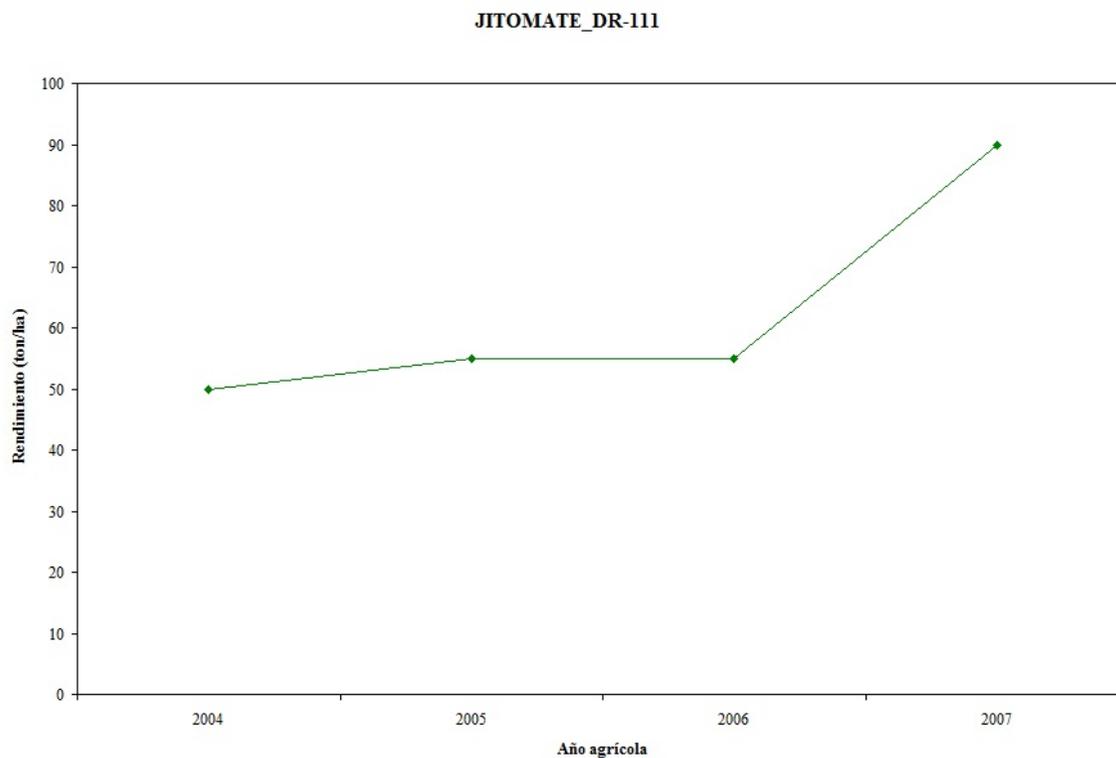


Figura A.1.157. Rendimiento promedio del cultivo de jitomate en el DR-111 para el ciclo OI.

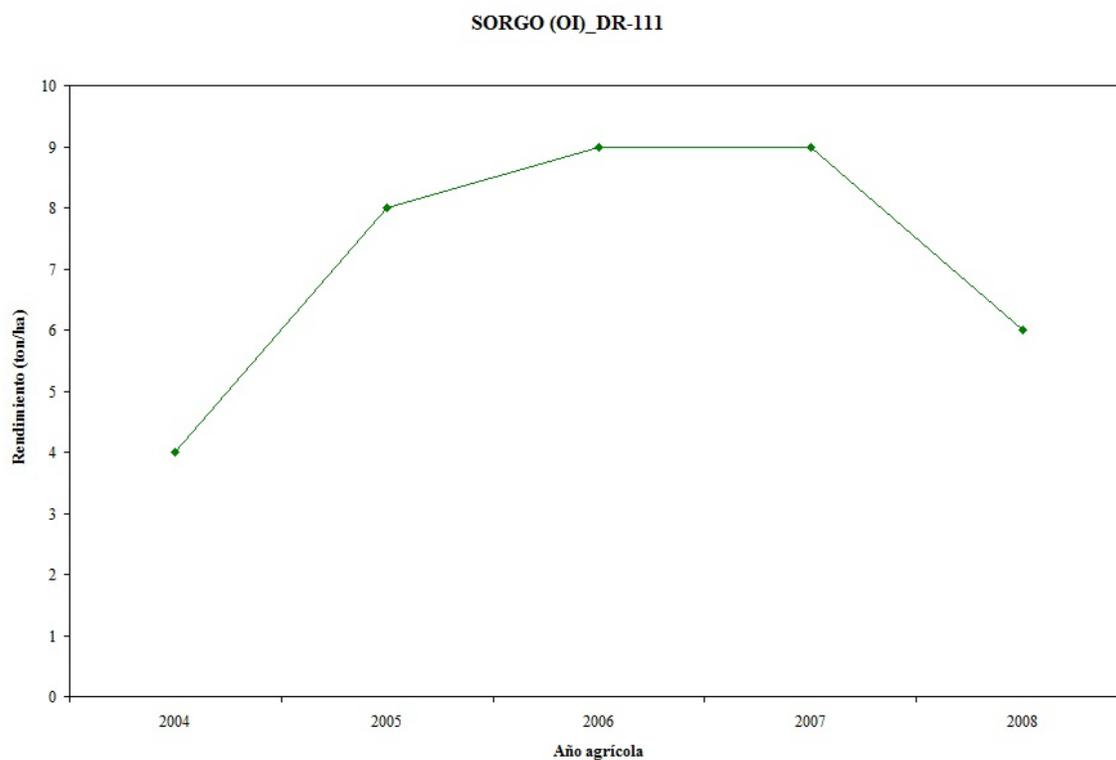


Figura A.1.158. Rendimiento promedio del cultivo de sorgo en el DR-111 para el ciclo OI.

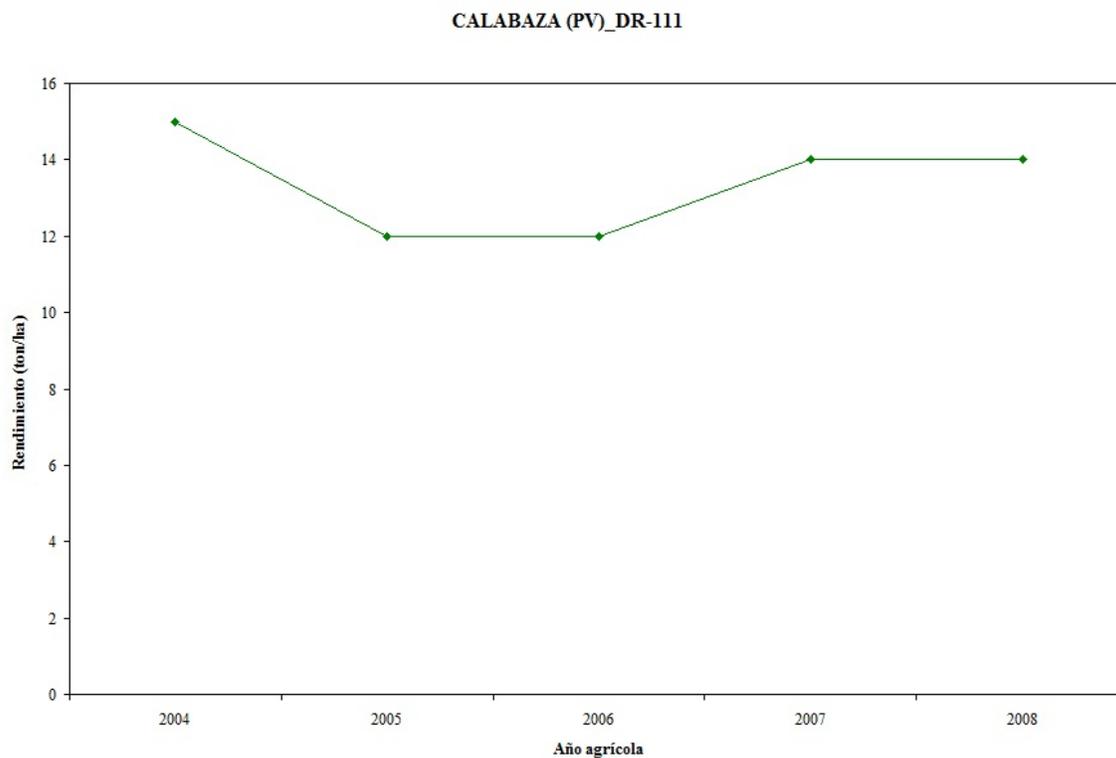


Figura A.1.159. Rendimiento promedio del cultivo de calabaza en el DR-111 para el ciclo PV.

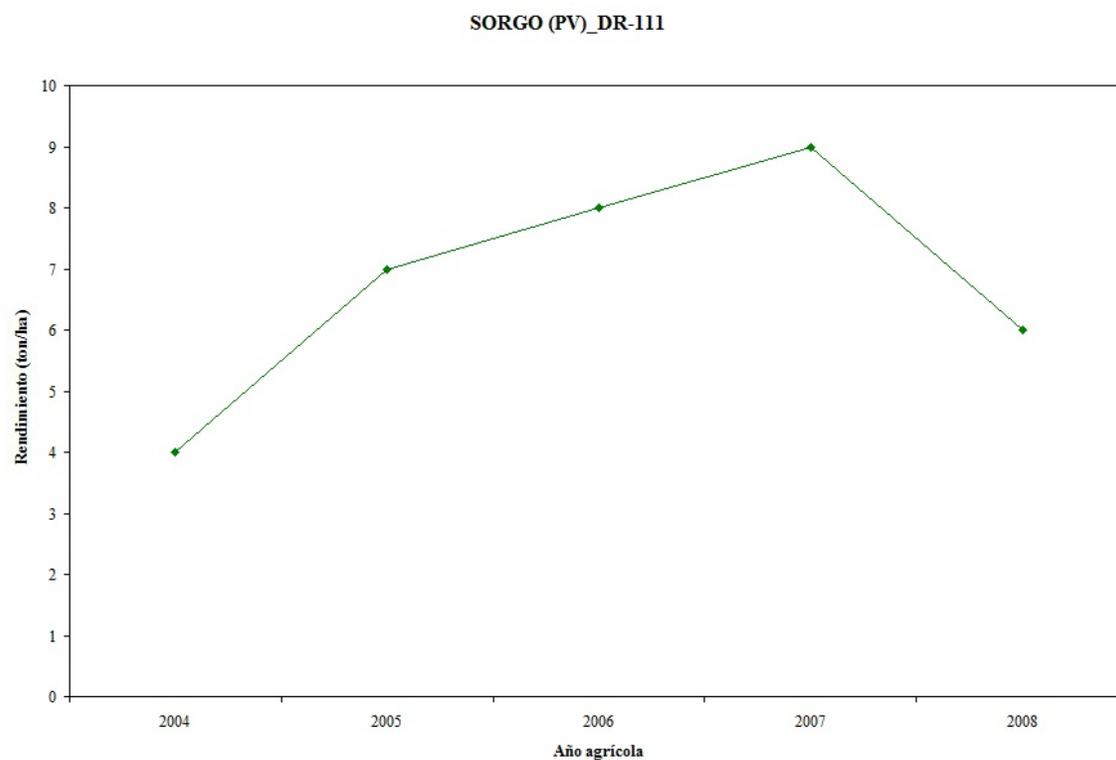


Figura A.1.160. Rendimiento promedio del cultivo de sorgo en el DR-111 para el ciclo PV.

A.1.3. Siniestralidad de los principales cultivos en los distritos de riego de Sinaloa

A continuación se presenta la siniestralidad por cultivo y distrito de riego para cada ciclo agrícola, donde se puede observar que los principales distritos (considerado así por la superficie establecida) y cultivos siniestrados son los ubicados en el norte del estado debido a la temporada de heladas y huracanes en el ciclo OI (**Cuadro A.1.1**). Además, hay algunos cultivos siniestrados en el ciclo PV por las altas olas de calor en diferentes años agrícolas (**Cuadro A.1.2**). También, es importante señalar que para los cultivos perennes no se considera la siniestralidad debido a que el período en que se levanta el reporte estadístico no coincide con algunos cultivos en sus períodos de cosechas.

Cuadro A.1.1. Siniestralidad registrada en los cultivos establecidos durante el ciclo OI.

DR	Porcentaje de siniestros en el ciclo OI													
	Algodón	Arroz	Calabaza	Cártamo	Cebolla	Chile	Frijol	Garbanzo	Jitomate	Papa	Pepino	Sandía	Tomate de cáscara	Trigo
010	*	*	*	*	*	*	*	4%	1%	*	2%	*	*	1%
063	*	*	*	*	5%	5%	5%	1%	1%	2%	4%	25%	10%	1%
074	*	*	10%	1%	7%	9%	12%	2%	3%	*	*	10%	*	1%
075	5%	*	7%	9%	4%	6%	5%	3%	5%	2%	8%	8%	*	2%
076	*	*	16%	9%	*	*	19%	6%	*	2%	*	*	0%	1%
108	*	*	*	*	*	0%	5%	*	0%	*	0%	*	*	*
109	*	0%	0%	*	*	0%	0%	0%	0%	*	*	*	*	*
111	*	*	0%	*	*	0%	0%	*	0%	*	*	*	*	*

*: Cultivo no establecido.

Cuadro A.1.2. Siniestralidad registrada en los cultivos establecidos durante el ciclo PV.

DR	Porcentaje de siniestros en el ciclo PV		
	Arroz	Calabaza	Sorgo
010	4%	*	2%
063	*	*	8%
074	*	*	*
075	*	*	3%
076	*	*	4%
108	*	*	1%
109	*	*	0%
111	*	0%	2%

*: Cultivo no establecido.

APÉNDICE II

En el presente apéndice, se muestra la información obtenida respecto a la base de datos con la malla a una resolución de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (latitud y longitud) con sus anomalías (**Figura A.2.1** a la **Figura A.2.4**) y desviaciones estándar calculadas para los períodos futuros de 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2098 en los escenarios A1B y A2. Además, se presentan las desviaciones estándar para el período base de 1950-2000. En el **CAPÍTULO II** se mostraron los aumentos y reducción de las temperaturas y precipitación, respectivamente para el estado de Sinaloa.

A.2.1. Anomalías de cambio climático para las variables de precipitación y temperaturas en el estado de Sinaloa

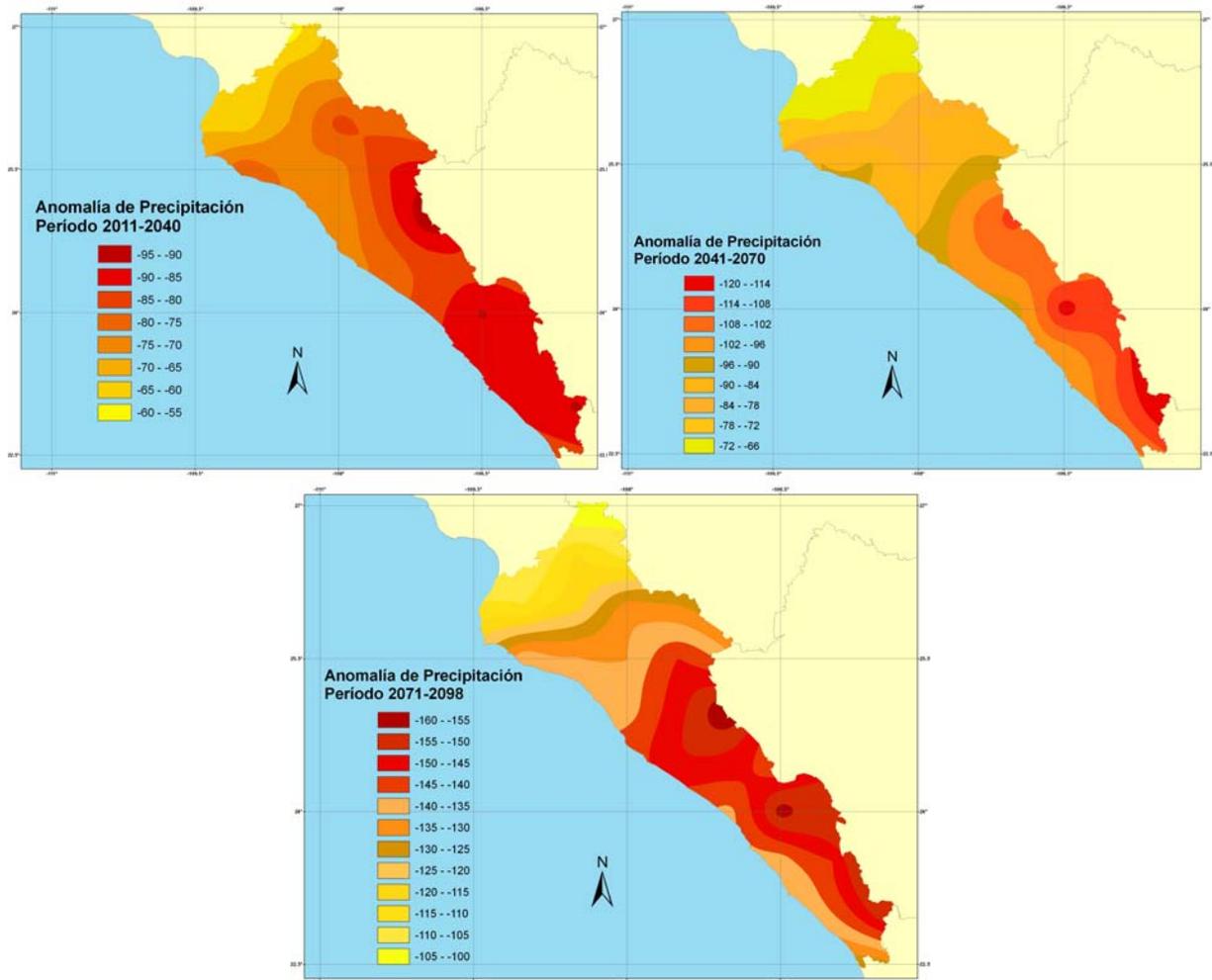


Figura A.2.1. Anomalia de precipitación anual promedio para los períodos de 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2098.

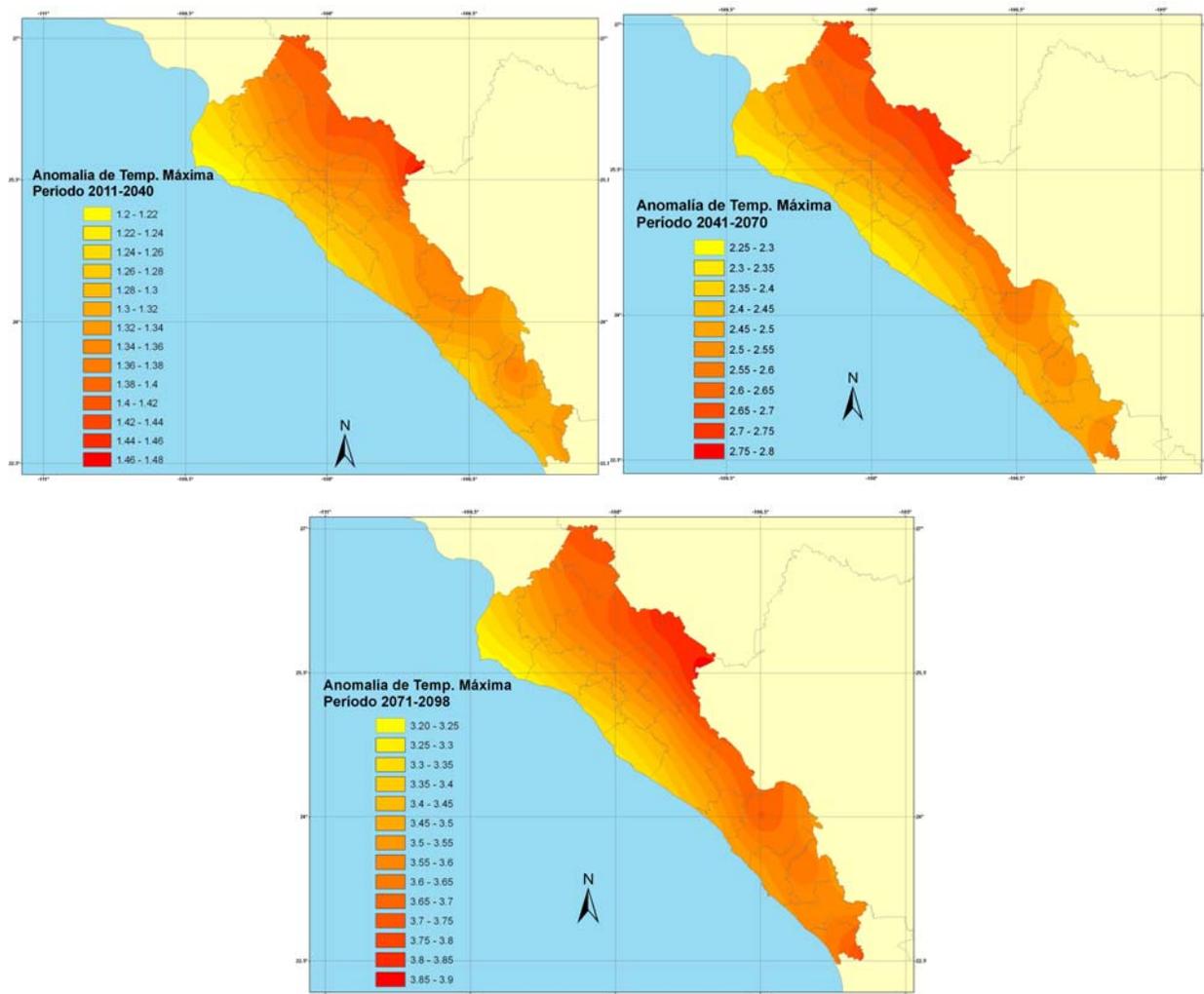


Figura A.2.2. Anomalia de temperatura máxima anual promedio para los períodos de 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2098.

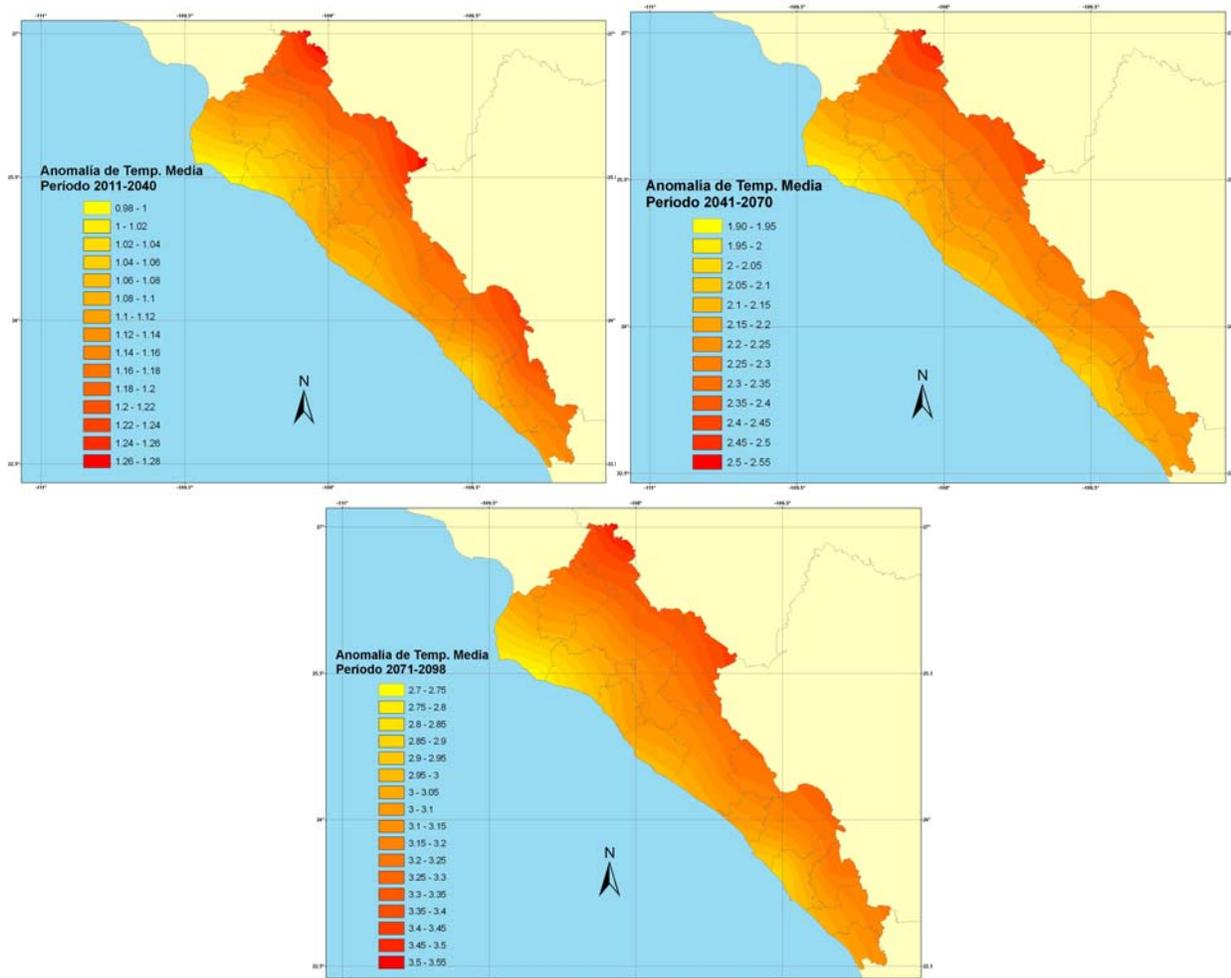


Figura A.2.3. Anomalia de temperatura media anual promedio para los períodos de 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2098.

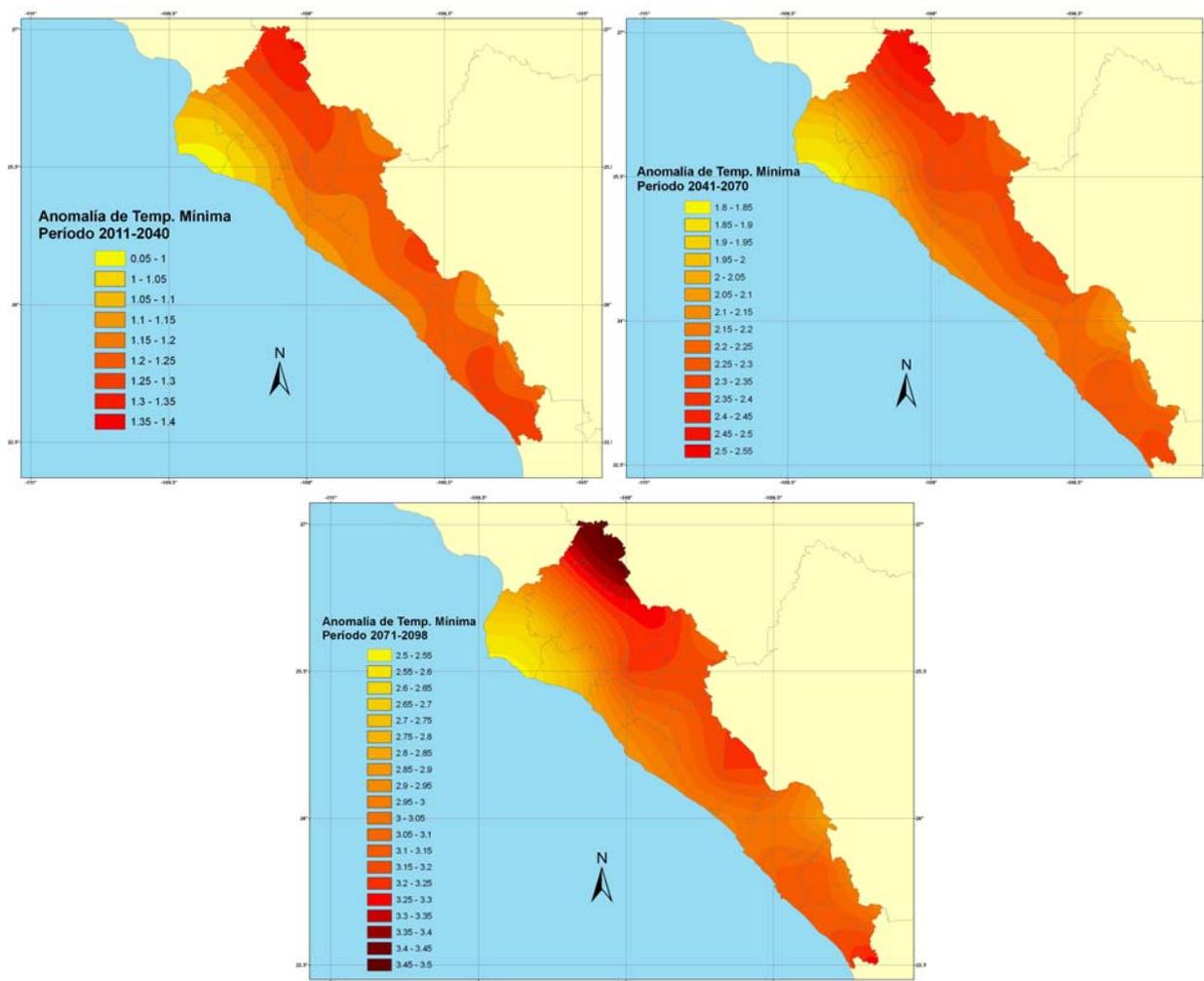


Figura A.2.4. Anomalia de temperatura mínima anual promedio para los períodos de 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2098.

Las anomalías presentadas en este apartado se refieren al rango de variación que tendrán las variables de precipitación y temperatura para el presente siglo. Dichas variaciones son una reducción de la precipitación y aumento de la temperatura en el estado de Sinaloa para los períodos futuros y escenarios climáticos en que se trabajó.

A.2.2. Precipitación acumulada promedio a nivel mensual del período base

A continuación se presenta la precipitación acumulada promedio a nivel mensual (**Figura A.2.5**) del período base (1950-2000) para los meses más lluviosos del año.

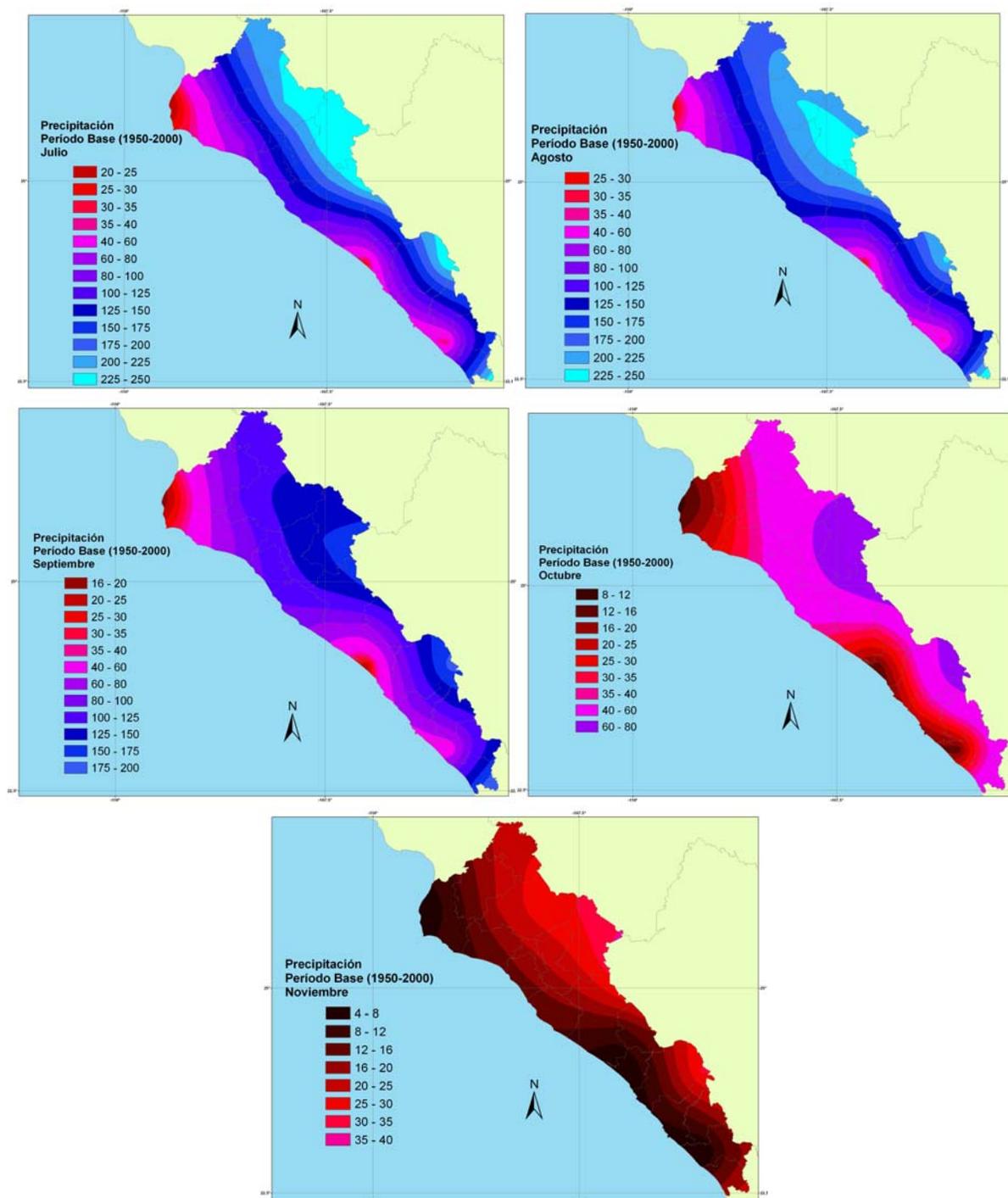


Figura A.2.5. Precipitación promedio acumulada de julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre del período base.

A continuación se presentan las desviaciones estándar (**Figura A.2.6**) de la precipitación acumulada promedio a nivel mensual del período base (1950-2000), esto se realizó con fines de corroborar la media para los meses más lluviosos del año en el estado de Sinaloa.

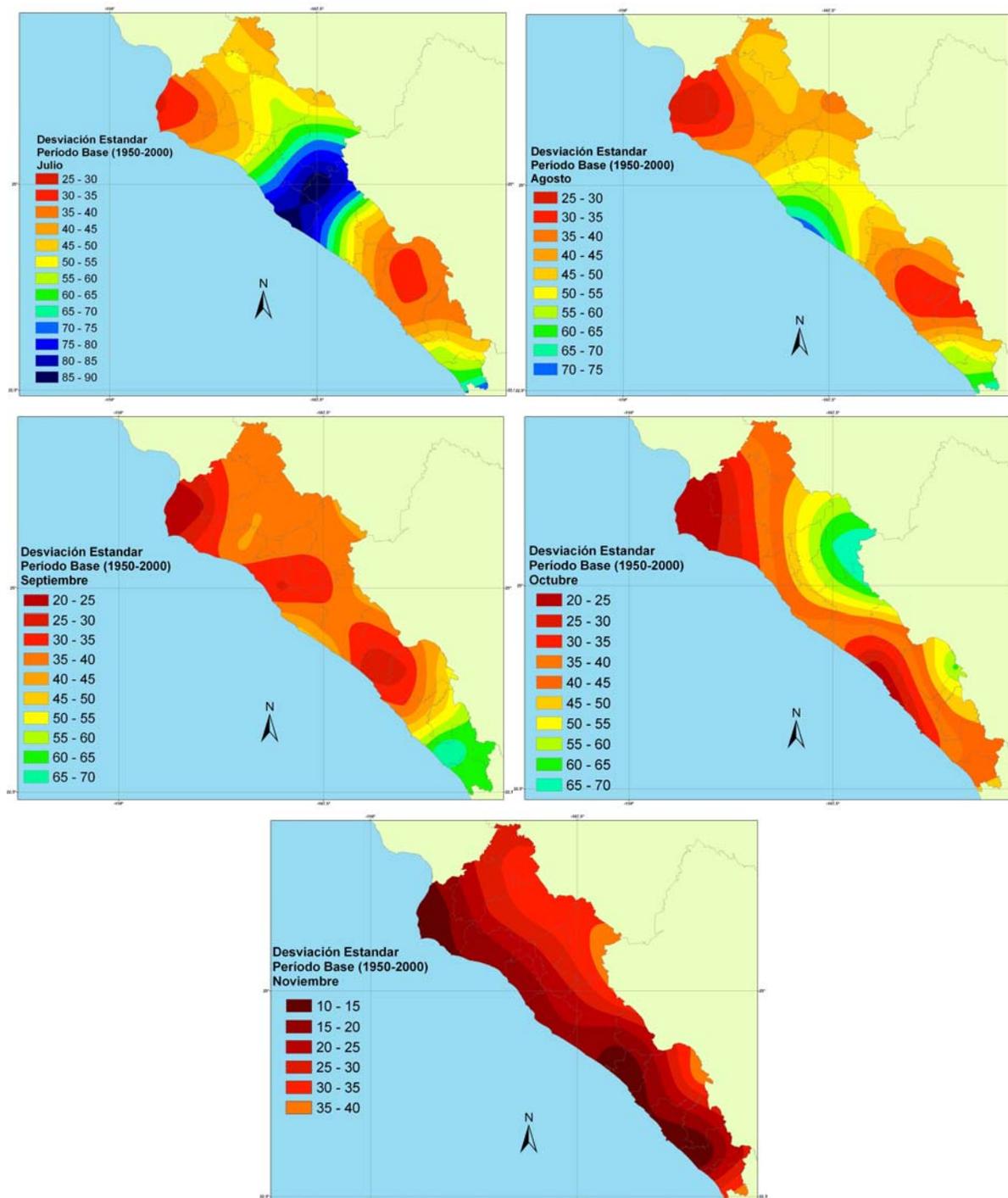


Figura A.2.6. Desviación estándar para precipitación del mes de julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre del período base.