



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

ESTIMACIÓN DE LA SUPERFICIE DE RIEGO ÓPTIMA EN
LOS DISTRITOS DE RIEGO 075 Y 076, SINALOA, MÉXICO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
PEDRO MANUEL NÚÑEZ GARCÍA

TUTOR PRINCIPAL
DR. CARLOS AGUSTÍN ESCALANTE SANDOVAL
FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. MAYO 2014

ÍNDICE

Introducción	1
Justificación	8
Planteamiento del Problema	8
Hipótesis.....	9
Objetivo General	9
Objetivos Específicos	9
1 Características de las Series de Tiempo.....	10
1.1 Características básicas de una serie de tiempo.....	11
1.2 Características complejas de una serie de tiempo (periódicas).....	12
1.3 Características de las series de tiempo multivariadas.....	13
1.4 Números aleatorios de Box-Müller.....	14
1.5 Pruebas de Bondad de Ajuste de los Modelos.....	14
1.5.1 Prueba de Normalidad de los Residuales	14
1.5.2 Prueba de Independencia de los residuales	15
1.5.3 Criterio de Información de Akaike	16
1.6 Modelos autorregresivos de generación sintética	17
1.6.1 Modelos autorregresivos anuales, AR(p)	17
1.6.2 Modelos autorregresivos periódicos, PAR (p)	20
1.6.3 Modelo autorregresivo de promedios móviles, ARMA (p,q)	21

1.6.4	Modelo autorregresivo de promedios móviles periódicos ARMA (p,q)	22
1.6.5	Modelos multivariados anuales, MAR (p).....	23
1.6.6	Modelos multivariados periódicos, MAR (p) periódicos	24
1.7	Modelos de desagregación.....	26
1.7.1	Modelo de desagregación temporal.....	26
1.7.2	Modelo de desagregación temporal extendido.....	26
1.7.3	Modelo de desagregación espacial.....	26
1.8	Pronóstico	28
1.8.1	Pronóstico de series anuales.....	28
1.8.2	Pronóstico de series periódicas	28
2	Análisis de Estacionareidad de las Series de Tiempo.....	31
2.1	Análisis de tendencias	31
2.1.1	Mann-Kendall	32
2.1.2	Prueba de Spearman.....	34
2.2	Análisis de homogeneidad.....	35
2.2.1	Prueba t de Student.....	36
2.2.2	Prueba de Cramer	37
2.2.3	Prueba de Helmert.....	37
2.2.4	Prueba de Pettitt.....	38
2.2.5	Prueba de Homogeneidad Normal Estándar.....	39

2.2.6	Estadístico de Buishand	39
2.2.7	Prueba de Von Newman.....	40
2.2.8	Prueba de Fisher	40
3	Aspectos de Irrigación en Zonas Agrícolas	42
3.1	Evapotranspiración.....	42
3.1.1	Evaporación	42
3.1.2	Transpiración.....	42
3.1.3	Cálculo de la Evapotranspiración.....	43
3.1.4	Requerimiento de Agua del Cultivo (RAC).....	47
3.2	Eficiencia de riego	47
3.3	Planeación del riego	48
3.3.1	Selección de cultivos	49
3.3.2	Demanda de agua de los cultivos.....	50
3.3.3	Disponibilidad de agua	51
4	Optimización de Procesos	53
4.1	Programación Lineal.....	55
4.2	Algoritmos Genéticos.....	56
5	Escenarios de Cambio Climático	59
5.1	Cambios globales observados en las variables climatológicas	60
5.2	Escenarios globales futuros.....	62

5.3	Proyecciones para la República Mexicana	64
6	Caso de Estudio: Distritos de Riego 075 y 076, Sinaloa, México	66
6.1	Medio Físico	66
6.1.1	Distrito de Riego 075, “Río Fuerte”	66
6.1.2	Distrito de Riego 076, “Valle del Carrizo”	71
6.2	Desarrollo de la Metodología y Resultados.....	75
6.2.1	Base de Datos	75
6.2.2	Evapotranspiraciones de Referencia Promedio	76
6.2.3	Estimación de los Coeficientes de Cultivo	78
6.2.4	Análisis de homogeneidad y tendencias en el Requerimiento de Agua de los Cultivos	86
6.2.5	Política de Operación del Sistema de Presas	86
6.2.6	Ingresos al Sistema de Presas	87
6.2.7	Demandas a los almacenamientos por hectárea sembrada.....	88
6.2.8	Superficies Óptimas.....	89
6.2.9	Escenarios de Cambio Climático	97
7	Conclusiones	104
	Referencias	107

Introducción

El agua es el recurso vital a partir del cual desde la antigüedad se han sustentado las civilizaciones, en función a su ubicación y disponibilidad se han fundado las grandes ciudades y es una pieza clave en todas las actividades que realiza el ser humano; sin ella la vida no sería posible. Por lo tanto, buscar instrumentos que permitan su mejor aprovechamiento ha sido una labor continúa de los investigadores a través de generaciones.

Entre los diversos problemas que existen en México, uno de lo más trascendentales que afecta a todos los niveles de la población es el relacionado con la escasez o el exceso de agua, originado por la mala distribución espacial y temporal del líquido en el territorio nacional.

En lo que se refiere a la distribución temporal del recurso, cerca del 68% de la precipitación ocurre en los meses de junio a septiembre lo que obliga a la construcción de obras de almacenamiento que permitan utilizarla en los meses de escasez y obras de control para proteger a la población contra desastres naturales como inundaciones. Sin embargo, debido a sus altos costos no siempre es posible disponer de ellas o en muchas ocasiones no cuentan con la capacidad suficiente para desempeñar sus funciones de la manera que se requeriría.

Por otra parte, de acuerdo con las cifras de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2012a), anualmente ingresa al país un volumen precipitado de 1 489 km³ más 48 km³ importados desde otros países, de los cuales 1 084 km³, aproximadamente el 71%, se pierde en forma de evapotranspiración y 0.43 km³ son exportados, quedando disponibles 405 km³, de los cuales 331 km³ escurren superficialmente y 74 km³ se infiltran recargando a los acuíferos. A través de estas cifras es posible determinar que para la población censada en 2010 existe un volumen de agua renovable per cápita de 4 090 m³/hab/año, sin embargo, este volumen no se distribuye equitativamente, si se observa a nivel regional, más del 50% pertenece a las regiones del sur que son las menos productivas, mientras que las regiones más productivas localizadas en el centro y norte del país son también las más áridas (Fig. I.1), es importante señalar que la disparidad se agrava si se observa a nivel estatal o peor aún municipal.

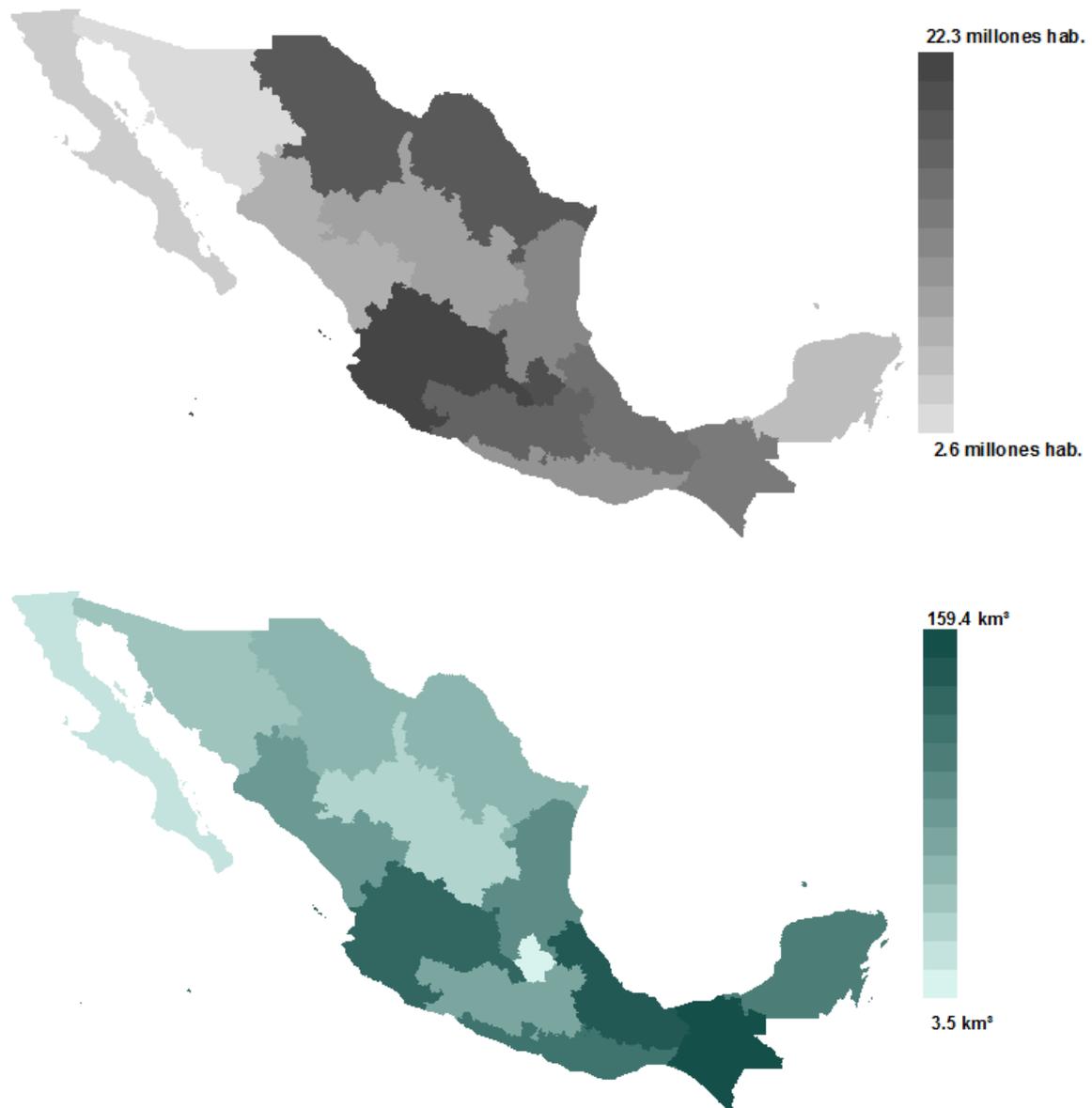


Fig. 1.1 Distribución del Agua Renovable per Cápita en México. Fuente: CONAGUA, 2012a

Del volumen disponible únicamente se aprovecha para consumo humano (uso consuntivo) 80.21 km³, es decir el 19%, mientras que el restante descarga hacia los océanos.

En lo que respecta a los usos que se le da al agua, se clasifican en cuatro grandes rubros en función de la actividad productiva en la que es aprovechada, ellos son: Agrícola, Abastecimiento Público, Industrial y Energía Eléctrica. Dentro de estos rubros, a nivel nacional el agrícola es el que consume la mayor cantidad del recurso, un volumen total de

61.49 km³ que representan el 76.7% del volumen aprovechado, seguido por el abastecimiento público con un 14.3%, la energía eléctrica con el 5% y finalmente el Industrial ocupando sólo el 4% (CONAGUA, 2012a).

A partir de 1926 el Gobierno Federal, a través de la extinta Comisión Nacional de Irrigación, desarrolló una serie de proyectos de irrigación conocidos como Distritos y Unidades de Riego, que incluyen diversas obras como presas, pozos, derivaciones, plantas de bombeo, canales y caminos orientados a una mejor administración del agua agrícola (CONAGUA, 2012a). En el artículo 3 fracción XXV.a de la Ley de Aguas Nacionales (Ley de Aguas Nacionales, 2013) se proporciona la siguiente definición de distrito de riego:

“El establecido mediante Decreto Presidencial, el cual está conformado por una o varias superficies previamente delimitadas y dentro de cuyo perímetro se ubica la zona de riego, el cual cuenta con las obras de infraestructura hidráulica, aguas superficiales y del subsuelo, así como con sus vasos de almacenamiento, su zona federal, de protección y demás bienes y obras conexas, pudiendo establecerse también con una o varias unidades de riego.”

Mientras que la definición de unidad de riego, consignada en el artículo 3, fracción LI de dicha Ley es:

“Área agrícola que cuenta con infraestructura y sistemas de riego, distinta de un distrito de riego y comúnmente de menor superficie que aquél; puede integrarse por asociaciones de usuarios u otras figuras de productores organizados que se asocian entre sí libremente para prestar el servicio de riego con sistemas de gestión autónoma y operar las obras de infraestructura hidráulica para la captación, derivación, conducción, regulación, distribución y desalojo de las aguas nacionales destinadas al riego agrícola“

La administración de los distritos y unidades de riego se realiza de forma compartida entre el sector público y el sector privado (Johnson, 1997), de tal manera que los usuarios son quienes proponen un programa de cultivos a establecer durante el ciclo agrícola y la dependencia gubernamental, en este caso, la Jefatura del Distrito de Riego se encarga de autorizar o proponer modificaciones al programa en función de los requerimientos por otros usos y la disponibilidad del recurso.

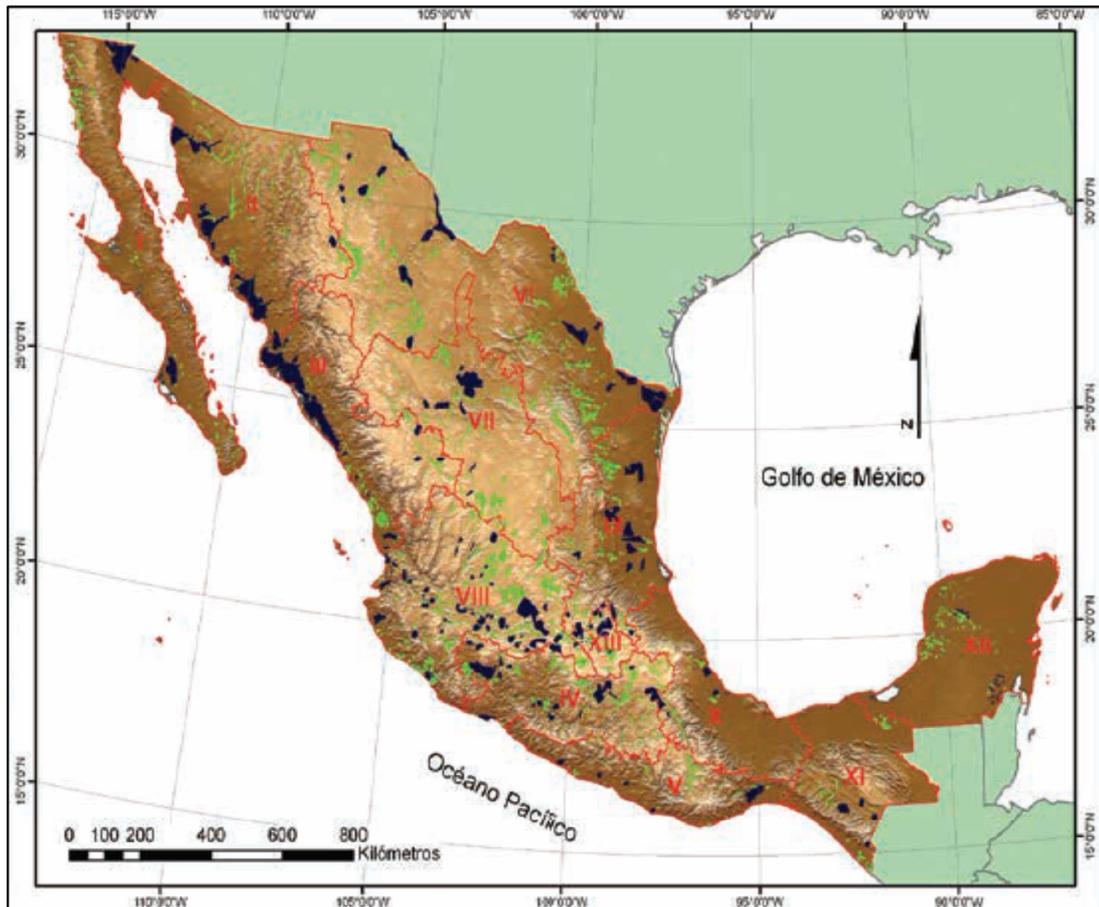


Fig 1.2 Distritos (azul) y Unidades (verde) de Riego por Consejo de Cuenca. Fuente: CONAGUA, 2012b

El 86% del agua distribuida en los distritos de riego proviene del escurrimiento superficial a través de la extracción desde presas de almacenamiento, bombeo de corrientes y derivación; mientras que el 14% restante se extrae del agua subterránea mediante el bombeo de pozos profundos (CONAGUA, 2012b).

En los distritos abastecidos por una presa, la disponibilidad para riego se estima a partir de un balance entre nivel del almacenamiento al inicio del ciclo agrícola, los ingresos probables que tienen un comportamiento estocástico, las pérdidas por evaporación e infiltración y las demandas por otros usos; por otro lado, la disponibilidad de los distritos abastecidos por extracción de acuíferos depende del balance entre las entradas por infiltración del agua de lluvia, escurrimientos superficiales y subterráneos o en algunos casos por retorno de los excedentes de riego y las salidas ya sean por evapotranspiración o por descarga natural a una corriente o al mar; existen también distritos abastecidos por derivación y bombeo de corrientes superficiales donde la disponibilidad depende de los

escurrimientos y su determinación con fines de planeación se determina a partir de la probabilidad de ocurrencia de estos últimos.

En México se siembran en promedio 21 000 000 ha al año, obteniéndose una producción con valor promedio de 218 555 mdp, según datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

De acuerdo a la información presentada en el informe 2011-2012 de Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego en el territorio nacional existen 85 distritos de riego (CONAGUA, 2012b), siendo más productivos los localizados en los estados de Sonora y Sinaloa; en particular, el distrito de riego 075 “Río Fuerte” localizado en el norte Sinaloa es el de mayor extensión y el segundo lugar en toneladas producidas al año, pero el primero en cuanto a la derrama económica durante todo el ciclo agrícola.

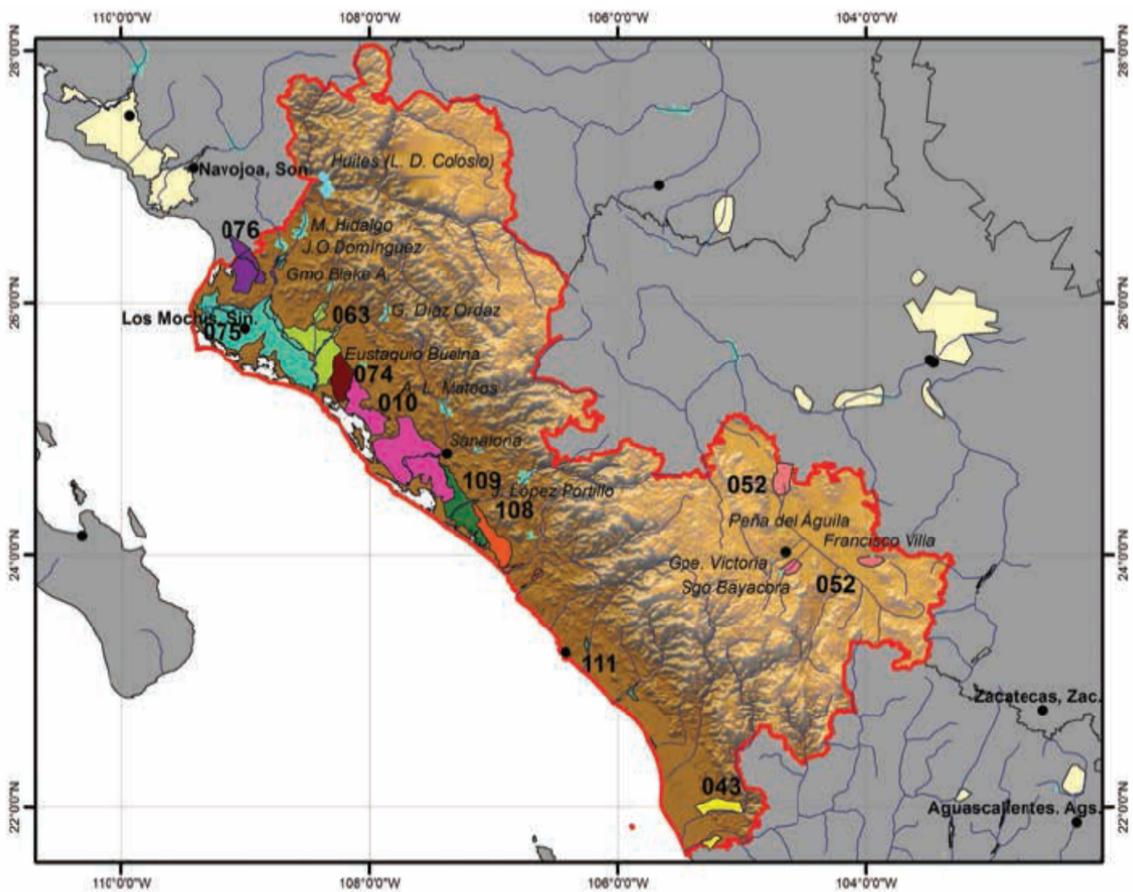


Fig. I.3 Distritos de riego de la Región Hidrológica Administrativa Pacífico Norte.
Fuente CONAGUA, 2012b

La operación del distrito de riego 075 se encuentra íntimamente ligada con la del distrito de riego 076 “Valle del Carrizo” localizado en la frontera de los estados de Sonora y Sinaloa ya que son abastecidos por las presas Miguel Hidalgo y Costilla y Josefa Ortiz de Domínguez, respectivamente, que junto con la presa Luis Donaldo Colosio, conforman el sistema de presas del río Fuerte, con una capacidad de almacenamiento de aproximadamente 6342 hm³ medidos al nivel de aguas máximas ordinarias.

Puesto que las condiciones climáticas influyen directamente en la disponibilidad de los almacenamientos, ciertas variaciones en éstas provocarán cambios en la cantidad de agua para riego, siendo en ocasiones insuficiente para satisfacer los requerimientos de los cultivos, los cuales, además, son afectados por el clima a través de la evapotranspiración. Todo esto provoca fuertes pérdidas económicas al sector productivo.

De acuerdo con lo descrito en el capítulo 2 del Quinto Reporte de Evaluación del Cambio Climático publicado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, 2014) los impactos negativos del cambio climático en el rendimiento de los cultivos serán más comunes que los positivos; asimismo, un análisis de las proyecciones y escenarios presentados para el periodo 2015-2039 y 2075-2099 de la Actualización de Escenarios de Cambio Climático para México presentada por el Instituto Nacional de Ecología y cambio climático (INECC, 2014), revela que debido al incremento de las temperaturas y disminución de las lluvias, la evapotranspiración aumentará, lo que significa en términos agrícolas un incremento en los requerimientos de riego, y si a esto se le agrega el hecho de que pudiera existir una reducción en los escurrimientos superficiales y subterráneos, el concepto de planeación para la operación de los sistemas de abastecimiento adquiere una relevancia fundamental.

Por lo anterior, es evidente que para los para los encargados de administrar el recurso agua resulta de suma importancia contar con un instrumento que les sirva como guía para que la operación de los sistemas de abastecimiento a largo plazo sea la adecuada. En el caso de los administradores de los distritos de riego conocer bajo que superficies de siembra de los distintos cultivos se obtendrá el funcionamiento óptimo, generando las mayores producciones con las menores pérdidas, puede ser la diferencia entre un desarrollo sustentable de la actividad agrícola y fuertes pérdidas económicas con afectaciones a los recursos naturales.

El presente trabajo consiste en el desarrollo de una metodología para la estimación las superficies óptimas de los distritos de riego 075 y 076; en el capítulo 1 se presentan las características básicas de las series de tiempo que servirán para la construcción de modelos de generación de muestras sintéticas de ingresos a los almacenamientos para la evaluación de su comportamiento al largo plazo. En el capítulo 2 se tratarán los temas de análisis de la estacionareidad de las series de tiempo, a través de los cuales se podrán evaluar los posibles cambios en las variables climáticas a través de los años con registro. En el capítulo 3, se tocarán temas correspondientes a la irrigación, en él se presentan las ecuaciones fundamentales para el cálculo de los requerimientos hídricos de los cultivos en función del clima. En el capítulo 4, se exponen los escenarios de cambio climático presentados por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. En el capítulo 5, se incluyen algunos aspectos referentes a la optimización de procesos. En el capítulo 6 se presenta un caso de estudio para los Distritos de Riego 075 y 076 donde se aplicarán todos los conceptos expuestos en los capítulos precedentes. Finalmente, en el capítulo 7 se dan las conclusiones y recomendaciones de esta investigación.

Justificación

Aproximadamente el 77% del agua que se consume en el país es utilizada con fines agrícolas, no obstante, en muchas ocasiones la calidad de la infraestructura con la que se cuenta, la baja eficiencia de los sistemas de riego por gravedad que predominan en el territorio, una mala operación de los almacenamientos, los requerimientos del mercado y las costumbres de los productores, no permiten que el rendimiento del líquido sea el deseado, perdiéndose en promedio el 60% de este volumen.

Sinaloa es el principal productor agrícola de México, ocupando el primer lugar en cultivos que forman parte de la canasta básica, tales como el maíz, el tomate y el chile verde, por lo cual posee el mayor volumen de agua concesionado para este uso y en particular el distrito de riego 075 localizado al norte del estado es el que produce la cosecha de mayor valor, el que tiene la mayor cantidad de hectáreas habilitadas para la siembra y el mayor volumen de agua distribuido, lo cual es un indicador de los efectos devastadores que puede ocasionar una mala planeación del programa de siembras tanto en la región como a nivel nacional. Además, la configuración del sistema de presas encargado de satisfacer los requerimientos de riego de este distrito obliga a estudiar al distrito de riego colindante, el 076.

Planteamiento del Problema

En los distritos de riego 075 y 076, la mayor parte del volumen de agua entregado es para el consumo de los cultivos, y la cantidad que estos requieren depende, además de sus características fisiológicas, de las variables climatológicas, por un lado la precipitación que representa una fuente de ingreso a la zona de riego y por el otro la temperatura que influye en la evapotranspiración de los cultivos. La presencia de episodios de escasez de precipitación aunados a las altas temperaturas provocan que la disponibilidad de agua no siempre sea la suficiente para satisfacer las demandas de riego; además, de acuerdo a las proyecciones de cambio climático elaboradas por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, estas condiciones se agudizarán, por lo tanto es necesario contar con un instrumento de planeación que reduzca los impactos de las condiciones climáticas adversas en la producción agrícola.

Hipótesis

En los Distritos de Riego 075 y 076, existe una superficie óptima de siembra para los principales cultivos a través de la cual es posible mitigar el efecto las condiciones climáticas adversas.

Objetivo General

Desarrollar una metodología que permita establecer la superficie de siembra del patrón de cultivos de los distritos de riego 075 y 076, localizados al norte del estado de Sinaloa, tal que la capacidad de las presas para satisfacer los requerimientos hídricos a largo plazo y para diferentes condiciones climatológicas sea suficiente para mantener una producción rentable.

Objetivos Específicos

- Estimar las evapotranspiraciones reales de los principales cultivos de los distritos de riego 075 y 076.
- Obtener los volúmenes demandados a las presas Miguel Hidalgo y Costilla y Josefa Ortiz de Domínguez por hectárea sembrada y analizar su posible variabilidad en el tiempo.
- Seleccionar el modelo de generación de muestras sintéticas que preserve de forma más eficiente las características de las series hidrológicas.
- Estimar la superficie de siembra que permita que la disponibilidad del agua para riego en el sistema de presas a largo plazo sea suficiente para minimizar las pérdidas por déficits y excedentes, manteniendo los niveles de producción esperados.
- Plantear escenarios de cambio climático en los distritos de riego a través de las proyecciones y escenarios presentados por el INECC, para analizar su efecto ante el uso de la superficie estimada.

1 Características de las Series de Tiempo

Supóngase, que en una cuenca se lleva el registro de precipitación en sitios alejados entre sí.

Si $X_i(t)$ es el registro de las lluvias en el sitio i , los registros correspondientes a los distintos sitios tendrán una forma como:

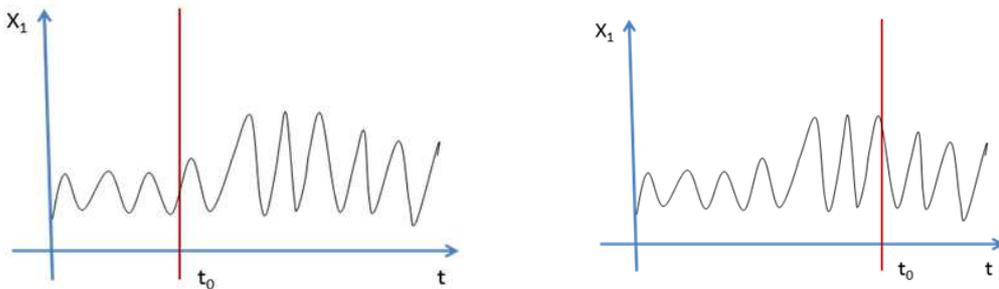


Fig. 1.1 Series de tiempo.

Si para un tiempo cualquiera " t_0 " se toman las lluvias registradas en los distintos sitios $\{X_1(t_0), X_2(t_0), \dots, X_n(t_0)\}$ los valores correspondientes estarán caracterizados por su función de distribución $F(X_0)$. Si el proceso se repite para tiempos: t_1, t_2, \dots, t_n . las funciones de distribución $F(x_1), F(x_2), \dots, F(x_t), \dots, F(x_n)$ serán en general distintas, esto es la función de distribución de la variable aleatoria X será función del instante t que se considera a un proceso como el anterior se le denomina estocástico.

Por otra parte el proceso de conversión de la lluvia en escurrimiento, depende del estado de la cuenca al inicio del proceso (grado de saturación de los suelos, almacenamiento en acuíferos...) lo que determina que el escurrimiento en un instante " t " dependa de la historia del proceso. Se dice entonces que el proceso tiene memoria y por lo tanto, lo que ocurre en un momento dado depende en cierto grado de lo que ocurrió en los instantes previos.

Este mecanismo al que se debe la existencia de la persistencia o componente autorregresiva es evidente con el proceso del escurrimiento, sin embargo aunque en menor grado se presenta también con la precipitación y la evaporación.

Si la cuenca sufre modificaciones graduales debidas a urbanización o deforestación, estas se manifiestan en el escurrimiento, ya que presenta una tendencia a crecer o a decrecer con el tiempo. Finalmente aun pudiendo conocer con precisión la tendencia, las

variaciones cíclicas y la dependencia del proceso con su historia, quedarían algunas variaciones, imposibles de explicar en términos de relaciones causa-efecto.

Estas variaciones pueden atribuirse a fenómenos completamente casuales y son adicionadas a la serie de tiempo mediante una componente estocástica.

Las componentes de las series de tiempo son:

- Componente aleatoria
- Tendencia
- Periodicidad
- Componente Autorregresiva

El concepto de generación de muestras sintéticas es usado para la etapa de planeación (largo plazo) y el concepto de pronóstico es usado para la etapa de operación (corto plazo).

1.1 Características básicas de una serie de tiempo

$$y_t = \frac{x_t^\lambda - 1}{\lambda} \quad (1.1)$$

$$y_t = \ln x_t \quad (1.2)$$

Donde:

x_t Serie registrada

y_t Serie normalizada.

$$Z_t = y_t - \bar{y} \quad (\text{series anuales}) \quad (1.3)$$

$$Z_t = \frac{y_t - \bar{y}}{S_y} \quad (\text{series periódicas}) \quad (1.4)$$

Donde:

Z_t Serie estandarizada.

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^n x_t \quad (1.5)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^n y_t \quad (1.6)$$

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2 \quad (1.7)$$

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2 \quad (1.8)$$

$$g = \frac{N \sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^3}{(N-1)(N-2)S^3} \quad (1.9)$$

Función de autocovarianza: Mide el grado de dependencia lineal (auto-dependencia) de la serie de tiempo.

La Autocovarianza C_k entre x_t y x_{t+k} es:

$$C_k = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x}) \quad 0 \leq k < N \quad (1.10)$$

Donde:

C_k Autocovarianza de retraso k

Una medida adimensional de la dependencia lineal se obtiene dividiendo C_k por C_0

$$r_k = \frac{C_k}{C_0} = \frac{\sum_{t=1}^{N-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x})}{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2} \quad (1.11)$$

Donde:

r_k Coeficiente de autocorrelación de retraso k

1.2 Características complejas de una serie de tiempo (periódicas)

$$x_{v,\tau} \quad (1.12)$$

Donde:

v = Denota el año

τ = Periodo $1, \dots, \omega$

$$y_{v,\tau} = \ln x_{v,\tau} \quad (1.13)$$

$$Z_{v,\tau} = \frac{y_{v,\tau} - \bar{y}_\tau}{S_\tau} \quad (1.14)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{v=1}^n x_{v,\tau} \quad (1.15)$$

$$S_\tau^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{v=1}^N (x_{v,\tau} - \bar{x}_\tau)^2 \quad (1.16)$$

$$g_\tau = \frac{N \sum_{v=1}^n (x_{v,\tau} - \bar{x}_\tau)^3}{(N-1)(N-2)S_\tau^3} \quad (1.17)$$

$$r_{k,\tau} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{v=1}^{N-k} (x_{v,\tau} - \bar{x}_\tau)(x_{v,\tau-k} - \bar{x}_{\tau-k})}{S_\tau S_{\tau-k}} \quad (1.18)$$

Cuando $\tau - k < 1$ se deben remplazar los términos

$$\frac{1}{N} \text{ por } \frac{1}{N-1} \quad (1.19)$$

$$v = 1 \text{ por } v = 2 \quad (1.20)$$

$$x_{v,\tau-k} \text{ por } x_{v-1,\omega+\tau-k} \quad (1.21)$$

$$x_{\tau-k} \text{ por } x_{\omega+\tau-k} \quad (1.22)$$

$$S_{\tau-k} \text{ por } S_{\omega+\tau-k} \quad (1.23)$$

1.3 Características de las series de tiempo multivariadas

$$r_k^{ij} = \frac{\sum_{t=1}^{N-k} (x_t^{(i)} - \bar{x}_t^{(i)})(x_{t+k}^{(j)} - \bar{x}_{t+k}^{(j)})}{\left[\sum_{t=1}^{N-k} (x_t^{(i)} - \bar{x}_t^{(i)})^2 \sum_{t=1}^{N-k} (x_{t+k}^{(j)} - \bar{x}_{t+k}^{(j)})^2 \right]^{1/2}} \quad (1.24)$$

Donde:

$\bar{x}_t^{(i)}$ Es la media de los primeros $N - k$ valores de la serie i

$\bar{x}_{t+k}^{(i)}$ Es la media de los últimos $N - k$ valores de la serie i

Para n series de tiempo es común representar la correlación por medio de una matriz

$$\widehat{M}_k \begin{bmatrix} r_k^{11} & r_k^{12} & - & - & r_k^{1n} \\ r_k^{21} & r_k^{22} & - & - & r_k^{2n} \\ - & - & - & - & - \\ - & - & - & - & - \\ r_k^{n1} & r_k^{n2} & - & - & r_k^{nn} \end{bmatrix} \quad (1.25)$$

Donde:

r_k^{ij} Se calcula con la ecuación anterior

Cuando se trata con series periódicas la estructura de la dependencia periódica entre dos series $x_{v,\tau}^{(i)}$ y $\bar{x}_{v,\tau}^{(j)}$ es determinada por:

$$r_{k,\tau}^{ij} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{v=1}^N (x_{v,\tau}^{(i)} - \bar{x}_{\tau}^{(i)}) (x_{v,\tau+k}^{(j)} - \bar{x}_{\tau+k}^{(j)})}{S_{\tau}^{(i)} S_{\tau+k}^{(j)}} \quad (1.26)$$

1.4 Números aleatorios de Box-Müller

$$\xi_1 = \left[2 \ln \frac{1}{u_1} \right]^{1/2} \cos(2\pi u_2) \quad (1.27)$$

$$\xi_2 = \left[2 \ln \frac{1}{u_1} \right]^{1/2} \text{sen}(2\pi u_2) \quad (1.28)$$

$u_1, u_2 =$ Números con distribución uniforme en el intervalo [0,1]

Para generar el primer valor de la muestra sintética Z_0 es el último valor de la muestra original.

1.5 Pruebas de Bondad de Ajuste de los Modelos

1.5.1 Prueba de Normalidad de los Residuales

Existen diversas formas de comprobar la normalidad de los residuales de una serie de tiempo, la forma más común es la gráfica, dibujando los residuales en un papel de distribución normal y observando si los puntos se ajustan a una línea recta.

También es posible verificar la normalidad de una serie de tiempo a través de su coeficiente de asimetría. Se debe revisar si el coeficiente de asimetría es

significativamente igual a cero. A continuación se presenta la expresión para estimar el coeficiente y los valores críticos del mismo.

Coeficiente de Asimetría:

$$\text{Sesgado: } g_1 = \frac{n^2 \sum (x_i - \bar{x})^3}{[\sum (x_i - \bar{x})^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (1.29)$$

$$\text{No Sesgado } G_1 = \frac{\sqrt{n(n-1)}}{n-2} g_1 \quad (1.30)$$

Tabla 1.1 Valores significativamente iguales a cero del coeficiente de asimetría según la longitud del registro

N	g	N	g
25	0.711	70	0.459
30	0.662	80	0.432
35	0.621	90	0.409
40	0.587	100	0.389
45	0.558	125	0.35
50	0.534	150	0.321
60	0.492	175	0.298

1.5.2 Prueba de Independencia de los residuales

Prueba de Independencia de Anderson

Para que se pueda llevar a cabo el análisis de frecuencia se requiere que la muestra x_i para $i = 1, 2, 3, \dots, n$ esté compuesta por las variables aleatorias. Para probarlo se aplica la prueba de independencia de Anderson la cual hace uso del coeficiente de autocorrelación serial r_k para diferentes tiempos de retaso de k .

La expresión para obtener el coeficiente de correlación serial de retraso k , es:

$$r_k = \frac{\sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}; \text{ para } r_0 = 1 \text{ y } k = 1, 2, \dots, n/3 \quad (1.31)$$

Donde:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1.32)$$

Además, los límites al 95% de confianza para r_k se pueden obtener como:

$$r_k(95\%) = \frac{-1 \pm 1.96\sqrt{n - k - 1}}{n - k} \quad (1.33)$$

La gráfica de los valores estimados para r_k (ordenadas) contra los tiempos de retraso k (abscisas) junto con sus correspondientes límites de confianza, se llama correlograma de la muestra.

Si solo el 10% de los valores r_k sobrepasan los límites de confianza se dice que la serie x_i es independiente y por lo tanto, es una variable que sigue las leyes de la probabilidad.

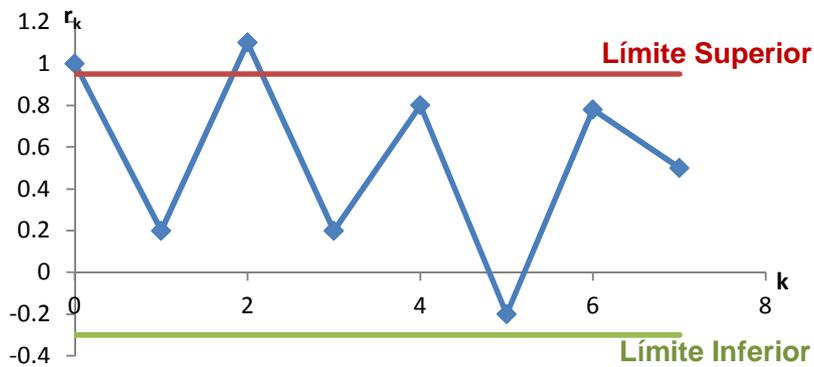


Fig. 1.2 Correlograma

1.5.3 Criterio de Información de Akaike

Para conocer cuál de los modelos es el mejor se utiliza el Criterio de Información de Akaike:

$$CIA = N * Ln(\hat{\sigma}_\varepsilon^2) + 2(p + q) \quad (1.34)$$

Donde:

p Número de parámetros autorregresivos.

q Número de parámetros de promedios móviles.

El modelo que tenga el menor valor del Coeficiente de Información de Akaike es el mejor.

1.6 Modelos autorregresivos de generación sintética

1.6.1 Modelos autorregresivos anuales, AR(p)

Modelo AR (1)

$$x_t = \text{Datos obtenidos de la muestra original} \quad (1.35)$$

$$y_t = \ln x_t \quad (1.36)$$

$$Z_t = y_t - \bar{y} \quad (1.37)$$

$$Z_t = \phi_1 Z_{t-1} + \varepsilon_t \quad (1.38)$$

$$\hat{Z}_t = \hat{\phi}_1 \hat{Z}_{t-1} + \sigma_\varepsilon \xi_t \quad (1.39)$$

Donde:

y_t Variable normalizada.

Z_t Variable estandarizada.

$\hat{\phi}_1$ Parámetro autorregresivo.

ε_t Residuales del modelo, son la diferencia entre el valor medido y el estimado. La serie de residuales debe ser normal e independiente.

$$\varepsilon_t = Z_t - \hat{\phi}_1 Z_{t-1} \quad (1.40)$$

σ_ε Varianza de los residuales.

$$\sigma_\varepsilon^2 = \sigma_y^2 (1 - \hat{\phi}_1^2) \quad (1.41)$$

Como en hidrología se tienen muestras pequeñas, se utiliza la varianza insesgada:

$$\sigma_\varepsilon^2 = \frac{N}{N-1} \sigma_y^2 (1 - \hat{\phi}_1^2) \quad (1.42)$$

ξ_t Número aleatorio con distribución normal estándar.

$\hat{\phi}_1 = \hat{r}_1$ Se obtienen de la serie estandarizada.

\hat{r}_1 Coeficiente autorregresivo.

$-1 < |\hat{\phi}_1| < 1$ Debe estar dentro del círculo unitario.

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x})}{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2} ; \text{ para } r_0 = 1 \quad \text{y} \quad k = 1, 2, \dots, \frac{n}{3} \quad (1.43)$$

$$r_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (z_i - \bar{z})(z_{i+k} - \bar{z})}{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2} \quad (1.44)$$

Por Máxima Verosimilitud:

$$\hat{\phi}_1 = \frac{D_{12}}{D_{22}} \quad (1.45)$$

$$\sigma_\varepsilon^2 = \frac{1}{N-1} (D_{11} - \hat{\phi}_1 D_{12}) \quad (1.46)$$

Considerando:

$$D_{ij} = D_{ji} = \frac{N}{(N+2-i-j)} \sum_{l=0}^{N+1-(i+j)} Z_{i+l} Z_{j+l} \quad (1.47)$$

Los parámetros por máxima verosimilitud se encuentran al resolver el sistema de ecuaciones.

$$D_{ij} = \phi_1 D_{j2} + \phi_2 D_{j3} + \dots + \phi_p D_{j,p+1} \quad (1.48)$$

$$\sigma_\varepsilon^2 = \frac{1}{N-p} \left(D_{11} - \sum_{j=1}^p \hat{\phi}_j D_{1,j+1} \right) \quad (1.49)$$

Modelo AR (2)

$$Z_t = \phi_1 Z_{t-1} + \phi_2 Z_{t-2} + \varepsilon_t \quad (1.50)$$

$$\varepsilon_t = Z_t - \phi_1 Z_{t-1} - \phi_2 Z_{t-2} \quad (1.51)$$

$$\hat{\phi}_1 = \frac{\hat{r}_1(1-\hat{r}_2)}{1-\hat{r}_1^2} \quad (1.52)$$

$$\hat{\phi}_2 = \frac{\hat{r}_2 - \hat{r}_1^2}{1 - \hat{r}_1^2} \quad (1.53)$$

$$\sigma_\varepsilon^2 = \sigma_y^2 \left(\frac{1 + \hat{\phi}_2}{1 - \hat{\phi}_2} \right) \left[(1 - \hat{\phi}_2)^2 - \hat{\phi}_1^2 \right] \quad (1.54)$$

$$\sigma_\varepsilon^2 = \sigma_y^2 \frac{N}{N-2} \left(\frac{1 + \hat{\phi}_2}{1 - \hat{\phi}_2} \right) \left[(1 - \hat{\phi}_2)^2 - \hat{\phi}_1^2 \right] \quad (1.55)$$

$$\hat{Z}_t = \hat{\phi}_1 \hat{Z}_{t-1} + \hat{\phi}_2 \hat{Z}_{t-2} + \sigma_\varepsilon \xi_t \quad (1.56)$$

Por Máxima Verosimilitud:

$$\hat{\phi}_1 = \frac{D_{12}D_{33} - D_{13}D_{23}}{D_{22}D_{33} - D_{23}^2} \quad (1.57)$$

$$\hat{\phi}_2 = \frac{D_{12}D_{33} - D_{13}D_{23}}{D_{22}D_{33} - D_{23}^2} \quad (1.58)$$

$$\sigma_\varepsilon^2 = \frac{1}{N-2} (D_{11} - \hat{\phi}_1 D_{12} - \hat{\phi}_2 D_{13}) \quad (1.59)$$

Modelo AR (3)

$$Z_t = \phi_1 Z_{t-1} + \phi_2 Z_{t-2} + \phi_3 Z_{t-3} + \varepsilon_t \quad (1.60)$$

$$\varepsilon_t = Z_t - \phi_1 Z_{t-1} - \phi_2 Z_{t-2} - \phi_3 Z_{t-3} \quad (1.61)$$

$$\hat{\phi}_1 = \frac{(1 - \hat{r}_1^2)(\hat{r}_1 - \hat{r}_3) - (1 - \hat{r}_2)(\hat{r}_1 \hat{r}_2 - \hat{r}_3)}{(1 - \hat{r}_2)(1 - 2\hat{r}_1^2 + \hat{r}_2)} \quad (1.62)$$

$$\hat{\phi}_2 = \frac{(1 - \hat{r}_2)(\hat{r}_2 + \hat{r}_2^2 - \hat{r}_1^2 - \hat{r}_1^2 - \hat{r}_1 \hat{r}_3)}{(1 - \hat{r}_2)(1 - 2\hat{r}_1^2 + \hat{r}_2)} \quad (1.63)$$

$$\hat{\phi}_3 = \frac{(\hat{r}_1 - \hat{r}_3)(\hat{r}_1^2 - \hat{r}_2) - (1 - \hat{r}_2)(\hat{r}_1 \hat{r}_2 - \hat{r}_3)}{(1 - \hat{r}_2)(1 - 2\hat{r}_1^2 + \hat{r}_2)} \quad (1.64)$$

$$\sigma_\varepsilon^2 = \sigma_y^2 \left(1 - \sum_{j=1}^p \hat{\phi}_j \hat{r}_j \right) \quad (1.65)$$

$$\sigma_\varepsilon^2 = \frac{N}{N-p} \sigma_y^2 \left(1 - \sum_{j=1}^p \hat{\phi}_j \hat{r}_j \right) \quad (1.66)$$

Por Máxima Verosimilitud:

$$\hat{\phi}_1 = \frac{D_{12} - \hat{\phi}_2 D_{23} - \hat{\phi}_3 D_{24}}{D_{22}} \quad (1.67)$$

$$\hat{\phi}_2 = \frac{D_{13} D_{22} - D_{12} D_{23} + (D_{23} D_{24} - D_{22} D_{34}) \hat{\phi}_3}{(D_{22} D_{33} - D_{23}^2)} \quad (1.68)$$

$$\hat{\phi}_3 = \frac{D_{14} D_{22} - D_{12} D_{42} + (D_{22} D_{43} - D_{23} D_{24}) (D_{13} D_{22} - D_{12} D_{23} + D_{24} D_{34} - D_{22} D_{34})}{(D_{22} D_{44} - D_{24}^2) (D_{22} D_{33} - D_{23}^2)} \quad (1.69)$$

1.6.2 Modelos autorregresivos periódicos, PAR (p)

Estos modelos pueden ser de coeficientes constantes y de coeficientes periódicos.

$$x_{v,\tau} \quad (1.70)$$

$$y_{v,\tau} = \ln(x_{v,\tau}) \quad (1.71)$$

$$z_{v,\tau} = \frac{y_{v,\tau} - \mu_\tau}{\sigma_\tau} \quad (1.72)$$

Donde $\tau = 1, \dots, \omega$ periodos. Para una serie mensual $\omega = 12$

Las series se acomodan como físicamente ocurre.

PAR (p) coeficientes constantes

Para una serie $z_{v,\tau}$ se convierte en una serie:

$$z_t \text{ con } t = (v - 1)\omega + \tau \quad (1.73)$$

La cual se puede modelar con:

$$z_t = \phi_1 z_{t-1} + \phi_2 z_{t-2} + \dots + \phi_p z_{t-p} + \varepsilon_t \quad (1.74)$$

PAR (p) coeficientes periódicos

$$z_{v,\tau} = \phi_{1,\tau} z_{v,\tau-1} + \dots + \phi_{p,\tau} z_{v,\tau-p} + \sigma_{\varepsilon\tau} \xi_{v,\tau} \quad (1.75)$$

$\xi_{v,\tau}$ Son en todos los casos los residuales del modelo.

Los valores de $\rho_{k,\tau}$ pueden obtenerse con el correlograma periódico:

$$\rho_{k,\tau} = r_{k,\tau} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{v=1}^N (z_{v,\tau} - \bar{z}_\tau)(z_{v,\tau-k} - \bar{z}_{\tau-k})}{S_\tau S_{\tau-k}} \quad (1.76)$$

Cuando $\tau - k < 1$. Se reemplaza:

$$\frac{1}{N} \rightarrow \frac{1}{N-1} \quad (1.77)$$

$$\nu = 1 \rightarrow \nu = 2 \quad (1.78)$$

$$Z_{\nu, \tau-k} \rightarrow Z_{\nu-1, \omega-\tau-k} \quad (1.79)$$

$$\bar{Z}_{\tau-k} \rightarrow \bar{Z}_{\omega+\tau-k} \quad (1.80)$$

$$S_{\tau-k} \rightarrow S_{\omega+\tau-k} \quad (1.81)$$

1.6.3 Modelo autorregresivo de promedios móviles, ARMA (p,q)

$$z_t = \phi_1 z_{t-1} + \phi_2 z_{t-2} + \dots + \phi_p z_{t-p} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (1.82)$$

$$z_t = \sum_{j=1}^p \phi_j z_{t-j} + \varepsilon_t - \sum_{j=0}^q \theta_j \varepsilon_{t-j} \quad (1.83)$$

$$\sigma_\varepsilon^2 = \frac{C_0}{1 + \hat{\theta}_1^2 + \dots + \hat{\theta}_q^2} \quad (1.84)$$

$$\hat{\theta}_j = - \left(\frac{C_j}{\sigma_\varepsilon^2} - \hat{\theta}_1 \hat{\theta}_{j+1} - \hat{\theta}_2 \hat{\theta}_{j+2} - \dots - \hat{\theta}_{q-j} \hat{\theta}_q \right) \quad (1.85)$$

Autocovarianza:

$$C_k = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x}) \quad 0 \leq k \leq n \quad (1.86)$$

Donde:

\bar{x} Media de la serie residual.

En el cálculo usaremos los valores de la serie estandarizada

$$C_k = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{n-k} (z_t - \bar{z})(z_{t+k} - \bar{z}) \quad 0 \leq k \leq n \quad (1.87)$$

Proceso MA (1)

$$\sigma_\varepsilon^2 = \frac{C_0}{1 + \hat{\theta}_1^2} \quad (1.88)$$

$$\hat{\theta}_1^2 = - \frac{C_1}{\hat{\sigma}_\varepsilon^2} \quad (1.89)$$

Donde C_0, C_1 ; son la autocovarianza de la serie de residuales

Proceso MA (2)

$$\sigma_{\varepsilon}^2 = \frac{C_0}{1 + \hat{\theta}_1^2 + \hat{\theta}_2^2} \quad (1.90)$$

$$\hat{\theta}_2 = -\frac{C_2}{\hat{\sigma}_{\varepsilon}^2} \quad (1.91)$$

$$\hat{\theta}_1 = -\left(\frac{C_1}{\hat{\sigma}_{\varepsilon}^2} - \hat{\theta}_1 \hat{\theta}_2\right) \quad (1.92)$$

Donde C_0, C_1 y C_2 ; son la autocovarianza de la serie de residuales

Para generar muestra sintéticas por ejemplo con el ARMA (1,1):

$$z_t = \phi_1 z_{t-1} + \hat{\sigma}_{\varepsilon} \xi_t - \theta_1 \hat{\sigma}_{\varepsilon} \xi_{t-1} \quad (1.93)$$

1.6.4 Modelo autorregresivo de promedios móviles periódicos ARMA (p,q)

Para una serie:

$$Z_{v,\tau} = \frac{Y_{v,\tau} - \mu_{\tau}}{\sigma_{\tau}} \quad (1.94)$$

$$Z_{v,\tau} = \sum_{j=1}^p \phi_{j,\tau} Z_{v,\tau-j} - \sum_{i=0}^q \theta_{i,\tau} \varepsilon_{v,\tau-i} + \varepsilon_{v,\tau} \quad (1.95)$$

Donde:

σ_{τ} Desviación estándar periódica.

μ_{τ} Media periódica.

$\phi_{j,\tau}$ Coeficientes autorregresivos.

$\theta_{i,\tau}$ Coeficientes de promedios móviles.

ARMA (p,q) para coeficientes constantes

Se transforma, por ejemplo, en un ARMA (1,1)

$$z_t = \phi_1 z_{t-1} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} \quad (1.96)$$

$$z_t = \phi_1 z_{t-1} + \hat{\sigma}_{\varepsilon} \xi_t - \theta_1 \hat{\sigma}_{\varepsilon} \xi_{t-1} \quad (1.97)$$

Donde el subíndice:

$$t = (v-1)\omega + \tau \quad (1.98)$$

ARMA (p,q) para coeficientes periódicos

$$\hat{r}_{2,\tau} = \hat{r}_{1,\tau} \hat{\phi}_{1,\tau} \quad (1.99)$$

$$\hat{r}_{1,\tau} = \frac{(1 - \hat{\theta}_{1,\tau} \hat{\phi}_{1,\tau})(\hat{\phi}_{1,\tau} - \hat{\theta}_{1,\tau})}{1 + \hat{\theta}_{1,\tau}^2 - 2\hat{\phi}_{1,\tau} \hat{\theta}_{1,\tau}} \quad (1.100)$$

$\hat{r}_{2,\tau}$ y $\hat{r}_{1,\tau}$ se obtienen del correlograma periódico, ecuación 1.18, y se pueden estimar los valores de $\hat{\phi}_{1,\tau}$ y $\hat{\theta}_{1,\tau}$.

$$\hat{\sigma}_{\varepsilon,\tau}^2 = \frac{1 - \hat{\phi}_{1,\tau}}{1 + \hat{\theta}_{1,\tau}^2 - 2\hat{\phi}_{1,\tau} \hat{\theta}_{1,\tau}} \quad (1.101)$$

$$Z_{v,\tau} = \phi_{1,\tau} Z_{v,\tau-1} - \theta_{1,\tau} \varepsilon_{v,\tau-1} + \varepsilon_{v,\tau} \quad (1.102)$$

Para generar muestras sintéticas:

$$Z_{v,\tau} = \phi_{1,\tau} Z_{v,\tau-1} + \sigma_{\varepsilon,\tau} \xi_{v,\tau-1} - \theta_{1,\tau} \sigma_{\varepsilon,\tau} \xi_{v,\tau-1} \quad (1.103)$$

1.6.5 Modelos multivariados anuales, MAR (p)

MAR (1)

$$Z_t = A_1 Z_{t-1} + B \varepsilon_t \quad (1.104)$$

En series multivariadas se hace una estandarización completa.

$$Z = \frac{y - \bar{y}}{s_y} \quad (1.105)$$

Los parámetros se calculan:

$$\hat{A}_1 = \hat{M}_1 \hat{M}_0^{-1} \quad (1.106)$$

$$\hat{B} \hat{B}^T = \hat{M}_0 - \hat{A}_1 \hat{M}_1^T \quad (1.107)$$

MAR (2)

$$Z_t = A_1 Z_{t-1} + A_2 Z_{t-2} + B \varepsilon_t \quad (1.108)$$

$$\hat{A}_1 = [\hat{M}_1 - \hat{M}_2 \hat{M}_0^{-1} \hat{M}_1^T] [\hat{M}_0 - \hat{M}_1 \hat{M}_0^{-1} \hat{M}_1^T]^{-1} \quad (1.109)$$

$$\hat{A}_2 = [\hat{M}_2 - \hat{M}_1 \hat{M}_0^{-1} \hat{M}_1^T] [\hat{M}_0 - \hat{M}_1 \hat{M}_0^{-1} \hat{M}_1^T]^{-1} \quad (1.110)$$

$$\hat{B} \hat{B}^T = \hat{M}_0 - [\hat{A}_1 \hat{M}_1^T + \hat{A}_2 \hat{M}_2^T] \quad (1.111)$$

Donde:

$$\hat{M}_k = \begin{bmatrix} r_k^{11} & r_k^{12} & \dots & r_k^{1n} \\ r_k^{21} & r_k^{22} & \dots & r_k^{2n} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ r_k^{n1} & r_k^{n2} & \dots & r_k^{nn} \end{bmatrix} \quad (1.112)$$

$$r_k^{ij} = \frac{\sum_{t=1}^{N-k} (x_t^{(i)} - \bar{x}_t^{(i)})(x_{t+k}^{(j)} - \bar{x}_{t+k}^{(j)})}{\left[\sum_{t=1}^{N-k} (x_t^{(i)} - \bar{x}_t^{(i)})^2 \sum_{t=1}^{N-k} (x_{t+k}^{(j)} - \bar{x}_{t+k}^{(j)})^2 \right]^{1/2}} \quad (1.113)$$

\bar{x}_t^i = media de los primeros $N - k$ valores de la serie i .

\bar{x}_{t+k}^j = media de los últimos $N - k$ valores de la serie j .

Los elementos de la matriz B se obtienen al considerar una matriz triangular inferior, los elementos son obtenidos columna por columna.

$$b^{ij} = \frac{d^{ji}}{b^{ij}} \text{ para } j=1, i=1, \dots, n \quad (1.114)$$

$$b^{ij} = \left[d^{ij} - \sum_{k=1}^{j-1} (b^{jk})^2 \right]^{1/2} \text{ para } j=2, \dots, n \quad i=j \quad (1.115)$$

$$b^{ij} = \frac{\left[d^{ij} - \sum_{k=1}^{j-1} b^{jk} b^{ik} \right]}{b^{jj}} \text{ para } j=2, \dots, n-1 \quad i=j+1, \dots, n \quad (1.116)$$

Donde:

$$D = \hat{M}_0 - \hat{A}_1 \hat{M}_1^T \quad (1.117)$$

1.6.6 Modelos multivariados periódicos, MAR (p) periódicos

Para una serie:

$$Z_{v,\tau} = \frac{y_{v,\tau} - \mu_\tau}{\sigma_\tau} \quad (1.118)$$

MAR (p) para coeficientes constantes

Se convierte en un AR (1)

$$Z_t = A_1 Z_{t-1} + B \varepsilon_t \quad (1.119)$$

MAR (ρ) para coeficientes periódicos

$$Z_{v,\tau} = A_{1,\tau} Z_{v,\tau-1} + B_\tau \varepsilon_{v,\tau} \quad (1.120)$$

Para la serie con coeficientes periódicos:

$$\hat{A}_{1,\tau} = \hat{M}_{1,\tau} \hat{M}_{0,\tau-1}^{-1} \quad (1.121)$$

$$\hat{B}_\tau \hat{B}_\tau^T = \hat{M}_{0,\tau} - \hat{M}_{1,\tau} \hat{M}_{0,\tau-1}^{-1} \hat{M}_{1,\tau}^T \quad (1.122)$$

Las matrices se obtienen con:

$$\hat{M}_{k,\tau} = \begin{bmatrix} r_{k,\tau}^{11} & r_{k,\tau}^{12} & \dots & r_{k,\tau}^{1n} \\ r_{k,\tau}^{21} & r_{k,\tau}^{22} & \dots & r_{k,\tau}^{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ r_{k,\tau}^{n1} & r_{k,\tau}^{n2} & \dots & r_{k,\tau}^{nn} \end{bmatrix} \quad (1.123)$$

$$r_{k,\tau}^{i,j} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{v=1}^N (x_{v,\tau}^{(i)} - \bar{x}_\tau^{(i)}) (x_{v,\tau-k}^{(j)} - \bar{x}_{\tau-k}^{(j)})}{S_\tau^{(i)} S_{\tau-k}^{(j)}} \quad (1.124)$$

Donde:

$\bar{x}_\tau^{(i)}$ y $\bar{x}_{\tau-k}^{(j)}$ Son las medias periódicas en los tiempos τ y $\tau - k$.

$S_\tau^{(i)}$ y $S_{\tau-k}^{(j)}$ Son las desviaciones estándar en los tiempos τ y $\tau - k$

Cuando $\tau - k < 1$ se reemplazan los términos:

$$\frac{1}{N} \quad \text{por} \quad \frac{1}{N-1} \quad (1.125)$$

$$v = 1 \quad \text{por} \quad v = 2 \quad (1.126)$$

$$x_{v,\tau-k}^{(j)} \quad \text{por} \quad x_{v-1,\omega+\tau-k}^{(j)} \quad (1.127)$$

$$\bar{x}_{\tau-k}^{(j)} \quad \text{por} \quad \bar{x}_{\omega+\tau-k}^{(j)} \quad (1.128)$$

$$S_{\tau-k}^{(j)} \quad \text{por} \quad S_{\omega+\tau-k}^{(j)} \quad (1.129)$$

1.7 Modelos de desagregación

1.7.1 Modelo de desagregación temporal

$$Y = AX + B\varepsilon \quad (1.130)$$

Donde:

Y Series dependientes de X , serie mensual.

X Serie clave a ser desagregada, serie anual.

ε Serie aleatoria.

Considerando:

$$\hat{A} = S_{yx} S_{xx}^{-1} \quad (1.131)$$

$$\hat{B}\hat{B}^T = S_{yy} - S_{yx} S_{xx}^{-1} S_{xy} \quad (1.132)$$

1.7.2 Modelo de desagregación temporal extendido

$$Y = AX + B\varepsilon + CZ \quad (1.133)$$

Donde:

$$\hat{A} = (S_{yx} - S_{yz}S_{zz}^{-1}S_{zx})(S_{xx} - S_{xz}S_{zz}^{-1}S_{zx})^{-1} \quad (1.134)$$

$$\hat{C} = (S_{yz} - \hat{A}S_{zx})S_{zz}^{-1} \quad (1.135)$$

$$\hat{B}\hat{B}^T = S_{yy} - \hat{A}S_{xy} - \hat{C}S_{zy} \quad (1.136)$$

1.7.3 Modelo de desagregación espacial

Este modelo es similar al extendido pero en forma espacial:

$$Y = AX + B\varepsilon + C_z \quad (1.137)$$

Donde:

$$\hat{A} = [S_{yx} - S_{yy}(1)S_{yy}^{-1}S_{xy}^T(1)][S_{xx} - S_{xy}(1)S_{yy}^{-1}S_{xy}^T(1)]^{-1} \quad (1.138)$$

$$\hat{C} = [S_{yy}(1) - \hat{A}S_{xy}(1)]S_{yy}^{-1} \quad (1.139)$$

$$\hat{B}\hat{B}^T = S_{yy} - \hat{A}S_{xy} - \hat{C}S_{yy}^T(1) \quad (1.140)$$

Suponiendo 2 sitios y 3 periodos, las covarianzas se obtienen como:

$$S_{xx} = \frac{1}{N-1} \sum_{v=1}^N \begin{bmatrix} X_v^{(1)} \\ X_v^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_v^{(1)} & X_v^{(2)} \end{bmatrix} \quad (1.141)$$

$$S_{yx} = \frac{1}{N-1} \sum_{v=1}^N \begin{bmatrix} y_{v,1}^{(1)} \\ y_{v,2}^{(1)} \\ y_{v,3}^{(1)} \\ y_{v,1}^{(2)} \\ y_{v,2}^{(2)} \\ y_{v,3}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_v^{(1)} & X_v^{(2)} \end{bmatrix} \quad (1.142)$$

$$S_{yy} = \frac{1}{N-1} \sum_{v=1}^N \begin{bmatrix} y_{v,1}^{(1)} \\ y_{v,2}^{(1)} \\ y_{v,3}^{(1)} \\ y_{v,1}^{(2)} \\ y_{v,2}^{(2)} \\ y_{v,3}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{v,1}^{(1)} & y_{v,2}^{(1)} & y_{v,3}^{(1)} & y_{v,1}^{(2)} & y_{v,2}^{(2)} & y_{v,3}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (1.143)$$

$$Z_v = \begin{bmatrix} y_{v-1,2}^{(1)} \\ y_{v-1,3}^{(1)} \\ y_{v-1,2}^{(2)} \\ y_{v-1,3}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (1.144)$$

$$S_{zz} = \frac{1}{N-1} \sum_{v=1}^N \begin{bmatrix} y_{v-1,2}^{(1)} \\ y_{v-1,3}^{(1)} \\ y_{v-1,2}^{(2)} \\ y_{v-1,3}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{v-1,2}^{(1)} & y_{v-1,3}^{(1)} & y_{v-1,2}^{(2)} & y_{v-1,3}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (1.145)$$

$$S_{zx} = \frac{1}{N-1} \sum_{v=1}^N \begin{bmatrix} y_{v-1,2}^{(1)} \\ y_{v-1,3}^{(1)} \\ y_{v-1,2}^{(2)} \\ y_{v-1,3}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_v^{(1)} & X_v^{(2)} \end{bmatrix} \quad (1.146)$$

$$S_{zy} = \frac{1}{N-1} \sum_{v=1}^N \begin{bmatrix} y_{v-1,2}^{(1)} \\ y_{v-1,3}^{(1)} \\ y_{v-1,2}^{(2)} \\ y_{v-1,3}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{v,1}^{(1)} & y_{v,2}^{(1)} & y_{v,3}^{(1)} & y_{v,1}^{(2)} & y_{v,2}^{(2)} & y_{v,3}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (1.147)$$

1.8 Pronóstico

1.8.1 Pronóstico de series anuales

Los modelos estocásticos también se pueden emplear con propósitos de operación a corto plazo, para ello se utilizan como pronóstico.

Modelo AR (1)

$$Z_t^{(1)} = \phi_1 Z_{t-1} \quad (1.148)$$

$Z_t^{(1)}$ Variable estandarizada de un paso adelante.

Modelo ARMA (1,1)

$$Z_t^{(1)} = \phi_1 Z_{t-1} - \theta_1 \varepsilon_t \quad (1.149)$$

Por ejemplo, para pronosticar lo que sucederá en el año 1966

$$Z_{1965}^{(1)} = Z_{1966} = \phi_1 Z_{1965} - \theta_1 \varepsilon_{1965}$$

1.8.2 Pronóstico de series periódicas

Modelos ARIMA Multiplicativos (p,d,q)x(P,D,Q)

El modelo estacional ARIMA (P,1,Q)_w se obtiene ajustando un modelo a las series diferenciadas estacionales donde:

P= componente autorregresiva estacional

Q= componente de promedio móvil estacional

w= componente periódica

$$U_t = X_t - X_{t-w} \quad (1.150)$$

Un ARIMA (0,1,Q)_w o IMA (1,Q)_w es:

$$U_t = \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-w} - \theta_2 \varepsilon_{t-2w} - \dots - \theta_Q \varepsilon_{t-Qw} \quad (1.151)$$

Un ARIMA (P,1,0)_w es

$$U_t = \phi_1 u_{t-w} + \phi_2 u_{t-2w} + \dots + \phi_p u_t - P_w + \varepsilon_t \quad (1.152)$$

La forma general de los modelos ARIMA Multiplicativos es:

$$\begin{aligned}
 & (1 - \phi_1 B^w - \phi_2 B^{2w} - \dots - \phi_p B^{pw})(1 - \phi_1 B^1 - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p) \\
 & (1 - B^w)^D (1 - B)^d X_t = \\
 & (1 - \theta_1 B^w - \theta_2 B^{2w} - \dots - \theta_p B^{pw})(1 - \theta_1 B^1 - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_p B^p) \varepsilon_t
 \end{aligned} \tag{1.153}$$

Que en forma condensada es:

$$\phi(B^w)\phi(B)(1 - B^w)^D (1 - B)^d X_t = \theta(B^w)\theta(B)\varepsilon_t \tag{1.154}$$

Donde:

$$BX_t = X_{t-1} \tag{1.155}$$

B = Operador hacia atrás

$$B^n X_t = X_{t-n} \tag{1.156}$$

Primera diferencia

$$(1 - B)X_t = X_t - X_{t-1} \tag{1.157}$$

Segunda diferencia

$$(1 - B)^2 X_t = X_t - 2X_{t-1} - X_{t-2} \tag{1.158}$$

d-ésima diferencia

$$(1 - B)^d X_d \tag{1.159}$$

Primera diferencia estacional de periodo 12

$$(1 - B^{12})X_t = X_t - X_{t-12} \tag{1.160}$$

Segunda diferencia estacional del periodo 12

$$(1 - B^{12})^2 X_t = X_t - 2X_{t-12} + X_{t-24} \tag{1.161}$$

D-ésima diferencia estacional de periodo 12

$$(1 - B^w)^D X_t \tag{1.162}$$

$$\phi(B)X_t = (1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p)X_t = -\sum_{i=0}^p \phi_i X_{t-i} \tag{1.163}$$

Operador autorregresivo

$$\theta_0 = -1 \tag{1.164}$$

Por ejemplo un modelo ARIMA (2,0,0)x(0,0,1)₁₂, se escribe como:

$$(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2)(1 - B^{12})Y_t = (1 - \theta_1 B^{12})\varepsilon_t \tag{1.165}$$

Que al usar la notación, equivale a:

$$Y_t = Y_{t-12} + \phi_1 Y_{t-1} + \phi_2 Y_{t-2} - \phi_1 Y_{t-13} - \phi_2 Y_{t-14} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-12} \quad (1.166)$$

Los residuales del modelo son:

$$\varepsilon_t = Y_t - Y_{t-12} - \phi_1 Y_{t-1} - \phi_2 Y_{t-2} + \phi_1 Y_{t-13} + \phi_2 Y_{t-14} + \theta_1 \varepsilon_{t-12} \quad (1.167)$$

Los parámetros se obtienen al minimizar, la suma de los errores al cuadrado

$$\min \sum_{i=1}^n e_1^2 \quad (1.168)$$

Donde:

$$e_i = \varepsilon_t$$

Y un modelo ARIMA (0,1,1)x(0,1,1)₁₂

$$(1 - B)(1 - B^{12})Y_t = (1 - \theta_1 B)(1 - \theta_1 B^{12})\varepsilon_t \quad (1.169)$$

$$Y_t = Y_{t-1} + Y_{t-12} - Y_{t-13} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_1 \varepsilon_{t-12} + \theta_1 \theta_1 \varepsilon_{t-13} \quad (1.170)$$

El modelo ARIMA multiplicativo no sirve para generar muestras sintéticas, sólo sirve para pronóstico estocástico, se usan las series periódicas, y representa la serie logarítmica de la serie original.

2 Análisis de Estacionariedad de las Series de Tiempo

Antes de llevar a cabo cualquier procedimiento estadístico, resulta necesario verificar la calidad de la información con la que se cuenta ya que de otra manera se obtendrán resultados erróneos que aumentarán la incertidumbre del problema. Los modelos de generación sintética y predicción requieren que las series sean homogéneas e independientes, por lo cual es necesario aplicarles distintas pruebas que nos lleven a verificar el cumplimiento de estos requisitos.

2.1 Análisis de tendencias

La evidencia científica muestra que el cambio climático ha empezado a manifestarse por sí mismo globalmente, en la forma de incrementos o decrementos en las condiciones climatológicas y los efectos de estas como precipitación, temperatura, etc. (Karmeshu, 2012). Además cambios graduales en la cuenca como uso de suelo o deforestación, pueden inducir un incremento o decremento en la serie. Por todo lo anterior, el análisis de la tendencia de una serie de tiempo es de vital importancia en el diseño de un aprovechamiento.

El planteamiento de políticas de operación de los aprovechamientos sin tomar en cuenta los posibles cambios (incrementos o decrementos) en las series de tiempo puede tener graves consecuencias, por tal motivo es necesario aplicar pruebas estadísticas en la etapa de diseño y cada determinado tiempo, que nos indiquen si la serie de tiempo presenta o no una tendencia, de tal forma que se puedan emprender las acciones necesarias antes de que sea demasiado tarde.

Al momento de aplicar las pruebas es necesario considerar la longitud y calidad de la serie, ya que en muchas ocasiones el uso de series cortas o que no se consideran en toda su extensión puede llevar a mal interpretar los resultados de una prueba de tendencia, en general se recomienda utilizar muestras con periodos de registro de más de 60 años para llegar a un buen resultado, en caso contrario el resultado constituye únicamente un indicador, sin embargo, la prueba puede ser considerada como no concluyente.

La tendencia en variables climatológicas se define como la proporción del cambio que sufre la cantidad a lo largo del periodo dividido por el valor inicial de la cantidad, y generalmente se expresa como un porcentaje o una fracción con tres variantes: negativa, positiva y nula.

Las pruebas aplicadas en el presente trabajo para la evaluación de la tendencia de la serie de tiempo fueron la de Mann-Kendall y la de Spearman, que en general, son las más comunes. Ambas pruebas se aplicaron para un nivel de significancia $\alpha=0.05$.

2.1.1 Mann-Kendall

Es una de las pruebas más utilizadas en el análisis de las tendencias de las series de tiempo y consiste en un test no paramétrico, estadísticamente basado en el ranking o número de orden de 2 variables, una el evento y la otra el tiempo. Cada valor de los datos se compara con todos los valores siguientes. La prueba tiene dos ventajas, la primera es que al ser no paramétrica, no requiere de que la información esté normalmente distribuida; la segunda es que tiene baja sensibilidad a los cambios abruptos debidos a series no estacionarias (Karmeshu, 2012).

El estadístico “S” de la prueba de Mann – Kendall se obtiene como:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{signo}(x_j - x_k) \quad (2.1)$$

Donde x_j y x_k son los valores anuales en los años j y k con $j > k$; y

$$\text{signo}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{si } x_j - x_k > 0 \\ 0 & \text{si } x_j - x_k = 0 \\ -1 & \text{si } x_j - x_k < 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

El valor esperado para el estadístico S es que sea igual a cero. Si esto sucede se acepta la hipótesis nula a probar, es decir, la serie no presenta tendencia. Además el estadístico S nos proporciona información sobre si la tendencia es positiva o negativa.

$S > 0$ Tendencia creciente (positiva)

$S < 0$ Tendencia decreciente (negativa)

La hipótesis nula se rechaza a nivel de significancia α si $|Z_s| > Z_{crítico}$, donde $Z_{crítico}$ es el valor de la distribución normal estándar con una probabilidad de excedencia de $\alpha/2$. El valor de prueba se obtiene como:

$$Z_s = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{VAR(S)}} & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{VAR(S)}} & \text{si } S < 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

Para muestras con una longitud de registro mayor a 10 años, se puede considerar:

$$VAR(S) = \frac{1}{18} [n(n - 1)(2n + 5) - \sum_{p=1}^g t_p(t_p - 1)(2t_p + 5)] \quad (2.4)$$

n = número total de datos.

g = número de grupos vinculados, un grupo vinculado es un conjunto de datos muestra que tiene el mismo valor.

t_0 = número de puntos de datos en el grupo p .

En el análisis de las series de tiempo es esencial considerar la autocorrelación, antes de probar las tendencias, ya que esta incrementa las probabilidades de detectar tendencias significativas a pesar de que estas no existan (Karmeshu, 2012). Para corregir la influencia de la autocorrelación significativa existen dos posibles modificaciones en la aplicación de la prueba, una que consiste en una corrección de la varianza del estadístico S y la otra conocida como preblanqueo elimina la componente autorregresiva de la serie de tiempo.

Corrección en la Varianza

Esta corrección consiste en afectar la varianza por el factor N/N_s . Es decir:

$$VAR^*(S) = [VAR(S)] \frac{N}{N_s} \quad (2.5)$$

Donde

$$\frac{N}{N_s} = 1 + \frac{2}{N(N - 1)(N - 2)} - \sum_{i=1}^{N-1} (N - i)(N - i - 1)(N - i - 2)\rho_s(i) \quad (2.6)$$

N = número total de observaciones

$\rho_s(i)$ = valores significativos de la función de auto correlación de la serie de los órdenes de las observaciones calculadas después de remover la tendencia por un método robusto.

Una forma de remover la tendencia, es asumir que es lineal por lo que constituye la pendiente de una recta, de la siguiente manera:

$$T_t = X_t - bt \quad (2.7)$$

Preblanqueo

Esta técnica propone remover de la serie estandarizada la tendencia, estimada por un método robusto antes de calcular el coeficiente de autocorrelación de retardo 1 (r_1). Esto resuelve el problema de la influencia de la tendencia en la estimación del coeficiente de autocorrelación, mientras que la remoción de la tendencia no afecta al proceso autorregresivo subyacente.

De igual manera que en el caso anterior, se asume que la tendencia es lineal y se elimina de la serie:

$$Y_t = X_t - T_t = X_t - bt \quad (2.8)$$

Se estima el coeficiente de autocorrelación r_1 de la serie Y_t y si este no es significativamente distinto de cero la serie se considera independiente y la prueba de Mann-Kendall se aplica a la serie original. Si r_1 es significativamente distinto de cero. La serie se pre – blanquea a fin de remover el proceso autorregresivo de primer orden AR(1) como:

$$Y'_t = Y_t - r_1 Y_{t-1} \quad (2.9)$$

La tendencia estimada y la serie Y'_t compuesta por residuos que deben ser independientes se combinan como:

$$Y''_t = Y'_t - T_t \quad (2.10)$$

Y la prueba de Mann – Kendall se aplica a la serie Y''_t evitándose de esta manera el efecto de la autocorrelación serial.

2.1.2 Prueba de Spearman

Esta prueba se basa en el rango para la correlación entre dos variables que se pueden utilizar para comprobar la correlación entre el tiempo y la serie de datos.

El coeficiente de correlación por datos es:

$$R_s = 1 - \frac{6 \sum_{j=1}^N (r_{xi} - r_{yi})^2}{n^3 - n} \quad (2.11)$$

Para tamaños de muestra mayor que diez se puede emplear el estadístico de prueba:

$$t_d = \frac{R_s}{\sqrt{\frac{1-R_s}{n-2}}} \quad (2.12)$$

Donde t_d sigue la distribución t con $n - 2$ grados de libertad

La hipótesis nula es: la serie no presenta tendencia, y esta se acepta si $|t_d| < t_{crítico}$, en caso contrario se acepta la hipótesis alterna que es: la serie presenta tendencia.

Además esta prueba permite evaluar la tendencia de la serie mediante el coeficiente de correlación por datos de la siguiente manera:

$R_s > 0$ Tendencia creciente

$R_s < 0$ Tendencia decreciente

2.2 Análisis de homogeneidad

En términos estadísticos la homogeneidad de una serie de tiempo implica que la información pertenece a una sola población y por lo tanto tiene un valor medio que se mantiene invariante en el tiempo, esta serie se puede definir como homogénea si sus variaciones son causadas por modificaciones temporales de las condiciones climáticas (Saifuddin, 2010). Muchos factores pueden afectar la calidad y confiabilidad de la información obtenida de las estaciones climatológicas, principalmente factores relacionados con el tiempo de operación como cambios en el personal que efectúa las mediciones, cambios en el equipo, en la ubicación de la estación, etc. Todos estos factores pueden hacer que una serie sea no homogénea, por tal motivo de forma periódica la calidad de las series debe ser probada estadísticamente (Khadr, 2011).

Además de las razones mencionadas en el párrafo anterior, cambios en el patrón del clima o las actividades humanas como deforestación apertura de nuevas áreas al cultivo, rectificación de cauces, construcción de embalses, reforestación, etc. pueden producir anomalías en la serie de tiempo.

La no homogeneidad puede ser detectada de dos formas, mediante pruebas de homogeneidad absoluta y relativas, las primeras se utilizan cuando dos series no están lo

suficientemente relacionadas y dependen únicamente de la información de la estación analizada; las segundas consisten en probar la homogeneidad de la estación base contra una estación con la que este altamente correlacionada y que sea supuestamente homogénea (Sahin & Cigizoglu, 2010).

A continuación se presentan ocho pruebas absolutas, para probar la homogeneidad de una serie de tiempo.

2.2.1 Prueba t de Student

Cuando la causa probable de la pérdida de la homogeneidad de la serie sea un cambio abrupto en la media, la prueba del estadístico t es muy útil.

Si se considera una serie de tamaño n , la cual se divide en dos conjuntos de tamaño

$n_1 = n_2 = \frac{n}{2}$ entonces, el estadístico de prueba se define con la expresión:

$$t_d = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\left[\frac{n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{1/2}} \quad (2.13)$$

Donde:

\bar{x}_1, s_1^2 Son la media y la varianza de la primera parte del registro de tamaño n_1 .

\bar{x}_2, s_2^2 Son la media y la varianza de la segunda parte del registro de tamaño n_2 .

El valor absoluto de t_d se compra con el valor de la distribución t de Student de dos colas, y con $\nu = n_1 + n_2 - 2$ grados de libertad, para un nivel de confianza $\alpha = 0.05$.

Hipótesis Nula: Si y sólo si,

$$t_d > t_{crítico}$$

Se concluye que la diferencia entre las medias es evidencia de inconsistencia y la serie se considera No Homogénea.

2.2.2 Prueba de Cramer

La prueba compara el valor de la media, \bar{x} , del registro total con cada una de las medidas de los bloques elegidos \bar{x}_{60} y \bar{x}_{30} . Los cuales representan el 60% de los últimos valores y 30% de los últimos valores.

Para que se considere la serie analizada como estacionaria en la media, se deberá cumplir que no existe una diferencia significativa entre las medias de los bloques.

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad (2.14)$$

$$S_x = \left[\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2} \quad (2.15)$$

$$\bar{x}_{60} = \sum_{i=1}^{n_{60}} \frac{x_k}{60}; \quad \bar{x}_{30} = \sum_{i=1}^{n_{30}} \frac{x_k}{30} \quad (2.16)$$

$$\tau_{60} = \frac{\bar{x}_{60} - \bar{x}}{S_x}; \quad \tau_{30} = \frac{\bar{x}_{30} - \bar{x}}{S_x} \quad (2.17)$$

$$t_w = \left\{ \frac{n_w(n-2)}{n - n_w [1 + (\tau_w)^2]} \right\}^{1/2} |\tau_w| \quad \text{para } w=60 \text{ y } 30 \quad (2.18)$$

El estadístico t_w tiene distribución t de Student de dos colas con $\nu = n_1 + n_2 - 2$ grados de libertad y para un nivel de confianza $\alpha = 0.05$.

Hipótesis Nula: Si y sólo si, el valor absoluto de t_w , para $w=60$ y $w=30$, es mayor que el de la distribución t de Student, se concluye que la diferencia entre las medias es evidencia de inconsistencia y por tanto la serie x_i se considera no homogénea. Si y sólo si:

$$|t_w| > t_{crítico} \quad \text{La serie es No Homogénea}$$

2.2.3 Prueba de Helmert

Esta prueba es no paramétrica y consiste en analizar el signo de las desviaciones de cada evento Q_j^i de la serie j para $j = 1, 2, 3, \dots, n_j$ con respecto al valor medio \bar{Q}_j . Si una desviación de un cierto signo es seguida de otra del mismo signo, entonces se forma una secuencia "S", de lo contrario se considera como un cambio "C".

La serie se considera homogénea si:

$$-\sqrt{n_j - 1} \leq (NS - NC) \leq \sqrt{n_j - 1} \quad (2.19)$$

Donde:

n_j = Tamaño de la muestra

NS = número de secuencias

NC = número de cambios.

2.2.4 Prueba de Pettitt

Es una prueba no paramétrica basada en rangos, que se emplea para identificar un punto de cambio en una serie de tiempo. Una vez que se detecta el punto de cambio la serie se divide en 2 intervalos para determinar su tendencia. Las 2 muestras $(Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_t)$ y $(Q_{t+1}, Q_{t+2}, Q_{t+3}, \dots, Q_T)$ vienen de la misma población.

La prueba estadística $U_{t,N}$ está dada por:

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N \text{signo}(Q_i - Q_j) \quad (2.20)$$

La hipótesis nula de la prueba denota la ruptura en la serie para:

$$\begin{aligned} \text{signo}(Q_i - Q_j) &= 1 && \text{Si } Q > 0 \\ &= 0 && \text{Si } Q = 0 \\ &= -1 && \text{Si } Q < 0 \end{aligned} \quad (2.21)$$

Sea k_n la variable definida por el máximo valor absoluto del estadístico $U_{t,N}$ para t que varía de 1 hasta $N-1$.

Si k designa el valor de k_n tomado de la serie analizada con la hipótesis nula, la probabilidad de excedencia del valor k estará dada:

$$\text{prob}(k_n > k) \approx 2 \exp\left(\frac{-6k^2}{N^3 + N^2}\right) \quad (2.22)$$

Para un riesgo α de primer orden.

Si $prob(k_n > k)$ es inferior, la hipótesis nula se rechaza.

El punto de cambio más significativo es donde $|U_{t,N}|$ es el máximo de k_n .

2.2.5 Prueba de Homogeneidad Normal Estándar

Es una prueba paramétrica que asume como hipótesis nula que las series son independientes e idénticamente distribuidas (homogéneas). La hipótesis alterna considera que hay una fecha de cambio en la media de los datos.

Sea \bar{Q} la media de la serie y Q_j la serie por examinar.

La prueba es:

$$T(k) = k\bar{Z}_1^2 + (n - k)\bar{Z}_2^2 \text{ para } k = 1, \dots, n \quad (2.23)$$

Donde:

$$\bar{Z}_1 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{Q_i - \bar{Q}}{s} \quad (2.24)$$

$$\bar{Z}_2 = \frac{1}{n - k} \sum_{i=k+1}^n \frac{Q_i - \bar{Q}}{s} \quad (2.25)$$

La media de los primeros k años y los últimos $n - k$ años del registro se comparan. $T(k)$ alcanza un máximo cuando hay un cambio localizado en el año k . La distribución de $T(k)$ de la serie se observa al graficar los resultados de cada año. El estadístico de prueba T_0 se define como:

$$T_0 = \text{máx}T(k) \quad 1 \leq k \leq n \quad (2.26)$$

Si T_0 es superior al valor crítico la hipótesis nula se rechaza.

2.2.6 Estadístico de Buishand

Es una prueba de origen Bayesiano y propone detectar cambios en la media de la serie

$$x_i = \begin{cases} \mu + \varepsilon_i & i = 1, \dots, m \\ \mu + \Delta + \varepsilon_i & i = m + 1, \dots, n \end{cases} \quad (2.27)$$

ε_i son variables aleatorias con media cero y varianza σ^2 . El punto de ruptura m y los parámetros μ y Δ . Son valores desconocidos. Sea la variable:

$$S_{\gamma}^* = 0 \quad (2.28)$$

$$S_k^* = \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x}) \text{ para } k = 1, \dots, N \quad (2.29)$$

Donde:

\bar{x} es la media de los valores x_1, x_2, \dots, x_n

S_k^* = es tal que

$$E(S_k^*) = -k(N-m)N^{-1}\Delta \quad \text{para } k = 0, \dots, m \quad (2.30)$$

$$E(S_k^*) = -m(N-k)N^{-1}\Delta \quad \text{para } k = m+1, \dots, N \quad (2.31)$$

$$\text{Var}(S_k^*) = k(N-k)N^{-1}\sigma^2 \quad \text{para } k = 0, \dots, N \quad (2.32)$$

Se supone una distribución a priori uniforme para la posición del punto de ruptura m . El estadístico B de "Buishand", son propuestos a partir de un proceso de simulación de Monte Carlo.

2.2.7 Prueba de Von Newman

La relación de Von Newman se define como:

$$N = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (Q_i - Q_{i+1})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (2.33)$$

Si la muestra tiene un cambio entonces el valor de N tiende a ser menor q el valor esperado $E[N]$. Si la muestra tiene variaciones rápidas en la media, entonces el valor de $N > 2$. La prueba no da información sobre el punto de quiebre.

2.2.8 Prueba de Fisher

Esta es una prueba no paramétrica que relaciona la varianza de los subconjuntos (de longitud similar y sin presentar traslape) de la serie completa.

Esta prueba mide la estabilidad de la varianza a pesar de que los datos no se apeguen a la distribución normal.

La hipótesis nula es: "La varianza de los subconjuntos son iguales":

$$F_t = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad (2.34)$$

Donde:

$$S = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^w (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.35)$$

w para cada subconjunto.

F_t se compara con la distribución F de Fisher para $\nu_1 = n_1 - 2$ y $\nu_2 = n - 2$ grados de libertad.

Si $F_t > F_{tablas}$ la serie es no homogénea en la varianza.

De todas las pruebas anteriores la prueba de homogeneidad normal estándar tiende a detectar el punto de cambio cerca del comienzo o al final de una serie. En tanto que las pruebas de Buishand y Pettit lo son para la parte media de la serie. La prueba de Von Neumann solo evalúa la aleatoriedad de la serie pero no informa sobre el año de ruptura.

3 Aspectos de Irrigación en Zonas Agrícolas

La mayor parte del agua utilizada en los distritos de riego es para satisfacer las demandas de los cultivos, de tal forma que su desarrollo sea el adecuado. Puesto que el requerimiento de agua es igual a la evapotranspiración de los cultivos, a continuación se presentan algunas definiciones relacionadas con este concepto.

3.1 Evapotranspiración

Se conoce como evapotranspiración (ET) la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo (Allen, Pererira, Raes, & Smith, 2006).

3.1.1 Evaporación

La evaporación es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua y se retira de la superficie evaporante, es decir, de las superficies de lagos, ríos, caminos, suelos y la vegetación mojada (Allen et al., 2006).

Para cambiar el estado de las moléculas de líquido a vapor se requiere energía, la radiación solar y la temperatura ambiente del aire, proporcionan esta energía, mientras que el impulso mediante el cual se retira el vapor de agua es proporcionado por la diferencia entre la presión del vapor de agua en la superficie evaporante y la presión de vapor de agua de la atmósfera. Además, el reemplazo de aire saturado por un aire más seco depende en gran medida de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento son parámetros climatológicos a considerar al evaluar la evaporación (Allen et al., 2006).

Cuando la superficie evaporante es la superficie del suelo, el grado de cobertura del suelo por parte del cultivo y la cantidad de agua disponible en la superficie son otros factores que afectan el proceso de evaporación (Allen et al., 2006).

3.1.2 Transpiración

La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmósfera. Los cultivos pierden agua predominantemente a través de los estomas, que son pequeñas aberturas en la hoja de la planta por las que atraviesan los gases y el vapor de agua de la planta hacia la atmósfera. Casi toda el agua absorbida del suelo se pierde por transpiración y solamente una pequeña fracción se convierte en parte de los tejidos vegetales (Allen et al., 2006).

Al igual que la evaporación directa, la transpiración depende del aporte de energía, del gradiente de presión del vapor y de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y el viento también deben ser considerados en su determinación. El contenido de agua del suelo, la capacidad del suelo de conducir el agua a las raíces, las características de los cultivos, el medio donde se produce y las prácticas agrícolas, también son factores que determinan la tasa de transpiración. (Allen et al., 2006)

3.1.3 Cálculo de la Evapotranspiración

El procedimiento para obtener una estimación del valor de la evapotranspiración que ocurre en una región agrícola parte de dos conceptos básicos: la evapotranspiración de referencia (ET_o) y la Evapotranspiración del Cultivo (ET_c).

Evapotranspiración de Referencia (ET_o)

La evapotranspiración de referencia es una función de la energía radiante neta que recibe un cultivo de referencia, por lo que su estimación se basa en algunos factores climatológicos que también varían en función de dicha energía (Palacios Vélez, 1981). De acuerdo con la FAO (Allen et al., 2006), la superficie de referencia corresponde a un cultivo hipotético de pasto con características específicas.

En pocas palabras, evapotranspiración de referencia, también denominada por algunos autores como evapotranspiración potencial, se refiere a la cantidad de agua que se podría evapotranspirar por parte de una superficie de suelo cubierta por el cultivo de referencia ante las condiciones ideales de suministro de agua, y es una medida para estimar la capacidad evapotranspirante de las variables climáticas que actúan en una determinada región.

Existen diversos métodos y fórmulas empíricas para llevar a cabo la estimación de la evapotranspiración de referencia, entre ellos el considerado como el estándar a nivel internacional es el propuesto por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), y que es conocido como el método FAO de Penman-Monteith.

El método se originó en un panel de expertos e investigadores en riego organizado en mayo de 1990 donde se revisaron las metodologías previamente propuestas para el cálculo de los requerimientos de agua de los cultivos, y finalmente, se adoptó como nuevo

método estandarizado, el método combinado de Penman-Monteith; este busca incorporar todas las variables climáticas que intervienen en el proceso de evapotranspiración y cuenta con procedimientos de cálculo para realizar la estimación bajo casi cualquier circunstancia, por ejemplo, en caso de que no exista registro de algunas de las variables requeridas por la ecuación (Allen et al., 2006).

La ecuación FAO de Penman-Monteith es:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)} \quad (3.1)$$

Donde:

ET_0 – Evapotranspiración de referencia (mm/día)	; u_2 – Velocidad del viento a 2 m de altura (m/s)
R_n - Radiación neta en la superficie del cultivo (MJ/m ² día)	; e_s – Presión de vapor de saturación (kPa)
G - Es el flujo del calor en el suelo (MJ/m ² día)	; e_a – Presión real de vapor (kPa)
T – Temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)	; $(e_s - e_a)$ - Déficit de presión de vapor (kPa)
γ – Constante psicométrica (kPa/°C)	; Δ – pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/°C)

Evapotranspiración del Cultivo (ET_c)

La evapotranspiración de un cultivo será diferente a la del cultivo de referencia (ET_0) en la medida en que sus características de cobertura del suelo, propiedades de la vegetación y resistencia aerodinámica difieran de las correspondientes al pasto. Los efectos de las características que distinguen al cultivo del pasto están incorporadas en el coeficiente del cultivo (K_c) que integra los efectos combinados de la evaporación del suelo y la transpiración del cultivo; estas características son: la altura del cultivo; la reflectancia de la superficie, que depende del área cubierta por vegetación y afecta a la radiación; la resistencia del cultivo a la transferencia del vapor de agua, y la evaporación que ocurre en la parte expuesta del suelo (Allen et al., 2006).

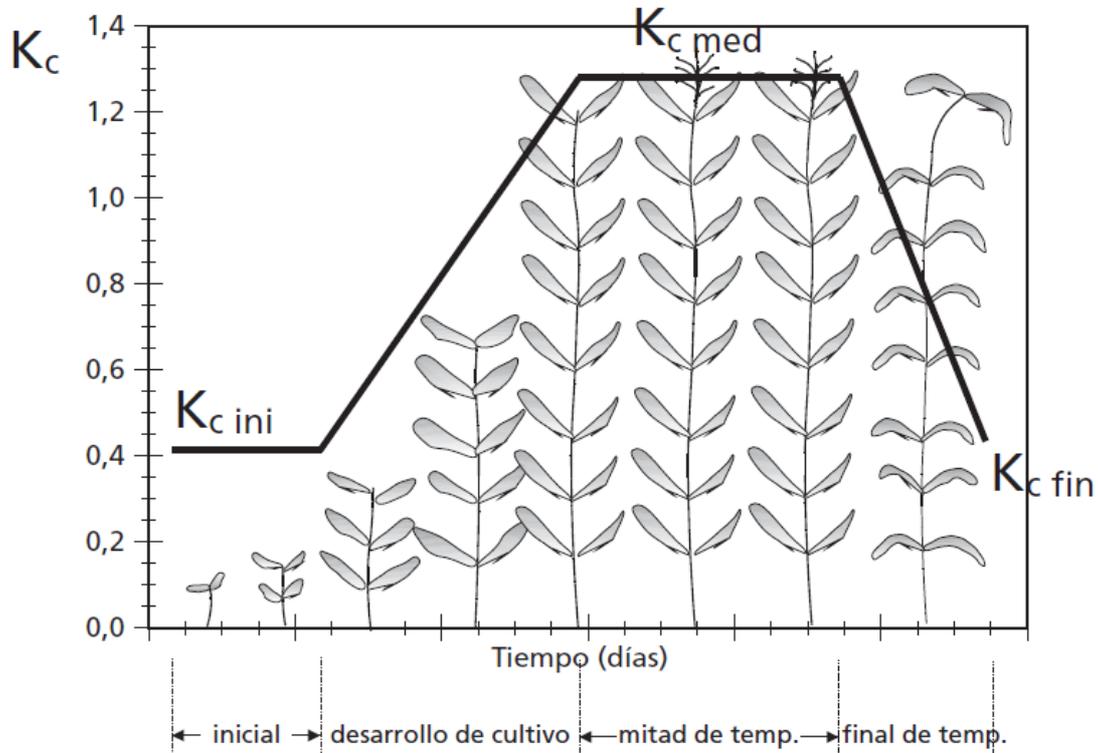


Fig. 3.1 Variación del K_c con el desarrollo del cultivo. Fuente: Allen, et al., 2006

El valor de K_c varía principalmente en función de las características particulares de desarrollo del cultivo, cambiando solo en una pequeña proporción en función del clima, esto permite la transferencia de valores estándar del coeficiente del cultivo entre distintas áreas geográficas (Allen et al., 2006).

Las principales etapas de desarrollo del cultivo son: emergencia, desarrollo, floración (mitad de temporada) y madurez (final de temporada).

En la metodología del coeficiente del cultivo, la evapotranspiración real del cultivo se calcula multiplicando ET_0 por K_c :

$$ET_c = K_c ET_0 \quad (3.2)$$

Donde,

ET_c – Evapotranspiración del cultivo (mm/día)

K_c – Coeficiente del cultivo (adimensional)

ET_0 – Evapotranspiración del cultivo de referencia (mm/día)

El procedimiento para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo mencionado en la referencia (Allen et al., 2006) es el siguiente:

1. Identificar las etapas de desarrollo del cultivo, determinando la duración de cada etapa y seleccionando los valores correspondientes de K_c .
2. Ajustar los valores de K_c seleccionados según la frecuencia de humedecimiento o las condiciones climáticas durante cada etapa.
3. Construir la curva del coeficiente del cultivo, que permite la determinación de K_c para cualquier etapa durante el período de desarrollo.
4. Calcular ET_c como el producto de ET_o y K_c .

Cabe señalar que el K_c , se refiere a un cultivo exento de enfermedades, con buena fertilización y que se desarrolla en parcelas amplias bajo condiciones óptimas de suelo y agua (Allen et al., 2006) y es el que generalmente se utiliza en la planeación de zonas agrícolas. Para casos específicos en los que se requiera mayor precisión se puede obtener un coeficiente del cultivo ajustado a condiciones no estándar, sin embargo, su aplicación queda fuera de los alcances de este trabajo.

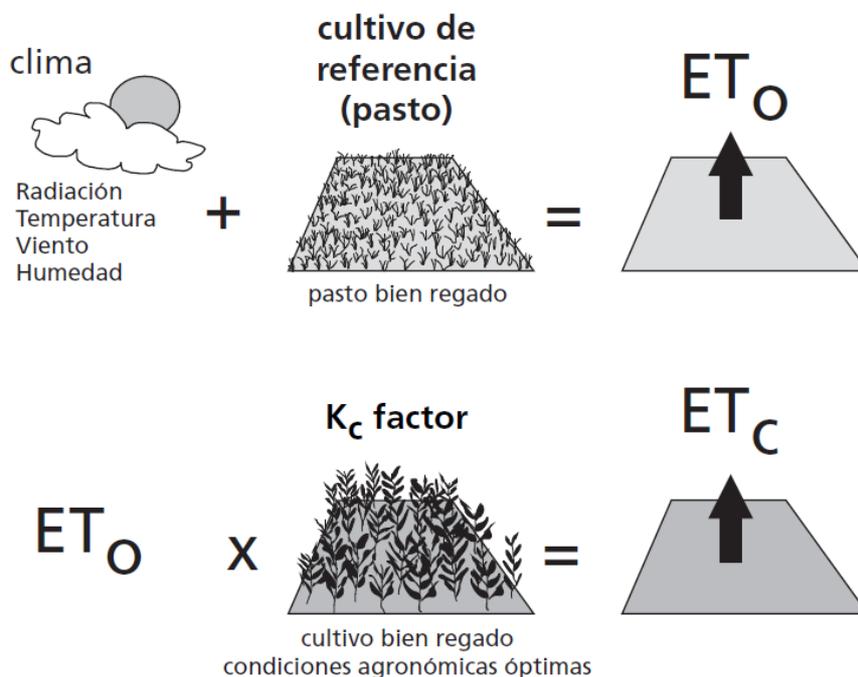


Fig. 3.2 Evapotranspiración de Referencia y del Cultivo. Fuente: Allen, et al., 2006

En la literatura se presentan distintos métodos para el cálculo de las etapas de desarrollo de los cultivos, entre ellos el de grados día, días después de la siembra y porcentaje de

desarrollo fenológico (Íñiguez Covarrubias, Ojeda Bustamante, & Rojano Aguilar, 2011); asimismo, existen tablas de duración y valores de K_c para distintos tipos de clima y diferentes localidades como los que se presentan en (Allen et al., 2006).

3.1.4 Requerimiento de Agua del Cultivo (RAC)

El requerimiento de agua que del cultivo nos indica la cantidad de agua que se le debe suministrar en cada etapa de su crecimiento para que su desarrollo se de en condiciones normales y sirve para calcular las láminas y fechas de los riegos. Responde a la diferencia entre la lámina de agua que se evapotranspira y la lámina de precipitación efectiva en el sitio.

$$RAC = ET_c - Hp_e \quad (3.3)$$

Donde

RAC – Requerimiento de agua [mm]; Hp_e – Lámina de precipitación efectiva [mm]

La precipitación efectiva puede ser calculada a partir de la ecuación desarrollada por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (Swennenhuis, 2009):

$$Hp_e = \frac{Hp * (125 - 0.2Hp)}{125} \text{ si } Hp \leq 250 \text{ mm} \quad (3.4)$$

$$Hp_e = 125 + 0.1Hp \text{ si } Hp > 250 \text{ mm} \quad (3.5)$$

Donde:

Hp – Lámina de precipitación total [mm]

Hp_e – Lámina de precipitación efectiva [mm]

3.2 Eficiencia de riego

Otro concepto fundamental en el riego de zonas agrícolas es el denominado eficiencia de riego, y consiste en la relación existente entre el volumen de agua demandado a un almacenamiento o el aforado en algún punto de control dentro del distrito de riego con respecto al que es utilizado por los cultivos.

Son muchos los factores que influyen para que la cantidad de agua extraída desde un almacenamiento no sea la misma que la que el cultivo utiliza para su desarrollo, entre ellos los más importantes son: las pérdidas por conducción a través de las corrientes y canales del distrito y las pérdidas por aplicación del riego.

Las pérdidas por conducción, como su nombre lo indica se originan durante el traslado del agua desde la fuente de abastecimiento hasta la obra de toma de la parcela y principalmente son generadas por evaporación e infiltración del líquido a través de las paredes del canal, sobre todo si estas no se encuentran revestidas, por lo tanto entre mayor sea la distancia recorrida por el agua para llegar a la parcela mayor será el volumen de agua perdido por este efecto.

En la práctica, las pérdidas por conducción suelen estimarse como la razón de cambio entre los aforos realizados en el punto de control de la obra de toma de la fuente de abastecimiento y en el punto de control de la obra de toma parcelaria. Las principales acciones emprendidas para reducirlas son el revestimiento de los canales de riego, su conservación y la incorporación de líneas de conducción cerradas como tuberías que si bien reducen las pérdidas, los costos derivados de su instalación y mantenimiento pueden ser más elevados.

En cuanto a las pérdidas por aplicación del riego, dependen principalmente del sistema de riego utilizado. En general, cuando se aplica un riego no toda el agua queda almacenada en la zona de las raíces de los cultivos, sino que una parte se pierde por evaporación, escurrimiento superficial hacia las obras de drenaje y por percolación profunda (Montero Martínez, 2000). La cantidad de agua que se pierde durante la aplicación del riego depende en gran medida de la programación de los riegos y por lo tanto de la cantidad de agua almacenada en el suelo al momento de la aplicación, es decir, para un mejor aprovechamiento del recurso hídrico es necesario aplicar el riego oportunamente.

En México los sistemas más comunes para aplicar el riego son: gravedad, aspersión y goteo, de entre los cuales el riego por gravedad es el de mayor aplicación, un poco más del 90% de la superficie es regada por este sistema debido a que las inversiones iniciales son bajas (comparadas con los otros), no obstante, es también el de menor eficiencia (Gracia Sánchez, 2003).

3.3 Planeación del riego

La planeación del riego implica dos tipos de estimaciones que generalmente no son fáciles, dada la información disponible en la mayoría de los distritos de riego; estas estimaciones son, la de los volúmenes de agua que estarán disponibles y el volumen de demanda (Palacios Vélez, 1981).

Es preciso señalar que ambos valores deben de estar correlacionados ya que el plan de cultivos por lo general se establece considerando que los requerimientos de agua sean compatibles con el volumen disponible, determinado de un balance hídrico que depende de la capacidad y de las políticas de operación de los almacenamientos por lo que es posible establecer una negociación entre los usuarios y los administradores del agua de tal forma que se establezca un padrón que satisfaga ambas necesidades.

La secuencia para realizar el balance hídrico y establecer el plan de riego es la siguiente (Gracia Sánchez, 2003):

1. Se elige un patrón de cultivos, en función de los requerimientos del mercado, de los productores y de las características de la región.
2. Se determina la demanda de agua para riego, en función del uso consuntivo y la lluvia aprovechable.
3. Se compara la demanda con la disponibilidad de agua en los almacenamientos.
4. En caso de que el paso 2 y 3 sean compatibles, se establece el plan de riego definitivo.

3.3.1 Selección de cultivos

La selección de cultivos obedece a tres condiciones básicas: demanda y precio del producto, adaptación del cultivo a las características de la zona y disponibilidad de agua. Si no se cumple con cualquiera de esas tres condiciones, la producción no será la óptima (Gracia Sánchez, 2003). De lo anterior, es posible inferir que existen planes de cultivos más adecuados para una región que para otra y que estos dependen principalmente de las características del mercado, las características edafológicas de la parcela y de las variables climáticas; así, no se recomienda el establecimiento de cultivos que tengan una alta demanda de agua en regiones áridas donde este recurso es escaso, sin embargo en muchas ocasiones los factores sociales y políticos como las costumbres y educación del agricultor son los que terminan determinando los cultivos que se sembrarán durante el ciclo.

Puesto que las condiciones climáticas y la disponibilidad de agua en los almacenamientos varían a lo largo del año, existen diferentes épocas recomendadas de siembra y cosecha para los cultivos. Por lo general los ciclos agrícolas se establecen en función de la duración del desarrollo de los cultivos, es decir, anuales, bianuales y perennes. En México el año agrícola comienza en el mes de octubre y finaliza en septiembre del año siguiente,

los principales ciclos son: Otoño-Invierno (O-I), Primavera-Verano (P-V) y cultivos Perennes.

Una de las principales medidas que permiten un desarrollo sustentable de las zonas de riego es la rotación de cultivos. En una rotación de cultivos, estos se desarrollan en una sucesión recurrente y sistemática en un mismo terreno, alternándolos año con año con el objetivo de desarrollar sistemas de producción diversificados que aseguren la sostenibilidad del suelo promoviendo que se mantengan la fertilidad del suelo y reduzcan los niveles de erosión, considerando los recursos y necesidades de los productores (Morales Flores & Matrínez Menez, 2012).

Es importante mencionar, que las variedades de los cultivos seleccionados deben de ser las más adecuadas para la calidad del suelo de la parcela y la calidad de agua de riego.

3.3.2 Demanda de agua de los cultivos

La demanda mensual y anual de agua para riego se obtiene mediante la suma del producto: $a_{ij} x_i$, donde a_{ij} son las lámina o coeficientes mensuales de requerimiento de riego del cultivo i en cada mes j y x_i es la superficie sembrada del cultivo i . La estimación de estos coeficientes en función de los factores que influyen en su constitución suele ser complicada. Para cada cultivo, el coeficiente depende de la evapotranspiración; de la aportación natural de agua al cultivo, ya sea por medio de la precipitación pluvial o del manto freático, y desde luego de la eficiencia con la que se conduce y aplica el riego (Palacios Vélez, 1981).

Una forma sencilla de evaluar los coeficientes de requerimiento de riego, es a través de la información estadística de volúmenes entregados por cultivo a las parcelas, mediante la siguiente expresión (Palacios Vélez, 1981):

$$a_{ij} = \frac{V_{ij}/\overline{ST}_i}{\overline{E}_{cj}} \quad (3.6)$$

Donde:

a_{ij} – coeficiente de requerimiento de riego del cultivo i en el mes j (lámina, cm)

V_{ij} – volumen mensual que en promedio se ha servido al cultivo i en el mes j (hm^3)

\overline{ST}_i – superficie total que en promedio se ha regado del cultivo i por ciclo agrícola (ha)

\overline{E}_{cj} – eficiencia promedio de conducción del distrito en el mes j

La ecuación (3.6) representa una condición promedio, sin embargo existen variaciones considerables de los coeficientes de un año a otro. Efectos como las lluvias y otros factores como las variedades del cultivo, la oportunidad de los créditos, disponibilidad de equipos y problemas debidos a condiciones climáticas, la mayoría de ellos con una importante componente aleatoria son la causa de dichas variaciones (Palacios Vélez, 1981).

Los coeficientes de requerimiento de riego no representan láminas aplicadas a los cultivos, sino que son la parte proporcional, para cada mes, en que se ha dividido la lámina total aplicada al cultivo en la superficie establecida (coeficiente anual) y a pesar de la variabilidad que se observa en los coeficientes estimados según el método propuesto, los valores obtenidos representan con cierta fidelidad el efecto combinado de todos los factores que intervienen en el consumo de agua por los cultivos (Palacios Vélez, 1981).

3.3.3 Disponibilidad de agua

La disponibilidad de agua para riego depende del balance hídrico efectuado en la zona de riego, considerando las fuentes de abastecimiento con las que se cuenta, la infraestructura hidroagrícola, la lámina de precipitación y la demanda para otros usos. Las fuentes de abastecimiento de agua a los distritos de riego son: por gravedad desde una presa, por gravedad mediante derivación de corrientes, por bombeo de corrientes y por bombeo de pozos profundos.

En los distritos abastecidos por una presa, la disponibilidad de agua para riego se estima a partir de un balance entre: el nivel del almacenamiento al inicio del ciclo agrícola; los ingresos probables a las presas, las pérdidas por evaporación e infiltración y las demandas por otros usos.

Para estimar la disponibilidad de agua de los distritos abastecidos por extracción de acuíferos mediante el bombeo de pozos profundos, se realiza un balance entre las entradas por infiltración del agua de lluvia, escurrimientos superficiales y subterráneos o en algunos casos por retorno de los excedentes de riego, y las salidas ya sean por evapotranspiración, por descarga natural a una corriente o al mar y los volúmenes concesionados. La Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales continuamente realiza actualizaciones a la disponibilidad media anual de agua subterránea de los acuíferos de la República Mexicana.

Finalmente, la disponibilidad de los distritos abastecidos por derivación y bombeo de corrientes superficiales depende de los escurrimientos superficiales y su determinación se puede realizar a través del registro histórico estimando su probabilidad de ocurrencia.

4 Optimización de Procesos

De acuerdo con Palacios Vélez (1981), el patrón de cultivos de un distrito de riego es el resultado de la selección individual, por usuario de uno o varios cultivos bajo el supuesto de que tratan de lograr el mayor ingreso neto, sin embargo, este se encuentra sujeto a limitaciones por disponibilidad de recursos (agua, tierra, mano de obra y capital), restricciones físicas, climáticas y de aspectos de mercado como son: capacidad de procesamiento, almacenamiento y transporte de las plantas agroindustriales de la región, contratos preestablecidos, entre otros. El problema anterior plantea una gran cantidad de variables, restricciones y una infinidad de posibles soluciones que sin una técnica eficiente de optimización sería imposible encontrar.

La optimización de procesos tiene su origen en Inglaterra durante la Segunda Guerra Mundial a través del término "Operations Reserch" o Investigación de Operaciones acuñado por la Royal Air Force para el desarrollo de sistemas de defensa de radares, buscando hacerlos más eficientes. En los años posteriores, los científicos concluyeron que los mismos principios podían ser aplicados en el sector civil (Rajgopal, 2001)

Las principales partes que integran un modelo de optimización son:

- La función objetivo. Es la función que se desea maximizar o minimizar
- Las variables. Son los valores que se pueden modificar para maximizar o minimizar la función objetivo, se debe de comenzar por un valor propuesto por el modelador (valor inicial).
- Las restricciones. Son limitaciones que se imponen a los valores de las variables para que una solución sea admisible.

Optimización es un proceso de buscar y comparar soluciones factibles hasta encontrar la mejor solución. La solución del problema corresponde a cualquier valor posible de las variables principales y puede ser factible, si satisface todas las restricciones o infactible en caso contrario. Dentro de las soluciones factibles las hay de frontera, es decir, si cumplen las restricciones con una igualdad o interiores si se encuentran dentro de la región creada por las restricciones impuestas. La solución óptima del modelo, la constituye la solución factible con la que la función objetivo toma un valor mayor o menor que con las otras soluciones, no obstante, esto depende de la región del espacio solución donde se esté trabajando ya que si hay mejores soluciones en otra región la solución encontrada

corresponderá a un óptimo local mientras que el mejor valor del espacio de soluciones es conocido como óptimo global (Fig. 4.1).

Los algoritmos de optimización son iterativos. Comienzan con un valor aproximado de la variable (valor inicial) y generan una secuencia de estimaciones, llamadas iteraciones, hasta que finalizan. Lo que distingue a unos algoritmos de otros es la estrategia utilizada para trasladarse de una iteración a la siguiente, algunos utilizan los valores obtenidos de la evaluación de la función objetivo, de las restricciones y posiblemente de sus primeras y segundas derivadas; otros acumulan información recolectada de las iteraciones antecedentes (Nocedal & Wright, 2006). Independientemente del algoritmo de solución utilizado, los algoritmos de optimización deben ser (Nocedal & Wright, 2006):

- Robustos: Deben desempeñarse de manera correcta en una amplia variedad de problemas de su clase.
- Eficientes: No deben de requerir un tiempo de procesamiento excesivo.
- Precisos: Deben de ser capaces de identificar una solución con precisión.

En general la optimización de problemas puede ser clasificada en dos grupos: un solo objetivo o multiobjetivo (Khadr, 2011).

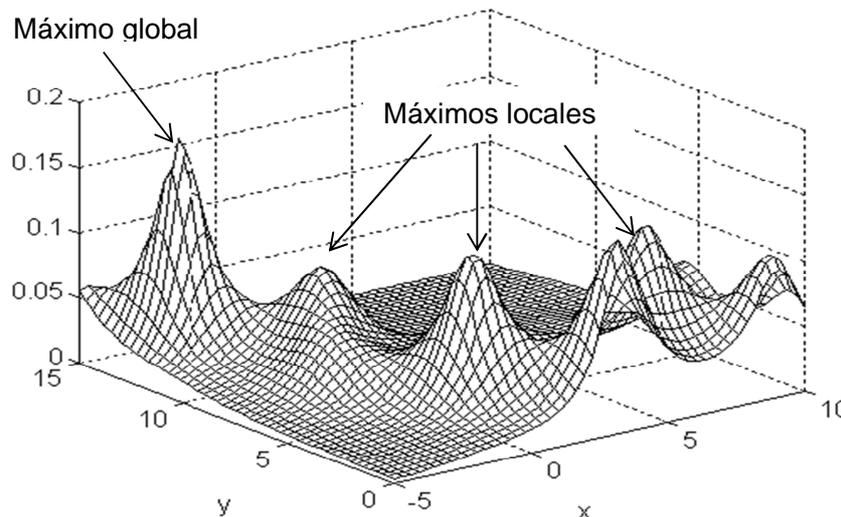


Fig. 4.1 Soluciones óptimas globales y locales. Fuente: Munteanu & Lazarescu, 1998

La meta principal de una función de un solo objetivo es determinar su valor máximo o mínimo, mientras que en el caso de las funciones multiobjetivo se refiere a diferentes problemas que deben de ser resueltos de manera simultánea.

Existen tres formas de afrontar el problema de un modelo con múltiples objetivos:

1. Optimizar un objetivo a la vez imponiendo restricciones a los otros objetivos.
2. Combinar todos los objetivos en un único objetivo.
3. Optimizar todos los objetivos de forma simultánea.

Algunos modelos de optimización dependen de cantidades desconocidas al momento de la formulación, estos son conocidos como estocásticos, como es el caso de los ingresos a un sistema de presas; en este tipo de problemas en lugar de usar valores aproximados de las cantidades desconocidas los modeladores pueden agregar al modelo información adicional sobre éstas, como un número determinado de posibles escenarios (Nocedal & Wright, 2006).

Los problemas de optimización también se pueden dividir en lineales o no lineales, dependiendo de la forma matemática que tienen las funciones incluidas en el modelo (Postolache, 2007).

A continuación se presentan dos modelos de optimización que frecuentemente son empleados en la planeación de sistemas hidroagrícolas: La programación lineal y algoritmos genéticos.

4.1 Programación Lineal

En 1939, el matemático ruso Leonidas Vitalyebich Kantorovitch publicó una extensa monografía titulada *Métodos Matemáticos de Organización y Planificación de la Producción*, en la que se hace corresponder con una extensa gama de problemas a una teoría matemática precisa y bien definida, conocida hoy en día como Programación Lineal (Soler Fajardo, Molina Focazzio, & Rojas Cortés, 2005).

La Programación Lineal (PL) aborda una clase de problemas de programación donde tanto la función objetivo a optimizar como todas las relaciones entre las variables son lineales, por lo tanto cuando se formula un problema de toma de decisiones como un programa lineal, se deben verificar las siguientes condiciones (Arsham, 1994):

- La función objetivo debe ser lineal. El mayor exponente de las variables debe de ser 1 y estas únicamente deben estar sumadas o restadas.
- El objetivo debe ser de una función lineal.
- Las restricciones también deben ser lineales.

La programación lineal ha demostrado ser una herramienta de gran utilidad para resolver problemas de producción, operación, finanzas, transporte, entre otros, ya que comúnmente estos pueden ser formulados como expresiones lineales, no obstante, presentan limitaciones cuando estos problemas requieren interacciones entre variables o relaciones no proporcionales.

Existen distintas metodologías para resolver un problema de programación lineal, de entre ellas el Método Simplex suele ser la más eficiente, puede resolver problemas con millares de variables y restricciones si se programa en una computadora. El método consiste en analizar todos los vértices de la región de soluciones factible hasta encontrar la solución óptima.

4.2 Algoritmos Genéticos

Desarrollados por John Holland en 1975, son algoritmos de búsqueda fundamentados en el proceso de selección natural (evolución biológica) basado en la teoría de Darwin. El concepto más básico es que el fuerte tiende a adaptarse y sobrevivir mientras que el débil tiende a morir, la optimización está basada en la supervivencia del más fuerte. (Wainwright, 1993), así los individuos más aptos transmiten sus características a las siguientes generaciones (Carrión, López, Ortega, & De Juan, 2003). El diagrama de flujo del funcionamiento de un algoritmo genético se presenta en la Fig. 4.2.

Los algoritmos genéticos tienen la habilidad de crear una población inicial de posibles soluciones (individuos) y combinarlas en una manera de guiar su búsqueda hacia solo las áreas más prometedoras (Wainwright, 1993). Cada individuo es evaluado por medio de la función objetivo seleccionando únicamente a los más aptos.

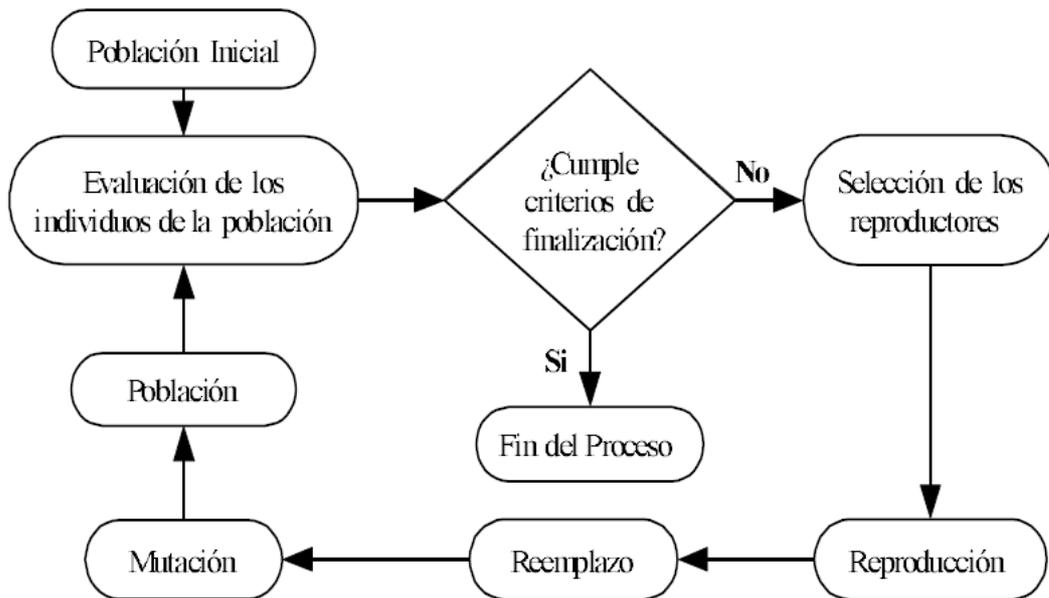


Fig. 4.2 Diagrama de flujo del algoritmo genético. Fuente: Carrión et al., 2003)

La metodología que normalmente se sigue en el desarrollo de un algoritmo genético simple es la siguiente:

- I. Generar la población inicial.
- II. Evaluar la población, a cada individuo de la población se le asigna un valor de aptitud.
- III. Selección de la población basada en la aptitud de cada individuo.
- IV. Cruza de los individuos seleccionados (padres) para obtener una nueva población (hijos) cada pareja de padres genera una pareja de hijos.
- V. Mutación en un porcentaje muy bajo de los individuos hijos.
- VI. Los individuos hijos forman una nueva población sustituyendo por completo a la generación anterior (padres). Puede existir elitismo, esto ocurre cuando el mejor individuo de la generación de padres pasa intacto a la nueva generación (hijos).
- VII. Evaluar la población.
- VIII. Se repiten los pasos del III al VII hasta alcanzar un criterio de fin (comúnmente se trata de un determinado número de generaciones).

La codificación con la que se representan los algoritmos genéticos, consiste en representar a los individuos como un conjunto de parámetros, llamados genes, que se agrupan en cadenas de valores (cromosomas), que normalmente son de tipo binarias (0,1), aunque existen otras representaciones.

Los algoritmos genéticos para su reproducción ocupan principalmente dos tipos de operadores: cruza y mutación.

El operador cruza, escoge a dos padres y corta sus cadenas de cromosomas en una posición elegida de manera aleatoria, produciendo dos cadenas iniciales y dos cadenas finales, después realiza un intercambio entre las cadenas finales y produce dos nuevos cromosomas. Ambos descendientes heredan genes de cada uno de los padres. Habitualmente el operador cruza no se aplica a todos los pares de individuos que han sido seleccionados para emparentarse, sino que se aplica con una probabilidad aleatoria entre 0.5 y 1. Los padres que no se cruzaron pasan a la siguiente generación y son conocidos como élite.

El operador mutación, se aplica a cada hijo de manera individual, y consiste en la alteración aleatoria con poca probabilidad de cada gen componente del cromosoma.

La convergencia de un algoritmo genético se logra cuando al menos el 95% de los individuos de la población comparten el mismo valor para un determinado gen.

El programa Matlab (The Mathworks, Inc., 1992) cuenta con una herramienta para llevar a cabo minimizaciones utilizando algoritmos genéticos, el cual se utilizó en este trabajo para resolver los problemas de optimización.

5 Escenarios de Cambio Climático

En este capítulo se presentan algunas de las características más relevantes de la “Actualización de Escenarios de Cambio Climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional”, los cuales se utilizan en este documento como escenarios para evaluar los efectos de las modificaciones climáticas proyectadas en la región estudiada.

Para el Grupo Internacional de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), el cambio climático se define como cualquier modificación en los elementos del clima (temperatura, precipitación, humedad, vientos, presión, nubosidad, radiación solar y visibilidad) debido a la variabilidad natural o como resultado de las actividades humanas.

El 31 de marzo de 2014, el IPCC presentó en la ciudad de Yokohama, Japón el 5° Reporte de evaluación de los efectos del cambio climático (AR5), el cual constituye una actualización del 4° Reporte presentado en 2007. El mensaje principal del reporte es que el cambio climático es real y sus efectos llegarán a todos los niveles de la población.

Las simulaciones climatológicas utilizan un nuevo conjunto de escenarios conocidos como los Trayectorias de Concentraciones Representativas (RCP), obtenidos durante el marco del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 5 (CMIP5) del Programa de Investigación Climática Mundial. En total, son cuatro los RCP establecidos por el ICPP identificados por los niveles de forzamiento radiativos o alteraciones energéticas de la atmósfera para el año 2100 con respecto a los del año 1750, con valores de 8.5, 6.0, 4.5 y 2.6 W/m².

El CMIP5 fue realizado por centros internacionales de modelación del clima mediante un conjunto de experimentos numéricos para estudiar su predictibilidad, explorando los alcances y limitaciones de los modelos globales. La información generada es sustento del AR5 (INECC, 2014).

En el CMIP5 se incluyeron dos tipos de experimentos de modelación del clima: integraciones de larga duración (escala de tiempo en siglos) y escalas a corto plazo (10-30 años). La actualización para México se realizó mediante un análisis regional del periodo histórico de proyecciones de 15 modelos de circulación global a futuro cercano (2015-2039) y a futuro lejano (2075-2099), los cuales fueron utilizados en el AR5 del IPCC. El estudio utiliza las integraciones de larga duración para los dos periodos de

tiempo considerando para las proyecciones futuras los escenarios RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5 (INECC, 2014).

Los cambios globales observados se basan en mediciones directas y remotas desde satélites, realizados a partir de mediados del siglo XIX (era instrumentada), aunque sólo se toman como mediciones confiables aquellas efectuadas a partir de 1950. Existen reconstrucciones paleoclimáticas que permiten extender los registros millones de años, así, junto con las mediciones actuales se pueden observar cambios de largo plazo en el sistema climático terrestre.

El reporte predice con un alto grado de confianza que los impactos negativos del calentamiento en el rendimiento de los cultivos sobrepasarán cualquier impacto positivo; que los conflictos violentos exacerbarán los efectos del calentamiento global; que los glaciares continuarán derritiéndose produciendo aumentos significativos en los escurrimientos; que aumentará el riesgo de extinción de algunas especies animales terrestres y marinas; además, impactos en la salud causados por olas de calor e inundaciones, y que continuará la acidificación de los océanos destruyendo los arrecifes de coral (Walsh, 2014).

5.1 Cambios globales observados en las variables climatológicas

A continuación, se describen algunas de las observaciones y efectos proyectados por el IPCC que pueden tener influencia en las actividades agrícolas; esta información u otra información adicional al respecto puede ser consultada en la referencia: IPCC (2013).

El rápido aumento de las concentraciones de los gases de efecto invernadero causado por la actividad humana, provoca una alteración del flujo de energía radiante en la atmósfera (forzamiento radiativo) debido a la absorción de radiación infrarroja terrestre por las moléculas constitutivas de esos gases, y consecuentemente altera el balance de energía en la superficie de la Tierra (Santamaría Antonio, 2010).

El forzamiento radiativo total observado es positivo, lo que conduce a un incremento en la energía del sistema climático. La mayor contribución al forzamiento radiativo total es ocasionada por el incremento en la concentración atmosférica de CO₂.

Cada una de las tres últimas décadas ha sido sucesivamente más caliente en la superficie terrestre que cualquier década precedente desde 1850. Para los mayores periodos cuando las tendencias regionales se obtienen con datos de 1901 a 2012, casi todo el

globo terráqueo ha experimentado calentamiento. Basándose en el registro más largo, el incremento total de la anomalía entre los promedios del periodo de 1850 a 1900 y el de 2003 a 2012 es de 0.72 a 0.85 °C.

Las reconstrucciones continentales de temperatura muestran que periodos de varias décadas durante la Anomalía Climática Medieval, sucedida del año 950 al 1250, fueron tan calientes como aquellos de finales del siglo XX, no obstante, este calentamiento regional no ocurrió con la coherencia regional del calentamiento del siglo pasado.

En promedio, en las regiones localizadas en la latitud media del Hemisferio Norte se tienen estimaciones de alto grado de confiabilidad de que la precipitación ha aumentado desde 1951.

Además, se han observado cambios en los eventos extremos desde 1950: el número de días y noches frías ha disminuido mientras que el número de días y noches cálidas ha aumentado a escala global; la frecuencia de olas de calor se ha incrementado en extensas regiones de Europa, Asia y África. Existe una mayor cantidad de regiones donde el número de precipitaciones intensas se ha incrementado que aquellas donde se ha disminuido.

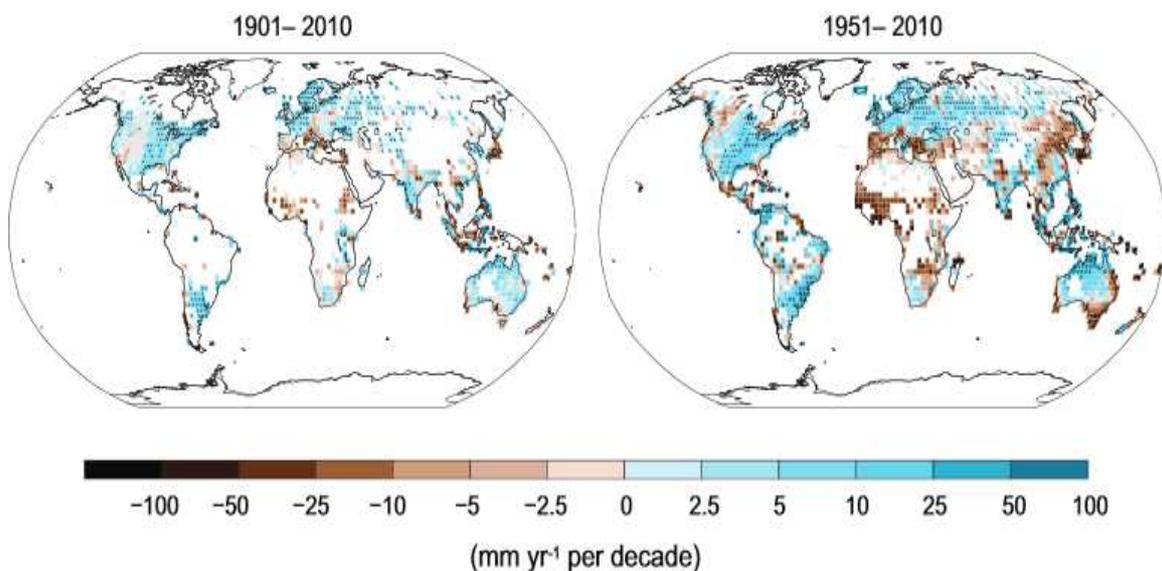


Fig. 5.1 Anomalías globales observadas en la precipitación anual. Fuente: IPCC, 2013

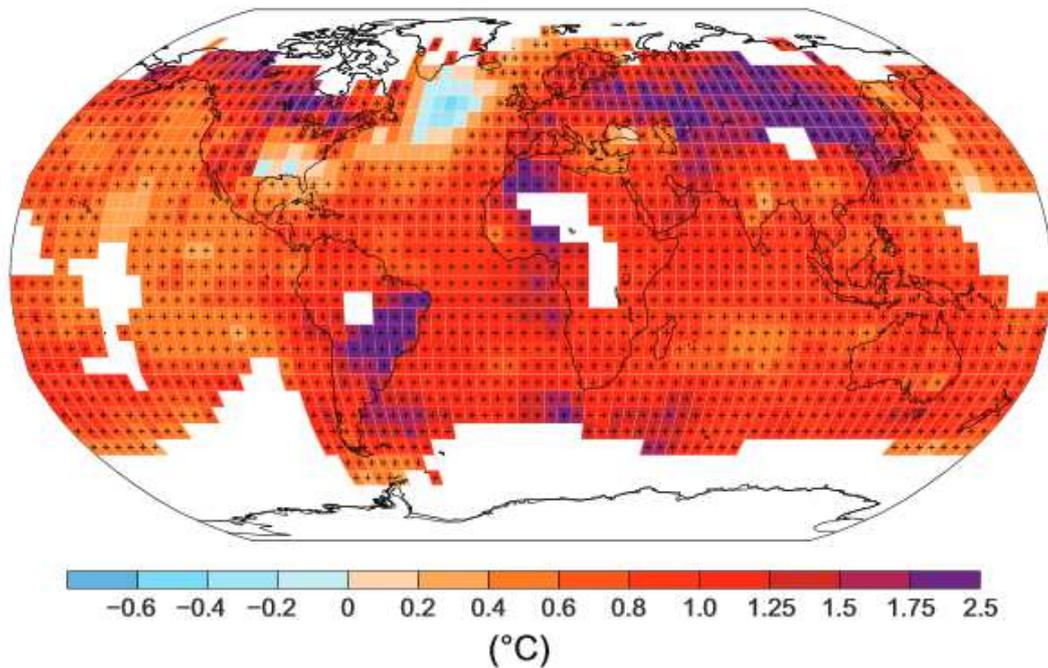


Fig. 5.2 Anomalías observadas para el periodo 1901-2012 en la temperatura atmosférica . Fuente: IPCC, 2013

5.2 Escenarios globales futuros

La temperatura media global para el periodo de 2016 a 2035 aumentará de 0.3 a 0.7°C y para el periodo de 2081 a 2100 se incrementará entre 0.3 a 1.7 °C para el RCP 2.6; entre 1.1 a 2.6°C para el RCP 4.5; entre 1.4 a 3.1°C para el RCP 6.0 y de 2.6 a 4.8°C para el RCP 8.5, ambos con respecto al periodo de 1986 a 2005.

Los incrementos en la temperatura media periódica y la media anual serán mayores en los trópicos y subtrópicos que en las latitudes medias, además cada vez serán más frecuentes las temperaturas extremas y las olas de calor ocurrirán con una mayor periodicidad y duración.

En cuanto al ciclo del agua, los cambios durante el siglo XXI no serán uniformes, los contrastes en la precipitación entre regiones y periodos húmedos y secos se incrementarán.

Se proyectan incrementos en la precipitación media anual de las latitudes altas del océano Pacífico a final del siglo XXI bajo el escenario RCP 8.5, mientras que en regiones secas subtropicales y de latitud media la precipitación media disminuirá y en las regiones húmedas se incrementará.

Los eventos de precipitación extremos de las latitudes medias y regiones tropicales húmedas se volverán más intensos y más frecuentes al final del siglo, mientras la temperatura media global se incrementa. Es probable que la precipitación debida a fenómenos como monzones se intensifique debido al incremento en la humedad atmosférica, al tiempo que su duración aumentará. Además, existe una alta evidencia de que la Oscilación del Sur El Niño permanecerá como el modo dominante de la variación interanual en el Pacífico tropical, con un aumento probable en la intensidad de las precipitaciones debidas a este fenómeno por el incremento en la humedad.

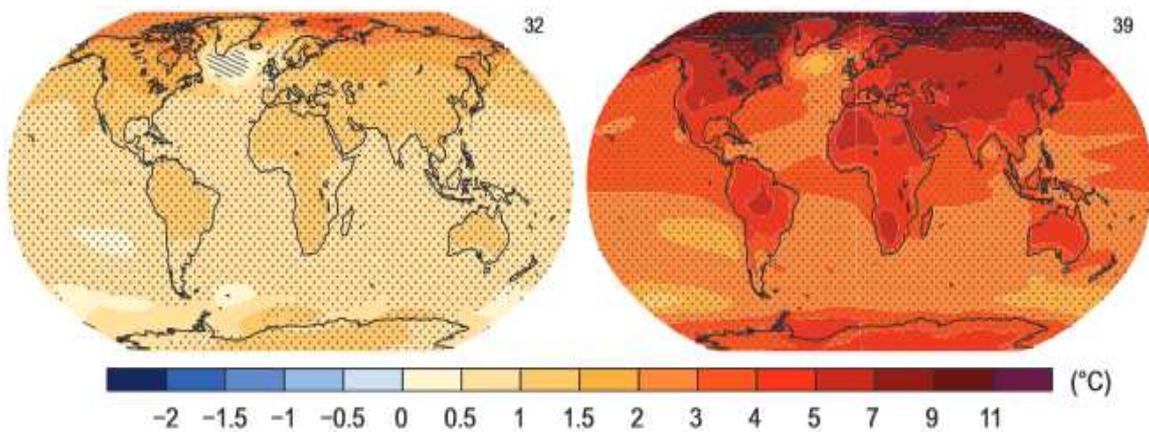


Fig. 5.3 Cambios en la temperatura superficial promedio (1986-2005 a 2081-2100) para RCP 2.6 (izquierda) y RCP 8.5 (derecha). Fuente: IPCC, 2013

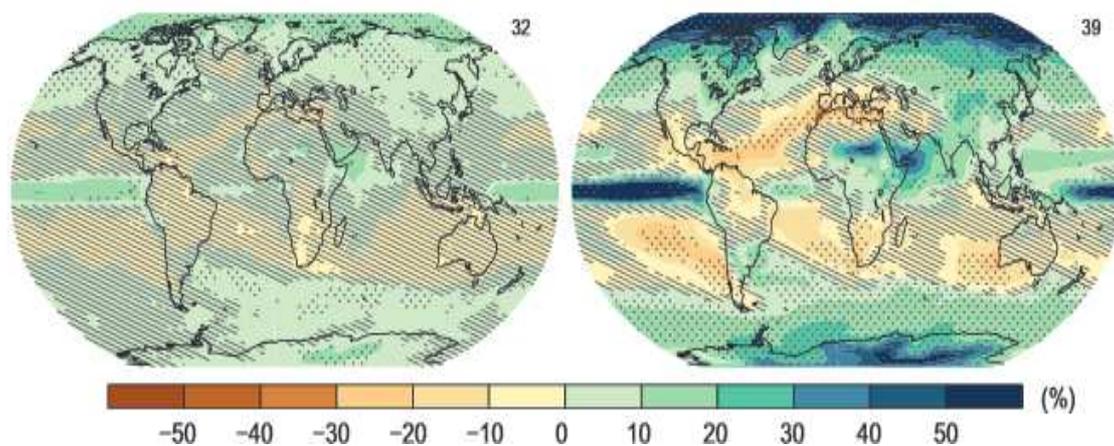


Fig. 5.4 Cambios en la precipitación promedio (1986-2005 a 2081-2100) para RCP 2.6 (izquierda) y RCP 8.5 (derecha). Fuente: IPCC, 2013

5.3 Proyecciones para la República Mexicana

Las gráficas de anomalías mensuales para la República Mexicana se presentan en las figuras 5.5 a 5.16; estas muestran los cambios proyectados para las temperaturas medias y precipitaciones promedio del periodo 2015-2039 y 2075-2099 en los RCP: 4.5, 6.0 y 8.5.

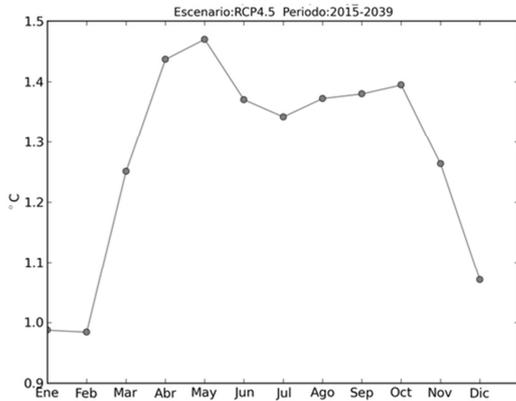


Fig. 5.5 Anomalías en la temperatura media (2015-2039) RCP4.5

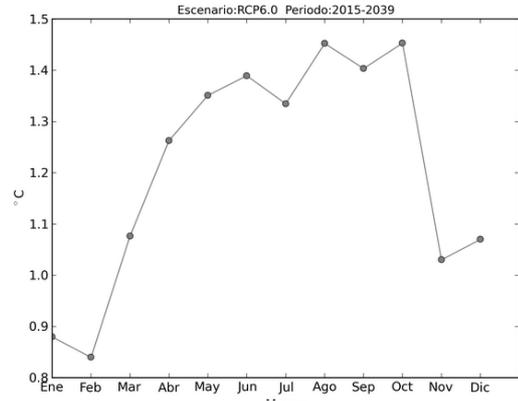


Fig. 5.6 Anomalías en la temperatura media (2015-2039) RCP6.0

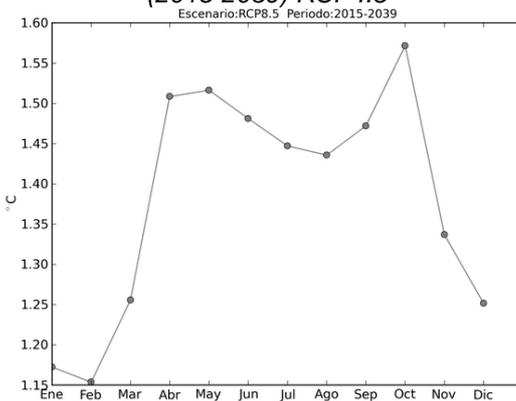


Fig. 5.7 Anomalías en la temperatura media (2015-2039) RCP8.5

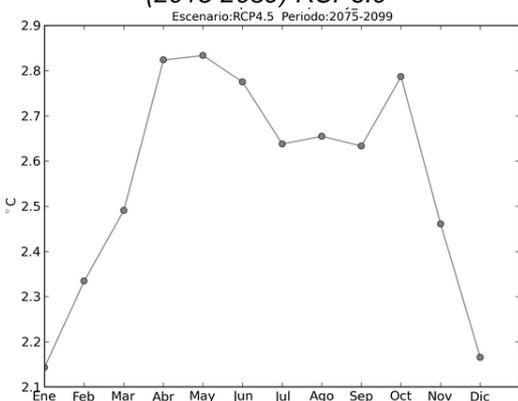


Fig. 5.8 Anomalías en la temperatura media (2075-2099) RCP4.5

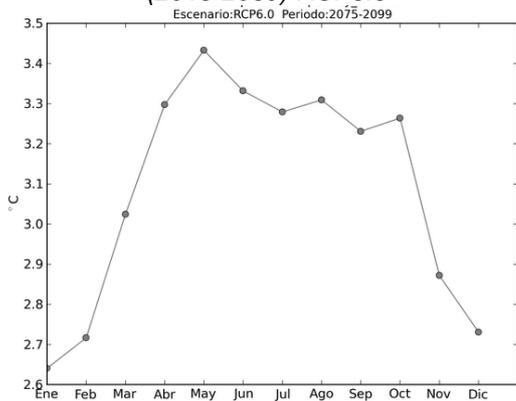


Fig. 5.9 Anomalías en la temperatura media (2075-2099) RCP6.0

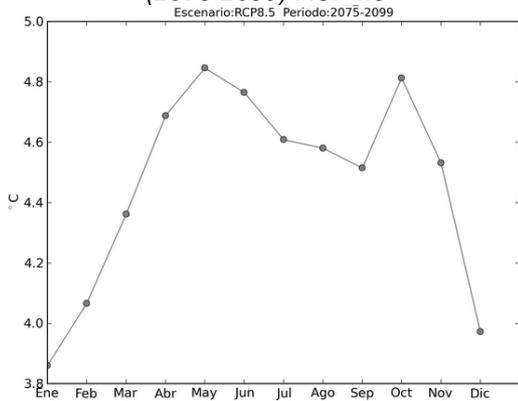


Fig. 5.10 Anomalías en la temperatura media (2075-2099) RCP8.5

Estimación de la superficie de riego óptima en los distritos de riego 075 y 076, Sinaloa, México

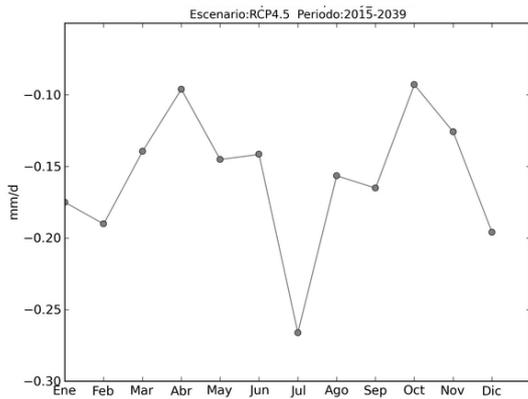


Fig. 5.11 Anomalías en la precipitación diaria (2015-2039) RCP4.5

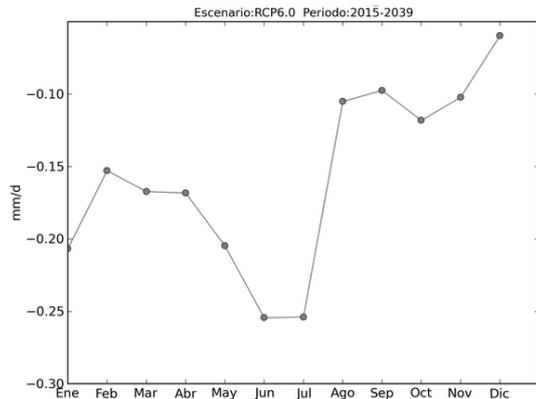


Fig. 5.12 Anomalías en la precipitación diaria (2015-2039) RCP6.0

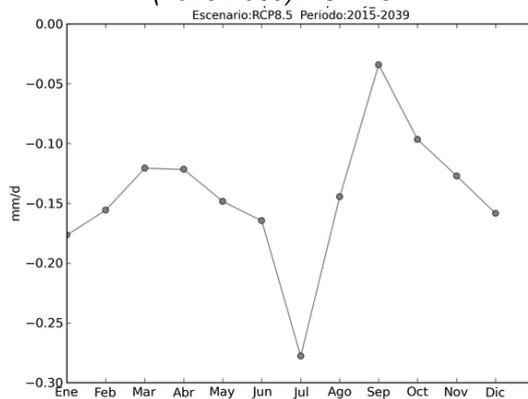


Fig. 5.13 Anomalías en la precipitación diaria (2015-2039) RCP8.5

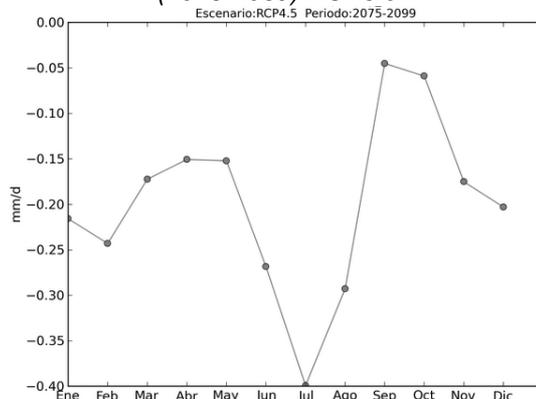


Fig. 5.14 Anomalías en la precipitación diaria (2075-2099) RCP4.5

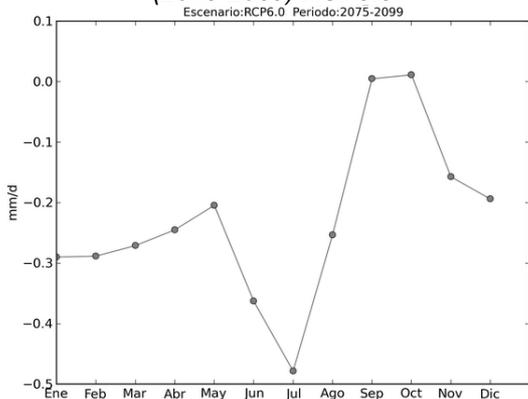


Fig. 5.15 Anomalías en la precipitación diaria (2075-2099) RCP6.0

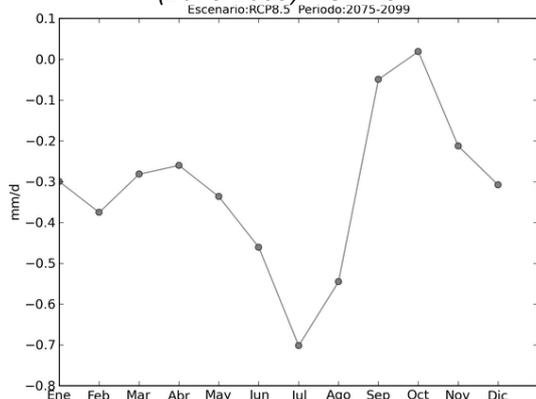


Fig. 5.16 Anomalías en la precipitación diaria (2075-2099) RCP8.5

Como es posible observar en las gráficas anteriores para todos los escenarios de forzamiento radiativo se proyecta que las temperaturas medias en el país sufrirán un incremento, siendo mayor en los meses de abril a octubre; mientras que la precipitación por día se reducirá en todos los meses, con mayores decrementos en los meses comúnmente más húmedos, correspondientes al verano.

6 Caso de Estudio: Distritos de Riego 075 y 076, Sinaloa, México

6.1 Medio Físico

6.1.1 Distrito de Riego 075, “Río Fuerte”

Localización y Organización

El distrito de riego 075, “Río Fuerte” se encuentra al Norte del estado de Sinaloa abarcando parte de los municipios de El Fuerte, Ahome, Guasave y Sinaloa, cuenta con una superficie de 228 441.22 ha habilitadas para riego, perteneciendo el 67.02% a ejidatarios y el 32.98% a particulares, conformando en total 21 611 usuarios. El distrito está conformado dos Sociedades de Responsabilidad Limitada (SRL), compuestas por 1 y 4 unidades de riego, respectivamente, para un total de 13 módulos.

Geográficamente se localiza entre las coordenadas: 25°12'27" latitud norte, 108°15'51" longitud oeste, 23°06'48" Latitud Norte y 109°19'15" Longitud Oeste (Fig. 6.1)



Fig. 6.1 Localización del Distrito de Riego “Río Fuerte”, Sinaloa.

Clima.

En lo que se refiere al clima, dentro del distrito de riego se presentan dos tipos; en la franja costera se presenta el tipo BW(h')w, es decir, muy árido, cálido, con temperatura media anual mayor de 22 °C y temperatura del mes más frío mayor a 18 °C, con lluvias de

verano y un porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual. Mientras tanto, en la parte noreste presenta un clima BSo(h')w, árido, cálido, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C, con lluvias de verano y porcentaje de la lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

Edafología, Uso de Suelo y Vegetación

El suelo del distrito se encuentra principalmente compuesto por vertisol crómico, presentándose en el 43.13% de la superficie, quedando el resto repartida entre xerosol háplico y solochank órtico, con poca presencia de fluviosoles. Mientras que de un análisis del uso de suelo y vegetación, se observa que el principal uso que se le da a los suelos es para agricultura de riego ocupando el 84.32% de la superficie, mientras que la agricultura de temporal abarca tan solo el 1.55%, en el resto de la superficie, correspondiente a la zona costera, se presenta principalmente vegetación halófila con una pequeña intrusión de uso urbano.

De acuerdo con el plan director para la modernización del distrito (PROTY, 2006), las texturas de los suelos en el distrito de riego son predominantemente pesadas abarcando el 67.11% de la superficie, mientras que las medias y ligeras tan solo ocupan el 24.83% y 8.07% de la superficie.

Se tiene un grado moderado de degradación química por declinación de la fertilidad y reducción del contenido de materia orgánica, originado por las actividades agrícolas y sobrepastoreo.

Riesgo por Sequías y Heladas

De acuerdo con el mapa de riesgo por sequías del CENAPRED (Escalante Sandoval, 2005) el distrito se encuentra en un área con riesgo de sequía muy vasta, mientras que el grado de riesgo de daños por bajas temperaturas, es muy bajo.

Fuentes de Abastecimiento

Como fuentes de abastecimiento de agua superficial y subterránea, el distrito de riego cuenta con las aportaciones del río Fuerte y del acuífero homónimo. El río Fuerte es el más importante del estado con un área de captación de 39 590 km², se localiza dentro de la Región Hidrológica No. 10 "Sinaloa" y se forma por tres grandes arroyos llamados ríos: el Verde que tiene su origen en el estado de Durango, muy cerca de los límites con Chihuahua, el Tumachic o Chinatú y el de Guadalupe y Calvo; penetra después a los

municipios de Batopilas y Urique, en el estado de Chihuahua, recibiendo en ambos corrientes que llevan el nombre de esos municipios. Pasa después, al estado de Sinaloa, donde recibe a los ríos Septentrión, Chinipas, Choix y Álamos entre otros, para finalmente desembocar en el Golfo de California.

Por otro lado, el acuífero Río Fuerte se ubica en la porción norte del estado de Sinaloa, ocupando la zona de mayor explotación en la planicie costera, a una distancia de 220 km de la ciudad de Culiacán; en la zona de veda de control decretada para el río Fuerte (Diario Oficial de la Federación, 1948) y la margen derecha del río Sinaloa. Su explotación se restringe a una superficie de 856.55 km² comprendiendo la totalidad del distrito de riego que es el principal explotador de sus recursos, mientras que los propietarios de pozos particulares y el servicio público urbano lo son en menor medida. La mayoría de los pozos de explotación se encuentran próximos al río Fuerte, con profundidades variables entre 10 y 300 m y un potencial de producción acuífera de 10 a 150 l/s aunque los gastos autorizados en la actualidad son menores a los 50 l/s. El acuífero se recarga naturalmente por infiltración de la lluvia, la corriente del río Fuerte y los arroyos localizados dentro de la zona, a esta se le suma la recarga inducida por la infraestructura hidroagrícola sin revestir así como las infiltraciones del agua almacenada en las presas. El flujo horizontal de entradas al acuífero asciende a 36.89 hm³/año. Las principales salidas de agua son la evapotranspiración con 155 hm³/año, la descarga al río Fuerte de aproximadamente 120 hm³/año, el bombeo de pozos con 124 hm³/año y la descarga al mar por flujo subterráneo que ascienden a 41 hm³/año (CONAGUA, 2009).

Infraestructura Hidroagrícola

La infraestructura hidroagrícola del distrito parte de la Presa Luis Donald Colosio, que inició sus operaciones en el año de 1995 con el objetivo de incrementar la superficie de riego en los distritos y la generación de energía eléctrica, aprovechando los excedentes del río Fuerte que no había sido posible almacenar anteriormente con las presas Miguel Hidalgo y Costilla y Josefa Ortiz de Domínguez. Estas dos presas junto con la presa Luis Donald Colosio también conocida por el nombre de "Huites" forman un sistema que tiene como finalidad el aprovechamiento de la corriente del río Fuerte para la generación de energía eléctrica y agricultura de riego que se practica en los distritos de riego 075 y 076.

La presa Huites posee un área de captación de aproximadamente 26 295.34 km² recibiendo un escurrimiento promedio al año de 4 181.80 hm³; tiene una capacidad para azolves de 500 hm³, de almacenamiento en condiciones normales de 2 908 hm³ (al

NAMO) y en excedencia de 4 568 hm³ (al NAME). La obra de toma se encuentra a 190 msnm y está compuesta por un par de tuberías a presión de 7.80 m de diámetro interior, capaces de conducir gastos de hasta 235 m³/s cada una, el cual se turbinan para la generación de hasta 211 MW de energía eléctrica, para un total de 422 MW que se transfieren en cascada hacia la presa Miguel Hidalgo y Costilla.

La presa Miguel Hidalgo y Costilla también conocida como “El Mahone” fue construida de 1952 a 1956 con propósito de riego, generación de energía, control de avenidas y otros usos secundarios como el esparcimiento, su área de captación es de 30 700 km², con una capacidad de almacenamiento en condiciones normales de 2 921.43 hm³ (al NAMO) y en condiciones extraordinarias de 3 917.13 hm³ (al NAME). La obra de toma está compuesta por dos túneles, uno para riego y el otro para la generación de energía eléctrica con su umbral a 96.40 msnm y un gasto máximo de 360 m³/s. A partir del año 1967 en el que se terminó la construcción de la presa Josefa Ortiz de Domínguez, se comenzó el trasvase de los volúmenes excedentes de la presa Miguel Hidalgo para su aprovechamiento en el riego del distrito 076, mediante un canal lateral abastecido por una obra de toma auxiliar a la elevación de 125 msnm y con capacidad de transportar hasta 120 m³/s, no obstante, de los datos registrados se observó una política de no realizar transferencias cuando la capacidad de la presa Miguel Hidalgo este por debajo de los 800 hm³ o hasta 675 hm³ en condiciones muy críticas.

Los ingresos de la presa Miguel Hidalgo provienen de la transferencia de las extracciones de la presa aguas arriba, en promedio 3,962 hm³ al año y de un pequeño ingreso por cuenca propia de 741.64 hm³. La configuración general del sistema de presas se presenta en la Fig. 6.2 Sistema de Presas del Río Fuerte Fig. 6.2.

De acuerdo con la información proporcionada durante una visita realizada a los distritos de riego, los volúmenes disponibles en las presas para generación eléctrica, riego y otros usos, se calculan a partir del almacenamiento de las tres presas al primero de octubre (inicio del año agrícola), al que se le suma un ingreso mensual con probabilidad de ocurrencia del 98%, es decir se utiliza el valor superado por el 98% de la serie de ingresos mensuales a cada una de las presas por cuenca propia, que para los 64 años de los que se dispone, corresponde al mínimo ingreso registrado, como si ocurriera ese volumen mínimo de forma simultánea en los tres almacenamientos y se le restan las pérdidas por evaporación estimadas de acuerdo al registro histórico, el nivel mínimo en los almacenamientos y la demanda por usos domésticos estimada en 223 hm³ en promedio

para ambos distritos. La disponibilidad total del sistema así calculada, se reparte en el porcentaje de la concesión que le corresponde a cada distrito, siendo en promedio para el distrito 075 el 78.16% y para el distrito 076 el 21.84%. En la Tabla 6.1 se presenta la evolución de la disponibilidad calculada para los ciclos agrícolas del 2007-2008 al 2012-2013, se observa que a partir del periodo 2010-2011 en el que se presentaron eventos de sequía y helada, la disponibilidad se redujo de manera sustancial.



Fig. 6.2 Sistema de Presas del Río Fuerte

Tabla 6.1 Disponibilidad estimada para los Distritos de Riego en hm^3 . Fuente: Jefatura del DR076

Año Agrícola	Luis Donald Colosio (Generación Eléctrica)	Miguel Hidalgo y Costilla (DR 075 y Otros Usos)	Josefa Ortiz de Domínguez (DR 076 y Otros Usos)
2007-2008	2650	3298.6	827.9
2008-2009	2650	3451.7	874.2
2009-2010	2900	3340.3	881.2
2010-2011	2650	3314.4	881.2
2011-2012	1390	1966.9	519.3
2012-2013	2020	1868.6	516.4

Las extracciones por obra de toma de la presa Miguel Hidalgo y Costilla se transitan por el río Fuerte con una eficiencia del 95% en la conducción hasta llegar a la presa derivadora El Sufragio, donde parte del gasto se deriva para satisfacer las demandas de riego de los módulos pertenecientes a la SRL denominada Red Mayor del Valle del Fuerte que se divide en cuatro unidades de riego compuestas por los módulos: Guasave, Río Fuerte, Santa Rosa, Taxtes, Nohme, Leyva Solano, Ruíz Cortines, Batequis, Juncos, Sevelbampo y Pascola. La parte del gasto que no se deriva sigue transitando por el río hasta llegar a la presa derivadora Cahuinahua donde parte del gasto se deriva nuevamente para satisfacer las demandas de los módulos Mavari y Cahuinahua pertenecientes a la SRL Sistema Cahuinahua y el restante descarga al Golfo de Baja California

6.1.2 Distrito de Riego 076, “Valle del Carrizo”

Localización y Organización

El distrito de riego 076 se localiza en la región noroeste del país al norte del estado de Sinaloa comprendiendo parte de los municipios de Ahome, el Fuerte y Navojoa perteneciente al estado de Sonora. Se construyó durante el periodo de 1967-1971 como parte del Plan Hidráulico del Noroeste (Herrán, 1992). Se encuentra constituido por tres SRL, divididas en 2, 3 y 4 módulos de riego, respectivamente, cuenta con una superficie regable de 71 585.86 ha, perteneciendo el 15.49% a pequeños propietarios particulares y el 84.51% a ejidatarios, que en total conforman los 9 001 usuarios del distrito. El tipo de infraestructura del valle es típico de los sistemas de riego por gravedad. El caudal de diseño general característico de los sistemas de riego mexicanos, es de 1 l/s por ha.

Geográficamente se localiza entre las coordenadas 26°33'42" latitud norte, 109°7'11" longitud oeste, la latitud 26°04'30" norte y longitud 26°10'45" oeste (Fig. 6.3).

Clima

De acuerdo a la caracterización del clima en el territorio nacional, en el distrito de riego 076 predominan dos tipos de clima, en la franja oeste se presenta un clima BW(h')w, muy árido, cálido, de temperatura media anual mayor de 22°C, con temperatura del mes más frío mayor de 18°C, con lluvias de verano y un porcentaje de la precipitación invernal del 5% al 10.2% del total anual, mientras que en la franja este el clima es BSo(h')w, árido, cálido con temperatura media anual mayor a los 22°C, siendo la temperatura del mes más frío mayor a 18°C, se presentan lluvias de verano y el porcentaje de la lluvia invernal con respecto al total anual es del 5% al 10.2%.



Fig. 6.3 Localización del Distrito de Riego "Valle del Carrizo", Sinaloa

Edafología, Uso de Suelo y Vegetación

La edafología del lugar muestra que el suelo predominante es el vertisol crómico abarcando el 59% de la superficie, quedando el resto dividida entre yermosoles, regosoles, fluviosoles y solonchak. En lo que se refiere a los usos dados al suelo, el 70 % de la superficie se utiliza para agricultura de riego y el resto es abarcado principalmente por vegetación de matorrales.

Riesgo por Sequías y Heladas

De igual manera que en el distrito 075, del mapa de riesgo por sequías se puede establecer que el distrito se encuentra en un área con riesgo de sequía muy vasta y que el grado de riesgos por bajas temperaturas es muy bajo.

Fuentes de Abastecimiento

La única fuente de abastecimiento de este distrito es el agua superficial que escurre por el río Fuerte transferido de los excedentes de la presa Miguel Hidalgo y Costilla a la presa Josefa Ortiz de Domínguez y por el arroyo Álamos. Esta corriente nace en la sierra de Álamos dentro del estado de Sonora, conociéndose en sus orígenes con el nombre de arroyo Chuchujaqui. Su trayectoria general es inicialmente hacia el Suroeste y después hacia el Sureste siguiendo un curso sinuoso, siendo sus principales afluentes el arroyo Chuchujaque y el arroyo Huiricoba. Adelante de estas confluencias se regula en la presa

Josefa Ortiz de Domínguez, situada unos 15 km antes de su confluencia con el río Fuerte, por la margen derecha de este último, aguas abajo de la población de El Fuerte, Sin.

Infraestructura Hidroagrícola

La infraestructura hidroagrícola parte de la presa Josefa Ortiz de Domínguez, anteriormente conocida con el nombre de "El Sabino", esta presa se terminó de construir en el año de 1967 como parte del Programa Hídrico del Norte con el objeto de que los escurrimientos del arroyo Álamos y las excedencias de la presa Miguel Hidalgo y Costilla pudieran ser aprovechados con fines de riego, ya que de manera paralela a su construcción se llevó a cabo la construcción de la infraestructura de canales y drenes del distrito 076. El área de captación de la presa Josefa Ortiz es de 2 260 km² y recibe un escurrimiento anual de 107.19 hm³ por lo que los ingresos más grandes provienen del trasvaso que se hace desde la presa Miguel Hidalgo y Costilla en promedio 422 hm³/año, a través de un canal de conducción que nace en el dique número 6 de la segunda y sigue en su primer tramo con rumbo suroeste, sensiblemente paralelo al curso del río Fuerte, en su recorrido pasa por varios diques y túneles, hasta llegar al vaso de la presa Josefa Ortiz de Domínguez. Esta presa tiene una capacidad de almacenamiento útil en condiciones normales de 460 hm³ (al NAMO) y la capacidad total con excedencias es de 485 hm³ (NAME). La extracción para el riego del distrito se efectúa mediante la obra de toma con umbral a la elevación de 90 msnm y un gasto de diseño de 100 m³/s.

Como se mencionó, el distrito se encuentra dividido en tres SRL: El Carrizo, ubicada en el estado de Sinaloa, donde se ubican los módulos 1, 2, 3, 4; Fuerte-Mayo, compartiendo los estados de Sonora y Sinaloa con los módulos 1, 2 y 5, y Fuerte San Blás localizada en Sinaloa administra los módulos 6 y 7. En la Fig. 6.4, se observa la distribución de los módulos dentro del distrito, destacan por su tamaño marcados en azul, rosa, verde y lila los módulos 1, 2, 3 y 4 de Sinaloa, mientras que en rojo y morado se presentan los módulos 1 y 2 de Sonora, además en la parte superior derecha de esta figura se aprecia la presa Josefa Ortiz de Domínguez.

En la tarjeta del inventario 2012-2013 del distrito de riego 076 proporcionada por la Jefatura del Distrito de Riego durante la visita al sitio, se informa que se cuenta con una red de 995.34 km, correspondiente a una densidad de 1.34 km/ha, de los cuales 128.04 son principales y 867.30 secundarios, el 88% de los canales principales presenta revestimiento de concreto, mientras que en sólo el 18% de los secundarios se presenta la misma condición. Además, se cuenta con una red de drenes de 711.80 km, o una

densidad de 0.96 km/ha. De acuerdo con la información proporcionada en campo, la eficiencia de conducción del arroyo Álamos para los volúmenes extraídos de la obra de toma al punto de control de la red mayor (SRL), es del 95%, mientras que la eficiencia de conducción de esta red es de 85.6%, en la distribución del punto de control de la red a los módulos se tiene una eficiencia del 76%, por lo que la eficiencia de conducción del almacenamiento a la parcela es en promedio del 58%, resultando la eficiencia global del 38%.

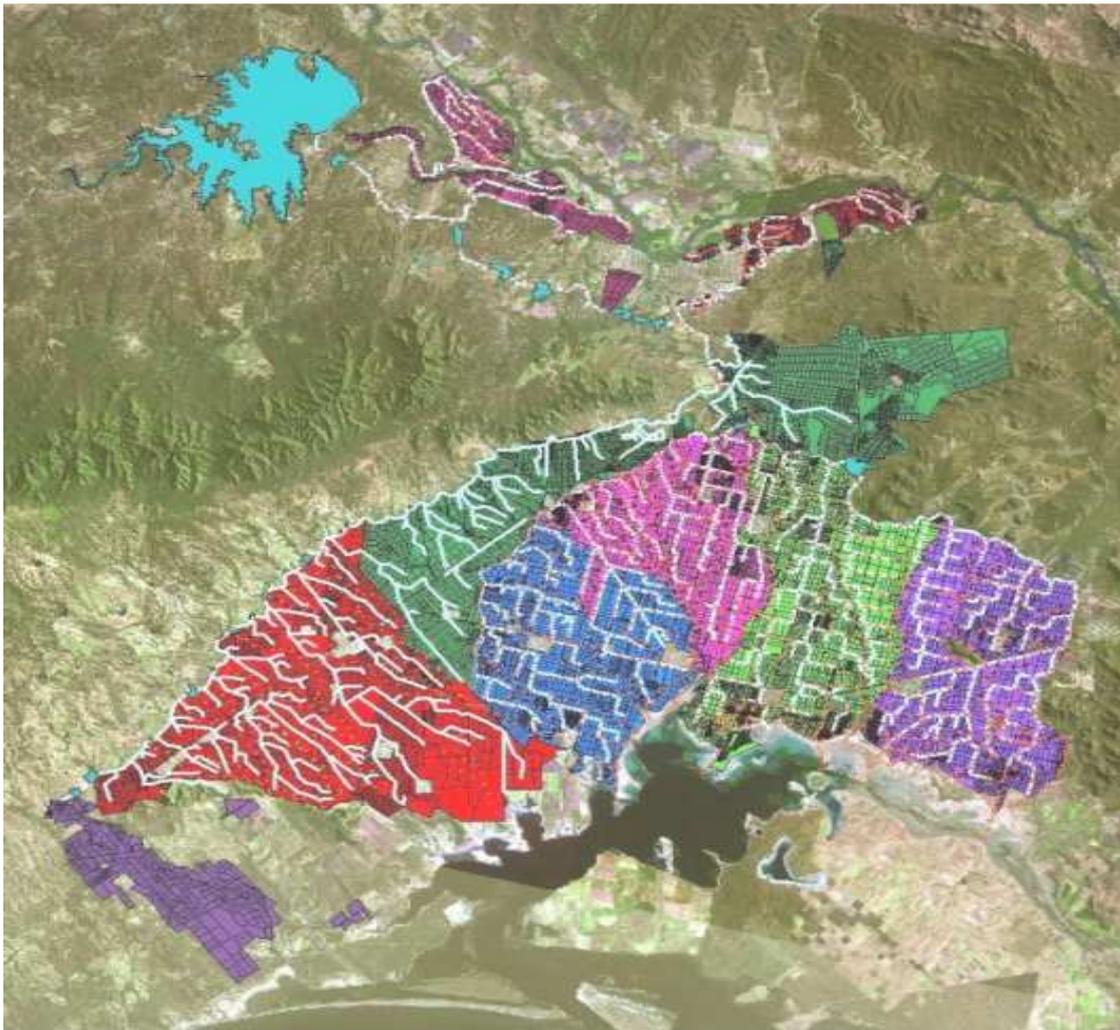


Fig. 6.4 Distribución de los módulos del distrito de riego 076

6.2 Desarrollo de la Metodología y Resultados

6.2.1 Base de Datos

La información de temperaturas máximas, mínimas y precipitaciones se obtuvo de la base de datos de estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) a través de los archivos de clima computarizado (CLICOM) los cuales están disponibles para los usuarios en las oficinas del SMN, con actualización hasta 2010.

Para la información hidrométrica, inicialmente se trabajó con la base de datos del banco nacional de aguas superficiales de la CONAGUA (BANDAS) recolectando la información de gastos medios diarios de las estaciones Huites, Chinipas, Jesús Cruz, Palo Dulce, Urique II y Batopilas para los ingresos por cuenca propia a la presa Huites; Choix para la presa Miguel Hidalgo y Costilla, y Cazanate para la presa Josefa Ortiz de Domínguez, sin embargo, tras analizar estos datos se encontró que presentan muchos huecos y únicamente se cuenta con información hasta el año 2005 o menos, por lo tanto se acudió a las oficinas de la Subgerencia de Hidrología Operativa de la CONAGUA para solicitar información registrada de ingresos a los almacenamientos; de esta visita se obtuvo la base de datos de ingresos mensuales y anuales por cuenca propia y totales a las presas para el periodo 1949 a 2012, además también fueron proporcionados los volúmenes de almacenamiento al día primero de los todos los meses del periodo.

Las extracciones de las presas fueron obtenidas de la Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola de la CONAGUA, quién proporcionó estos datos de manera mensual y por año agrícola. Además, se consiguió acceso por parte de la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos (GASIR) a la base de datos del Sistema de Información Hidrológica (SIH), donde se concentra toda la información de operación histórica de las presas, descargando para los tres almacenamientos datos de niveles, áreas, volúmenes, gastos de extracción, evaporaciones, precipitaciones y gastos derramados. El Organismo de Cuenca del Pacífico Norte, facilitó la información con las curvas elevación, área, capacidad de las tres presas estudiadas.

En lo que se refiere a la información hidroagrícola, el Dr. Waldo Ojeda Bustamante hizo llegar vía correo electrónico los informes de Estadísticas Agrícolas en los Distritos de Riego para los ciclos agrícolas 1997-1998 a 2011-2012, en ellos se presentan los datos más relevantes en cuanto a la superficie sembrada, cosechada, rendimiento, producción y precio medio rural por ciclo y por cultivo para cada distrito de riego del país.

Adicionalmente, se presentan los volúmenes de agua utilizados en el ciclo por cada distrito de riego y por tipo de fuente de abastecimiento. La desventaja encontrada en estos informes es que únicamente se presentan los resultados obtenidos en el ciclo, sin particularizar en fechas de siembra, cosecha o láminas suministradas a los cultivos, información que resulta indispensable para el desarrollo de este trabajo; por lo tanto, se estableció comunicación con las Jefaturas de los Distritos de Riego estudiados, con la finalidad de programar una reunión en el sitio para conocer, a través de una explicación detallada del personal que ahí labora, la forma en que estos operan. De la reunión llevada a cabo en la ciudad de El Carrizo y en la ciudad de “Los Mochis”, se obtuvieron los programas de siembra y riego con sus resultados para los ciclos agrícolas 2008-2009 a 2012-2013.

El resumen de la información que se utilizó en el presente trabajo se enlista a continuación:

- Ingresos mensuales y anuales a las presas Luis Donald Colosio “Huites”, Miguel Hidalgo y Costilla y Josefa Ortiz de Domínguez durante el periodo 1949-2012
- Extracciones mensuales y anuales de las presas Luis Donald Colosio “Huites”, Miguel Hidalgo y Costilla y Josefa Ortiz de Domínguez durante los periodos agrícolas 1996-2010, 1991-2010 y 1991-2009, respectivamente.
- Precipitaciones y temperaturas máximas y mínimas para el periodo 1951-2010.
- Superficies sembradas, cosechadas, rendimientos, precios medios rurales, volúmenes entregados y valor de la producción por año agrícola en el periodo 1997-2012
- Planes de cultivo y planes de riego mensuales y anuales de los distritos 075 y 076 registrados en el periodo agrícola 2009-2013

6.2.2 Evapotranspiraciones de Referencia Promedio

La evapotranspiración de referencia de cada distrito de riego se estimó aplicando la ecuación (3.1) a partir de las temperaturas máximas y mínimas de las estaciones climatológicas ubicadas dentro de ellos para el periodo 1951-2010. El área de influencia de cada estación se estimó a través del método de los polígonos de Thiessen (Fig. 6.6 y Fig. 6.5), calculando las temperaturas máxima y mínima medias de cada distrito, para posteriormente calcular las variables restantes de la ecuación de acuerdo a lo indicado por Allen et al. (2006). Las evapotranspiraciones de referencia medias de los distritos de

Estimación de la superficie de riego óptima en los distritos de riego 075 y 076, Sinaloa, México

riego 075 y 076 para el periodo 1951-2010 se presentan en las Tablas 6.2 y 6.3, respectivamente.

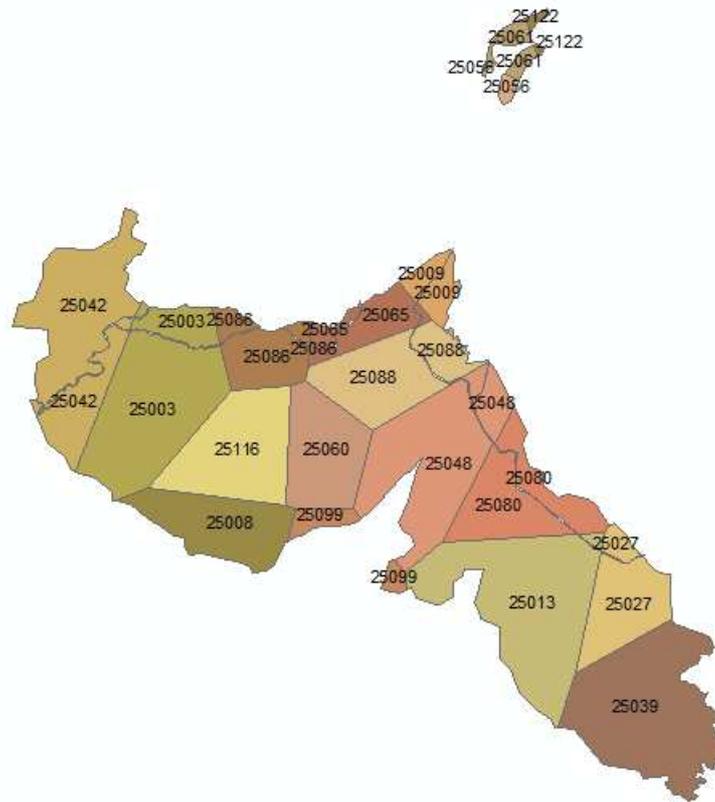


Fig. 6.5 Polígonos de Thiessen DR075

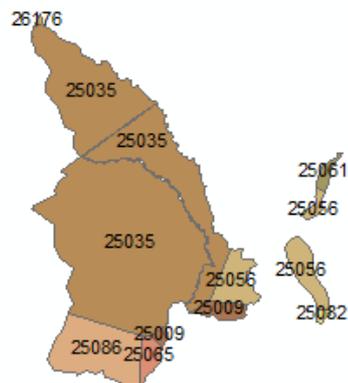


Fig. 6.6 Polígonos de Thiessen DR076

Tabla 6.2 Evapotranspiración de Referencia (ET_o) DR075

Mes	Temp Mín	Temp Máx	Humedad	Viento	Insolación	Rad	ET _o
	°C	°C	%	m/s	horas	MJ/m ² /día	mm
Enero	9.7	26.1	68	2	9.1	16.2	502.2
Febrero	9.9	27.6	67	2	10.1	19.6	553.7
Marzo	10.7	29.5	66	2	11.2	23.9	740.9
Abril	12.9	32.5	65	2	12.3	27.6	828.0
Mayo	15.8	34.9	66	2	12.8	29.2	905.2
Junio	21.2	36.6	71	2	11.3	27	810.0
Julio	23.4	36.3	74	2	9.8	24.6	762.6
Agosto	23.3	35.8	74	2	9.3	23.3	722.3
Septiembre	22.7	35.5	74	2	9	21.3	639.0
Octubre	19.3	34.3	71	2	9.6	19.7	610.7
Noviembre	13.7	30.6	68	2	9.9	17.5	525.0
Diciembre	10.4	26.7	68	2	9.2	15.5	480.5

Tabla 6.3 Evapotranspiración de Referencia (ET_o) DR076

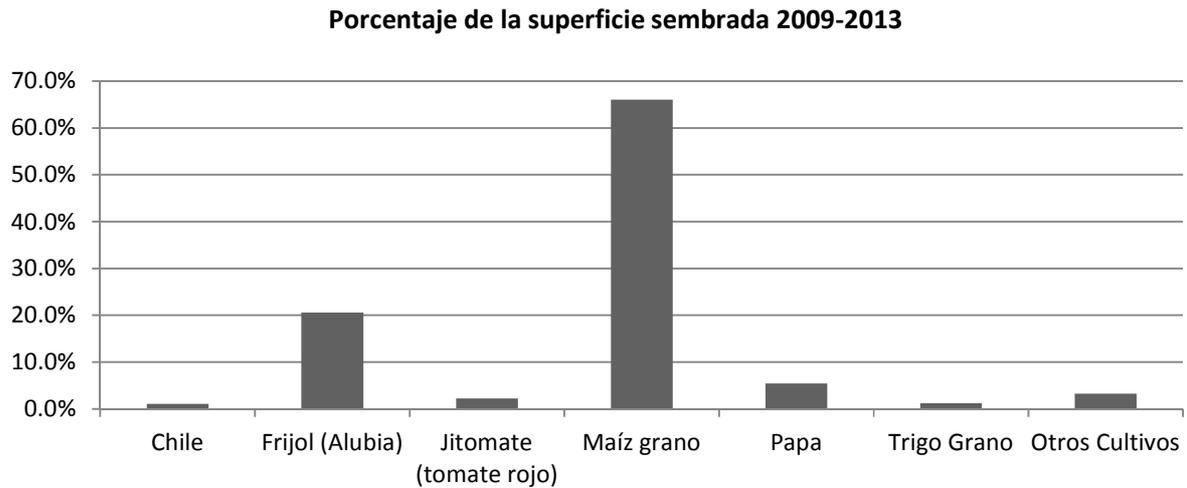
Mes	Temp Mín	Temp Máx	Humedad	Viento	Insolación	Rad	ET _o
	°C	°C	%	m/s	horas	MJ/m ² /día	mm
Enero	9.9	26.8	67	2	9.4	16.3	97.3
Febrero	10.2	28.1	66	2	10.2	19.6	107.6
Marzo	11.2	30.4	65	2	11.4	24	149.7
Abril	13.3	33.6	65	2	12.7	28.1	180.0
Mayo	16.6	36.5	66	2	13.2	29.7	209.8
Junio	22.3	38.4	70	2	11.7	27.6	203.4
Julio	24.9	37.3	75	2	9.5	24.2	187.5
Agosto	24.8	36.6	76	2	8.8	22.5	174.2
Septiembre	24	36.3	75	2	8.7	20.8	157.2
Octubre	20	35.1	71	2	9.6	19.5	149.1
Noviembre	14.1	31.3	68	2	10	17.4	117.0
Diciembre	10.7	27.5	68	2	9.4	15.5	96.7

6.2.3 Estimación de los Coeficientes de Cultivo

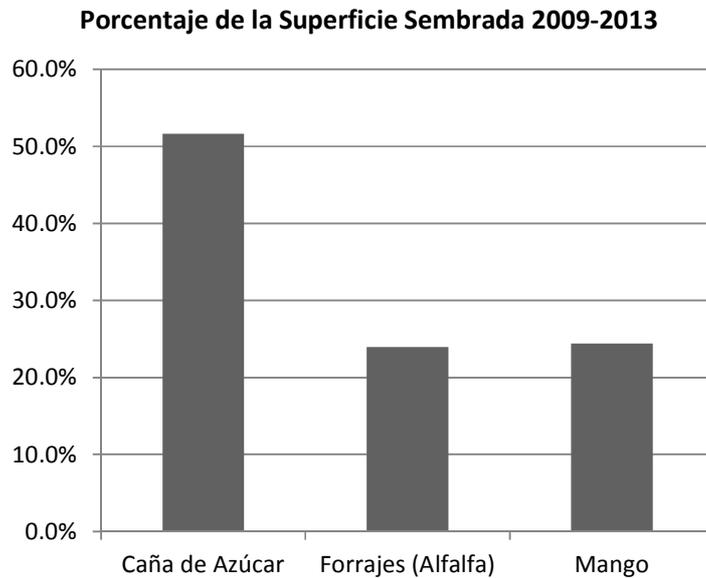
La metodología empleada para la estimación de los coeficientes de los cultivos principales es la siguiente:

Identificación de los cultivos principales

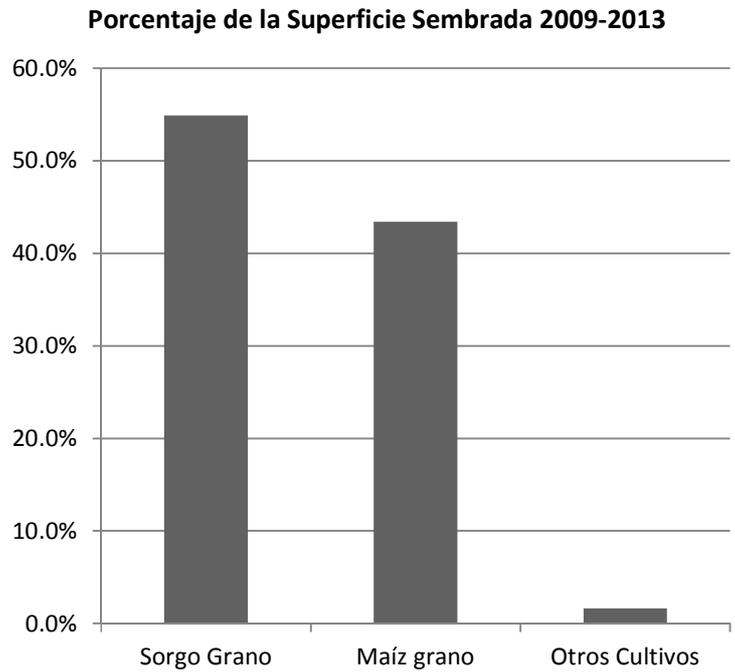
El primer paso consistió en la identificación del patrón de cultivos principales de cada ciclo en cada distrito para los planes de cultivos de los años agrícolas del periodo 2009-2013 proporcionados por las Jefaturas, de acuerdo a los porcentajes de la superficie total sembrada durante ese periodo en cada ciclo, como se presenta en las gráficas siguientes:



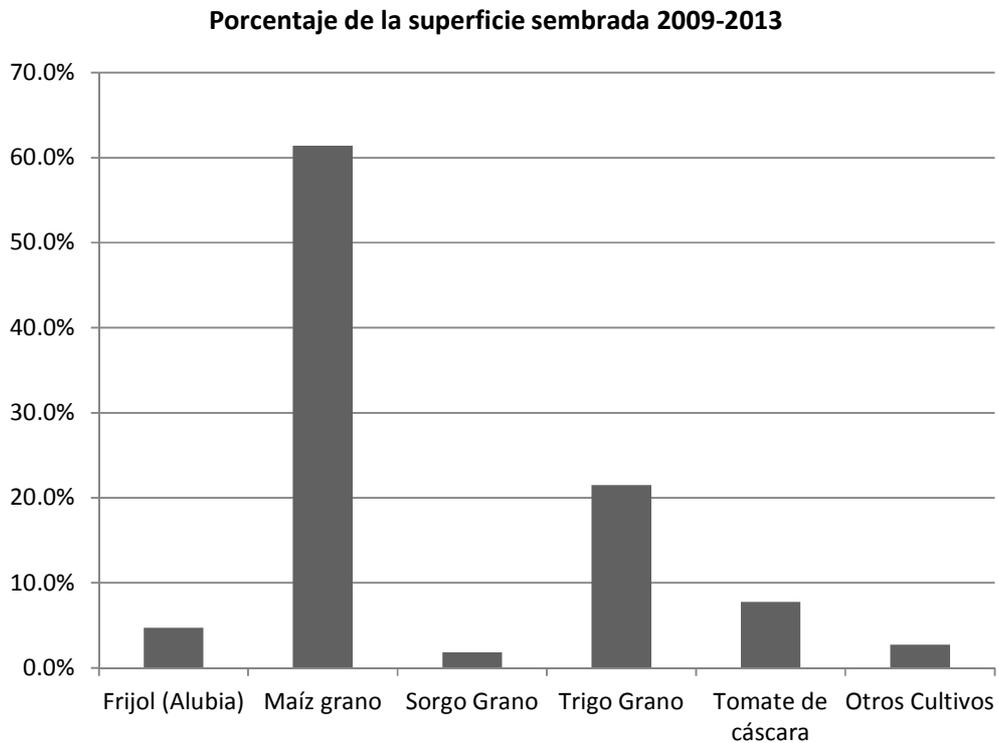
Gráfica 6.1 Superficies Sembradas en el Ciclo Otoño-Invierno, DR075



Gráfica 6.2 Superficies Sembradas de Cultivos Perennes, DR075

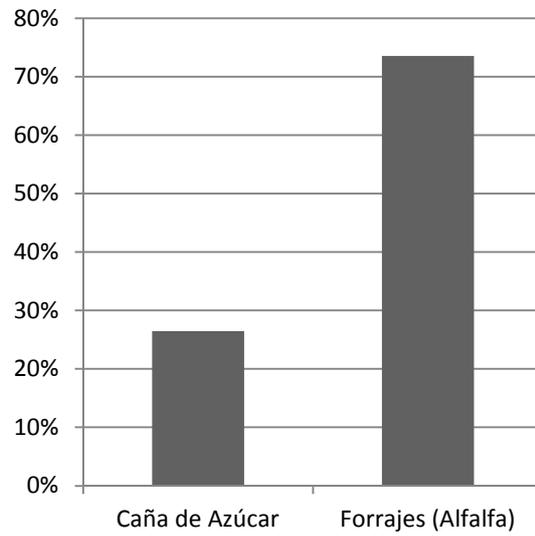


Gráfica 6.3 Superficies Sembradas en el Ciclo Primavera-Verano, DR075



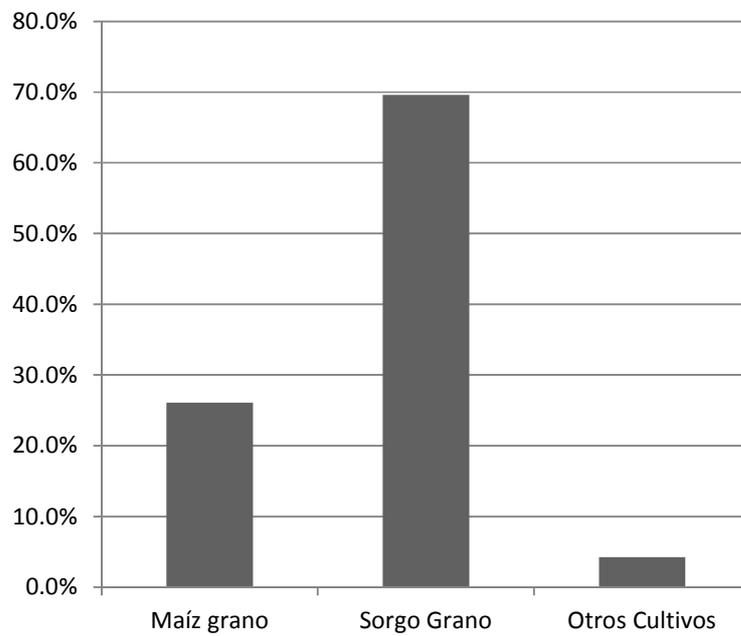
Gráfica 6.4 Superficies Sembradas en el Ciclo Otoño-Invierno, DR076

Porcentaje de la superficie sembrada 2009-2013



Gráfica 6.5 Superficies Sembradas de Cultivos Perennes, DR076

Porcentaje de la superficie sembrada 2009-2013



Gráfica 6.6 Superficies Sembradas en el Ciclo Primavera-Verano, DR076

Finalmente, el patrón de cultivos resultante fue:

Tabla 6.4 Patrón de Cultivos

DR075 "Río Fuerte"			DR076 "Valle del Carrizo"		
O-I*	Perennes	P-V*	O-I	Perennes	P-V
Maíz Grano	Caña de Azúcar	Maíz Grano	Maíz Grano	Caña de Azúcar	Maíz Grano
Frijol (Alubia)	Forrajes (Alfalfa)	Sorgo Grano	Frijol (Alubia)	Forrajes (Alfalfa)	Sorgo Grano
Jitomate	Frutales (Mango)		Tomate de Cáscara		
Papa			Sorgo Grano		
Chile Verde			Trigo Grano		
Trigo Grano					

O-I y P-V, se refieren a los ciclos Otoño Invierno y Primavera Verano, respectivamente

Demanda de agua de los cultivos

A partir de los promedios del periodo 2009-2013 de volúmenes mensuales suministrados para cada cultivo y de las áreas anuales sembradas, se estimaron las láminas entregadas a las parcelas para riego de los cultivos aplicando la ecuación (3.6), cabe señalar que en la ecuación la eficiencia de conducción se tomó igual a 1 ya que se disponía de los volúmenes netos suministrados (a nivel parcela). Los coeficientes de requerimiento de riego anuales de los cultivos principales se presentan en las tablas siguientes:

Tabla 6.5 Láminas Anuales Requeridas por los Cultivos del DR075

Ciclo	Cultivo	Lámina media requerida [cm]	Coefficiente de Variación
Otoño-Invierno	Maíz Grano	68.52	0.17
	Frijol (Alubia)	46.08	0.15
	Papa	54.07	0.09
	Jitomate	49.84	0.08
	Trigo Grano	61.94	0.08
	Chile Verde	53.33	0.07
Perennes	Forrajes (Alfalfa)	86.79	0.22
	Caña de Azúcar	88.86	0.39
	Frutales (Mango)	77.31	0.23
Primavera-Verano	Sorgo Grano	54.50	0.24
	Maíz Grano	62.46	0.40

Tabla 6.6 Láminas Anuales Requeridas por los Cultivos del DR 076

Ciclo	Cultivo	Lámina media requerida [cm]	Coefficiente de Variación
Otoño-Invierno	Maíz Grano	46.41	0.28
	Frijol (Alubia)	27.15	0.20
	Tomate Cáscara	46.65	0.16
	Trigo Grano	66.74	0.08
	Sorgo Grano	52.86	0.11
Perennes	Forrajes (Alfalfa)	104.69	0.09
	Caña de Azúcar	52.20	0.43
Primavera-Verano	Sorgo Grano	48.41	0.39
	Maíz Grano	63.85	0.42

Es importante aclarar que en el caso del sorgo grano del ciclo Otoño-Invierno únicamente se utilizó la información disponible, que corresponde al periodo 2011-2012 y 2012-2013; además, para los cultivos sorgo grano y maíz grano del ciclo Primavera-Verano no se tomó en cuenta el año 2010-2011 porque presentaba gran variación respecto a los demás debido a la helada ocurrida en el sitio durante el mes febrero de 2011 que acabó con gran parte de la producción de sorgo y maíz del ciclo Otoño-Invierno, obligando a volver a sembrar parte de la producción para mitigar las pérdidas.

Coeficientes de los Cultivos (Kc)

Una vez contando con las láminas requeridas por los cultivos según la información estadística, se calculó la precipitación efectiva media utilizando las ecuaciones (3.4) y (3.5) y los polígonos de Thiessen de las Fig. 6.5 y 6.6, estimando a continuación los requerimientos de agua de los cultivos (RAC) para sus respectivos meses de siembra, proponiendo diferentes valores de los coeficientes (Kc), días de inicio y duraciones del ciclo vegetativo a partir de los propuestos por la FAO (Allen et al., 2006).

Para verificar si los valores del Kc, día de inicio y duración propuestos eran correctos, se dividieron los RAC entre la eficiencia de aplicación del riego y se multiplicó ese valor por el porcentaje del área total del cultivo que se sembró en el mes, obteniendo la lámina a nivel parcela; finalmente, los valores obtenidos se compararon con las láminas requeridas estimadas en el punto anterior buscando que entre ellos no existiera una diferencia mayor al 3% del valor más grande, como se ilustra en la tabla siguiente para el caso del maíz grano del distrito de riego 075:

Tabla 6.7 Estimación del Coeficiente de Cultivo para el Maíz Grano del Ciclo Otoño-Invierno en el Distrito de Riego 075 "Río Fuerte"

Cultivo:	Maíz Grano		Ciclo:	Otoño-Invierno		
	Kc ini	Kc med		Kc fin		
	0.3	1.2	0.35			
Fecha de siembra:	15-sep	15-oct	15-nov	15-dic	15-ene	Total
Duración de Etapa Inicial [días]	20	20	20	20	20	
Duración de Etapa de Desarrollo [días]	30	30	30	30	30	
Duración de Etapa Media [días]	35	35	35	35	35	
Duración de Etapa Final [días]	30	30	30	30	30	
Duración Total del Ciclo Vegetativo [días]	115	115	115	115	115	
Fecha de cosecha:	08-ene	07-feb	10-mar	09-abr	10-may	
Requerimiento de Agua [mm]	285.40	266.30	275.70	346.60	460.10	
Requerimiento de Agua [cm]	28.54	26.63	27.57	34.66	46.01	
Eficiencia del Riego	0.50	0.54	0.64	0.67	0.68	
Requerimiento Neto [cm]	57.23	49.23	42.77	51.59	67.93	
Superficie Sembrada [%]	0.6%	30.5%	54.0%	12.5%	2.4%	100%
Lamina Neta Demandada [cm]	0.36	15.12	23.23	6.50	1.61	46.83
Lámina Neta Proporcionada [cm]						46.41
Diferencia					1%	-0.42

Los coeficientes de cultivo y las duraciones del ciclo vegetativo estimados para los principales cultivos de los distritos de riego 075 y 076 se muestran en las tablas 6.8 a 6.11:

Tabla 6.8 Duración de las etapas de crecimiento de los cultivos del DR075

Ciclo	Cultivo	Duración [días]			
		Emergencia	Desarrollo	Floración	Madurez
Otoño-Invierno	Maíz Grano	25	40	45	30
	Frijol (Alubia)	20	30	40	20
	Papa	25	30	30	30
	Jitomate	30	40	40	25
	Trigo Grano	30	30	40	30
	Chile Verde	25	30	35	20
Perennes	Forrajes (Alfalfa)	10	30	95	35
	Caña de Azúcar	20	25	70	35
	Frutales (Mango)	20	35	50	55
Primavera-Verano	Sorgo Grano	20	25	30	25
	Maíz Grano	20	25	30	20

Tabla 6.9 Coeficientes de cultivo (Kc), DR075

Ciclo	Cultivo	Kc			
		Emergencia	Desarrollo	Floración	Madurez
Otoño-Invierno	Maíz Grano	0.3	1.2	1.2	0.35
	Frijol (Alubia)	0.4	1.15	1.15	0.35
	Papa	0.5	1.15	1.15	0.75
	Jitomate	0.6	1.15	1.15	0.8
	Trigo Grano	0.3	1.15	1.15	0.3
	Chile Verde	0.6	1.05	1.05	0.9
Perennes	Forrajes (Alfalfa)	0.40	0.95	0.95	0.40
	Caña de Azúcar	0.3	1.25	1.25	0.6
	Frutales (Mango)	0.35	1.1	1.1	0.35
Primavera-Verano	Sorgo Grano	0.3	1	1	0.35
	Maíz Grano	0.3	1.1	1.1	0.35

Tabla 6.10 Duración de las etapas de crecimiento de los cultivos del DR076

Ciclo	Cultivo	Duración [días]			
		Emergencia	Desarrollo	Floración	Madurez
Otoño-Invierno	Maíz Grano	20	30	35	30
	Frijol (Alubia)	15	20	20	15
	Tomate Cáscara	25	35	40	25
	Trigo Grano	20	25	60	30
	Sorgo Grano	20	35	30	30
Perennes	Forrajes (Alfalfa)	15	30	110	35
	Caña de Azúcar	20	25	45	25
Primavera-Verano	Sorgo Grano	15	20	25	20
	Maíz Grano	20	25	30	20

Tabla 6.11 Coeficientes de cultivo (Kc), DR076

Ciclo	Cultivo	Kc			
		Emergencia	Desarrollo	Floración	Madurez
Otoño-Invierno	Maíz Grano	0.3	1.2	1.2	0.35
	Frijol (Alubia)	0.3	1.1	1.1	0.3
	Tomate Cáscara	0.3	1.1	1.1	0.65
	Trigo Grano	0.3	1.15	1.15	0.4
	Sorgo Grano	0.3	1.00	1.00	0.55
Perennes	Forrajes (Alfalfa)	0.4	0.95	0.95	0.4
	Caña de Azúcar	0.3	1.2	1.2	0.6
Primavera-Verano	Sorgo Grano	0.3	1.0	1.0	0.5
	Maíz Grano	0.3	1.2	1.2	0.35

6.2.4 Análisis de homogeneidad y tendencias en el Requerimiento de Agua de los Cultivos

A los datos de requerimiento de agua de los cultivos (RAC) se le aplicaron las pruebas de homogeneidad y tendencias descritas en el capítulo 2 con la finalidad de analizar posibles cambios o tendencias en la serie de demandas a los almacenamientos por modificaciones en las variables climatológicas. En el *Anexo I* se incluyen los resultados que se obtuvieron para cada cultivo.

En los resultados se observó un punto de quiebre en la mayoría de las series al final de la década de los cincuentas y principios de los sesentas, sin embargo, se concluyó que no se debe a un cambio o a un punto extraño, sino que fue ocasionado por el periodo seco que impactó a la zona en la mitad del siglo XX y que de poseer un registro de mayor longitud el cambio en la serie se compensaría con otros periodos secos.

6.2.5 Política de Operación del Sistema de Presas

Al no obtener información oficial de la política de operación del sistema de presas fue necesario inferirla a partir de la base de datos del funcionamiento histórico y de las curvas elevación-capacidad-área, elaborando un programa que simule el funcionamiento del vaso de acuerdo al algoritmo presentado por Aparicio Mijares (2011). Se establecieron coeficientes mensuales de transferencia de la presa Huites a la Miguel Hidalgo y Costilla y de la presa Miguel Hidalgo y Costilla a la presa Josefa Ortiz de Domínguez, además de coeficientes mensuales para representar el efecto de las mediciones de los evaporímetros y pluviómetro en los embalses.

En total, se estimaron 60 coeficientes de funcionamiento, calibrándolos mediante un algoritmo genético a partir de los 13 años de funcionamiento disponibles en la base de datos histórica (1997-2009). En la tabla siguiente se muestra la comparación de algunos parámetros del funcionamiento obtenidos de los datos reales y los simulados.

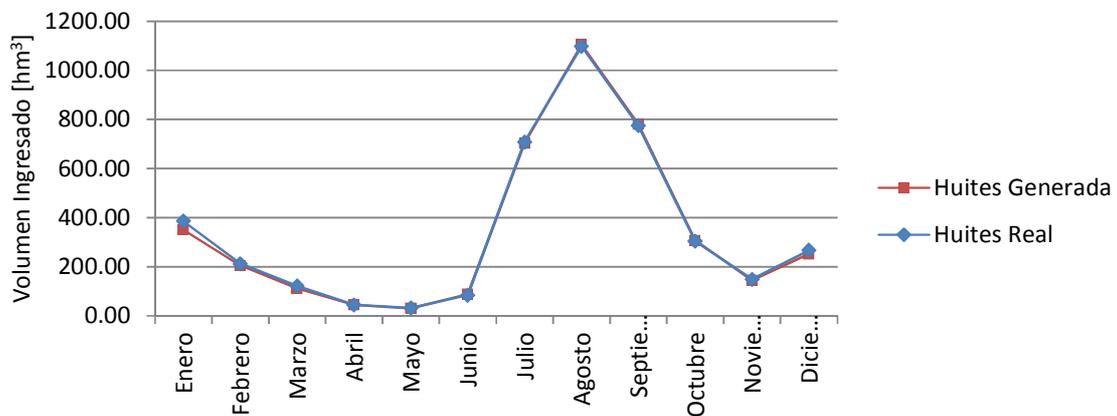
Tabla 6.12 Resultados de la Calibración de la Política de Operación del Sistema de Presas para el periodo 1997-2009

Presa	Datos	Derrames	Déficits	Volumen Transferido [hm ³]
Huites	Reales	3	0	42368
	Simulados	3	0	49165
Miguel Hidalgo	Reales	18	0	7564
	Simulados	16	0	7241
Josefa Ortiz	Reales	3	3	0
	Simulados	2	4	0

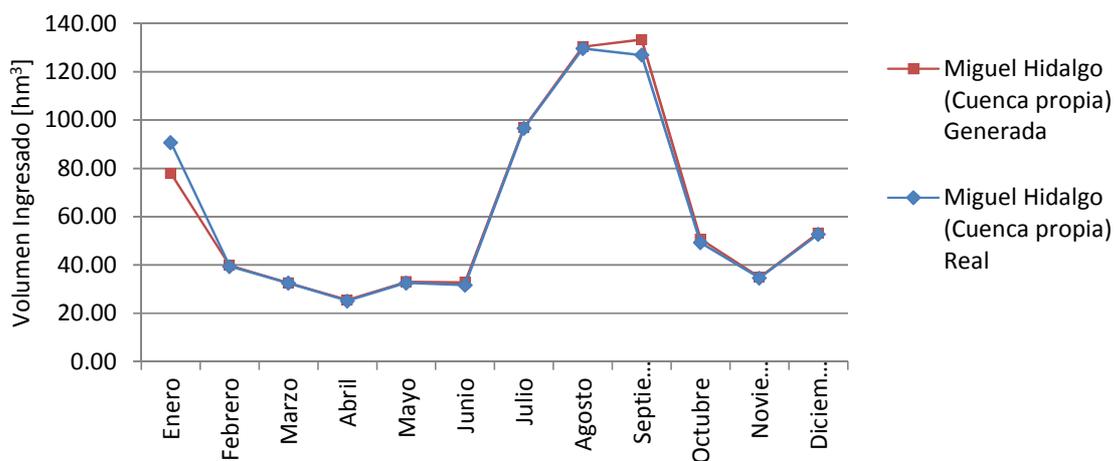
6.2.6 Ingresos al Sistema de Presas

Para analizar la disponibilidad del sistema de presas a largo plazo se generaron muestras sintéticas de los ingresos utilizando los modelos descritos en el capítulo 1.

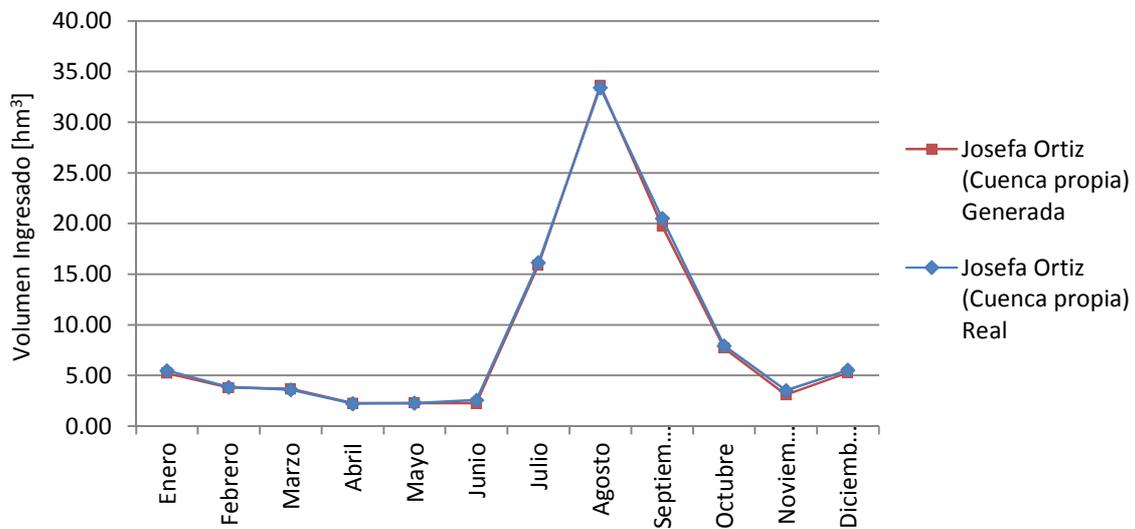
Después de ensayar diferentes modelos se observó que el ARMA (1,1) Periódico es el que mejor preserva las características de la serie, así que se generaron 100 muestras de 64 años de ingresos mensuales, correspondientes a la longitud del registro, para un total de 6 400 años o 76 800 meses a través de los cuales es posible conocer una gran cantidad de estados del sistema. En las gráficas 6.7 a 6.9 se pueden observar comparaciones entre la media de las muestras generadas y la de la muestra registrada para cada presa.



Gráfica 6.7 Promedios mensuales de ingresos de la muestra sintética y de la muestra real de la presa Luis Donaldo Colosio (Huites)



Gráfica 6.8 Promedios mensuales de ingresos por cuenca propia de la muestra sintética y de la muestra real de la Presa Miguel Hidalgo y Costilla



Gráfica 6.9 Promedios mensuales de ingresos por cuenca propia de la muestra sintética y de la muestra real de la Presa Josefa Ortiz de Domínguez

6.2.7 Demandas a los almacenamientos por hectárea sembrada

Corresponden a las extracciones que se requieren efectuar de las presas Miguel Hidalgo y Costilla y Josefa Ortiz de Domínguez para satisfacer las demandas de cada hectárea sembrada de un determinado cultivo. Para su cálculo se utilizó la base de datos de Requerimientos de Agua de los Cultivos (RAC), dividiéndola entre las eficiencias por aplicación y por conducción y multiplicándola por 10 000 m². El registro completo de demandas por hectárea de los principales cultivos de los distritos de riego 075 y 076, calculado para el periodo 1951-2010, se presenta en el *Anexo II*. En las Tablas 6.13 y 6.14 se muestran los promedios de los valores calculados para cada distrito de riego.

Tabla 6.13 Demandas por hectárea del distrito de riego 075

Ciclo	Cultivo	Demanda por hectárea [m ³]
Otoño-Invierno	Maíz Grano	10661.30
	Frijol (Alubia)	6717.23
	Papa	7834.07
	Jitomate	7054.67
	Trigo Grano	8290.75
	Chile Verde	7345.03
Perennes	Forrajes (Alfalfa)	13614.44
	Caña de Azúcar	11947.16
	Frutales (Mango)	12115.53
Primavera-Verano	Sorgo Grano	11306.94
	Maíz Grano	10399.52

Tabla 6.14 Demandas por hectárea del distrito de riego 076

Ciclo	Cultivo	Demanda por hectárea [m ³]
Otoño-Invierno	Maíz Grano	7208.08
	Frijol (Alubia)	4089.13
	Tomate Cáscara	6425.34
	Trigo Grano	13493.86
	Sorgo Grano	8860.40
Perennes	Forrajes (Alfalfa)	16621.01
	Caña de Azúcar	8075.69
Primavera-Verano	Sorgo Grano	8999.40
	Maíz Grano	12266.84

6.2.8 Superficies Óptimas

A través de la política de operación del sistema de presas, los ingresos generados, las demandas por hectárea, las demandas por otros usos y las aportaciones desde otras fuentes a los distritos de riego, se realizaron simulaciones de funcionamiento para observar la cantidad de veces en las que el sistema quedaba en condición de déficit o que ocurrían derrames. En total, fueron tres simulaciones en las que se consideraron las siguientes superficies de siembra: el promedio de la superficie sembrada, la mayor superficie sembrada en un año agrícola y la menor superficie sembrada en un año agrícola, todas correspondientes al periodo 2009-2013:

Tabla 6.15 Superficies [ha] sembradas de los principales cultivos del DR075, bajo tres diferentes condiciones

Ciclo	Cultivo	Promedio 2009-2013	Máximo (2010-2011)	Mínimo (2012-2013)
Otoño-Invierno	Maíz Grano	134287.75	139150.43	152807.37
	Frijol (Alubia)	42040.34	35210.91	29837.23
	Papa	10718.72	11576.44	10618.06
	Jitomate	5547.16	4928.26	2777.6
	Trigo Grano	2718.38	2764.45	2286.94
	Chile Verde	3508.51	3619.45	2735.51
Perennes	Forrajes (Alfalfa)	2011.25	1990.64	1984.61
	Caña de Azúcar	7458.55	8027.82	4901.03
	Frutales (Mango)	3160.16	3224.54	3597.23
Primavera-Verano	Sorgo Grano	28557.34	97194.76	1038.1
	Maíz Grano	35187.01	61767.28	11335.59

Tabla 6.16 Superficies [ha] sembradas de los principales cultivos del DR076, bajo tres diferentes condiciones

Ciclo	Cultivo	Promedio 2009-2013	Máximo (2010-2011)	Mínimo (2012-2013)
Otoño-Invierno	Maíz Grano	40864.69	47833.30	29855.94
	Frijol (Alubia)	3149.96	2104.31	1890.53
	Tomate Cáscara	5171.51	7446.43	2959.03
	Trigo Grano	14329.91	12174.05	15605.43
	Sorgo Grano	3060.32	0.00	2820.41
Perennes	Forrajes (Alfalfa)	351.17	390.80	255.45
	Caña de Azúcar	176.00	176.00	176.00
Primavera-Verano	Sorgo Grano	4710.15	22301.00	485.20
	Maíz Grano	12550.91	23411.25	6854.67

Las superficies anteriores se multiplicaron por las demandas por hectárea de las Tablas 6.13 y 6.14, obteniendo volúmenes demandados anuales. Debido a la política de operación, la simulación se realizó de forma mensual por lo que fue necesario dividir los volúmenes demandados anuales en fracciones mensuales, para esto, de las extracciones registradas para las presas Miguel Hidalgo y Costilla y Josefa Ortiz de Domínguez se obtuvieron coeficientes de distribución mensual, dividiendo las extracciones promedio mensuales entre la extracción promedio anual. Los coeficientes obtenidos son:

Tabla 6.17 Coeficientes de distribución mensual de la extracción

Mes	DR075	DR076
Enero	0.10	0.14
Febrero	0.10	0.14
Marzo	0.13	0.20
Abril	0.11	0.11
Mayo	0.09	0.04
Junio	0.06	0.02
Julio	0.04	0.01
Agosto	0.04	0.01
Septiembre	0.07	0.02
Octubre	0.10	0.10
Noviembre	0.09	0.10
Diciembre	0.08	0.12

En lo referente a la demanda por otros usos y aportación de otras fuentes (sólo DR075) se utilizaron los valores mensuales promedio para los años agrícolas 2009-2013:

Tabla 6.18 Extracciones por otros usos y aportación de otras fuentes de almacenamiento

Mes	DR075		DR076
	Otros Usos	Otras Fuentes	Otros Usos
Enero	15.04	25.19	1.88
Febrero	14.04	29.22	1.67
Marzo	15.10	37.90	1.85
Abril	15.39	36.55	1.91
Mayo	16.87	29.33	1.99
Junio	16.95	34.12	2.05
Julio	19.11	16.49	1.75
Agosto	22.86	16.35	1.58
Septiembre	19.91	74.52	1.68
Octubre	17.05	24.20	1.86
Noviembre	92.08	31.99	1.83
Diciembre	14.86	32.30	1.84

Las simulaciones realizadas bajo estas condiciones dieron los siguientes resultados:

Tabla 6.19 Resultados de la Simulación 1

		Promedio 2009-2013	Máximo	Mínimo
Huites	Derrames	3.2%	3.2%	3.2%
	Déficits	0.2%	0.2%	0.2%
Hidalgo	Derrames	17.7%	8.5%	23.5%
	Déficits	1.2%	10.4%	0.3%
Josefa	Derrames	8.4%	0.0%	20.7%
	Déficits	8.7%	59.1%	1.8%
Sistema	Derrames	29.4%	11.8%	47.4%
	Déficits	10.1%	69.7%	2.3%
Sistema	Total	39.5%	81.5%	49.7%
DR075	Valor de la Producción (\$x10 ⁶)	21200	40500	9560
DR076	Valor de la Producción (\$x10 ⁶)	1450	2150	1130
Total	Valor de la Producción (\$x10 ⁶)	22650	42650	10690

De los 76 800 meses simulados se observa a largo plazo de mantener una superficie de riego igual a la máxima que se ha establecido en ambos distritos, el valor de la producción sería muy alto siempre y cuando la disponibilidad de agua fuera la suficiente para satisfacer las demandas, sin embargo más de la mitad de las veces este volumen no será suficiente y por consiguiente la producción esperada, mientras que de establecer la menor

superficie se concluye que no se estaría llevando a cabo un correcto aprovechamiento del recurso ya que a pesar de que los déficits se reducirían, se estaría desperdiciando una gran cantidad de agua que se podría ocupar para aumentar la producción, por lo que el promedio resulta la opción más favorable entre estas tres, ya que compensa la cantidad de derrames y déficits reduciendo el total de estados desfavorables en el sistema. El precio por hectárea del cultivo se obtuvo de las tablas 6.20 y 6.21:

Tabla 6.20 Precio por hectárea DR075

Ciclo	Cultivo	\$ por Hectárea
Otoño-Invierno	Maíz Grano	21852.46
	Frijol (Alubia)	18683.59
	Papa	132549.99
	Jitomate	70005.68
	Trigo Grano	10102.39
	Chile Verde	105523.06
Perennes	Forrajes (Alfalfa)	22769.23
	Caña de Azúcar	22875.44
	Frutales (Mango)	64630.11
Primavera-Verano	Sorgo Grano	172868.36
	Maíz Grano	280385.40

Tabla 6.21 Precio por hectárea DR076

Ciclo	Cultivo	\$ por Hectárea
Otoño-Invierno	Maíz Grano	18896.76
	Frijol (Alubia)	17944.71
	Tomate Cáscara	42062.43
	Trigo Grano	11586.49
	Sorgo Grano	27511.00
Perennes	Forrajes (Alfalfa)	22861.52
	Caña de Azúcar	40364.23
Primavera-Verano	Sorgo Grano	12966.53
	Maíz Grano	19261.79

Por otro lado, el comportamiento del sistema de presas ante las demandas por hectárea calculadas a partir de las evapotranspiraciones estimadas y ante las extracciones promedio registradas en el periodo 1997-2010, es prácticamente igual, por lo que se puede validar el cálculo de las evapotranspiraciones.

Tabla 6.22 Comparación del comportamiento del sistema de presas bajo las demandas reales (1997-2009) y las estimadas (2009-2013)

	Escenario	Promedio 1997-2009	Promedio 2009-2013
Huites	Derrames	3.2%	3.2%
	Déficits	0.2%	0.2%
Hidalgo	Derrames	17.7%	17.7%
	Déficits	1.2%	1.2%
Josefa	Derrames	8.4%	8.4%
	Déficits	8.8%	8.7%
Sistema	Derrames	29.3%	29.4%
	Déficits	10.2%	10.1%
Sistema	Total	39.5%	39.5%

Una vez definida la condición promedio como la mejor entre las 3 anteriores, se buscó optimizar esa superficie para conciliar aún más el efecto de déficits y derrames, y ampliar las hectáreas sembradas con la finalidad de obtener una mayor producción.

Mediante un algoritmo genético simple se buscó bajo qué superficies de los cultivos principales se podían reducir la cantidad de condiciones de déficits y derrames en el sistema de presas ante la mayor producción considerando las restricciones de superficie física de los distritos de riego y de siembra mínima y máximas recientes (2009-2013). A continuación se describen las partes del modelo de optimización utilizado:

Función Objetivo

Ya que el problema se trata de la optimización de varios objetivos se tuvo que afrontar como una función multiobjetivo, incluyendo todos los objetivos en una sola función que busca minimizar los déficits y derrames en las presas al tiempo que maximiza la producción en ambos distritos. Se plantearon dos modelos para resolver, el primero busca maximizar la producción considerando los precios de los cultivos por hectárea y el segundo busca sembrar la mayor área de cada cultivo, sometido a ciertas restricciones. Las funciones objetivo de cada modelo son:

$$Z = -ProdDR075 - ProdDR076 + CdefH * DefHidalgo + CdefJ * DefJosefa \quad (6.1)$$

$$Z = - \sum_{i=1}^{11} x_i - \sum_{i=12}^{20} x_i + CdefH * DefHidalgo + CdefJ * DefJosefa \quad (6.2)$$

Donde:

Z – Es la función objetivo

i – Son los cultivos principales de acuerdo a la Tabla 6.23.

x_i – es la superficie establecida del cultivo i

$ProdDR075, ProdDR076$ – Producción de los distritos de riego 075 y 076, respectivamente. Se obtiene de multiplicar el precio por hectárea sembrada de un cultivo por la superficie sembrada del mismo.

$DefHidalgo, DefJosefa$ – Número de déficits de las presas Miguel Hidalgo y Costilla y Josefa Ortiz de Domínguez, respectivamente.

$DerrHidalgo, DerrJosefa$ – Número de derrames de las presas Miguel Hidalgo y Costilla y Josefa Ortiz de Domínguez, respectivamente.

$CdefH, CdefJ$ – Son coeficientes de castigo por déficit de las presas Miguel Hidalgo y Costilla y Josefa Ortiz de Domínguez, respectivamente.

$CderrH, CderrJ$ – Son coeficientes de castigo por derrame de las presas Miguel Hidalgo y Costilla y Josefa Ortiz de Domínguez, respectivamente.

Tabla 6.23 Número asignado a los cultivos principales de los distritos de riego 075 y 076

i	Distrito de riego 075		i	Distrito de riego 076	
	Cultivo	Ciclo		Cultivo	Ciclo
1	Maíz Grano	Otoño - Invierno	12	Maíz Grano	Otoño - Invierno
2	Frijol (Alubia)		13	Frijol (Alubia)	
3	Papa		14	Tomate Cáscara	
4	Jitomate		15	Trigo Grano	
5	Trigo Grano		16	Sorgo Grano	
6	Chile Verde		17	Forrajes (Alfalfa)	
7	Forrajes (Alfalfa)	Perennes	18	Caña de Azúcar	Perennes
8	Caña de Azúcar		19	Sorgo Grano	
9	Frutales (Mango)		20	Maíz Grano	
10	Sorgo Grano	Primavera-Verano			Primavera-Verano
11	Maíz Grano				

Restricciones

Debido a que el presente trabajo no se consideraron condiciones sociales ni de mercado, éstas se trataron de tomar en cuenta, restringiendo la superficie de cada uno de los cultivos principales de tal forma que esta no fuera mayor que las superficies máximas, ni menor que las superficies mínimas sembradas en los últimos años (2009-2013). Además, se limitó la superficie total de los cultivos de los ciclos Otoño-Invierno y Perennes para que esta no fuera mayor que la superficie total del distrito. Las ecuaciones de las restricciones son:

$$111521.59 \leq x_1 \leq 152807.37 \quad (6.3)$$

$$29837.23 \leq x_2 \leq 64602.67 \quad (6.4)$$

$$8879.68 \leq x_3 \leq 11628.83 \quad (6.5)$$

$$2777.6 \leq x_4 \leq 7002.73 \quad (6.6)$$

$$2007.17 \leq x_5 \leq 4145.51 \quad (6.7)$$

$$2735.51 \leq x_6 \leq 4222.20 \quad (6.8)$$

$$1880.79 \leq x_7 \leq 2130.63 \quad (6.9)$$

$$4901.03 \leq x_8 \leq 10454.3 \quad (6.10)$$

$$3064.19 \leq x_9 \leq 4545.14 \quad (6.11)$$

$$8228.42 \leq x_{10} \leq 61767.26 \quad (6.12)$$

$$1038.10 \leq x_{11} \leq 20000.00 \quad (6.13)$$

$$29855.94 \leq x_{12} \leq 48738.58 \quad (6.14)$$

$$1476.11 \leq x_{13} \leq 7693.25 \quad (6.15)$$

$$2812.11 \leq x_{14} \leq 7634.37 \quad (6.16)$$

$$9893.69 \leq x_{15} \leq 21100.25 \quad (6.17)$$

$$2820.41 \leq x_{16} \leq 3300.22 \quad (6.18)$$

$$255.45 \leq x_{17} \leq 533.58 \quad (6.19)$$

$$176.00 \leq x_{18} \leq 176.00 \quad (6.20)$$

$$2670.78 \leq x_{19} \leq 24368.24 \quad (6.21)$$

$$173.15 \leq x_{20} \leq 485.2 \quad (6.22)$$

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 \leq 228441.22 \quad (6.23)$$

$$x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{15} + x_{16} + x_{17} + x_{18} \leq 71585.86 \quad (6.24)$$

Se realizó una simulación de cada modelo ambas para una población de 100 individuos. En el primer caso se obtuvieron 40 generaciones, el criterio de finalización consistió en que se alcanzó el número máximo de generaciones sin una mejora significativa en la evaluación de la función objetivo.

La simulación del segundo modelo termino al cabo de 51 generaciones, con el criterio de que el cambio en la función objetivo fue menor a 0.001. Además, en el modelo 1 se tomó como población inicial la superficie promedio, mientras que en el modelo 2 se permitió al algoritmo buscar una población inicial eligiendo de manera aleatoria los límites máximos y mínimos de la función objetivo.

Tabla 6.24 Superficies Óptimas del DR075

Ciclo	Cultivo	Modelo 1	Modelo 2
Otoño-Invierno	Maíz Grano	134287.75	152807.21
	Frijol (Alubia)	42040.34	29930.94
	Papa	10718.72	11628.83
	Jitomate	5547.16	2782.60
	Trigo Grano	2718.38	4145.51
	Chile Verde	3508.51	2820.82
Perennes	Forrajes (Alfalfa)	2011.25	1935.39
	Caña de Azúcar	7458.55	10454.30
	Frutales (Mango)	3160.16	3268.39
Primavera-Verano	Sorgo Grano	28557.34	61767.26
	Maíz Grano	20000.00	3444.08

Tabla 6.25 Superficies óptimas del DR076

Ciclo	Cultivo	Modelo 1	Modelo 2
Otoño-Invierno	Maíz Grano	40864.69	48736.58
	Frijol (Alubia)	3149.96	3774.79
	Tomate Cáscara	5171.51	2886.03
	Trigo Grano	14329.91	12656.42
	Sorgo Grano	3060.32	2822.41
Perennes	Forrajes (Alfalfa)	351.17	533.58
	Caña de Azúcar	176.00	176.00
Primavera-Verano	Sorgo Grano	9835.82	3266.85
	Maíz Grano	312.43	175.64

Tabla 6.26 Resultados de la Simulación con las superficies optimizadas

	Escenario	Modelo 1	Modelo 2
Huites	Derrames	3.20%	3.20%
	Déficits	0.21%	0.21%
Hidalgo	Derrames	19.47%	15.91%
	Déficits	0.82%	1.92%
Josefa	Derrames	9.95%	8.47%
	Déficits	6.29%	10.74%
Sistema	Derrames	32.62%	27.59%
	Déficits	7.32%	12.87%
Sistema	Total	47.92%	45.10%
DR075	Valor de la Producción (\$x10 ⁶)	16892	18122
DR076	Valor de la Producción (\$x10 ⁶)	1445	1399
Total	Valor de la Producción (\$x10 ⁶)	18337	19521

Analizando la Tabla 6.26 es posible ver que la superficie promedio sigue proporcionando mejores resultados que las optimizadas ya que a pesar de que en el primer caso se mejoró el comportamiento de la presa Josefa Ortiz de Domínguez, en la Miguel Hidalgo y Costilla empeoró y en el segundo caso sucedió lo contrario, además el comportamiento global del sistema es mejor para la superficie promedio y se obtiene una mayor producción.

6.2.9 Escenarios de Cambio Climático

El objetivo de proponer distintos escenarios es el de conocer el efecto que ocasionarían en el funcionamiento de la zona de riego los cambios climáticos proyectados por el IPCC (2013), por lo que en función de esas proyecciones se afectaron las demandas de agua de los distritos de riego con cambios en el requerimiento de agua de los cultivos (RAC) y los ingresos al sistema de presas por cuenca propia a través de modificaciones en las precipitaciones.

En la actualización de escenarios de cambio climático para la República Mexicana se buscaron las coordenadas geográficas con información de anomalías mensuales en temperaturas y precipitaciones dentro de la región estudiada, para los RCP 4.5, 6.0 y 8.5 y los periodos 2015-2039 y 2075-2099, obteniendo la anomalía media mensual para cada año. Se obtuvo el promedio de las anomalías medias anuales para cada mes de cada distrito para ambos periodos de tiempo, las cuales respectivamente, se sumaron con el promedio de precipitaciones y temperaturas del periodo 1951-2010.

Tabla 6.27 Proyecciones 2015-2039 DR075

Escenario	RCP 4.5			RCP 6.0			RCP 8.5		
	Tmin °C	Tmax °C	Hp [mm]	Tmin °C	Tmax °C	Hp [mm]	Tmin °C	Tmax °C	Hp [mm]
Enero 2015-2039	10.80	27.33	8.82	10.47	27.27	0.00	10.78	27.51	8.95
Febrero 2015-2039	10.81	28.76	0.70	10.76	28.70	0.00	10.88	28.99	2.78
Marzo 2015-2039	11.67	31.02	1.82	11.56	31.29	0.00	11.88	31.16	2.49
Abril 2015-2039	13.93	33.93	0.00	13.91	34.14	0.00	14.15	34.04	0.00
Mayo 2015-2039	17.12	36.50	0.31	17.12	36.50	0.00	17.39	36.77	0.00
Junio 2015-2039	22.52	37.95	3.08	22.31	37.97	1.20	22.64	38.16	3.17
Julio 2015-2039	24.62	37.85	45.69	24.36	37.86	47.84	24.71	38.00	48.41
Agosto 2015-2039	24.51	37.25	91.32	24.38	36.93	82.69	24.62	37.22	94.33
Septiembre 2015-2039	23.99	36.83	73.39	23.91	36.81	77.97	24.13	36.96	86.31
Octubre 2015-2039	20.75	35.89	26.59	20.62	35.62	21.15	20.89	36.12	26.50
Noviembre 2015-2039	14.94	31.88	9.70	14.75	31.61	2.72	15.26	32.07	9.81
Diciembre 2015-2039	11.37	27.81	13.54	11.30	27.61	4.78	11.69	27.96	14.76

Tabla 6.28 Proyecciones 2075-2099 DR075

Escenario	RCP 4.5			RCP 6.0			RCP 8.5		
	Tmin °C	Tmax °C	Hp [mm]	Tmin °C	Tmax °C	Hp [mm]	Tmin °C	Tmax °C	Hp [mm]
Enero 2075-2099	12.05	28.57	7.94	12.55	28.89	0.00	13.78	30.45	5.12
Febrero 2075-2099	12.20	30.33	0.00	12.53	30.59	0.00	13.88	32.31	0.00
Marzo 2075-2099	13.18	32.33	0.02	13.52	33.14	0.00	14.82	34.55	0.64
Abril 2075-2099	15.58	35.36	0.00	15.75	35.98	0.00	17.05	37.46	0.00
Mayo 2075-2099	18.79	37.99	0.47	19.19	38.54	0.00	20.60	40.31	0.00
Junio 2075-2099	23.95	39.53	2.74	24.32	40.19	4.35	25.65	41.70	3.09
Julio 2075-2099	25.93	39.41	45.88	26.26	40.38	38.35	27.65	41.64	34.14
Agosto 2075-2099	25.83	38.57	85.10	25.94	38.69	83.11	27.43	40.25	80.62
Septiembre 2075-2099	25.25	38.10	90.07	25.48	38.47	80.12	26.87	39.53	91.55
Octubre 2075-2099	22.31	37.35	26.67	22.44	37.41	28.08	24.07	39.36	23.36
Noviembre 2075-2099	16.63	33.28	8.00	16.78	33.47	0.00	18.57	35.30	7.51
Diciembre 2075-2099	12.67	29.01	12.04	13.43	29.30	1.51	14.56	30.98	11.67

Tabla 6.29 Proyecciones 2015-2039 DR076

Escenario	RCP 4.5			RCP 6.0			RCP 8.5		
	Tmin °C	Tmax °C	Hp [mm]	Tmin °C	Tmax °C	Hp [mm]	Tmin °C	Tmax °C	Hp [mm]
Enero 2015-2039	10.83	28.08	11.75	10.58	28.00	0.00	10.83	28.25	11.59
Febrero 2015-2039	11.00	29.29	6.22	11.03	29.22	3.82	11.13	29.54	6.89
Marzo 2015-2039	12.15	31.81	2.27	12.14	31.83	0.00	12.31	31.97	3.14
Abril 2015-2039	14.32	35.07	0.00	14.45	35.09	0.00	14.48	35.22	0.00
Mayo 2015-2039	17.87	38.20	0.00	18.01	38.14	0.00	18.05	38.36	0.00
Junio 2015-2039	23.76	39.84	9.75	23.44	39.90	8.61	23.80	40.13	9.95
Julio 2015-2039	26.09	38.82	77.55	25.79	38.91	78.53	26.13	38.88	78.37
Agosto 2015-2039	26.03	37.91	117.51	25.86	37.43	111.93	26.11	37.80	118.52
Septiembre 2015-2039	25.31	37.72	73.08	25.24	37.74	76.86	25.44	37.74	85.11
Octubre 2015-2039	21.36	36.78	21.60	21.24	36.48	19.38	21.49	37.03	22.42
Noviembre 2015-2039	15.24	32.68	7.19	15.13	32.38	1.21	15.43	32.87	7.61
Diciembre 2015-2039	11.55	28.74	13.47	11.56	28.50	10.25	11.79	28.88	15.07

Tabla 6.30 Proyecciones 2075-2099 DR076

Escenario	RCP 4.5			RCP 6.0			RCP 8.5		
	Tmin °C	Tmax °C	Hp [mm]	Tmin °C	Tmax °C	Hp [mm]	Tmin °C	Tmax °C	Hp [mm]
Enero 2075-2099	12.07	29.33	9.43	12.57	29.67	0.00	13.68	31.29	7.35
Febrero 2075-2099	12.42	30.87	4.52	12.95	31.08	0.00	13.98	32.92	1.89
Marzo 2075-2099	13.72	33.14	0.34	14.54	33.59	0.00	15.28	35.31	1.07
Abril 2075-2099	15.86	36.46	0.00	16.34	37.01	0.00	17.37	38.46	0.00
Mayo 2075-2099	19.55	39.66	0.00	20.50	40.43	0.00	21.31	41.99	0.00
Junio 2075-2099	25.12	41.45	9.71	25.57	42.11	12.54	26.89	43.88	10.50
Julio 2075-2099	27.34	40.26	75.01	27.73	41.54	62.93	29.06	42.17	59.22
Agosto 2075-2099	27.34	39.15	109.04	27.44	39.10	105.33	28.90	40.47	102.8
Septiembre 2075-2099	26.60	38.96	84.46	26.84	39.47	76.79	28.25	40.34	86.66
Octubre 2075-2099	22.80	38.27	22.18	22.93	38.27	26.03	24.58	40.52	19.27
Noviembre 2075-2099	16.99	34.13	5.78	17.17	34.28	0.00	18.68	36.28	5.55
Diciembre 2075-2099	12.81	29.95	12.26	13.41	30.22	7.21	14.61	31.99	11.11

Asimismo, los Requerimientos de Agua de los Cultivos (RAC) obtenidos a partir de los valores de las variables climatológicas y los coeficientes de cultivo estimados en el apartado 6.2.3 para las proyecciones 2015-2039 y 2075-2099 de los escenarios RCP 4.5, 6.0 y 8.5 son:

Tabla 6.31 RAC para las proyecciones climáticas del INECC, DR075

Ciclo	Cultivos	2015-2039			2075-2099		
		RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
O-I	Maíz	451.2	475.4	450.5	474.8	500	506.8
	Frijol	285.2	310.3	285.4	300	325.6	323.2
	Papa	324.8	348.3	324.4	341.6	367.5	365.9
	Jitomate	309.2	330	309.7	323.6	342.9	348.5
	Trigo	446.3	464	445.9	467.7	485.6	499
	Chile	312.8	336.7	314	328.2	350.2	354.1
Perennes	Alfalfa	608.3	631.5	608.4	635.8	661.3	677.3
	Caña	533.2	560.6	533.3	559.1	587.8	596.3
	Mango	553.7	576.7	553.6	579.8	604.6	617.9
P-V	Sorgo	448.2	452.1	451.5	465	472.7	493.7
	Maíz	448.8	453.7	451.1	466.2	474.2	494.6

Tabla 6.32 RAC para las proyecciones climáticas del INECC, DR076

Ciclo	Cultivos	2015-2039			2075-2099		
		RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
O-I	Maíz	306.4	325.9	306.3	326	345.9	353.3
	Frijol	173.3	180.7	172.8	182.8	189	198.2
	Tomate	293.7	309	293.9	310	322.5	334.9
	Trigo	508.3	525.9	508.9	533.7	552.9	574.1
	Sorgo	370.6	387.1	371.2	389.9	406.3	420.6
Perennes	Alfalfa	706.4	725	706	737.9	761.9	790.6
	Caña	350.5	369.8	350.6	371.8	391.6	402.6
P-V	Sorgo	353.4	354.6	352.9	365.5	370.7	388.2
	Maíz	526.1	523.6	525.1	540.7	545.3	574.1

Así, utilizando las proyecciones fue posible plantear escenarios de demanda bajo cambio climático a las presas Miguel Hidalgo y Costilla y Josefa Ortiz de Domínguez.

Tabla 6.33 Escenarios de demandas a la presa Miguel Hidalgo y Costilla, DR075

Escenarios	2015-2039	2015-2039	2015-2039	2075-2099	2075-2099	2075-2099
	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
Enero	279.1	292.5	279.3	294.5	308.9	314.7
Febrero	284.5	298.4	284.7	300.3	315.3	321.3
Marzo	358.5	376.3	358.8	378.4	397.5	405.2
Abril	320.1	336.0	320.4	338.1	355.2	362.0
Mayo	253.0	265.4	253.3	267.5	280.7	286.1
Junio	164.1	172.5	164.2	174.5	183.5	187.1
Julio	112.6	117.6	112.7	119.7	125.2	127.3
Agosto	122.4	127.8	122.5	130.2	135.9	138.2
Septiembre	155.1	164.8	155.2	167.1	177.5	181.7
Octubre	312.3	327.2	312.6	329.4	345.4	351.8
Noviembre	355.0	368.3	355.2	378.0	392.3	398.1
Diciembre	229.3	240.7	229.4	242.6	254.9	259.9

Tabla 6.34 Escenarios de demandas a la presa Josefa Ortiz de Domínguez, DR076

Escenarios	2015-2039	2015-2039	2015-2039	2075-2099	2075-2099	2075-2099
	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
Enero	97.6	101.9	97.6	103.0	107.5	110.8
Febrero	99.6	104.0	99.6	105.1	109.8	113.2
Marzo	141.8	148.1	141.8	149.6	156.3	161.2
Abril	80.9	84.4	80.9	85.4	89.1	91.9
Mayo	28.3	29.5	28.3	30.0	31.2	32.1
Junio	16.9	17.6	16.9	17.9	18.6	19.1
Julio	8.9	9.2	8.9	9.5	9.8	10.0
Agosto	6.2	6.4	6.2	6.6	6.8	7.0
Septiembre	14.1	14.7	14.1	14.9	15.5	16.0
Octubre	72.1	75.3	72.1	76.1	79.5	81.9
Noviembre	69.6	72.6	69.6	73.5	76.7	79.0
Diciembre	82.9	86.5	82.9	87.5	91.3	94.1

Para considerar las anomalías por cambio climático en los ingresos a las presas, se estimó el porcentaje de variación mensual de la precipitación en las cuencas de cada almacenamiento, sumando a la precipitación media (polígonos de Thiessen) promedio mensual de 1951-2010 de cada cuenca las anomalías medias mensuales de los periodos 2015-2039 y 2075-2099. El porcentaje de variación corresponde a la relación entre la precipitación media promedio mensual para el periodo 1951-2010 y la precipitación media promedio mensual para los periodos 2015-2039 y 2075-2099 para cada RCP y cada cuenca, para los casos en los que la variación correspondía a más del 100% de la precipitación media registrada, el porcentaje se tomó como el 100%, es decir, como si durante ese mes dejara de llover, para evitar tener ingresos negativos a las presas.

Tabla 6.35 Porcentaje de Cambio en la Precipitación de la Cuenca de la Presa Huites

Mes	2015-2039	2015-2039	2015-2039	2075-2099	2075-2099	2075-2099
	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
Enero	-72.9%	-32.3%	-27.3%	-38.9%	-37.1%	-49.6%
Febrero	-33.6%	-21.3%	-22.1%	-43.2%	-47.0%	-57.3%
Marzo	-22.5%	-43.5%	-14.4%	-37.9%	-64.2%	-51.8%
Abril	-16.8%	-57.1%	-26.3%	-29.3%	-69.0%	-51.3%
Mayo	-14.6%	-25.5%	-10.3%	-13.2%	-23.2%	-27.0%
Junio	-3.2%	-7.9%	-5.6%	-5.7%	-11.3%	-12.0%
Julio	-3.6%	-3.3%	-3.5%	-5.0%	-4.1%	-13.9%
Agosto	-1.6%	-5.0%	-0.2%	-6.8%	-5.5%	-11.4%
Septiembre	-5.2%	-2.4%	2.3%	0.7%	0.9%	4.2%
Octubre	-12.8%	-12.6%	-3.8%	-11.8%	3.2%	-14.7%
Noviembre	-21.0%	-19.0%	-22.8%	-27.7%	-28.6%	-29.1%
Diciembre	-24.4%	-9.6%	-16.7%	-26.2%	-22.3%	-39.2%

Tabla 6.36 Porcentaje de Cambio en la Precipitación de la Cuenca de la Presa Miguel Hidalgo

Mes	2015-2039 RCP 4.5	2015-2039 RCP 6.0	2015-2039 RCP 8.5	2075-2099 RCP 4.5	2075-2099 RCP 6.0	2075-2099 RCP 8.5
Enero	-31.2%	-50.6%	-36.7%	-54.2%	-56.9%	-64.1%
Febrero	-44.2%	-36.9%	-30.3%	-55.1%	-77.0%	-75.3%
Marzo	-44.4%	-82.1%	-27.4%	-67.9%	-100.0%	-90.4%
Abril	-68.4%	-100.0%	-98.7%	-100.0%	-100.0%	-100.0%
Mayo	-25.6%	-42.0%	-22.7%	-21.4%	-44.3%	-44.2%
Junio	-7.3%	-12.2%	-8.7%	-8.6%	-17.9%	-19.0%
Julio	-4.2%	-4.4%	-5.6%	-6.5%	-7.3%	-20.4%
Agosto	-1.3%	-4.0%	-0.1%	-6.3%	-5.8%	-11.9%
Septiembre	-6.2%	-1.6%	3.6%	2.5%	0.6%	6.5%
Octubre	-14.5%	-15.5%	-2.3%	-8.7%	10.9%	-13.2%
Noviembre	-29.4%	-45.9%	-27.1%	-35.7%	-70.8%	-38.1%
Diciembre	-29.6%	-12.7%	-18.8%	-31.9%	-26.9%	-46.5%

Tabla 6.37 Porcentaje de Cambio en la Precipitación de la Cuenca de la Presa Josefa Ortiz

Mes	2015-2039 RCP 4.5	2015-2039 RCP 6.0	2015-2039 RCP 8.5	2075-2099 RCP 4.5	2075-2099 RCP 6.0	2075-2099 RCP 8.5
Enero	-33.8%	-64.0%	-36.2%	-51.6%	-71.2%	-59.8%
Febrero	-48.4%	-47.1%	-36.1%	-62.0%	-100.0%	-85.0%
Marzo	-61.5%	-100.0%	-36.3%	-89.0%	-100.0%	-100.0%
Abril	-100.0%	-100.0%	-100.0%	-100.0%	-100.0%	-100.0%
Mayo	-65.7%	-95.3%	-65.3%	-48.7%	-100.0%	-100.0%
Junio	-10.1%	-26.7%	-12.5%	-12.0%	-26.7%	-23.0%
Julio	-5.7%	-6.3%	-7.0%	-7.4%	-12.9%	-24.3%
Agosto	-1.4%	-3.7%	-0.1%	-6.1%	-7.0%	-10.8%
Septiembre	-8.3%	-2.7%	3.7%	1.9%	-2.8%	5.8%
Octubre	-15.2%	-20.6%	-6.3%	-10.3%	6.7%	-14.4%
Noviembre	-27.2%	-53.0%	-25.5%	-31.9%	-79.5%	-34.0%
Diciembre	-36.9%	-16.4%	-23.0%	-40.2%	-32.6%	-54.0%

Finalmente, a partir de los escenarios anteriores se simuló nuevamente el funcionamiento del sistema de presas afectando a los ingresos en la proporción establecida por las Tablas 6.35 a 6.37, y con las demandas de las Tablas 6.33 y 6.34 (2009-2013). Los resultados de la simulación se presentan a continuación:

Tabla 6.38 Resultado de la Simulación del funcionamiento de presas para los escenarios de cambio climático del INECC

		Promedio 2015-2039 RCP4.5	Promedio 2015-2039 RCP6.0	Promedio 2015-2039 RCP8.5	Promedio 2075-2099 RCP4.5	Promedio 2075-2099 RCP6.0	Promedio 2075-2099 RCP8.5
Huites	Derrames	2.5%	2.4%	2.9%	2.3%	2.4%	1.9%
	Déficits	0.3%	0.3%	0.2%	0.3%	0.3%	0.4%
Hidalgo	Derrames	9.2%	7.6%	10.5%	6.6%	5.8%	4.0%
	Déficits	5.6%	8.0%	4.6%	9.6%	12.3%	17.5%
Josefa	Derrames	1.1%	0.4%	1.5%	0.2%	0.1%	0.0%
	Déficits	29.5%	38.7%	25.9%	43.5%	52.3%	62.4%
Sistema	Derrames	12.7%	10.4%	14.9%	9.1%	8.2%	6.0%
	Déficits	35.3%	47.1%	30.7%	53.3%	64.8%	80.2%
Sistema	Total	48.1%	57.5%	45.6%	62.5%	73.0%	86.2%

Como se puede observar, conforme la evapotranspiración y la escasez de agua se incrementan de acuerdo a las proyecciones de cambio climático, los déficits aumentan mientras que los derrames disminuyen siendo sobrepasados por el número de déficits en todos los años.

7 Conclusiones

Se desarrolló una metodología que estima la superficie que debe sembrarse en los distritos de riego 075 y 076, tal que minimice el número de déficits y derrames en el sistema de presas del río Fuerte y mantenga una producción rentable.

Para conocer el volumen demandado a los almacenamientos fue necesario estimar la evapotranspiración de los cultivos, entendida como la cantidad de agua que estos necesitan para tener un desarrollo adecuado. El procedimiento descrito por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) es el estándar mundial para realizar la estimación de la evapotranspiración de los cultivos, en él intervienen variables del clima en la región como la temperatura y la precipitación, así como aspectos relativos a la fenología de los cultivos a través de un coeficiente conocido como “factor de cultivo” usualmente obtenido de experimentos llevados a cabo en la región de influencia de los distritos de riego, sin embargo, ya que para los distritos 075 y 076 no fue posible acceder a dicha información, el factor de cada cultivo se estimó a partir de las variables climáticas y los volúmenes suministrados. Estas estimaciones se compararon con el registro de las extracciones de las presas Miguel Hidalgo y Costilla y Josefa Ortiz de Domínguez, encargadas de abastecer a los distritos de riego 075 y 076, dando resultados similares.

Al analizar el plan de cultivos proporcionado por las Jefaturas de los Distritos de Riego se observó que existía entre ellos un grupo bien definido que representa alrededor del 90% de la superficie sembrada y, por lo tanto, a partir de este se establecen los mayores volúmenes de extracción de las presas, permitiendo reducir el número de cultivos a evaluar.

Puesto que se evaluaron las demandas de los cultivos a largo plazo, fue necesario conocer si las demandas estimadas para el registro histórico de temperaturas y precipitaciones presentaban algún punto de quiebre o tendencia que tuviera que ser tomada en cuenta en las simulaciones. Del análisis de homogeneidad y tendencia, únicamente se encontraron puntos de quiebre para el final de la década de los cincuenta y comienzo de los sesenta, sin embargo, se observó que estos corresponden a un periodo muy seco que se presentó en toda la región y el cual probablemente de tener un registro con mayor longitud se compensaría.

Para llevar a cabo la simulación a largo plazo fue necesario generar una gran cantidad de muestras de la serie de ingresos al sistema de presas. Existen diferentes modelos para generar una muestra sintéticamente, de entre los cuales el que mejor preserve las características de la muestra original es el más adecuado. Se encontró que de entre los modelos evaluados, el modelo ARMA(1,1) fue el que mejor se adaptó a la serie de tiempo de ingresos a las presas del sistema del río Fuerte.

Ya que para cumplir con los objetivos de este trabajo era necesario simular el funcionamiento real del sistema de presas, se necesitaba conocer la política de operación utilizada, sin embargo, ya que no fue posible obtener esta política de alguna fuente oficial se decidió calibrar el funcionamiento del sistema para obtener una política de operación similar a la real, asignando coeficientes mensuales a las transferencias entre presas estimados mediante un algoritmo genético. Los resultados obtenidos al comparar el funcionamiento registrado bajo la política real y el simulado utilizando los coeficientes calibrados, muestran que este procedimiento es una opción eficiente para estimarla.

Las simulaciones realizadas en busca de la superficie óptima muestran que establecer áreas de cultivo muy grandes incrementa el valor de la producción esperada en algunos años, sin embargo, a largo plazo provoca que el sistema de presas se encuentre la mayor parte del tiempo en déficit, no permitiendo que se satisfagan los requerimientos de riego y por lo tanto reduciendo el valor de la producción, como se observa en las presas Miguel Hidalgo y Costilla y Josefa Ortiz de Domínguez donde de mantenerse la superficie establecida en el año 2010-2011 estas se encontrarían en condición de déficits el 59.1% y 10.7% de las veces. Por otro lado, establecer superficies muy conservadoras impide un adecuado aprovechamiento del área agrícola, ocasionando que se desperdicie una gran cantidad de agua, como sucede con la superficie establecida en el año 2012-2013 y 2011-2012 de los distritos de riego 075 y 076 que de mantenerse a largo plazo provocaría derrames en las presas Miguel Hidalgo y Costilla y Josefa Ortiz de Domínguez, del 23.5% y 20.7%, respectivamente. La superficie promedio del periodo con registro resultó ser la más adecuada para conciliar los déficits y derrames con una producción de valor aceptable en la región, de acuerdo a los datos estadísticos; el comportamiento de esta superficie fue incluso mejor que el de superficies obtenidas mediante modelos de optimización que buscaron minimizar los déficits y derrames aumentando la producción.

Del análisis del funcionamiento del sistema de presas utilizando las demandas para la superficie óptima afectadas por los escenarios de cambio climático, se observó que la

capacidad de los almacenamientos para satisfacer estas necesidades cada vez será menor por lo que es necesario tomar las medidas necesarias en la planeación para mitigar las pérdidas.

Por último, es importante aclarar que las superficies obtenidas en el presente trabajo únicamente representan la factibilidad técnica del problema, es decir, considerando aspectos meramente hidrológicos, no obstante, se recomienda para su puesta en práctica analizar también la factibilidad social y de mercado, ya que en muchas ocasiones las costumbres de los productores, contratos ya preestablecidos entre agroindustrias locales o de exportación tienen un efecto igual o mayor en las superficies sembradas que los factores hidráulicos.

Referencias

- Allen, G. R., Pererira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Aparicio Mijares, J. (2011). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Limusa.
- Arsham, H. (25 de Febrero de 1994). *Modelos Derministas: Optimización Lineal*. Recuperado el 26 de Marzo de 2014, de <http://home.ubalt.edu/ntsbarsh/opre640S/SpanishD.htm#rpop>
- Carrión, P., López, E., Ortega, J. F., & De Juan, A. (2003). Optimización mediante algoritmos genéticos de la gestión del agua en el regadío. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 19(4), 447-463.
- CONAGUA. (2009). *Determinación de la disponibilidad de agua en el Acuífero Río Fuerte, Sin*. Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA. (2012a). *Estadísticas del Agua en México*. México D.F.: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CONAGUA. (2012b). *Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego 2011/12*. México D.F.: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Diario Oficial de la Federación. (1948). *Acuerdo que declara vedado, por tiempo indefinido, el otorgamiento de concesiones para aprovechar aguas del río Fuerte, Sin*. México.
- Escalante Sandoval, C. A. (2005). *CENAPRED*. Recuperado el 2013, de http://atl.cenapred.unam.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=125&Itemid=150
- Gracia Sánchez, J. (2003). *Introducción al diseño de zonas de riego y drenaje*. Distrito Federal: Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Herrán, N. V. (1992). *Sinaloa y sus once ríos* (1ra ed.). Los Mochis, Sinaloa: S/E.
- INECC. (2014). *Escenarios de Cambio Climático*. Recuperado el 2014 de Abril de 14, de <http://escenarios.inecc.gob.mx/>
- Íñiguez Covarrubias, M., Ojeda Bustamante, W., & Rojano Aguilar, A. (2011). Metodología para la determinación de la evapotranspiración integrada y la capacidad de canales en una zona de riego. *FCA UNCUYO*, 43(2), 175-191.
- IPCC. (2013). Summary for Policymakers. En T. D.-K. Stocker (Ed.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Yokohama.
- Johnson, S. (1997). *La Transferencia del Manejo de la Irrigación en México: Una Estrategia para Lograr la Sustentabilidad de los Distritos de Riego*. Instituto Internacional del Manejo de la Irrigación, Colombo, Sri Lanka.

- Karmeshu, N. (2012). *Trend Detection in Annual Temperature & Precipitation using the Mann Kendall Test- A case study to assess climate change on select steates in the northeastern United States*. Pennsylvania: University of Pennsylvania.
- Khadr, M. (2011). *Tesis: Water Resources Management in the Context of Drought (An application to the Ruhr reiver basin in Germany)*. Berigische, Alemania: der Bergischen Universität Wuppertal.
- Ley de Aguas Nacionales. (2013). *[En línea] México*. Cámara de Diputados H. Congreso de la Unión.
- Montero Martínez, J. (2000). Análisis de la distribución de agua en sistemas de riego por aspersión estacionario. En *Colección de Tesis doctorales*. Castilla-La Mancha: Universidad de Casitlla La Mancha.
- Morales Flores, F. J., & Matrínez Menez, M. R. (2012). *Rotación de cultivos*. México, D.F.: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
- Munteanu, C., & Lazarescu, V. (1998). Global search using a new evolutionary framework: The adaptative research genetic algorithm. *Complexity International*, 5.
- Nocedal, J., & Wright, S. J. (2006). *Numerical Optimization* (2° ed.). New York, E.E.U.U.: Springer Science+Business Media, LLC.
- Palacios Vélez, E. (1981). *Introducción a la teoría de la operación de distritos y sistemas de riego* (2 da. ed.). Chapingo: Colegio de Postgraduados Intitución de Enseñaza e Investigación en Ciencias Agrícolas.
- Postolache, R. (2007). *Linear and Nonlinear Optimization Programming*. Ohio, E.E.U.U.: Capital University.
- PROTY, S. d. (2006). *Plan Director para la Modernización Integral del Riego del Distrito de Riego 075 "Río Fuerte", Sinaloa*. Sinaloa: CONAGUA.
- Rajgopal, J. (2001). Principles and applications of operations resarch. En D. o. Engineering (Ed.), *Maynard's Industrial Engineering Handbook* (págs. 11.27-11.44). Pittsburg, Pennsylvania: University of Pittsburgh.
- Sahin, S., & Cigizoglu, H. K. (2010). Homogeneity analysis of Turkish meteorological data set. *Hydrological Processes*.
- Saifuddin, A. (2010). *Homogeneity and trend analysis of temperature for urban and rural areas*.
- Santamaría Antonio, J. (2010). Forzamiento radiativo y cambios químicos en la atmósfera. *Revista de la real academia de ciencias exactas, físicas y naturales*, 104(1), 149-173.
- Soler Fajardo, F., Molina Focazzio, F., & Rojas Cortés, L. (2005). *Álgebra Lineal y Programación Lineal. Copn aplicaciones a ciencias administrativas, contables y financieras con uso de: Derive, O.S.B. y Excel*. 2°: ECOE.
- Swennenhuis, J. (2009). *Manual de Usuario CropWat 8.0*. Roma, Italia: FAO.
- The Mathworks, Inc. (1992). *MATLAB Reference Guide*. The Mathworks, Inc.

Estimación de la superficie de riego óptima en los distritos de riego 075 y 076, Sinaloa, México

Wainwright, R. L. (1993). Introduction to genetic algorithms. Theory and applications. *The Seventh Oklahoma Symposium on Artificial Intelligence*. Oklahoma: Department of Mathematical and Computer Sciences. University of Tulsa.

Walsh, B. (30 de March de 2014). *Warming world threatens us all, warns U.N. report*. Recuperado el 14 de April de 2014, de <http://ti.me/1i6wOOV>

ANEXOS

Anexo I. Análisis de Homogeneidad y Tendencia

Prueba t de Student

Tabla A.1 Resultados de la Prueba t de Student para los cultivos del Distrito de Riego 075

Ciclo	Cultivo	t_d	t_s	Hipótesis Nula	Nivel de Confianza (α)
Otoño-Invierno	Maíz Grano	2.011	2.002	Se acepta: No Homogénea: $t_s < t_d$	0.05
	Frijol (Alubia)	2.322	2.002	Se acepta: No Homogénea: $t_s < t_d$	0.05
	Papa	2.143	2.002	Se acepta: No Homogénea: $t_s < t_d$	0.05
	Jitomate	2.369	2.002	Se acepta: No Homogénea: $t_s < t_d$	0.05
	Trigo Grano	1.941	2.002	Se rechaza: Homogénea: $t_s > t_d$	0.05
	Chile	2.292	2.002	Se acepta: No Homogénea: $t_s < t_d$	0.05
Perennes	Alfalfa	2.338	2.002	Se acepta: No Homogénea: $t_s < t_d$	0.05
	Caña de Azúcar	2.419	2.002	Se acepta: No Homogénea: $t_s < t_d$	0.05
	Mango	2.223	2.002	Se acepta: No Homogénea: $t_s < t_d$	0.05
Primavera-Verano	Sorgo Grano	2.418	2.002	Se acepta: No Homogénea: $t_s < t_d$	0.05
	Maíz Grano	2.327	2.002	Se acepta: No Homogénea: $t_s < t_d$	0.05

Tabla A.2 Resultados de la Prueba t de Student para los cultivos del Distrito de Riego 076

Ciclo	Cultivo	t_d	t_s	Hipótesis Nula	Nivel de Confianza (α)
Otoño-Invierno	Maíz Grano	1.595	2.002	Se rechaza: Homogénea: $t_s > t_d$	0.05
	Frijol (Alubia)	1.923	2.002	Se rechaza: Homogénea: $t_s > t_d$	0.05
	Tomate Verde	1.754	2.002	Se rechaza: Homogénea: $t_s > t_d$	0.05
	Trigo Grano	2.762	2.002	Se acepta: No Homogénea: $t_s < t_d$	0.05
	Sorgo Grano	2.417	2.002	Se acepta: No Homogénea: $t_s < t_d$	0.05
Perennes	Alfalfa	2.549	2.002	Se acepta: No Homogénea: $t_s < t_d$	0.05
	Caña de Azúcar	1.688	2.002	Se rechaza: Homogénea: $t_s > t_d$	0.05
Primavera-Verano	Sorgo Grano	3.513	2.002	Se acepta: No Homogénea: $t_s < t_d$	0.05
	Maíz Grano	3.588	2.002	Se acepta: No Homogénea: $t_s < t_d$	0.05

Prueba de Homogeneidad de Cramer

Tabla A.3 Resultados de la Prueba de Homogeneidad de Cramer para los cultivos del Distrito de Riego 075

Ciclo	Cultivo	t_{30}	t_{60}	t_s	Hipótesis Nula	Nivel de Confianza (α)
Otoño-Invierno	Maíz Grano	0.193	2.145	2.002	Se acepta: No Homogénea: $t_s < t_{60}$	0.05
	Frijol (Alubia)	0.144	2.275	2.002	Se acepta: No Homogénea: $t_s < t_{60}$	0.05
	Papa	0.126	2.155	2.002	Se acepta: No Homogénea: $t_s < t_{60}$	0.05
	Jitomate	0.021	2.346	2.002	Se acepta: No Homogénea: $t_s < t_{60}$	0.05
	Trigo Grano	0.274	1.994	2.002	Se rechaza: Homogénea: $t_s > t_{60}$ y t_{30}	0.05
	Chile	0.021	2.197	2.002	Se acepta: No Homogénea: $t_s < t_{60}$	0.05
Perennes	Alfalfa	0.034	2.510	2.002	Se acepta: No Homogénea: $t_s < t_{60}$	0.05
	Caña de Azúcar	0.113	2.557	2.002	Se acepta: No Homogénea: $t_s < t_{60}$	0.05
	Mango	0.065	2.395	2.002	Se acepta: No Homogénea: $t_s < t_{60}$	0.05
Primavera-Verano	Sorgo Grano	0.696	3.492	2.002	Se acepta: No Homogénea: $t_s < t_{60}$	0.05
	Maíz Grano	0.685	3.127	2.002	Se acepta: No Homogénea: $t_s < t_{60}$	0.05

Tabla A.4 Resultados de la Prueba de Homogeneidad de Cramer para los cultivos del Distrito de Riego 076

Ciclo	Cultivo	t_{30}	t_{60}	t_s	Hipótesis Nula	Nivel de Confianza (α)
Otoño-Invierno	Maíz Grano	0.710	1.509	2.002	Se rechaza: Homogénea: $t_s > t_{60}$ y t_{30}	0.05
	Frijol (Alubia)	0.621	1.719	2.002	Se rechaza: Homogénea: $t_s > t_{60}$ y t_{30}	0.05
	Tomate Verde	0.820	1.634	2.002	Se rechaza: Homogénea: $t_s > t_{60}$ y t_{30}	0.05
	Trigo Grano	0.280	3.227	2.002	Se acepta: No Homogénea: $t_s < t_{60}$	0.05
	Sorgo Grano	0.088	2.639	2.002	Se acepta: No Homogénea: $t_s < t_{60}$	0.05
Perennes	Alfalfa	0.234	2.822	2.002	Se acepta: No Homogénea: $t_s < t_{60}$	0.05
	Caña de Azúcar	0.630	1.626	2.002	Se rechaza: Homogénea: $t_s > t_{60}$ y t_{30}	0.05
Primavera-Verano	Sorgo Grano	0.541	5.706	2.002	Se acepta: No Homogénea: $t_s < t_{60}$	0.05
	Maíz Grano	0.809	4.723	2.002	Se acepta: No Homogénea: $t_s < t_{60}$	0.05

Prueba de Homogeneidad de Helmer

Tabla A.5 Resultados de la Prueba de Homogeneidad de Helmer para los cultivos del Distrito de Riego 075

Ciclo	Cultivo	L_{inf}	H	L_{sup}	Hipótesis Nula	Nivel de Confianza (α)
Otoño-Invierno	Maíz Grano	-7.681	7	7.681	Se rechaza: Homogénea: $L_{inf} < H < L_{sup}$	0.05
	Frijol (Alubia)	-7.681	1	7.681	Se rechaza: Homogénea: $L_{inf} < H < L_{sup}$	0.05
	Papa	-7.681	7	7.681	Se rechaza: Homogénea: $L_{inf} < H < L_{sup}$	0.05
	Jitomate	-7.681	3	7.681	Se rechaza: Homogénea: $L_{inf} < H < L_{sup}$	0.05
	Trigo Grano	-7.681	7	7.681	Se rechaza: Homogénea: $L_{inf} < H < L_{sup}$	0.05
	Chile	-7.681	5	7.681	Se rechaza: Homogénea: $L_{inf} < H < L_{sup}$	0.05
Perennes	Alfalfa	-7.681	1	7.681	Se rechaza: Homogénea: $L_{inf} < H < L_{sup}$	0.05
	Caña de Azúcar	-7.681	1	7.681	Se rechaza: Homogénea: $L_{inf} < H < L_{sup}$	0.05
	Mango	-7.681	3	7.681	Se rechaza: Homogénea: $L_{inf} < H < L_{sup}$	0.05
Primavera-Verano	Sorgo Grano	-7.681	29	7.681	Se acepta: No Homogénea: $H > L_{sup}$	0.05
	Maíz Grano	-7.681	17	7.681	Se acepta: No Homogénea: $H > L_{sup}$	0.05

Tabla A.6 Resultados de la Prueba de Homogeneidad de Helmer para los cultivos del Distrito de Riego 076

Ciclo	Cultivo	L_{inf}	H	L_{sup}	Hipótesis Nula	Nivel de Confianza (α)
Otoño-Invierno	Maíz Grano	-7.681	5	7.681	Se rechaza: Homogénea: $L_{inf} < H < L_{sup}$	0.05
	Frijol (Alubia)	-7.681	9	7.681	Se acepta: No Homogénea: $H > L_{sup}$	0.05
	Tomate Verde	-7.681	3	7.681	Se rechaza: Homogénea: $L_{inf} < H < L_{sup}$	0.05
	Trigo Grano	-7.681	1	7.681	Se rechaza: Homogénea: $L_{inf} < H < L_{sup}$	0.05
	Sorgo Grano	-7.681	1	7.681	Se rechaza: Homogénea: $L_{inf} < H < L_{sup}$	0.05
Perennes	Alfalfa	-7.681	3	7.681	Se rechaza: Homogénea: $L_{inf} < H < L_{sup}$	0.05
	Caña de Azúcar	-7.681	9	7.681	Se acepta: No Homogénea: $H > L_{sup}$	0.05
Primavera-Verano	Sorgo Grano	-7.681	29	7.681	Se acepta: No Homogénea: $H > L_{sup}$	0.05
	Maíz Grano	-7.681	13	7.681	Se acepta: No Homogénea: $H > L_{sup}$	0.05

Prueba de Homogeneidad de Pettitt

Tabla A.7 Resultados de la Prueba de Homogeneidad de Pettitt para los cultivos del Distrito de Riego 07

Ciclo	Cultivo	x_k	$x_k cr$	Año	Hipótesis Nula	Nivel de Confianza (α)
Otoño-Invierno	Maíz Grano	379	314	1959	Se acepta: $x_k > x_k cr$ El cambio es significativo	0.05
	Frijol (Alubia)	321	314	1959	Se acepta: $x_k > x_k cr$ El cambio es significativo	0.05
	Papa	367	314	1959	Se acepta: $x_k > x_k cr$ El cambio es significativo	0.05
	Jitomate	323	314	1959	Se acepta: $x_k > x_k cr$ El cambio es significativo	0.05
	Trigo Grano	373	314	1959	Se acepta: $x_k > x_k cr$ El cambio es significativo	0.05
	Chile	307	314		Se rechaza: $x_k < x_k cr$ El cambio no es significativo	0.05
Perennes	Alfalfa	407	314	1959	Se acepta: $x_k > x_k cr$ El cambio es significativo	0.05
	Caña de Azúcar	373	314	1959	Se acepta: $x_k > x_k cr$ El cambio es significativo	0.05
	Mango	403	314	1959	Se acepta: $x_k > x_k cr$ El cambio es significativo	0.05
Primavera-Verano	Sorgo Grano	567	314	1963	Se acepta: $x_k > x_k cr$ El cambio es significativo	0.05
	Maíz Grano	541	314	1963	Se acepta: $x_k > x_k cr$ El cambio es significativo	0.05

Tabla A.8 Resultados de la Prueba de Homogeneidad de Pettitt para los cultivos del Distrito de Riego 076

Ciclo	Cultivo	x_k	$x_k cr$	Año	Hipótesis Nula	Nivel de Confianza (α)
Otoño-Invierno	Maíz Grano	277	314		Se rechaza: $x_k < x_k cr$ El cambio no es significativo	0.05
	Frijol (Alubia)	230	314		Se rechaza: $x_k < x_k cr$ El cambio no es significativo	0.05
	Tomate Verde	249	314		Se rechaza: $x_k < x_k cr$ El cambio no es significativo	0.05
	Trigo Grano	480	314	1972	Se acepta: $x_k > x_k cr$ El cambio es significativo	0.05
	Sorgo Grano	406	314	1972	Se acepta: $x_k > x_k cr$ El cambio es significativo	0.05
Perennes	Alfalfa	370	314	1972	Se acepta: $x_k > x_k cr$ El cambio es significativo	0.05
	Caña de Azúcar	283	314		Se rechaza: $x_k < x_k cr$ El cambio no es significativo	0.05
Primavera-Verano	Sorgo Grano	653	314	1971	Se acepta: $x_k > x_k cr$ El cambio es significativo	0.05
	Maíz Grano	572	314	1972	Se acepta: $x_k > x_k cr$ El cambio es significativo	0.05

Prueba de Homogeneidad Normal Estándar

Tabla A.10 Resultados de la Prueba de Homogeneidad Normal Estándar para los cultivos del Distrito de Riego 075

Ciclo	Cultivo	τ	τ_{cr}	Año	Hipótesis Nula	Nivel de Confianza (α)
Otoño-Invierno	Maíz Grano	15.8	8.6	1959	Se acepta: $\tau > \tau_{cr}$ El cambio es significativo	0.05
	Frijol (Alubia)	10.4	8.6	1959	Se acepta: $\tau > \tau_{cr}$ El cambio es significativo	0.05
	Papa	13.0	8.6	1959	Se acepta: $\tau > \tau_{cr}$ El cambio es significativo	0.05
	Jitomate	10.8	8.6	1959	Se acepta: $\tau > \tau_{cr}$ El cambio es significativo	0.05
	Trigo Grano	13.4	8.6	1959	Se acepta: $\tau > \tau_{cr}$ El cambio es significativo	0.05
	Chile	10.5	8.6	1958	Se acepta: $\tau > \tau_{cr}$ El cambio es significativo	0.05
Perennes	Alfalfa	18.1	8.6	1959	Se acepta: $\tau > \tau_{cr}$ El cambio es significativo	0.05
	Caña de Azúcar	15.5	8.6	1959	Se acepta: $\tau > \tau_{cr}$ El cambio es significativo	0.05
	Mango	17.7	8.6	1959	Se acepta: $\tau > \tau_{cr}$ El cambio es significativo	0.05
Primavera-Verano	Sorgo Grano	39.7	8.6	1961	Se acepta: $\tau > \tau_{cr}$ El cambio es significativo	0.05
	Maíz Grano	33.42	8.6	1961	Se acepta: $\tau > \tau_{cr}$ El cambio es significativo	0.05

Tabla A.10 Resultados de la Prueba de Homogeneidad Normal Estándar para los cultivos del Distrito de Riego 076

Ciclo	Cultivo	τ	τ_{cr}	Año	Hipótesis Nula	Nivel de Confianza (α)
Otoño-Invierno	Maíz Grano	6.3	8.6		Se rechaza: $\tau < \tau_{cr}$ El cambio es significativo	0.05
	Frijol (Alubia)	6.0	8.6		Se rechaza: $\tau < \tau_{cr}$ El cambio es significativo	0.05
	Tomate Verde	6.0	8.6		Se rechaza: $\tau < \tau_{cr}$ El cambio es significativo	0.05
	Trigo Grano	12.2	8.6	1967	Se acepta: $\tau > \tau_{cr}$ El cambio es significativo	0.05
	Sorgo Grano	9.1	8.6	1964	Se acepta: $\tau > \tau_{cr}$ El cambio es significativo	0.05
Perennes	Alfalfa	9.6	8.6	1959	Se acepta: $\tau > \tau_{cr}$ El cambio es significativo	0.05
	Caña de Azúcar	6.7	8.6		Se rechaza: $\tau < \tau_{cr}$ El cambio es significativo	0.05
Primavera-Verano	Sorgo Grano	26.9	8.6	1967	Se acepta: $\tau > \tau_{cr}$ El cambio es significativo	0.05
	Maíz Grano	21.2	8.6	1967	Se acepta: $\tau > \tau_{cr}$ El cambio es significativo	0.05

Prueba de Homogeneidad de Buishand

Tabla A.11 Resultados de la Prueba de Homogeneidad de Buishand para los cultivos del Distrito de Riego 075

Ciclo	Cultivo	Q/\sqrt{n}	Q_{cr}	Año	Hipótesis Nula	Nivel de Confianza (α)
Otoño-Invierno	Maíz Grano	1.42	1.3	1959	Se acepta: $Q/\sqrt{n} > Q_{cr}$ El cambio es significativo	0.05
	Frijol (Alubia)	1.15	1.3		Se rechaza: $Q/\sqrt{n} < Q_{cr}$ El cambio no es significativo	0.05
	Papa	1.29	1.3		Se rechaza: $Q/\sqrt{n} < Q_{cr}$ El cambio no es significativo	0.05
	Jitomate	1.18	1.3		Se rechaza: $Q/\sqrt{n} < Q_{cr}$ El cambio no es significativo	0.05
	Trigo Grano	1.31	1.3	1959	Se acepta: $Q/\sqrt{n} > Q_{cr}$ El cambio es significativo	0.05
	Chile	1.16	1.3		Se rechaza: $Q/\sqrt{n} < Q_{cr}$ El cambio no es significativo	0.05
Perennes	Alfalfa	1.53	1.3	1963	Se acepta: $Q/\sqrt{n} > Q_{cr}$ El cambio es significativo	0.05
	Caña de Azúcar	1.41	1.3	1959	Se acepta: $Q/\sqrt{n} > Q_{cr}$ El cambio es significativo	0.05
	Mango	1.50	1.3	1959	Se acepta: $Q/\sqrt{n} > Q_{cr}$ El cambio es significativo	0.05
Primavera-Verano	Sorgo Grano	2.44	1.3	1963	Se acepta: $Q/\sqrt{n} > Q_{cr}$ El cambio es significativo	0.05
	Maíz Grano	2.24	1.3	1962	Se acepta: $Q/\sqrt{n} > Q_{cr}$ El cambio es significativo	0.05

Tabla A.12 Resultados de la Prueba de Homogeneidad de Buishand para los cultivos del Distrito de Riego 076

Ciclo	Cultivo	Q	Q_{cr}	Año	Hipótesis Nula	Nivel de Confianza (α)
Otoño-Invierno	Maíz Grano	0.93	1.3		Se rechaza: $Q/\sqrt{n} < Q_{cr}$ El cambio no es significativo	0.05
	Frijol (Alubia)	1.03	1.3		Se rechaza: $Q/\sqrt{n} < Q_{cr}$ El cambio no es significativo	0.05
	Tomate Verde	0.93	1.3		Se rechaza: $Q/\sqrt{n} < Q_{cr}$ El cambio no es significativo	0.05
	Trigo Grano	1.61	1.3		Se rechaza: $Q/\sqrt{n} < Q_{cr}$ El cambio no es significativo	0.05
	Sorgo Grano	1.38	1.3	1972	Se acepta: $Q/\sqrt{n} > Q_{cr}$ El cambio es significativo	0.05
Perennes	Alfalfa	1.42	1.3	1978	Se acepta: $Q/\sqrt{n} > Q_{cr}$ El cambio es significativo	0.05
	Caña de Azúcar	0.98	1.3		Se rechaza: $Q/\sqrt{n} < Q_{cr}$ El cambio no es significativo	0.05
Primavera-Verano	Sorgo Grano	2.43	1.3	1971	Se acepta: $Q/\sqrt{n} > Q_{cr}$ El cambio es significativo	0.05
	Maíz Grano	2.09	1.3	1972	Se acepta: $Q/\sqrt{n} > Q_{cr}$ El cambio es significativo	0.05

Prueba de Homogeneidad Von Neuman

Tabla A.13 Resultados de la Prueba de Homogeneidad de Von Neuman para los cultivos del Distrito de Riego 075

Ciclo	Cultivo	N	Ncr	Hipótesis Nula	Nivel de Confianza (α)
Otoño-Invierno	Maíz Grano	1.65	1.57	Se rechaza: $N > N_{cr}$ no se presenta un cambio significativo	0.05
	Frijol (Alubia)	1.80	1.57	Se rechaza: $N > N_{cr}$ no se presenta un cambio significativo	0.05
	Papa	1.70	1.57	Se rechaza: $N > N_{cr}$ no se presenta un cambio significativo	0.05
	Jitomate	1.75	1.57	Se rechaza: $N > N_{cr}$ no se presenta un cambio significativo	0.05
	Trigo Grano	1.72	1.57	Se rechaza: $N > N_{cr}$ no se presenta un cambio significativo	0.05
	Chile	1.88	1.57	Se rechaza: $N > N_{cr}$ no se presenta un cambio significativo	0.05
Perennes	Alfalfa	1.59	1.57	Se rechaza: $N > N_{cr}$ no se presenta un cambio significativo	0.05
	Caña de Azúcar	1.65	1.57	Se rechaza: $N > N_{cr}$ no se presenta un cambio significativo	0.05
	Mango	1.59	1.57	Se rechaza: $N > N_{cr}$ no se presenta un cambio significativo	0.05
Primavera-Verano	Sorgo Grano	0.58	1.57	Se acepta: $N < N_{cr}$ la muestra tiene un cambio significativo	0.05
	Maíz Grano	0.94	1.57	Se acepta: $N < N_{cr}$ la muestra tiene un cambio significativo	0.05

Tabla A.14 Resultados de la Prueba de Homogeneidad de Von Neuman para los cultivos del Distrito de Riego 076

Ciclo	Cultivo	N	Ncr	Hipótesis Nula	Nivel de Confianza (α)
Otoño-Invierno	Maíz Grano	1.81	1.57	Se rechaza: $N > N_{cr}$ no se presenta un cambio significativo	0.05
	Frijol (Alubia)	1.72	1.57	Se rechaza: $N > N_{cr}$ no se presenta un cambio significativo	0.05
	Tomate Verde	1.79	1.57	Se rechaza: $N > N_{cr}$ no se presenta un cambio significativo	0.05
	Trigo Grano	1.61	1.57	Se rechaza: $N > N_{cr}$ no se presenta un cambio significativo	0.05
	Sorgo Grano	1.71	1.57	Se rechaza: $N > N_{cr}$ no se presenta un cambio significativo	0.05
Perennes	Alfalfa	1.76	1.57	Se rechaza: $N > N_{cr}$ no se presenta un cambio significativo	0.05
	Caña de Azúcar	1.79	1.57	Se rechaza: $N > N_{cr}$ no se presenta un cambio significativo	0.05
Primavera-Verano	Sorgo Grano	0.97	1.57	Se acepta: $N < N_{cr}$ la muestra tiene un cambio significativo	0.05
	Maíz Grano	1.37	1.57	Se acepta: $N < N_{cr}$ la muestra tiene un cambio significativo	0.05

Prueba de Tendencia de Mann-Kendall

Tabla A.15 Resultados de la Prueba de Tendencia de Mann Kendall para los cultivos del Distrito de Riego 075

Ciclo	Cultivo	S	p	Nivel de Confianza (α)	Hipótesis Nula
Otoño-Invierno	Maíz Grano	-307	0.05	0.05	Se acepta: $p > \alpha$ no existe tendencia en la serie
	Frijol (Alubia)	-285	0.07	0.05	Se acepta: $p > \alpha$ no existe tendencia en la serie
	Papa	-331	0.04	0.05	Se rechaza: $p < \alpha$ hay tendencia decreciente en la serie
	Jitomate	-286	0.07	0.05	Se acepta: $p > \alpha$ no existe tendencia en la serie
	Trigo Grano	-312	0.05	0.05	Se acepta: $p > \alpha$ no existe tendencia en la serie
	Chile	-260	0.10	0.05	Se acepta: $p > \alpha$ no existe tendencia en la serie
Perennes	Alfalfa	-371	0.02	0.05	Se rechaza: $p < \alpha$ hay tendencia decreciente en la serie
	Caña de Azúcar	-332	0.03	0.05	Se rechaza: $p < \alpha$ hay tendencia decreciente en la serie
	Mango	-367	0.02	0.05	Se rechaza: $p < \alpha$ hay tendencia decreciente en la serie
Primavera-Verano	Sorgo Grano	-330	0.04	0.05	Se rechaza: $p < \alpha$ hay tendencia decreciente en la serie
	Maíz Grano	-393	0.05	0.05	Se acepta: $p > \alpha$ no existe tendencia en la serie

Tabla A.16 Resultados de la Prueba de Tendencia de Mann Kendall para los cultivos del Distrito de Riego 076

Ciclo	Cultivo	S	p	Nivel de Confianza (α)	Hipótesis Nula
Otoño-Invierno	Maíz Grano	-204	0.20	0.05	Se acepta: $p > \alpha$ no existe tendencia en la serie
	Frijol (Alubia)	-148	0.35	0.05	Se acepta: $p > \alpha$ no existe tendencia en la serie
	Tomate Verde	-159	0.31	0.05	Se acepta: $p > \alpha$ no existe tendencia en la serie
	Trigo Grano	-482	0.00	0.05	Se rechaza: $p < \alpha$ hay tendencia decreciente en la serie
	Sorgo Grano	-409	0.01	0.05	Se rechaza: $p < \alpha$ hay tendencia decreciente en la serie
Perennes	Alfalfa	-347	0.03	0.05	Se rechaza: $p < \alpha$ hay tendencia decreciente en la serie
	Caña de Azúcar	-222	0.16	0.05	Se acepta: $p > \alpha$ no existe tendencia en la serie
Primavera-Verano	Sorgo Grano	-584	0.00	0.05	Se rechaza: $p < \alpha$ hay tendencia decreciente en la serie
	Maíz Grano	-573	0.00	0.05	Se rechaza: $p < \alpha$ hay tendencia decreciente en la serie

Prueba de tendencia de Spearman

Tabla A.17 Resultados de la Prueba de tendencia de Spearman para los cultivos del Distrito de Riego 075

Ciclo	Cultivo	t_d	t_s	R_s	Hipótesis Nula	Nivel de Confianza (α)
Otoño-Invierno	Maíz Grano	1	2	0	Se acepta: La serie no presenta tendencia	0.05
	Frijol (Alubia)	1	2	0	Se acepta: La serie no presenta tendencia	0.05
	Papa	1	2	0	Se acepta: La serie no presenta tendencia	0.05
	Jitomate	1	2	0	Se acepta: La serie no presenta tendencia	0.05
	Trigo Grano	1	2	0	Se acepta: La serie no presenta tendencia	0.05
	Chile	1	2	0	Se acepta: La serie no presenta tendencia	0.05
Perennes	Alfalfa	2	2	0	Se acepta: La serie no presenta tendencia	0.05
	Caña de Azúcar	1	2	0	Se acepta: La serie no presenta tendencia	0.05
	Mango	1	2	0	Se acepta: La serie no presenta tendencia	0.05
Primavera-Verano	Sorgo Grano	2	2	0	Se acepta: La serie no presenta tendencia	0.05
	Maíz Grano	2	2	0	Se acepta: La serie no presenta tendencia	0.05

Tabla A.18 Resultados de la Prueba de tendencia de Spearman para los cultivos del Distrito de Riego 076

Ciclo	Cultivo	t_d	t_s	R_s	Hipótesis Nula	Nivel de Confianza (α)
Otoño-Invierno	Maíz Grano	1	2	0	Se acepta: La serie no presenta tendencia	0.05
	Frijol (Alubia)	0	2	0	Se acepta: La serie no presenta tendencia	0.05
	Tomate Verde	0	2	0	Se acepta: La serie no presenta tendencia	0.05
	Trigo Grano	2	2	0	Se acepta: La serie no presenta tendencia	0.05
	Sorgo Grano	2	2	0	Se acepta: La serie no presenta tendencia	0.05
Perennes	Alfalfa	2	2	0	Se acepta: La serie no presenta tendencia	0.05
	Caña de Azúcar	1	2	0	Se acepta: La serie no presenta tendencia	0.05
Primavera-Verano	Sorgo Grano	2	2	0	Se acepta: La serie no presenta tendencia	0.05
	Maíz Grano	0	2	0	Se acepta: La serie no presenta tendencia	0.05

Anexo II. Demandas a los almacenamientos por hectárea

Tabla A.19 Volumen demandado a los almacenamientos por hectárea sembrada (m³/ha) -DR075

Ciclo	Otoño-Invierno						Perennes			Primavera-Verano	
Año	Maíz	Frijol	Papa	Jitomate	Trigo	Chile	Alfalfa	Caña de Azúcar	Mango	Sorgo	Maíz
1951	13075.92	9361.26	10149.21	9816.75	10379.58	10424.08	16858.64	15816.75	15123.04	13198.95	12230.37
1952	11897.91	7468.59	9065.45	7586.39	9502.62	8010.47	14819.37	13486.91	13536.65	11942.41	10722.51
1953	13458.12	8439.79	10020.94	8607.33	10617.80	9248.69	16808.90	15178.01	15416.23	13010.47	12107.33
1954	13285.34	8020.94	9764.40	8416.23	10335.08	8756.54	16913.61	14848.17	15219.90	12908.38	12633.51
1955	11458.12	7253.93	8149.21	8143.98	8581.15	8573.30	15214.66	13329.84	13251.31	13044.50	12400.52
1956	14196.34	9523.56	10780.10	9856.02	11235.60	10054.97	17853.40	16356.02	16180.63	12452.88	12172.77
1957	12717.28	9445.03	10617.80	9782.72	10586.39	10361.26	16047.12	15921.47	14654.45	12274.87	10869.11
1958	10599.48	7924.08	8395.29	8264.40	8350.79	8442.41	14212.04	13172.77	12625.65	12418.85	11073.30
1959	12675.39	7785.34	9324.61	7921.47	9890.05	7965.97	16054.97	13615.18	14384.82	13026.18	11654.45
1960	10002.62	4348.17	5963.35	5005.24	7099.48	4921.47	12876.96	10128.27	11272.25	13280.10	12303.66
1961	10989.53	7214.66	8002.62	7696.34	8434.55	8316.75	14193.72	13044.50	12505.24	12539.27	11222.51
1962	10641.36	6641.36	8248.69	7109.95	8452.88	6929.32	13848.17	12068.06	12308.90	11188.48	10452.88
1963	10709.42	6395.29	8086.39	6607.33	8447.64	6492.15	13712.04	11583.77	12117.80	11439.79	10371.73
1964	10259.16	6821.99	7918.85	7094.24	8115.18	7235.60	13311.52	11719.90	11772.25	10968.59	10060.21
1965	10379.58	6685.86	7856.02	6955.50	8170.16	6842.93	13264.40	11476.44	11777.49	11099.48	9772.25
1966	9764.40	6212.04	6664.92	6562.83	7494.76	7238.22	12102.09	10921.47	10874.35	10502.62	9617.80
1967	11816.75	8172.77	9057.59	8471.20	9421.47	9162.30	14897.91	13816.75	13455.50	11000.00	10536.65
1968	6484.29	5138.74	4646.60	5691.10	4617.80	5808.90	9028.80	7929.32	7523.56	9863.87	8246.07
1969	10431.94	7405.76	7879.58	7683.25	8204.19	8395.29	13471.20	12099.48	11879.58	10638.74	10000.00
1970	10445.03	7015.71	7924.08	7246.07	8277.49	7748.69	13162.30	12267.02	11795.81	10869.11	9651.83
1971	11827.23	8201.57	8892.67	8497.38	9342.93	9217.28	14858.64	13589.01	13342.93	11036.65	10397.91

Estimación de la superficie de riego óptima en los distritos de riego 075 y 076, Sinaloa, México

Ciclo	Otoño-Invierno						Perennes			Primavera-Verano	
Año	Maíz	Frijol	Papa	Jitomate	Trigo	Chile	Alfalfa	Caña de Azúcar	Mango	Sorgo	Maíz
1972	10811.52	5756.54	7698.95	5842.93	8259.16	5502.62	13882.20	11392.67	12298.43	11036.65	10895.29
1973	9146.60	5591.62	6659.69	5863.87	6963.35	5539.27	12031.41	9981.68	10518.32	10725.13	9473.82
1974	11437.17	8340.31	8910.99	8748.69	9138.74	9497.38	14714.66	13751.31	13130.89	11102.09	10620.42
1975	10078.53	4646.60	6714.66	4638.74	7667.54	5052.36	12497.38	9738.22	11178.01	10939.79	9968.59
1976	11628.27	7913.61	8892.67	8183.25	9301.05	8811.52	14484.29	13416.23	13078.53	10753.93	10015.71
1977	10743.46	5924.08	7832.46	6259.16	8337.70	6379.58	13507.85	11253.93	12018.32	10960.73	10120.42
1978	11062.83	8730.37	8712.04	9054.97	8814.14	9421.47	14361.26	13468.59	12719.90	11285.34	10112.57
1979	8515.71	5308.90	5986.91	5992.15	6311.52	5926.70	11507.85	9500.00	9882.20	10256.54	9620.42
1980	11539.27	8439.79	9157.07	8722.51	9342.93	9465.97	14698.95	13840.31	13172.77	11054.97	10301.05
1981	8450.26	5091.62	6246.07	6007.85	6311.52	5821.99	11463.35	10054.97	9761.78	10293.19	9568.06
1982	11698.95	7617.80	9086.39	7633.51	9340.31	7259.16	15036.65	13243.46	13353.40	11520.94	10787.96
1983	7431.94	2780.10	4649.21	3157.07	5350.79	3960.73	9078.53	6895.29	8075.92	10340.31	8348.17
1984	9565.45	5295.81	6738.22	5890.05	7164.92	5984.29	12494.76	10641.36	10945.03	10138.74	10141.36
1985	8180.63	3842.93	5251.31	4390.05	6065.45	4541.88	10243.46	8515.71	9068.06	10612.57	9431.94
1986	11544.50	7238.22	8921.47	7290.58	9282.72	6981.68	14492.15	12756.54	13089.01	10672.77	9931.94
1987	10774.87	7007.85	8251.31	7272.25	8552.36	7285.34	13785.34	12086.39	12290.58	10743.46	9960.73
1988	11743.46	7863.87	8863.87	8143.98	9327.23	8861.26	14662.30	13366.49	13185.86	11070.68	10277.49
1989	9154.45	6356.02	6426.70	6921.47	6819.37	7649.21	12356.02	10929.32	10607.33	11358.64	10549.74
1990	10010.47	6442.41	7112.57	6725.13	7557.59	7426.70	13104.71	11259.16	11397.91	11335.08	10573.30
1991	9489.53	3455.50	5787.96	3691.10	7102.09	3594.24	11541.88	8476.44	10400.52	11180.63	10219.90
1992	6549.74	2141.36	3005.24	2727.75	4191.10	3518.32	8581.15	5746.07	7227.75	10890.05	9494.76
1993	8683.25	6015.71	6028.80	6581.15	6429.32	7159.69	11662.30	10104.71	9994.76	10903.14	9945.03
1994	10971.20	5565.45	7829.84	5518.32	8651.83	5735.60	13471.20	10774.87	12246.07	10675.39	9971.20
1995	10162.30	3740.84	6180.63	3795.81	7609.95	4123.04	12287.96	8780.10	11159.69	11664.92	10730.37
1996	12586.39	8777.49	9793.19	9036.65	10130.89	9657.07	15874.35	14712.04	14335.08	11787.96	11075.92
1997	10460.73	6376.96	7471.20	6973.82	8007.85	7471.20	13078.53	11837.70	11604.71	11062.83	10141.36

Ciclo	Otoño-Invierno						Perennes			Primavera-Verano	
Año	Maíz	Frijol	Papa	Jitomate	Trigo	Chile	Alfalfa	Caña de Azúcar	Mango	Sorgo	Maíz
1998	9594.24	4175.39	6002.62	4253.93	7238.22	4450.26	11680.63	8803.66	10638.74	11405.76	9971.20
1999	12225.13	8109.95	9363.87	8311.52	9811.52	8806.28	15125.65	13884.82	13774.87	9874.35	10287.96
2000	12348.17	8570.68	9643.98	8824.61	9963.35	9492.15	15494.76	14452.88	14041.88	11246.07	10743.46
2001	10526.18	6596.86	8201.57	6678.01	8314.14	6232.98	13570.68	11641.36	12007.85	11034.03	9863.87
2002	11400.52	8007.85	8719.90	8376.96	9065.45	8863.87	14515.71	13308.90	12992.15	12081.15	10570.68
2003	10324.61	7513.09	7706.81	7869.11	7997.38	8287.96	13531.41	12282.72	11897.91	11808.90	10358.64
2004	8649.21	6096.86	6123.04	7062.83	6282.72	7442.41	11756.54	10397.91	9963.35	11798.43	9958.12
2005	9146.60	6319.37	6628.27	6725.13	6916.23	6547.12	12329.84	10159.69	10607.33	11447.64	10112.57
2006	12196.34	8405.76	9518.32	8704.19	9832.46	9136.13	15316.75	14149.21	13811.52	11426.70	10552.36
2007	10180.63	6369.11	7683.25	6756.54	7942.41	6348.17	13303.66	11594.24	11680.63	10890.05	10251.31
2008	10806.28	6018.32	7327.23	6264.40	8314.14	6887.43	13280.10	11554.97	12068.06	11397.91	10879.58
2009	12259.16	8136.13	9410.99	8413.61	9840.31	8824.61	15136.13	13856.02	13772.25	10371.73	10057.59
2010	10484.29	6976.44	8096.86	6960.73	8337.70	6607.33	13413.61	11850.79	11916.23	10562.83	9589.01

Tabla A.20 Volumen demandado a los almacenamientos por hectárea sembrada (m³/ha) -DR076

Ciclo	Otoño-Invierno					Perennes		Primavera-Verano	
	Año	Maíz	Frijol	Tomate Verde	Trigo	Sorgo	Alfalfa	Caña de Azúcar	Sorgo
1951	8940.72	5659.79	8291.24	15229.38	10131.44	19412.37	9981.96	9956.19	13479.38
1952	8121.13	3533.51	6835.05	14054.12	9456.19	17108.25	9061.86	8561.86	11845.36
1953	9177.84	4108.25	7670.10	16146.91	10987.11	19590.21	10237.11	10061.86	13489.69
1954	8961.34	5005.15	7750.00	15920.10	10626.29	19793.81	10036.08	10368.56	13747.42
1955	6443.30	5422.68	5997.42	14597.94	9688.14	17615.98	7448.45	10298.97	13770.62
1956	9716.49	5559.28	8945.88	16097.94	10984.54	20559.28	10811.86	10121.13	13644.33
1957	9103.09	5461.34	8278.35	13644.33	8863.40	17801.55	9997.42	8734.54	12144.33
1958	7198.45	4324.74	7079.90	13036.08	8110.82	16664.95	8072.16	9260.31	12793.81
1959	8765.46	3981.96	7585.05	15420.10	10438.14	19154.64	9729.38	9788.66	13386.60
1960	4677.84	3211.34	3621.13	14350.52	9332.47	15481.96	5533.51	10324.74	13873.71
1961	6587.63	4092.78	5775.77	14347.94	9469.07	16922.68	7548.97	9677.84	13208.76
1962	7850.52	3860.82	6636.60	14257.73	9335.05	17886.60	8734.54	9755.15	13219.07
1963	7105.67	3695.88	6139.18	14435.57	9569.59	17329.90	7969.07	9716.49	13229.38
1964	8028.35	3994.85	7082.47	14244.85	9510.31	17652.06	8930.41	9170.10	12628.87
1965	7273.20	4391.75	6757.73	13438.14	8708.76	17025.77	8157.22	9219.07	12600.52
1966	5340.21	3567.01	5229.38	12806.70	8203.61	14940.72	6108.25	9085.05	12458.76
1967	8974.23	5170.10	8043.81	15371.13	10422.68	19224.23	9956.19	9757.73	13180.41
1968	4546.39	3386.60	4621.13	10479.38	6134.02	12822.16	5162.37	7876.29	11273.20
1969	6994.85	4262.89	6716.49	13409.79	8631.44	16793.81	7817.01	9451.03	12698.45
1970	8278.35	4451.03	7332.47	14582.47	9804.12	17976.80	9193.30	9275.77	12773.20
1971	8894.33	5273.20	8121.13	15056.70	10298.97	18912.37	9899.48	9363.40	12615.98
1972	7554.12	3610.82	6226.80	14389.18	9644.33	17363.40	8492.27	9329.90	12353.09
1973	6095.36	3198.45	5760.31	11716.49	7365.98	14914.95	6889.18	8461.34	11579.90
1974	7871.13	5445.88	7335.05	13755.15	9054.12	17500.00	8798.97	9170.10	12247.42
1975	7015.46	2525.77	5033.51	13092.78	8737.11	15850.52	7837.63	8595.36	11695.88

Estimación de la superficie de riego óptima en los distritos de riego 075 y 076, Sinaloa, México

Ciclo	Otoño-Invierno					Perennes		Primavera-Verano	
	Año	Maíz	Frijol	Tomate Verde	Trigo	Sorgo	Alfalfa	Caña de Azúcar	Sorgo
1976	8615.98	5146.91	7793.81	14000.00	9556.70	17646.91	9525.77	8476.80	11481.96
1977	7752.58	4018.04	6564.43	13801.55	9239.69	17056.70	8649.48	8811.86	11943.30
1978	7969.07	4912.37	7966.49	13481.96	8780.93	17556.70	8886.60	9157.22	12262.89
1979	4414.95	3801.55	4414.95	11231.96	7126.29	12914.95	5146.91	8072.16	10793.81
1980	8291.24	5064.43	7747.42	13626.29	9108.25	17378.87	9113.40	8817.01	11987.11
1981	5471.65	4126.29	5087.63	11742.27	7396.91	14180.41	6260.31	8198.45	11136.60
1982	8497.42	4621.13	7997.42	13713.92	9167.53	17786.08	9384.02	8884.02	12136.60
1983	3840.21	1605.67	2860.82	9914.95	5572.16	11615.98	4590.21	7481.96	10819.59
1984	6675.26	3680.41	5618.56	13551.55	8943.30	16278.35	7597.94	9015.46	12100.52
1985	4731.96	2956.19	3536.08	11768.04	7435.57	13095.36	5466.49	8087.63	11394.33
1986	8311.86	3757.73	7190.72	14010.31	9489.69	17443.30	9229.38	8618.56	11536.08
1987	7641.75	4337.63	7015.46	12747.42	8543.81	16005.15	8414.95	7932.99	10757.73
1988	8322.16	4554.12	7172.68	14698.45	10030.93	18007.73	9265.46	9007.73	12152.06
1989	5188.14	3445.88	5092.78	11085.05	6747.42	13677.84	5935.57	8144.33	11358.25
1990	6244.85	2966.49	5381.44	13273.20	8649.48	15494.85	7028.35	8943.30	12213.92
1991	5623.71	1170.10	3407.22	12541.24	8182.99	14041.24	6327.32	8404.64	11409.79
1992	1381.44	2128.87	1556.70	9162.37	5059.28	9824.74	1984.54	8195.88	11579.90
1993	5314.43	4103.09	5368.56	12067.01	7492.27	14894.33	6077.32	9110.82	12255.15
1994	7734.54	2814.43	5917.53	13809.28	9237.11	16796.39	8554.12	8925.26	12121.13
1995	5920.10	2327.32	3958.76	13525.77	8974.23	15043.81	6657.22	8994.85	12172.68
1996	8927.84	4948.45	7935.57	14762.89	9979.38	18667.53	9842.78	9378.87	12734.54
1997	8059.28	4863.40	7082.47	14265.46	9644.33	17858.25	9030.93	9048.97	12402.06
1998	6881.44	2329.90	5407.22	13378.87	8847.94	15832.47	7724.23	8845.36	12064.43
1999	9680.41	5105.67	8311.86	15858.25	10868.56	19829.90	10752.58	9639.18	13110.82
2000	9907.22	5530.93	8948.45	14786.08	9680.41	19371.13	10835.05	9835.05	13324.74
2001	7234.54	3574.74	6595.36	12479.38	8092.78	15914.95	8038.66	8262.89	11476.80

Estimación de la superficie de riego óptima en los distritos de riego 075 y 076, Sinaloa, México

Ciclo	Otoño-Invierno					Perennes		Primavera-Verano	
Año	Maíz	Frijol	Tomate Verde	Trigo	Sorgo	Alfalfa	Caña de Azúcar	Sorgo	Maíz
2002	7659.79	4644.33	7252.58	13170.10	8672.68	16891.75	8507.73	8765.46	12110.82
2003	5974.23	4028.35	6273.20	11948.45	7551.55	14829.90	6737.11	8507.73	11791.24
2004	5399.48	4876.29	5255.15	11541.24	7353.09	14425.26	6206.19	8134.02	11484.54
2005	6064.43	3917.53	6350.52	11796.39	7226.80	15530.93	6835.05	9175.26	12675.26
2006	8610.82	4940.72	7701.03	14301.55	9682.99	18028.35	9497.42	8997.42	12255.15
2007	7280.93	4750.00	6739.69	12775.77	8396.91	16221.65	8090.21	8546.39	11546.39
2008	7046.39	3747.42	5889.18	13899.48	9193.30	16391.75	7914.95	9172.68	12417.53
2009	8891.75	4551.55	8095.36	14131.44	9670.10	17976.80	9824.74	8536.08	11623.71
2010	7407.22	4804.12	7167.53	12902.06	8520.62	16451.03	8203.61	8456.19	11440.72