

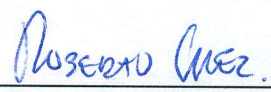
Ciudad Obregón, Sonora, a 30 de mayo de 2014.

Instituto Tecnológico de Sonora  
P r e s e n t e.

El que suscribe **Roberto González Preciado**, por medio del presente manifiesto bajo protesta de decir verdad, que soy autor y titular de los derechos de propiedad intelectual tanto morales como patrimoniales, sobre la obra titulada: **“Evaluación de la sustentabilidad en la cuenca del Rio Yaqui”**, en lo sucesivo “LA OBRA”, misma que constituye el trabajo de tesis que desarrolle para obtener el grado de **Ingeniero Civil** en ésta casa de estudios, y en tal carácter autorizo al Instituto Tecnológico de Sonora, en adelante “EL INSTITUTO”, para que efectúe la divulgación, publicación, comunicación pública, distribución y reproducción, así como la digitalización de la misma, con fines académicos o propios del objeto del Instituto, es decir, sin fines de lucro, por lo que la presente autorización la extiendo de forma gratuita.

Para efectos de lo anterior, EL INSTITUTO deberá reconocer en todo momento mi autoría y otorgarme el crédito correspondiente en todas las actividades mencionadas anteriormente de LA OBRA.

De igual forma, libero de toda responsabilidad a EL INSTITUTO por cualquier demanda o reclamación que se llegase a formular por cualquier persona, física o moral, que se considere con derechos sobre los resultados derivados de la presente autorización, o por cualquier violación a los derechos de autor y propiedad intelectual que cometa el suscrito frente a terceros con motivo de la presente autorización y del contenido mismo de la obra.

  
\_\_\_\_\_  
**Roberto González Preciado**  
(Nombre y firma del autor)



**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SONORA**  
Educar para Trascender

## **“Evaluación de la Sustentabilidad en la Cuenca del Río Yaqui”**

Tesis que para  
obtener el título de  
Ingeniero Civil

**Presenta:**

Roberto González Preciado

Cd. Obregón, Sonora; Junio de 2014

## DEDICATORIAS

*Dedico este trabajo a aquellas personas que me han impulsado y motivado durante este periodo de mi vida, que me han apoyado en cumplir toda meta que me he impuesto aun significando un sacrificio para ellos y que con sus palabras y acciones me han hecho saber que están y estarán siempre aquí.*

*A mis padres,*

*Yolanda Preciado Velarde*

*José Ramón González Clavero*

*A mis abuelos,*

*Yolanda Velarde Romero*

*Antonio Preciado Morales (+)*

## AGRADECIMIENTOS

*A mi familia, por ser el soporte incondicional durante toda mi carrera.*

*A mi asesor de tesis, el Dr. José Luis Minjares Lugo por otorgarme la oportunidad de trabajar con él y por su tiempo, paciencia y conocimiento aportados a este trabajo.*

*A mi maestra Gloria Isabel Bojórquez Morales y a mis revisores el Dr. Luis Carlos Valdez Torres y el Mtro. Luis Alonso Islas Escalante que con su apoyo y dedicación me permitieron concretar este proyecto.*

*A la Mtra. Lupita Ayón Murrieta, por brindarme su confianza y apoyo incondicional, y sobre todo por hacer este momento posible.*

*A Ana María Hernández Ruiz por acompañarme durante la carrera como mi maestra, amiga y compañera. Siempre dispuesta a apoyarme en cualquier obstáculo que se me presentara.*

*A mis amigos, de los cuales he aprendido tanto, por disfrutar conmigo los buenos momentos y apoyarme en los malos, que en estos últimos, es donde se descubre el verdadero significado de la amistad.*

*A todos ellos, muchas gracias.*

# ÍNDICE GENERAL

Dedicatorias .....	ii
Agradecimientos .....	iii
Índice General.....	iv
Índice de Figuras.....	vi
Índice de Tablas.....	viii
Resumen.....	ix
Capítulo I. Introducción .....	10
1.1. Antecedentes.....	10
1.2. Planteamiento del Problema.....	16
1.3. Objetivo .....	16
1.3.1. Objetivo General .....	16
1.3.2. Objetivos Específicos.....	17
1.4. Justificación .....	17
1.5. Limitaciones de Estudio.....	18
1.6. Delimitaciones de Estudio .....	18
Capítulo II. Marco Teórico.....	19
2.1. Sustentabilidad .....	19
2.2. Sequía .....	20
2.3. Gestión de Recursos Hidráulicos .....	21
2.4. Obras de almacenamiento.....	22
2.5. Algoritmos Genéticos.....	24
2.6. Modelo de Optimización .....	25
Capítulo III. Método.....	26
3.1. Tipo de Investigación.....	26

3.2. Ubicación del Objeto.....	26
3.3. Participantes.....	28
3.4. Instrumentos.....	28
3.5. Procedimientos.....	28
Capítulo IV. Resultados .....	32
4.1. Evaluación de los niveles de extracción sustentables de los sistemas de presas.....	32
4.2. Valoración del beneficio con el incremento en la explotación por bombeo de los acuíferos Valle del Yaqui y Cocoraque .....	39
4.3. Diagnóstico del panorama a futuro en un lapso de 10 años presentando condiciones de sequía y selección de un patrón de cultivos óptimos y sustentables .....	42
Capítulo V. Conclusiones y Recomendaciones.....	48
5.1. Conclusiones .....	48
5.2. Recomendaciones.....	49
Referencias.....	50
Anexos .....	55

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Promedio mensual de aportaciones en presas del Río Yaqui</i> .....	12
Figura 2. <i>Porcentaje de Área Afectada con Sequia en México</i> .....	21
Figura 3. <i>Principales componentes de un vaso</i> .....	23
Figura 4. <i>Mapa de la cuenca del Río Yaqui</i> .....	27
Figura 5. <i>Almacenamiento mensual de la Presa La Angostura (Panorama Seco)</i> .....	34
Figura 6. <i>Almacenamiento mensual de la Presa El Novillo (Panorama Seco)</i> .....	34
Figura 7. <i>Almacenamiento mensual de la Presa El Oviachic (Panorama Seco)</i> ...	34
Figura 8. <i>Almacenamiento mensual de la Presa La Angostura (Panorama Normal)</i> . .....	35
Figura 9. <i>Almacenamiento mensual de la Presa El Novillo (Panorama Normal)</i> ...	35
Figura 10. <i>Almacenamiento mensual de la Presa El Oviachic (Panorama Normal)</i> . .....	36
Figura 11. <i>Almacenamiento mensual de la Presa La Angostura (Panorama Húmedo)</i> .....	36
Figura 12. <i>Almacenamiento mensual de la Presa El Novillo (Panorama Húmedo)</i> . .....	37
Figura 13. <i>Almacenamiento mensual de la Presa El Oviachic (Panorama Húmedo)</i> . .....	37
Figura 14. <i>Beneficios del agua derivados de la agricultura en un año normal</i> .....	38
Figura 15. <i>Comparativa de volumen disponible de extracción para diferentes alternativas de bombeo en el panorama normal</i> .....	40
Figura 16. <i>Comparativa de volumen de recarga al acuífero para diferentes alternativas de bombeo en el panorama normal</i> .....	41
Figura 17. <i>Comparativo de hectáreas por cultivo sembradas en panorama con aumento de bombeo</i> .....	43
Figura 18. <i>Evolución del volumen de almacenamiento final anual por presa durante la simulación</i> .....	44
Figura 19. <i>Comparativo de hectáreas por cultivo sembradas en panorama sin aumento de bombeo</i> .....	45

Figura 20. <i>Evolución del volumen de almacenamiento final anual por presa durante la simulación.</i> .....	45
Figura 21. <i>Comparativa de beneficios económicos obtenidos.</i> .....	46
Figura 22. <i>Comparativa de hectáreas sembradas en primer cultivo.</i> .....	47



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Panoramas de inicio</i> .....	29
Tabla 2. <i>Datos obtenidos para el análisis del panorama seco</i> .....	33
Tabla 3. <i>Datos obtenidos para el análisis del panorama normal</i> .....	33
Tabla 4. <i>Datos obtenidos para el análisis del panorama húmedo</i> .....	33
Tabla 5. <i>Datos obtenidos en el análisis de alternativas de bombeo para un panorama seco</i> .....	39
Tabla 6. <i>Datos obtenidos en el análisis de alternativas de bombeo para un panorama normal</i> .....	40
Tabla 7. <i>Datos obtenidos para el estudio de sequía en un plazo extendido de 10 años con aumento de bombeo</i> .....	43
Tabla 8. <i>Datos obtenidos para el estudio de sequía en un plazo extendido de 10 años sin aumento de bombeo</i> .....	44

## RESUMEN

Este trabajo de investigación se realizó con el fin de evaluar desde un punto de vista sustentable el panorama a 10 años del sistema de presas del Río Yaqui identificando una serie de variables que señalen el progreso hacia un desarrollo sustentable teniendo como principales razones del estudio la preocupación provocada debido al acaecimiento de una fase de sequía prolongada que ha llegado a considerarse como un probable cambio climático en la región y el buscar crear una nueva conciencia sobre la vulnerabilidad de los recursos hidráulicos y del sistema de presas. La investigación fue realizada mediante un patrón secuencial y probatorio con el propósito de obtener resultados de carácter cuantitativo de cada panorama planteado y que fueron relacionados mediante un enfoque comparativo. Para llevar a cabo los objetivos se utilizó un modelo de simulación y optimización con el cual se obtuvo como resultado que, sólo para un panorama seco, un incremento del NAMINO entre un 5% y 10% en el sistema de presas permitiría terminar el ciclo agrícola con un almacenamiento similar al de inicio sin presentar un déficit tan elevado, además de que existe la capacidad de extraer por bombeo de hasta 550 Hm<sup>3</sup> sin sobrepasar la recarga de los acuíferos y por último, en un panorama de 10 años con sequía, una extracción por bombeo constante de 400 Hm<sup>3</sup> ayuda a mitigar los efectos de la misma, de esta manera se concluyó que, aunque se prevé un escenario bastante complicado, haciendo uso de modelos como complemento a la experiencia y sentido común de los encargados de la gestión de los recursos hidráulicos es posible asegurar el correcto funcionamiento del sistema de presas y optimizar su producción, por lo cual se recomienda generar una serie de políticas de emergencia para escenarios de sequía, respaldar el almacenamiento de las presas con la disponibilidad en los acuíferos y el establecimiento de la totalidad de la superficie regable en cada ciclo agrícola con el fin de dar sustentabilidad a la recarga de los acuíferos.

## **CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. Antecedentes**

En los últimos años la escasez de agua ha planteado una serie de retos a nivel mundial a los organismos reguladores del recurso y a las políticas en las cuales basan sus decisiones. Tal como menciona Sivakumar (2011) a pesar de todos los avances que se han realizado, la planeación y gestión de los recursos hidráulicos continúa siendo un desafío. A su vez, también reconoce tres factores, entre otros, que se prevé que complicarán aún más la situación del agua en el futuro:

- El crecimiento de la población normalmente se traduce en un incremento en las demandas en casi de todos los sectores (doméstico, industrial, agrícola, energético y recreativo).
- El cambio climático, de acuerdo a la mayoría de científicos, intensificará el ciclo hidrológico global lo que causará fenómenos hidrológicos extremos más frecuentes y severos; y debido a que la planeación y gestión del agua es más difícil durante periodos de sequía e

inundaciones, el cambio climático probablemente pueda traer consigo retos adicionales.

- Por último, los ríos y cuencas transfronterizas ya sea entre países, estados y/o municipios han sido la fuente de numerosos conflictos entre quienes los comparten, aunque también hay casos en los cuales esto ha llevado a la cooperación entre regiones.

Varias iniciativas han surgido de manera global bajo la preocupación sobre la escasez del agua, la crisis y el aumento de conflictos. Estas iniciativas han venido en varias formas y en tiempos diferentes (Sivakumar, 2011). Entre ellas se encuentra el mecanismo de coordinación de las Naciones Unidas para las todas las cuestiones relacionadas con el agua dulce, establecido en el 2003 y que actualmente cuenta con 30 miembros de las Naciones Unidas y otros 25 socios internacionales (United Nations Water, 2012). En su último reporte trianual, el Coordinador de Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP por sus siglas en inglés) Olcay Ünver expresó “El rápido cambio de las condiciones alrededor del mundo están creando nuevas presiones en el agua, e introduciendo nuevas incertidumbres y riesgos en su uso y gestión” reafirmando de esta manera la importancia en una correcta planeación y gestión del recurso (United Nations Water, 2012, p. III).

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO por sus siglas en inglés) el promedio de uso de agua en el año 2006 para el sector agrícola sobre el total de agua retirada a nivel mundial es del 69%, marcando una amplia diferencia entre los otros sectores como el municipal (12%) y el industrial (19%); en el caso de México el porcentaje del sector agrícola se sitúa sobre la media con un porcentaje de 76.69% (FAO, 2012). Este parámetro resulta crucial cuando se considera que más de tres cuartas partes de la extracción total de agua están determinadas por el adecuado régimen de políticas de extracción y la eficiencia con la cual los agricultores hagan uso del recurso.

La cuenca del Río Yaqui cuenta con una característica particular de la región, más del 70% de las aportaciones ocurre en los meses de julio a septiembre (ver Figura 1), por lo cual fue necesaria la creación de un sistema de presas para impulsar la actividad agrícola creciente en las décadas pasadas; este sistema puede llegar a manejar más de 6,712.6 hectómetros cúbicos (Hm<sup>3</sup>) al año según la intensidad de lluvias (CONAGUA, 2014a).

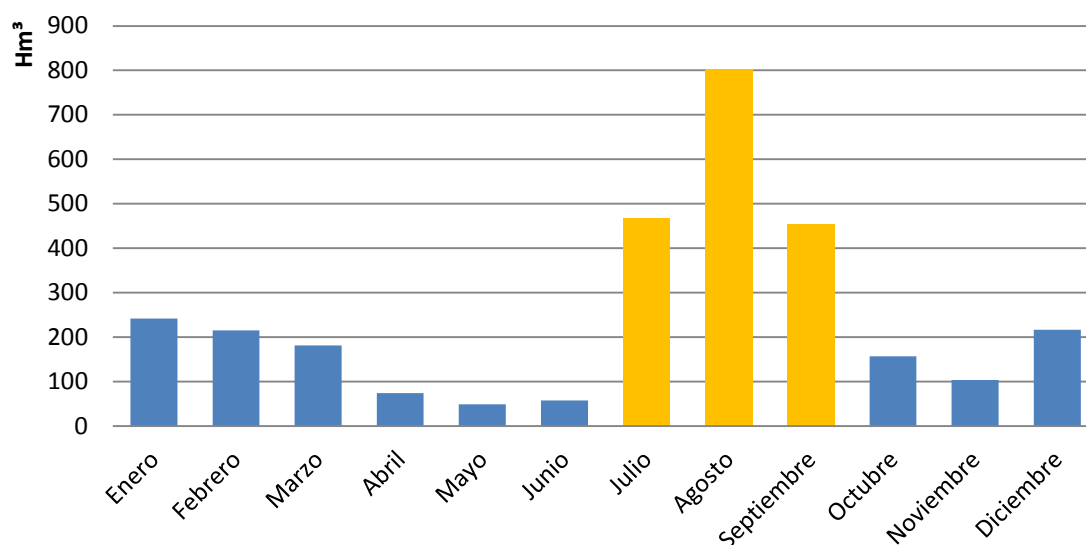


Figura 1. Promedio mensual de aportaciones en presas del Río Yaqui.  
Fuente: elaboración propia con datos de CONAGUA (2012)

Del agua almacenada en el sistema de presas antes mencionado depende directamente la actividad agrícola de la región del Valle del Yaqui, las Comunidades Indígenas Yaquis, la Minera de La Caridad, Los Pueblos Ribereños, las plantas hidroeléctricas pertenecientes a la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y para uso doméstico en los municipios de Cajeme, Bécum, San Ignacio Río Muerto, Benito Juárez y Etchojoa. Estas características propias del sistema demandaron el desarrollo de organismos que se encarguen de gestionar el agua durante el año para satisfacer las necesidades tanto de los asentamientos urbanos, industria y el uso agrícola.

Debido a la concientización en el uso y manejo del agua que se han presentado en las décadas recientes, el enfoque sustentable en el manejo de los recursos

hidráulicos a nivel mundial se ha convertido en un escalón imprescindible en la administración de este recurso tan vital; más aun añadiendo los factores que dependen de la zona en cuestión; tal como el predominio de la actividad agrícola como fuente económica, los cambios climáticos que se han presenciado durante las últimas dos décadas y el crecimiento demográfico, hace de este un problema que requiere de atención inminente, tal como menciona Grigg (1996, p. 6) “la verdadera crisis del agua es una ‘crisis progresiva’ –ocurre lentamente pero exige una respuesta inmediata”.

En las últimas dos décadas se han realizado una gran cantidad de trabajos referentes al uso sustentable del agua y su aplicación en el riego de regiones agrícolas debido a que es un tema que ha adquirido una gran importancia por tratar dos de los temas con una gran incidencia en el desarrollo de las comunidades, el agua y el alimento, además de relacionarse directamente con la economía de la región en que residen.

Muchos de éstos como el National Program for Sustainable Irrigation (2006) tratan temas como el uso de agua rodada, crecimiento de las plantas con técnicas como la hidroponía, uso eficiente del agua, riegos de precisión, y planeación de irrigación en comunidad, además de considerar el riesgo ecológico de las acciones que se realicen.

Incluso algunos comparten ciertas características con la presente investigación ya sea el clima, el tipo de región agrícola que se maneja o las líneas de acción que representan tal como el artículo presentado por Cai, McKinney y Rosegrant (2001) donde se menciona que un manejo sustentable del agua de riego debe de alcanzar simultáneamente dos objetivos: la producción de alimento seguro y la conservación del medio ambiente donde se realice la actividad. También se hace mención de indicadores tales como:

- Vulnerabilidad y confiabilidad del sistema de suministro de agua.
- Integridad del sistema ambiental.

- Equidad en la repartición del agua.
- Aceptabilidad económica.

Considerados útiles en zonas áridas o semiáridas para los tomadores de decisiones y recomienda su uso para las autoridades encargadas del manejo de la cuenca.

El artículo publicado por Minjares, Valdés, Salmón, Oroz, y López (2010) comparte el uso de indicadores para la evaluación de un sistema de presas perteneciente a la cuenca del Rio Yaqui definiendo índices que explican los principales atributos sustentables del sistema, además de relacionar los acuíferos del Valle del Yaqui y Cocoraque por su extrema vulnerabilidad. Estos autores desarrollaron un modelo de simulación-optimización a largo plazo capaz de generar una metodología cuantitativa y transferible que promueva el impulso de mejores prácticas sustentables en las actividades del distrito de riego.

En el enfoque económico que se maneja por Lant (2004) el agua juega al menos tres papeles críticos en el proceso ecológico-económico, primero como materia prima, un factor de producción de un sinnúmero de bienes económicos negociables, desde electricidad hasta los cultivos; segundo por su contribución a la salud humana, el agua potable tratada para uso doméstico es enormemente valiosa en la producción de capital humano, y por último el agua en los océanos, ríos, lagos, humedales, pantanos, y otros componentes del ciclo hidrológico, es un factor crítico en la producción de los “servicios” del ecosistema. Los humedales son el ejemplo más ilustrativo de los servicios que brinda el ecosistema tales como control de inundaciones, purificación de agua, hábitat para la vida silvestre, regulador del ciclo de hidrogeno, por mencionar algunos.

Tratándose sobre los estudios de sustentabilidad, una herramienta cada vez más utilizada como una ayuda en el desarrollo de políticas sustentables es el manejo de modelos de simulación, para Winz y Brierley (2007) su utilidad radica en la capacidad de permitir experimentar el comportamiento del mundo en una situación

artificial, además de ser relativamente económico de realizar repetitivamente y que con el incremento de potencia de los procesadores se es capaz de manejar una cantidad de información más grande y compleja.

En el área de la hidráulica se ha buscado la aplicación de métodos de optimización en busca de soluciones óptimas apegadas a una serie de condiciones establecidas y como menciona Bithin y Harikrishna (2004, p. 57) “Una de las áreas de la Ingeniería Civil que realmente ha sido pionera en el uso de técnicas de optimización es la planeación, diseño, operación y gestión de sistemas de recursos hidráulicos”. Este tipo de herramientas haciendo uso de modelos matemáticos confluyen en una serie de decisiones que en términos de sustentabilidad, pueden llegar a arrojar alternativas que mantengan un equilibrio entre los factores social, ecológico y económico, tal como busca demostrar este trabajo para la cuenca del Rio Yaqui.

Una situación que actualmente ha tomado bastante interés en el rubro de la hidráulica y el manejo del agua es la sequía que ha azotado a varias zonas del país, que ha llevado a generar caracterizaciones en cuencas como la realizada por López (2013), además de la formulación de un plan directamente enfocado al combate de la sequía conocido como “Programa Nacional contra la Sequía” (PRONACOSE) que a partir de la atención, seguimiento, mitigación y prevención al fenómeno recurrente de la sequía en el territorio nacional busca elaborar instrumentos que permitan la gestión integrada de los recursos hídricos (CONAGUA, 2013a).

Como esfuerzo focalizado en el área del Valle del Yaqui se ha instalado un grupo de trabajo para manejo de la sequía en el Valle del Yaqui integrado por CONAGUA, Distrito de Riego del Rio Yaqui, módulos de riego, organizaciones de productores, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) y Sanidad Vegetal, que será auxiliar al Comité



Hidráulico y busca proponer acciones inmediatas en el uso y manejo del agua (SEMARNAT, 2013).

## **1.2. Planteamiento del Problema**

En general, es común considerar la problemática planteada sobre los recursos hídricos y la importancia que impone la gestión y uso de estos en el sector agrícola a nivel mundial en un panorama tanto social como económico, pero actualmente el factor de la sustentabilidad se ha convertido en indispensable para asegurar el beneficio tanto de las generaciones presentes como las futuras. El Valle del Yaqui como pieza clave en la producción agrícola de la región está siendo azotado por una sequía que coloca en situación desfavorable y complicada los encargados de realizar una adecuada administración de los recursos en fin de abastecer a los diversos consumidores.

El conjunto de presas del Río Yaqui así como la gestión del agua a sus diferentes consumidores, los productos agrícolas producidos y los beneficios económicos que estos involucran, se puede representar como un sistema que define a los conceptos anteriormente mencionados como variables relacionadas que resultan afectadas en caso de variaciones en alguna de ellas. Haciendo uso de un modelo bajo un sistema de optimización se puede analizar las diversas perspectivas que se presenten y poder efectuar adecuaciones a considerar en caso de que se presenten dichas situaciones.

Analizando los factores económico, social y de gestión, desde un punto de sustentabilidad ¿Qué panorama se prevé para el sistema de presas del Río Yaqui en la situación de una sequía extendida en un periodo de estudio de 10 años?

## **1.3. Objetivo**

### **1.3.1. Objetivo General**

Evaluar desde un punto de vista sustentable el panorama a 10 años del sistema de presas del Río Yaqui, mediante la utilización de un modelo de simulación-

optimización propuesto por Minjares, Salmón, Oroz, y Cruz (2008), con el fin de promover mejores prácticas sustentables en el distrito de riego identificando una serie de variables que señalen el progreso hacia un desarrollo sustentable.

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Evaluar los niveles de extracción sustentables del sistema de presas.
- Valorar el beneficio con el incremento en la explotación por bombeo de los acuíferos Valle del Yaqui y Cocoraque.
- Diagnosticar el panorama a futuro en un lapso de 10 años presentando condiciones de sequía.
- Seleccionar un patrón de cultivos óptimos y sustentables, que genere los máximos beneficios económicos, minimizando el riesgo de déficit y derrames del sistema de presas.

### **1.4. Justificación**

Como principal razón para la realización de este estudio es preocupación provocada por el acaecimiento de una fase de sequía extendida que ha llegado a ser considerada como un probable cambio climático irremediable en la región. Esta situación ha llevado a examinar las posibles consecuencias que trae consigo la extensión de este fenómeno y la discusión de posibles soluciones que ayuden a mitigar los efectos que ocurran en la región.

Estudios de este tipo generan información útil para llevar a cabo el análisis de manera más profunda en las decisiones que se toman respecto al manejo del agua, si se generan escenarios en los cuales las condiciones sean adversas debido a fenómenos como la sequía mediante el modelado es posible identificar los principales factores de riesgo en la distribución del recurso y tener preparado un plan de acción para poder actuar de la manera más conveniente cuando se presenten esas condiciones en la realidad.

La realización de esta investigación, además de generar datos que proyecten los efectos de la sequía en el sistema a largo plazo, busca además crear una nueva conciencia sobre la vulnerabilidad de los recursos hidráulicos y del sistema en sí que depende enteramente de estos, al considerarse como un sistema interconectado se pretende demostrar que los efectos de la sequía va más allá de un indicador meramente económico, sino que implica un desbalance social que afecta a diversos rubros y no solamente al agrícola.

Es importante también reconocer la utilidad de los modelos por su capacidad de representar la realidad de manera sistematizada, identificando los datos esenciales que permiten mejorar la comprensión de su funcionamiento y generar resultados y experiencia aplicables en la solución de problemas reales.

### **1.5. Limitaciones de Estudio**

Las limitantes encontradas al realizar el estudio en su mayoría son debido a la utilización de un modelo que representa la situación establecida en base de abstracciones de la realidad.

### **1.6. Delimitaciones de Estudio**

El análisis se delimita a la cuenca del Río Yaqui y se efectúa en un panorama de 10 años a partir del año de los datos obtenidos.

## **CAPÍTULO II. MARCO TÉORICO**

### **2.1. Sustentabilidad**

La sustentabilidad como concepto carece de una definición exacta, Matson y Falcon (2012) lo consideran como un concepto complejo, con múltiples definiciones y metas, lo cual hace aún más complicado converger en una descripción completa. La sustentabilidad “no es un problema ecológico, social, ni económico, sino una combinación de los tres. Aun así los intentos para integrar a los tres, generalmente restan importancia a alguno de los estos aspectos” (Solorzano, 2002, p. 3).

Debido a lo anterior se ha decidido utilizar la definición de sustentabilidad que más se adecua al propósito del presente trabajo propuesta por Minjares et al. (2010, p. 139):

“...el Distrito de Riego 041, Río Yaqui, será sustentable si al operarlo mantiene su productividad, confiabilidad y resiliencia a cambios inesperados; si es capaz

de funcionar efectivamente bajo condiciones de cambios en las aportaciones y las demandas de agua, así como ante los cambios en los objetivos de los productores agrícolas, manteniendo una agricultura segura y rentable a largo plazo, que no degrade el agua, el suelo y otros recursos naturales, de tal manera que las futuras generaciones tengan la misma oportunidad de usarlos de la misma o mejor forma de la que se utilizan hoy en día, manteniendo la equidad en cuanto a la distribución de los costos y utilidades generados en el Distrito.”

Lo que es claro es que la sustentabilidad se enfoca en el mejoramiento del bienestar de la sociedad a largo plazo. Esta mejora en el bienestar a través del tiempo no puede ocurrir sin un sistema sustentable de recursos hidráulicos, sistemas que puedan satisfacer, ahora y en un futuro a la máxima capacidad posible, las demandas de la sociedad por agua y los múltiples propósitos para la cual se utiliza (Task Commiettee on Sustainability Criteria, Water Resources Planning and Management Division, American Society of Civil Engineers and the working group of UNESCO/IHP IV Project M-4.3, 1998, p. 44).

## **2.2. Sequía**

La sequía puede significar varias cosas para diferentes personas, dependiendo de su interés específico. Para el agricultor significa una disminución de la humedad en la zona de las raíces de sus cultivos. Para el hidrólogo sugiere un nivel por debajo del promedio en cauces, lagos, embalses y similares. Para el economista significa una reducción de agua que afectará adversamente a la economía establecida. Cada uno tiene una preocupación diferente que depende de los efectos de una anomalía meteorológica prolongada (Palmer, 1965).

Valiente (2001, p. 60) considera que a pesar de parecer sencilla y coincidir en una amplia gama de bibliografía como la “deficiencia de precipitaciones durante un periodo de tiempo relativamente prolongado” todas terminan por divergir en cuestión de duración (operacionales) o simplemente no hacer referencia al tiempo (conceptuales), al final utiliza la clasificación de Wilhite y Glantz (1985), citado por

Valiente, que categoriza a la sequía en cuatro grupos según la disciplina científica desde la que sea analizado el fenómeno, meteorológica, hidrológica, agrícola y socioeconómica.

Como respuesta al fenómeno de la sequía, en el norte de América, se han enfocado esfuerzos de cooperación entre expertos de Canadá, México y Estados Unidos para monitorear la sequía en el sector de América del Norte, este programa “North American Drought Monitor” (NA-DM) inicio en abril del 2002 y forma parte de un amplio proyecto, cuyo principal objetivo es el monitorio de eventos climáticos extremos sobre el territorio de los tres países (CONAGUA, 2014b). Como se muestra en la Figura 2 se han registrado picos de sequía excepcional en el país.

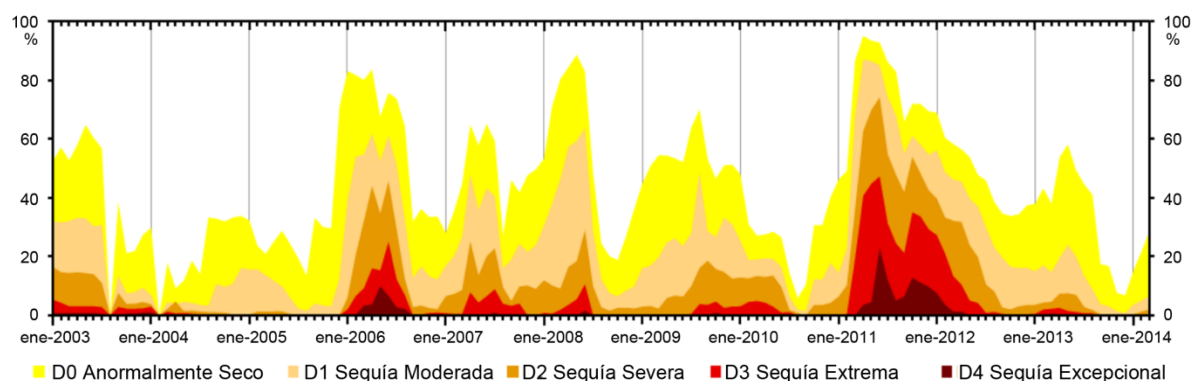


Figura 2. *Porcentaje de Área Afectada con Sequía en México.*  
Fuente: Adaptado de CONAGUA (2014b)

### 2.3. Gestión de Recursos Hidráulicos

La utilización de los recursos hidráulicos disponibles de una región para el beneficio de una comunidad ha sido realizado desde los inicios de la civilización, tales como, los canales romanos, los sistemas de drenaje en India y los sistemas de presas en Jordania y Egipto. En general, esos adelantos realizados hace siglos tenían como principal objetivo satisfacer el requerimiento de agua para las comunidades y los sistemas de riego. En la actualidad las condiciones que se deben de cumplir para los proyectos modernos son un tanto más complicadas por lo cual estos son visualizados haciendo uso de un planeamiento estratégico con

un enfoque científico. Las técnicas de planeación y gestión del agua pueden consistir tanto en soluciones estructurales (presas, conductos, canales, etc.) como no estructurales (decisiones, políticas de extracción, repartición de derechos, etc.) y son usadas para determinar la cantidad de agua necesaria para cumplir con las necesidades así como preservar y mejorar las condiciones de las fuentes de agua natural (IIT Kharagpur, 2008).

Según Balek (1983) los tres principales problemas que se encuentran en la planeación de proyectos que presentan un vínculo con los recursos hidráulicos están relacionados con la distribución de los recursos en el entorno, la búsqueda del modo más sensato de usar estos recursos y encontrar la manera más racional de potencializarlos y para una adecuada solución de estas cuestiones es necesario contar con redes hidrológicas e hidrometeorológicas de medición que permitan un constante monitoreo de tal manera que se pueda realizar una valoración de los recursos disponibles y de las demandas actuales y futuras.

Al tratarse de un recurso finito, existen límites para la cantidad de agua que puede ser sustraída de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos. También existen límites para la cantidad de contaminantes que pueden ser descargados en los flujos de agua sin causar un daño permanente. Ahora bien, tal como Loucks y van Beek (2005, p. 3) plantean: “¿cómo pueden estos recursos renovales pero finitos ser gestionados y usados de la mejor manera? ¿De qué modo puede lograrse esto en un entorno de suministros inciertos y demandas cambiantes y a la vez crecientes y por consecuencia el incremento de conflictos entre individuos que tienen intereses diferentes en el manejo de un río y su cuenca? El abordar y si es posible tratar de resolver esas preguntas es el propósito central de la planeación y gestión de los recursos hidráulicos”.

#### **2.4. Obras de almacenamiento**

Existen ciertos conceptos hidrológicos relativamente simples, aunque fundamentales y de gran importancia, al momento de diseñar una presa, en general estos conceptos sirven de base para su dimensionamiento. El elemento

distintivo de una presa debido a su utilidad es el vaso de almacenamiento, su principal motivo es la regulación de los cauces, en temporadas de lluvias sirve como almacenamiento para el volumen de exceso que fluye en el río, mientras que en las temporadas secas, distribuye el volumen almacenado con anterioridad. Indistintamente el volumen almacenado puede ser utilizado tanto para el sector doméstico, como para el agrícola, industrial, o la generación de energía eléctrica, entre otros (Aparicio, 1992).

El vaso de almacenamiento posee ciertos niveles que regulan el funcionamiento de la presa (ver Figura 3) y que representan la mínima y máxima capacidad de almacenamiento de la presa bajo ciertas condiciones.

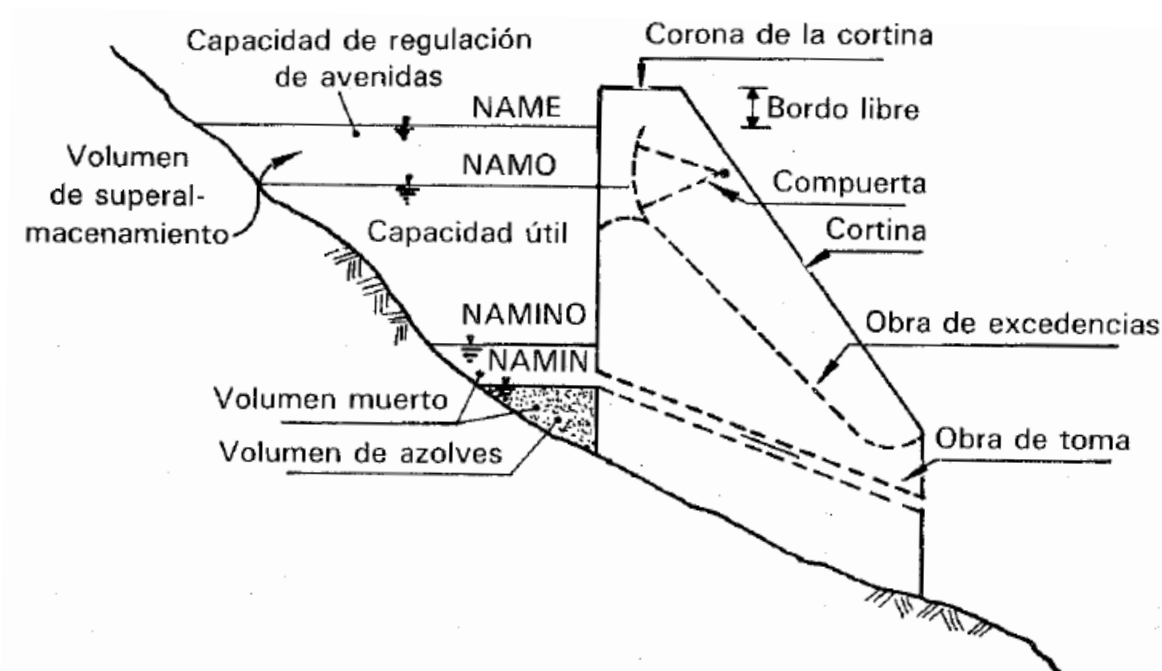


Figura 3. *Principales componentes de un vaso.*  
Fuente: Aparicio (1992)

Estos niveles se relacionan directamente con el régimen de funcionamiento considerado al diseñar el vaso de almacenamiento, Aparicio (1992) los describió de la siguiente manera:



- Nivel de aguas mínimas de operación (NAMINO), es el nivel más bajo con el que puede operar una presa y en algunos casos coincide con el nivel al que se encuentra la entrada de la obra de toma, o bien en el caso de plantas de generación de energía eléctrica, el nivel coincidiría con la carga mínima necesaria para el buen funcionamiento de las turbinas.
- Nivel de aguas máximas ordinarias o de operación (NAMO), coincide con el máximo nivel con el cual se puede operar la presa para satisfacer las demandas.
- Nivel de aguas máximas extraordinarias (NAME) es el nivel más alto que debe alcanzar el agua en el vaso bajo cualquier condición.

De la misma manera se describen los volúmenes generados entre los límites mencionados anteriormente:

- Volumen muerto, se considera como el volumen debajo del NAMINO que debido a su localización no se puede utilizar.
- Volumen de azolves, queda debajo de la obra de toma y se reserva para recibir el acarreo de sólidos por el río durante la vida útil de la presa.
- Volumen útil, cantidad almacenada entre el NAMO y el NAMINO y se encarga de satisfacer las demandas.
- Volumen de superalmacenamiento, abarca el volumen que se encuentra entre el NAMO y el NAME y su principal utilidad es controlar las avenidas extraordinarias.

## **2.5. Algoritmos Genéticos**

Tomando como inspiración la destreza y versatilidad de los organismos vivos en la solución de problemas y su capacidad de obtener sus habilidades mediante la evolución o bien la selección natural, Holland (1992) buscó incorporar esas características y mecanismos evolutivos a los programas con el objetivo hacerlos aptos para la resolución de problemas más complejos, mediante la adquisición de experiencia.

Tal como lo simplifica Tolmos (2003, p. 3) “Básicamente, el Algoritmo Genético funciona como sigue: en cada generación, se crea un conjunto nuevo de “criaturas artificiales” (cadenas) utilizando bits y partes más adecuadas del progenitor. Esto involucra un proceso aleatorio que no es, en absoluto, simple. La novedad que introducen los Algoritmos Genéticos es que explotan eficientemente la información histórica para especular sobre nuevos puntos de búsqueda, esperando un funcionamiento mejorado.”

En el lenguaje de los algoritmos genéticos es común hablar de términos como mutación, que se refiere a la creación de nuevos individuos realizado cambios en un solo individuo, o bien cruza, tratándose de nuevos individuos creados a partir de la combinación de dos individuos de la generación pasada. A partir de estos procesos, realizados durante varias generaciones de especies, se espera que la nueva población supere a la anterior por medio del principio de la supervivencia de más apto (Gen & Cheng, 2000).

## **2.6. Modelo de Optimización**

Como recomiendan Andreu, Capilla y Cabezas (1994, p. 8) “a los efectos de analizar la planificación y gestión de sistemas complejos es esencial que se utilicen las herramientas más avanzadas posibles”. Los modelos como herramienta de diseño para los sistemas de planeación hidráulica otorgan la capacidad al responsable de la gestión de plantearse escenarios en busca de soluciones anticipadas a la vida real, así como en caso de los modelos de optimización, tal como el propuesto por Minjares et al. (2008) a partir de restricciones aplicadas al sistema, en este caso de almacenamiento, extracción, continuidad, riego y mercado, y maximizando una función objetivo establecida, busca la solución más adecuada para el panorama propuesto; el funcionamiento y formulación utilizados se desarrolla dentro del Anexo 1 de esta investigación.

## **CAPÍTULO III. MÉTODO**

### **3.1. Tipo de Investigación**

Debido a que se manejan datos numéricos obtenidos del análisis estadístico de un escenario real, se trata de una investigación con carácter cuantitativo, esta investigación sigue un patrón secuencial y probatorio para obtener los resultados de cada panorama planteado que además serán relacionados con un enfoque comparativo para su discusión.

### **3.2. Ubicación del Objeto**

La cuenca del Rio Yaqui, según Lutz y Curl (2012), es la más grande del noroeste de México, tanto en términos de su extensión como por el volumen de sus escurrimientos, se ubica principalmente en la porción centro-este del estado mexicano de Sonora (ver Figura 4), se origina en el estado de Chihuahua hacia el este y en Arizona, Estados Unidos, hacia el norte. El Rio Yaqui tiene un sistema de ríos con una longitud de 397 km, la temperatura media anual es de 20.8°, mientras que su precipitación media anual es de 475mm. Como parte de su

infraestructura cuenta con un sistema que incluye tres grandes presas. La Angostura (Lázaro Cárdenas) localizada en el Río Bavispe, en la cuenca alta, El Novillo (Elías Calles) localizada en la confluencia de los Ríos Yaqui y Moctezuma en el punto medio entre las presas El Oviachic y La Angostura, en la cuenca media y El Oviachic (Álvaro Obregón) localizada a 35 km al norte de Ciudad Obregón en la cuenca baja. A este sistema también pertenecen dos grandes distritos de riego: El Distrito de Riego No. 041, Río Yaqui y el Distrito de Riego No. 018, Colonias Yaquis.

La capacidad total del sistema de presas es de 6,712.6 Hm<sup>3</sup>, de los cuales 703.4 Hm<sup>3</sup> corresponden a la presa Lázaro Cárdenas, 3,020 Hm<sup>3</sup> a la presa Plutarco Elías Calles y 2,989.2 Hm<sup>3</sup> a la presa Álvaro Obregón, sin considerar la colocación de agujas en “La Angostura” y “El Oviachic” (CONAGUA, 2014a).

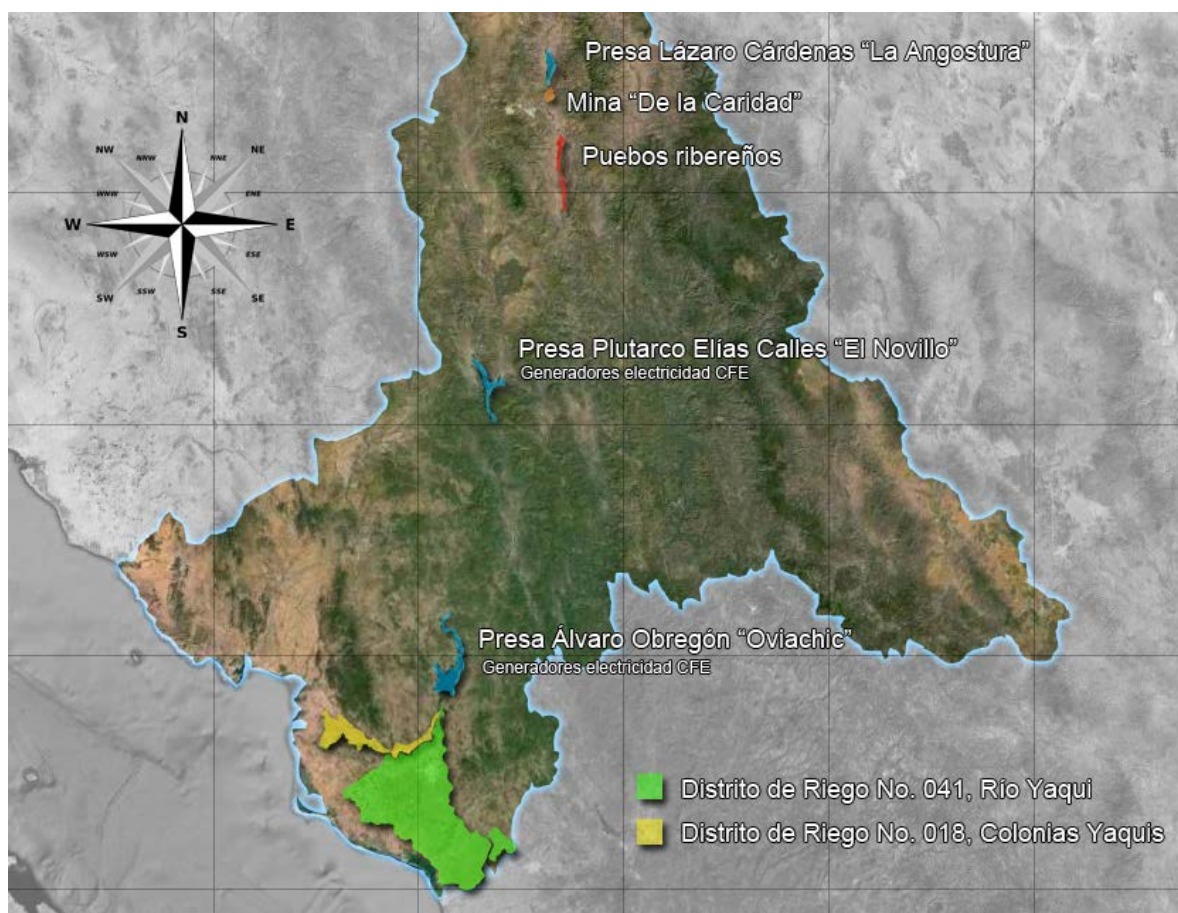


Figura 4. Mapa de la cuenca del Río Yaqui.  
Fuente: Adaptación de CONAGUA (2013b).

### **3.3. Participantes**

Los participantes dentro de esta investigación fueron el Coordinador de Distritos de Riego del Organismo de Cuenca de Noroeste como asesor, y el personal técnico del Departamento de Hidrometría como la fuente de datos necesarios para la realización del proyecto por parte de la Comisión Nacional del Agua, y por otra parte el alumno tesista inscrito al noveno semestre de la carrera de Ingeniería Civil en el Instituto Tecnológico de Sonora.

### **3.4. Instrumentos**

En fin de lograr esta investigación fue requerido el uso de herramientas computacionales como hojas de cálculo y procesadores de texto, los paquetes de software utilizados fueron los siguientes, Microsoft Office Word 2010 y Microsoft Office Excel 2010 con la aplicación Evolver y @Risk desarrolladas por Palisade.

### **3.5. Procedimientos**

Para cumplir con los objetivos mencionados en el primer capítulo se decidió seguir una serie de pasos según el objetivo que se buscó ensayar, esto en fin de obtener resultados comparables entre diversas situaciones buscando evaluar la sustentabilidad utilizando diversas variables como son: el volumen de almacenamiento de las presas en el sistema, la superficie sembrada, los beneficios económicos, los derrames y el déficit presentes en los sistemas de presas, entre otros.

Para todas las evaluaciones realizadas en el modelo de optimización se utilizó la herramienta de algoritmos genéticos referida en Minjares, et al. (2008) con las restricciones de parada de un tiempo de 5 minutos o bien, un total de 500 iteraciones sin mostrar un cambio de 0.01% en la función objetivo con el fin de mantener un estándar de parada en los ensayos.

Además de esto, se incluyó una condición preliminar para dar inicio a los ensayos y se establecieron los tres tipos de escenarios generales que reproducen las

situaciones en las cuales se podría encontrar el sistema, un panorama seco, uno normal y otro húmedo, las condiciones propuestas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. *Panoramas de inicio.*

Presa	Condición Inicial	Vol. Inicio Seco (+15%)	Vol. Inicio Normal (+60%)	Vol. Inicio Húmedo (+90%)
La Angostura (Hm <sup>3</sup> )	350.00	177.758	456.033	641.549
El Novillo (Hm <sup>3</sup> )	1,800.00	763.250	1,958.000	2,754.500
El Oviachic (Hm <sup>3</sup> )	1,600.00	902.225	1,958.900	2,663.350
Probabilidad (%)	50%	90%	60%	30%
Bombeo (Hm <sup>3</sup> )	200	400	300	150

Fuente: Elaboración propia.

En cada una de las condiciones se tomó como inicio el nivel de aguas mínimas de operación (NAMINO) y se sumo el porcentaje indicado cada uno de los panoramas de la diferencia entre el NAMINO y nivel de aguas máximas extraordinarias (NAME) de la siguiente manera;

$$\text{Volumen a 1 de Octubre}_{\text{Panorama}} = \text{Porcentaje} * (\text{NAME} - \text{NAMINO}) + \text{NAMINO}$$

De la misma forma se consideraron porcentajes de probabilidad para las aportaciones mensuales y para la lluvia en el vaso de la presa de manera que representen la condición seca o húmeda.

Para la realización del primer objetivo específico, evaluación de los niveles de extracción sustentables del sistemas de presas, se consideró que a partir de las situaciones establecidas en la Tabla 1 (panorama seco, normal y húmedo) se propusieron diversos escenarios del NAMINO, ésto para analizar el comportamiento del sistema de presas así como los beneficios económicos, la superficie factible a sembrar, los niveles de almacenamiento de presa por mes,

además de la presencia de derrames o déficit, estableciendo el aumento del NAMINO con la siguiente fórmula;

$$\text{NAMINO}_{\text{Porcentaje}} = \text{NAMINO} + \text{Porcentaje} * (\text{NAME} - \text{NAMINO})$$

Los porcentajes que se seleccionaron para la evaluación de este objetivo fueron de 5%, 10% y 20%.

En caso del segundo objetivo específico, la valoración del aumento en la explotación por bombeo de los acuíferos Valle del Yaqui y Cocoraque, se decidió llevar a cabo en esta simulación el análisis del beneficio que se tendría en el Distrito de Riego No. 041 a través de aumentar la extracción por bombeo, la cual se presentó en dos escenarios distintos, la primera que representa a un año seco y la segunda a un año normal, donde las variaciones de extracción fueron desde 450 Hm<sup>3</sup>, que es la capacidad máxima instalada, hasta 650 Hm<sup>3</sup> que corresponde a la recarga anual de los acuíferos del Valle del Yaqui y Cocoraque según (CONAGUA, 2009a) y (CONAGUA, 2009b).

Para la realización del tercer objetivo, diagnosticar el panorama a futuro de un lapso de 10 años presentando condiciones de sequía, con el uso del modelo se estudió el caso de que lo que se vive actualmente fuera un cambio climático permanente y no una sequía transitoria. Se representó un escenario de sequía, considerando como tal una probabilidad de 60% de aportaciones mensuales (2,216.9 Hm<sup>3</sup>), ya que al reducir la probabilidad se disminuye la precipitación esperada, después se corrió el modelo diez veces equivalente a 10 años, utilizando los volúmenes de almacenamiento finales de cada año anterior. También durante el proceso se presentaron escenarios críticos de escases de agua, debido a esto, se optó por aumentar el bombeo ya que seguramente sería una de las soluciones consideradas. Para establecer un panorama de comparación se realizó otro estudio a 10 años, siguiendo la misma metodología, pero considerando desde el inicio un bombeo de 400 Hm<sup>3</sup> el cual se mantuvo durante toda la realización del ensayo.

Por último para cumplir el cuarto objetivo, seleccionar un patrón de cultivos óptimos y sustentables que genere los máximos beneficios económicos minimizando el riesgo de déficit y derrames del sistema de presas, se realizó un gráfico comparativo a partir de los datos obtenidos en el tercer objetivo registrados a lo largo de diez años.



## **CAPÍTULO IV. RESULTADOS**

En esta capítulo se presentan los resultados obtenidos de acuerdo a los objetivos establecidos para este proyecto de investigación.

### **4.1. Evaluación de los niveles de extracción sustentables de los sistemas de presas**

En relación al primero objetivo, se puede observar en las Tablas de la 2 a la 4, que el movimiento del NAMINO afecta de mayor manera al escenario seco debido a que la presencia de un NAMINO más alto disminuye las salidas de agua de las presas y dispara los déficit, a medida que se mejora el panorama, es decir con un escenario normal o más húmedo las líneas que se presentan en las Figuras 5 a 13 empiezan a uniformizarse, señal de que la presencia del NAMINO más alto no llega a afectarlos de gran manera, debido a ésto se enfocó el análisis en el panorama seco.

Tabla 2. *Datos obtenidos para el análisis del panorama seco.*

Políticas de extracción para Panorama Seco	Nivel de NAMINO			
	Condición inicial	+ 5%	+ 10%	+ 20%
Volumen disponible para segundos cultivos	-1,759.126	-1,482.349	-1,213.233	-675.678
Beneficio económico	2,534,056,822	2,534,041,591	2,534,055,374	2,534,032,028
Superficie total sembrada, en Ha	185,012	185,010	185,011	185,008
Recarga al acuífero	609.46	609.45	609.46	609.45
Derrames	0.00	0.00	0.00	0.00
Déficit	844.767	1,119.397	1,394.467	1,965.953

Tabla 3. *Datos obtenidos para el análisis del panorama normal.*

Políticas de extracción para Panorama Normal	Nivel de NAMINO			
	Condición inicial	+ 5%	+ 10%	+ 20%
Volumen disponible para segundos cultivos	-115.644	-115.644	-83.249	-82.310
Beneficio económico	2,653,219,743	2,653,219,743	2,653,665,551	2,652,981,588
Superficie total sembrada, en Ha	208,001	208,001	208,001	208,001
Recarga al acuífero	691.84	691.84	691.62	692.63
Derrames	0.00	0.00	0.00	0.00
Déficit	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 4. *Datos obtenidos para el análisis del panorama húmedo.*

Políticas de extracción para Panorama Húmedo	Nivel de NAMINO			
	Condición inicial	+ 5%	+ 10%	+ 20%
Volumen disponible para segundos cultivos	2,127.679	2,169.770	2,187.439	2,176.830
Beneficio económico	2,673,120,247	2,653,274,570	2,652,774,127	2,658,073,247
Superficie total sembrada, en Ha	208,001	208,001	208,001	208,001
Recarga al acuífero	700.70	677.95	678.15	690.92
Derrames	403.747	472.633	478.398	435.386
Déficit	0.00	0.00	0.00	0.00

De la misma manera, se obtuvieron los volúmenes mensuales almacenados para cada una de las presas en las condiciones propuestas y cuyos resultados se presentan en las Figuras 5 al 13.

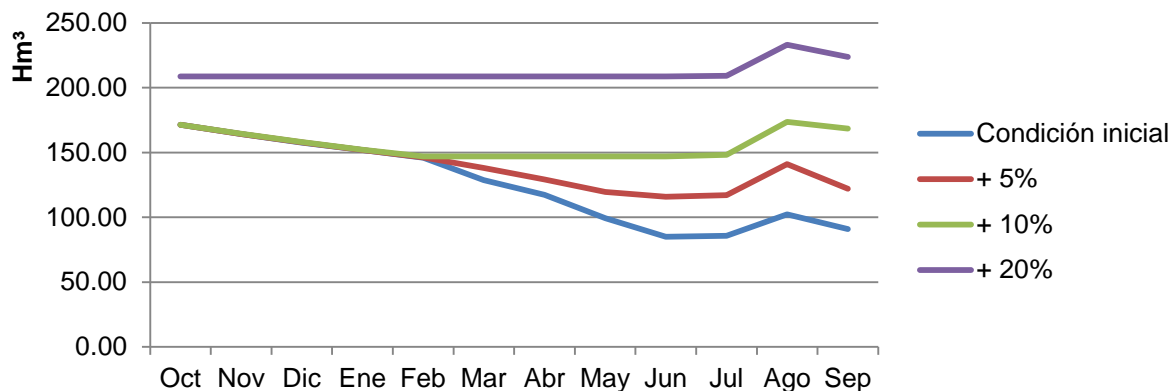


Figura 5. Almacenamiento mensual de la Presa La Angostura (Panorama Seco).

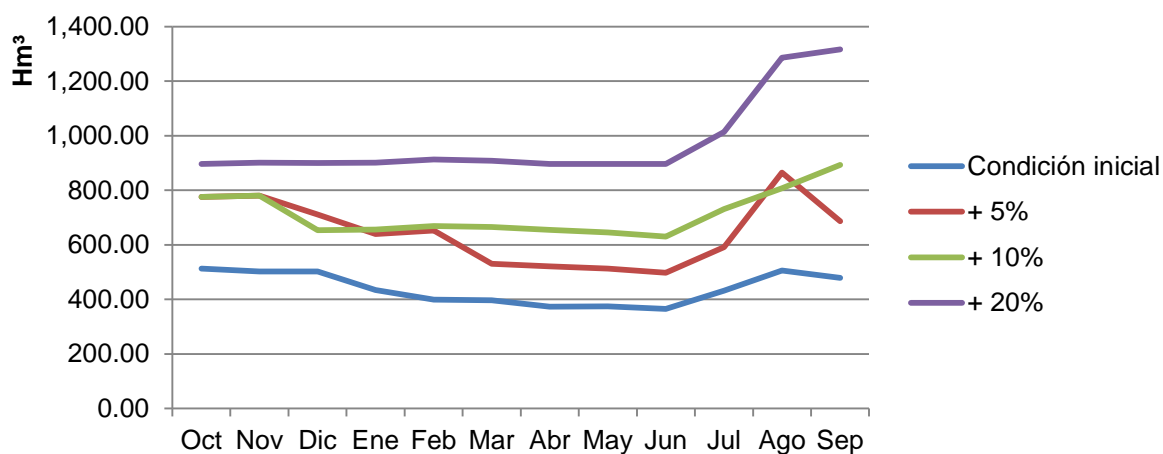


Figura 6. Almacenamiento mensual de la Presa El Novillo (Panorama Seco).

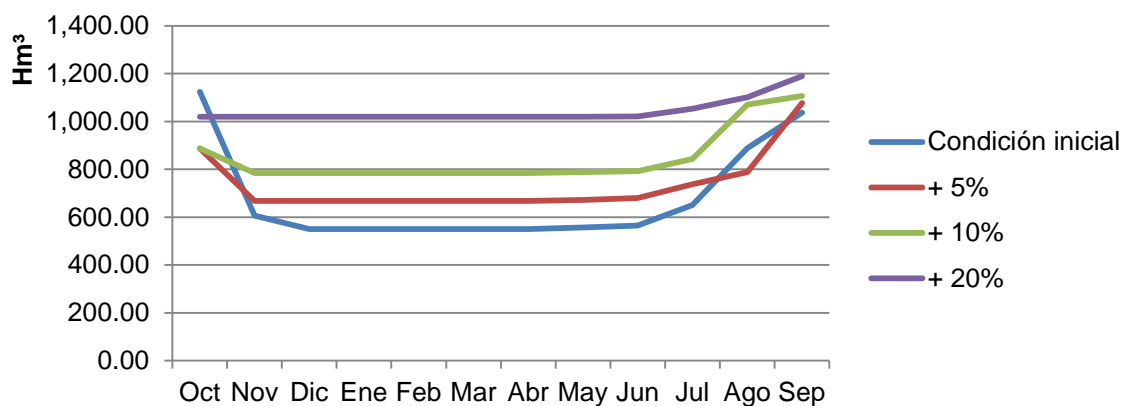


Figura 7. Almacenamiento mensual de la Presa El Oviachic (Panorama Seco).

Para el caso del análisis realizado al panorama normal se obtuvieron las siguientes graficas que representan el volumen mensual en cada una de las presas;

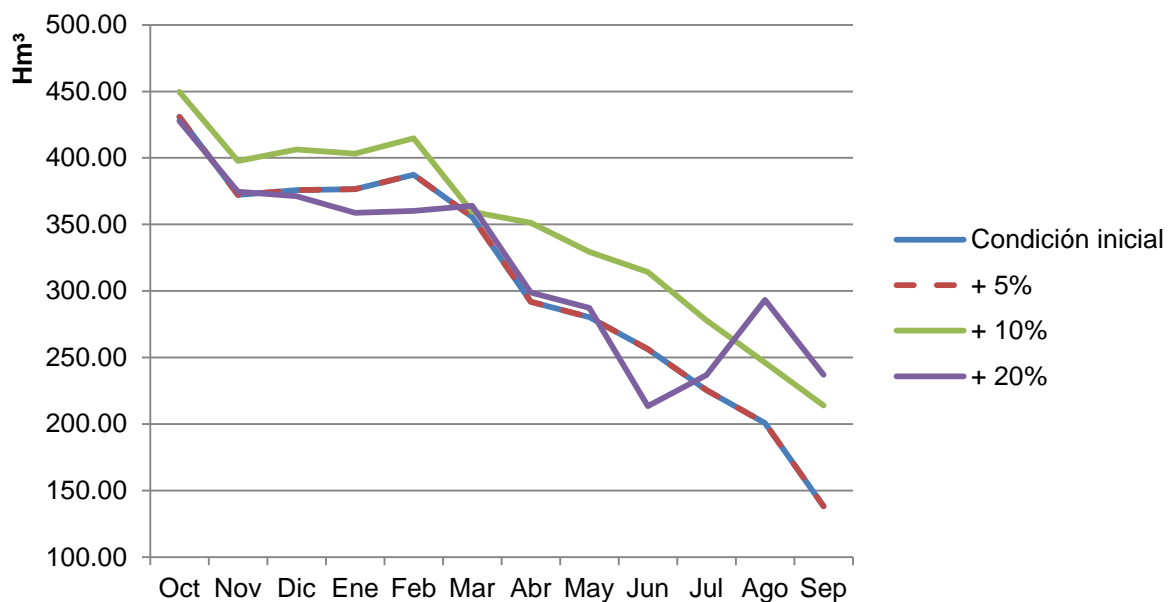


Figura 8. Almacenamiento mensual de la Presa La Angostura (Panorama Normal).

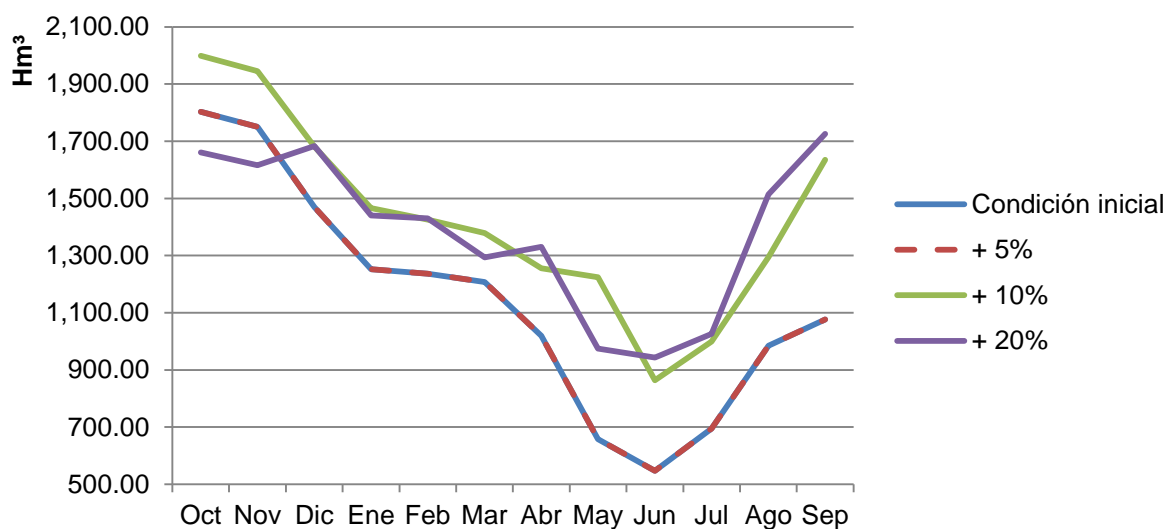


Figura 9. Almacenamiento mensual de la Presa El Novillo (Panorama Normal).

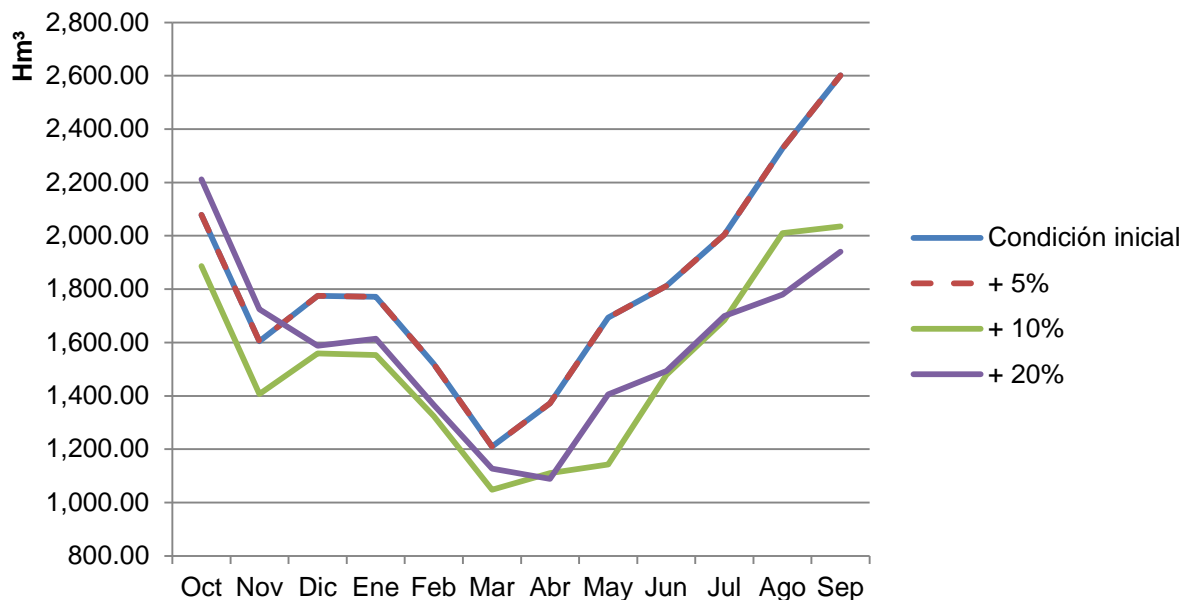


Figura 10. Almacenamiento mensual de la Presa El Oviachic (Panorama Normal).

Por último se muestran el volumen de almacenamiento de cada una de las presas como resultado de la aplicación de la metodología propuesta sobre el tercer escenario.

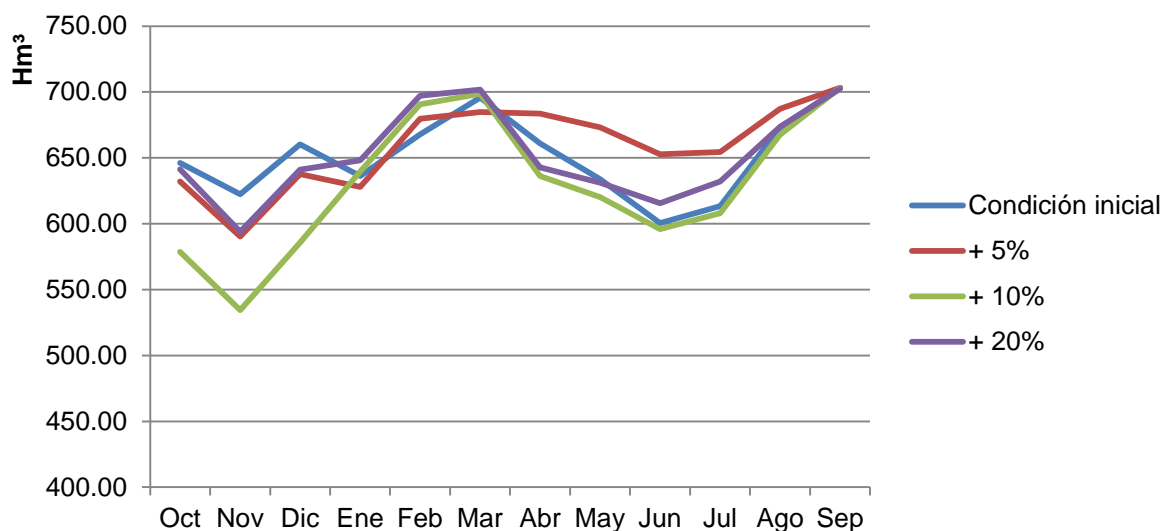


Figura 11. Almacenamiento mensual de la Presa La Angostura (Panorama Húmedo).

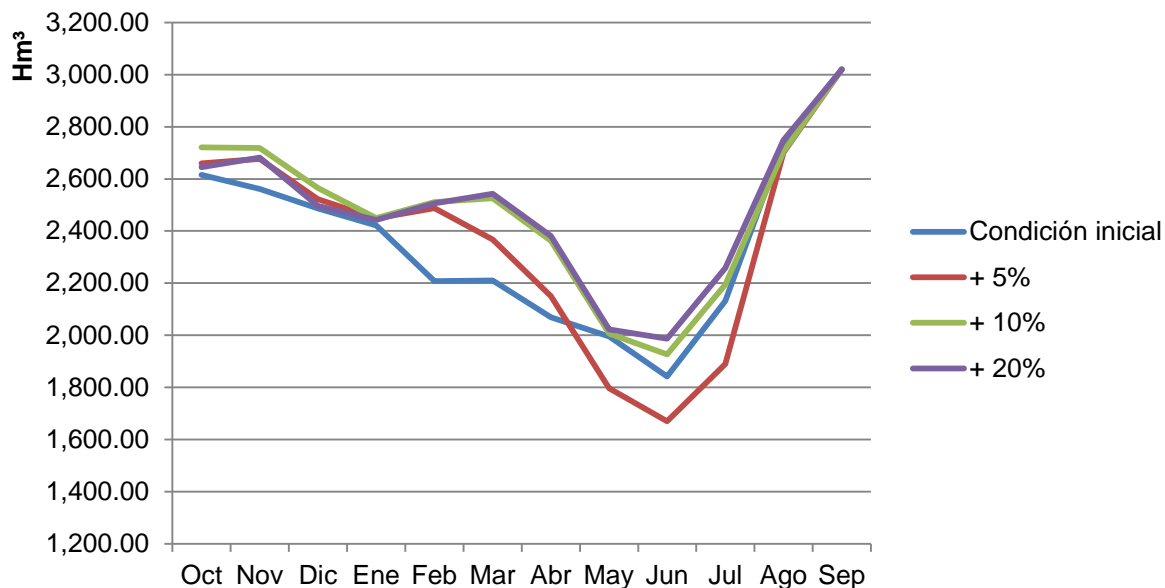


Figura 12. Almacenamiento mensual de la Presa El Novillo (Panorama Húmedo).

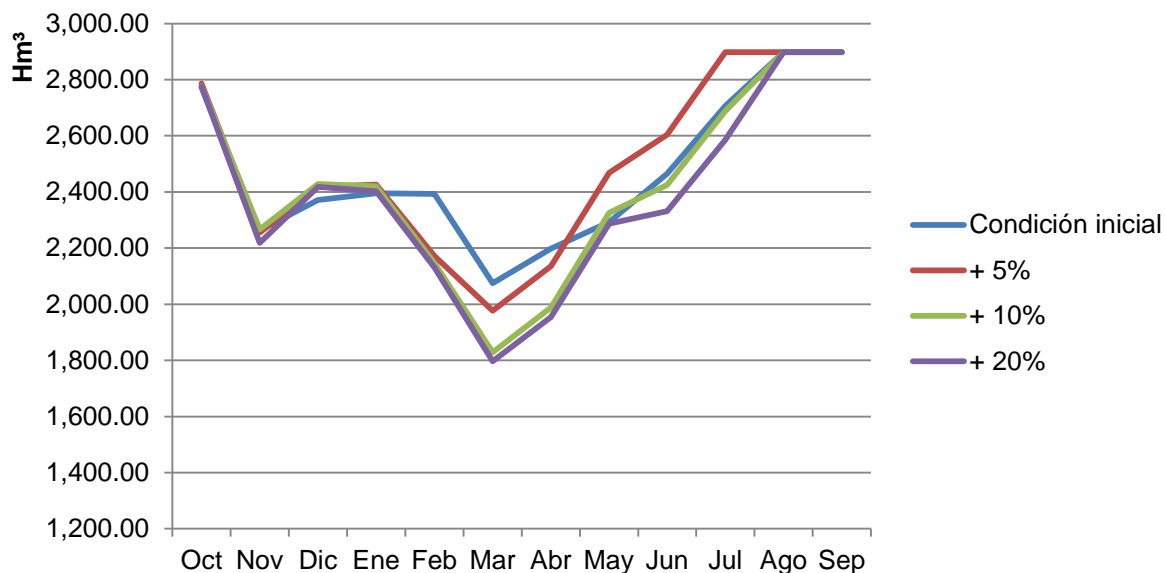


Figura 13. Almacenamiento mensual de la Presa El Oviachic (Panorama Húmedo).

Es importante indicar la relación que existe entre la recarga al acuífero y la superficie sembrada, observando como la recarga aumenta con los panoramas normal y húmedo al haberse sembrado una mayor cantidad de hectáreas y a su vez, esta recarga también varía en relación con el tipo de cultivo que se esté sembrando, ya que al presentar cultivos que requieren una mayor lámina de agua, el retorno al acuífero aumenta.

Para el caso del beneficio económico, no resultó un indicador que variara mucho debido a que la presencia de déficit no permitió el sembrar la totalidad de la superficie en los primeros cultivos. De la misma manera la relación que tiene el número de hectáreas sembradas y el beneficio económico presenta una curva creciente con un comportamiento asintótico con lo cual los cultivos que se seleccionan al final, es decir los cultivos menos rentables, no presentan un amplio margen de ganancia económica debido a la baja pendiente que muestra la curva (Ver Figura 14).

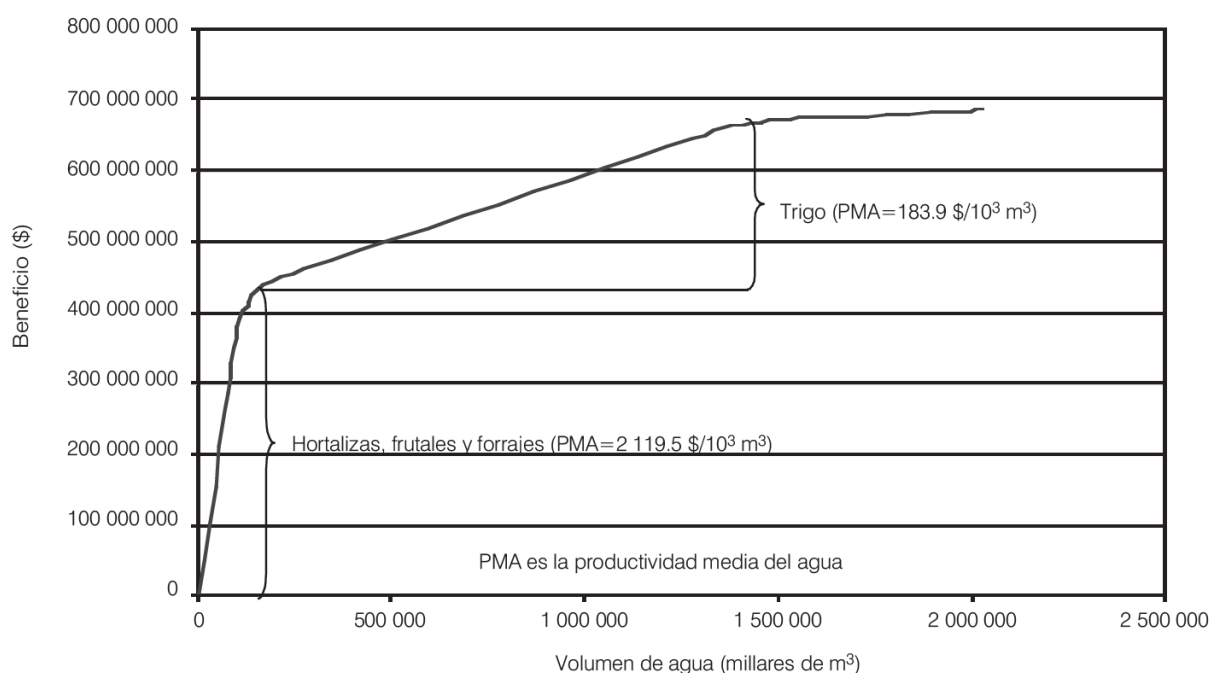


Figura 14. *Beneficios del agua derivados de la agricultura en un año normal.*  
Fuente: Minjares J. L., Salmón, Váldez, Oroz, y López (2009)

Al realizar la optimización de los cultivos el modelo automáticamente selecciona los cultivos más rentables como primeras opciones, y complementa el patrón con cultivos menos rentables por hectárea sembrada.

En términos sustentables analizando particularmente cada una de las gráficas del panorama seco (ver Figuras 5 a 7) se puede observar que la situación ideal para La Angostura sería aumentar un 10% el NAMINO de esta manera el nivel de almacenamiento inicial de la presa se acerca más a lo que es el nivel de

almacenamiento final, sin provocar un déficit tan elevado. Bajo el mismo análisis para el caso de “El Novillo”, entre un aumento del 5% y 10% se alcanza aproximadamente el mismo volumen con el cual se inició el ciclo agrícola, esto obteniendo los mismos beneficios, y por último para el Oviachic ocurrió algo similar, donde se presentó que desde la condición inicial (NAMINO actual) hasta el 10% se obtuvo un volumen final bastante similar al inicial lo cual se puede deber a que al ser la última presa del sistema cuenta con las dos presas superiores que surten el volumen necesario.

#### 4.2. Valoración del beneficio con el incremento en la explotación por bombeo de los acuíferos Valle del Yaqui y Cocoraque

En cuanto a la valoración del beneficio por bombeo se realizó el ensayo sólo en los panoramas seco y normal. En el panorama seco (ver Tabla 5) se observa una reducción de la escases de volumen disponible para segundo cultivo aunque no es suficiente para considerarlo como opción, lo más relevante es la presencia de un gran déficit en el sistema para poder cumplir con las demandas requeridas, lo cual paraliza el beneficio económico y las hectáreas sembradas sin posibilidades de mejora. A la vez se observa que la recarga al acuífero en el caso del panorama seco respalda la extracción por bombeo hasta el caso de una extracción de 650 Hm<sup>3</sup> en la cual sobrepasa la recarga de 632.46 Hm<sup>3</sup>.

Tabla 5. *Datos obtenidos en el análisis de alternativas de bombeo para un panorama seco.*

Aumento de Bombeo para un Año Seco	Total de Bombeo (Hm <sup>3</sup> )			
	Condición inicial	450	550	650
Volumen disponible para segundos cultivos	-1,790.544	-1,786.501	-1,780.150	-1,779.972
Beneficio económico	2,534,055,344	2,534,055,344	2,534,055,344	2,534,055,344
Superficie total sembrada, en Ha	185,011.00	185,011.00	185,011.00	185,011.00
Recarga al acuífero	609.46	614.07	623.23	632.46
Derrames	0.00	0.00	0.00	0.00
Déficit	1,017.563	972.014	927.147	854.567



Tabla 6. Datos obtenidos en el análisis de alternativas de bombeo para un panorama normal.

Aumento de Bombeo para un Año Normal	Total de Bombeo (Hm <sup>3</sup> )			
	Condición inicial	450	550	650
Volumen disponible para segundos cultivos	-111.853	22.713	65.846	192.681
Beneficio económico	2,654,818,099	2,654,818,099	2,654,818,099	2,655,940,417
Superficie total sembrada, en Ha	208,001.00	208,001.00	208,001.00	208,001.00
Recarga al acuífero	696.93	710.80	719.96	728.79
Derrames	0.00	0.00	0.00	0.00
Déficit	0.00	0.00	0.00	0.00

Para el panorama normal (ver Tabla 6), como se muestra en la Figura 15, el volumen disponible se incrementa considerablemente con el aumento del bombeo, si se decide realizar un segundo cultivo, ésto se puede traducir en mayores beneficios económicos debido a la venta de la producción agrícola.

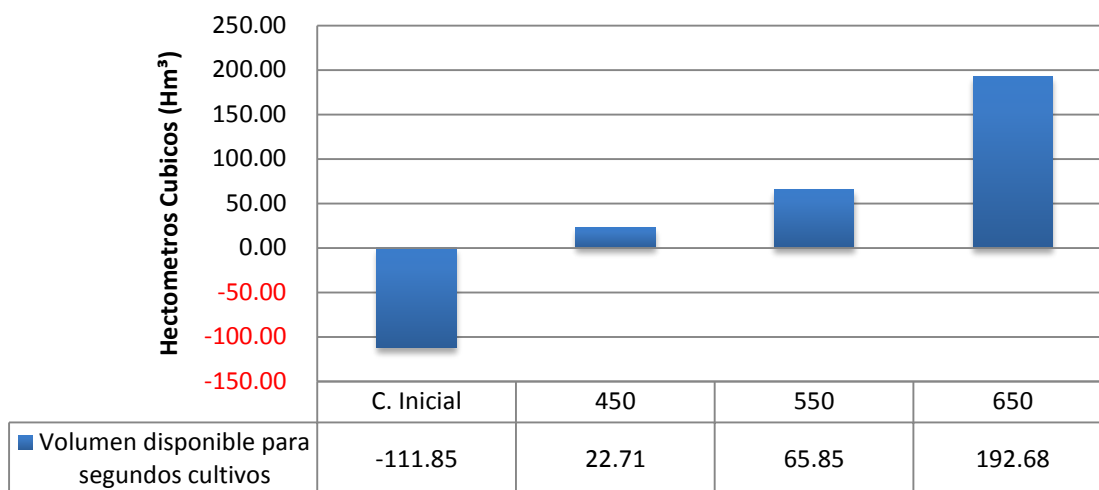


Figura 15. Comparativa de volumen disponible de extracción para diferentes alternativas de bombeo en el panorama normal.

Continuando con el panorama normal, se puede observar que la recarga al acuífero respalda enteramente a la extracción por bombeo (ver Figura 16) de manera que es factible y sustentable el uso de ese volumen de agua. El beneficio

económico no refleja un gran incremento debido a lo comentado respecto a la Figura 14 donde los cultivos menos rentables son los que se seleccionan al final, generando pocas ganancias y la repetición de los beneficios económicos se considera que es debido a que con la cantidad disponible de agua y el tope de hectáreas sembradas es el mejor patrón de cultivo que se puede obtener.

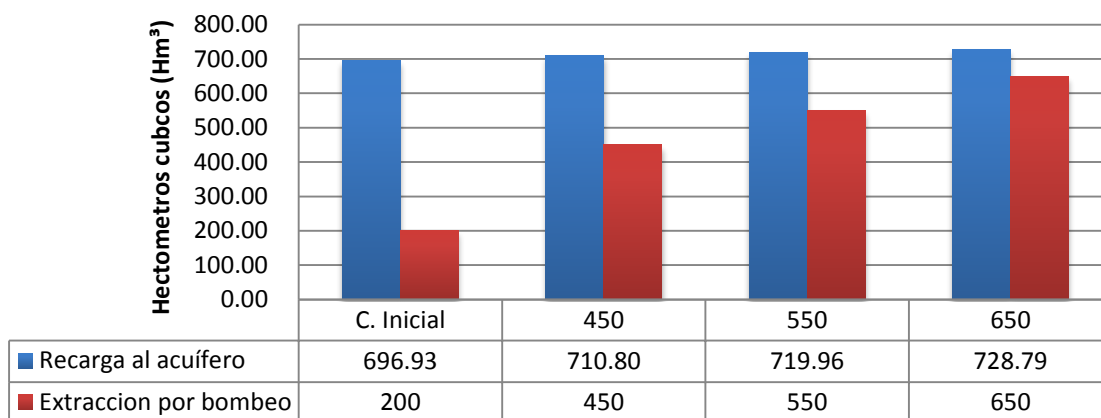


Figura 16. Comparativa de volumen de recarga al acuífero para diferentes alternativas de bombeo en el panorama normal.

### **4.3. Diagnóstico del panorama a futuro en un lapso de 10 años presentando condiciones de sequía y selección de un patrón de cultivos óptimos y sustentables**

En el caso de los escenarios realizados a 10 años, se puede observar en el primero de ellos (ver Tabla 7 y Figura 17) que al inicio del ensayo, durante los primeros 4 años, se ha sembrado la totalidad de las hectáreas disponibles para los primeros cultivos, esto sin presentar ningún tipo de déficit ni derrames y manteniendo 200 Hm<sup>3</sup> de bombeo, por otra parte, es notable como el nivel de almacenamiento del sistema de presas va reduciéndose significativamente (ver Figura 18), como consecuencia de la reducción de volumen de almacenamiento, el quinto año se presentó un descenso de la superficie sembrada de primer cultivo causando a su vez una reducción en los beneficios económicos.

Durante el sexto año se presentó un ligero déficit en el sistema y se decidió aumentar el bombeo a 300 Hm<sup>3</sup> para el séptimo año y a 400 Hm<sup>3</sup> para el octavo, el cual se mantuvo hasta el final del ensayo. Esto se consideró que sería una opción viable para sopesar la escasez de volumen en el sistema de presas, mientras la extracción no superara a la recarga en el acuífero.

Es considerado que en un análisis a un mayor lapso de tiempo puede mostrar tendencias de déficit aún mayores debido a que la recuperación que mostró el sistema se debió solo al incremento de bombeo que no superó la capacidad instalada de 450 Hm<sup>3</sup>. Es de esperarse que en un momento al futuro dentro de un lapso de 5 o 6 años, esta capacidad, ya no sea suficiente para equilibrar el sistema.

Tabla 7. Datos obtenidos para el estudio de sequía en un plazo extendido de 10 años con aumento de bombeo.

Observación	Bombeo = 200	Bombeo = 200	Bombeo = 200	Bombeo = 200	Bombeo = 200	Aumentó bombeo a 300	Aumentó bombeo a 400	Bombeo = 400	Bombeo = 400	Bombeo = 400	
Año de Estudio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Volumen final de la Angustura (Hm³)	138.119	159.541	131.463	164.810	104.886	164.433	131.234	100.165	91.387	89.298	
Volumen final del Novillo (Hm³)	1,076.661	644.941	1,015.444	799.299	967.361	622.703	1,215.457	804.676	1,005.942	779.669	
Volumen final del Oviachic (Hm³)	2,506.673	2,448.081	1,666.058	1,454.676	1,298.174	1,555.192	1,054.393	1,441.238	1,279.069	1,474.100	
Volumen Total (Hm³)	3,721.453	3,252.563	2,812.965	2,418.785	2,370.421	2,342.328	2,401.084	2,346.080	2,376.397	2,343.067	
S. Sembrada Primer Cultivo (Ha)	208,000	208,000	208,000	208,000	185,010	185,333	193,642	196,365	192,847	193,877	
Beneficios Económicos (miles)	\$ 2,653,219	\$ 2,636,706	\$ 2,632,644	\$ 2,640,068	\$ 2,534,055	\$ 2,535,926	\$ 2,575,876	\$ 2,582,719	\$ 2,574,282	\$ 2,583,330	
Derrames (Hm³)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Déficit (Hm³)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	40.66	1.9603	0.06384	0.04537	0.00	
Recarga (Hm³)	682.59	664.73	693.28	678.13	590.95	601.82	644.74	649.69	633.17	643.79	
Superficie Sembrada por Cultivo (Ha)	Maiz	11,717.38	5,654.83	14,655.18	11,110.37	0.00	323.27	5,821.66	5,466.34	264.92	3,414.50
	Varios	9.92	10.00	7.59	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
	Trigo	170,000.0	170,000.0	169,990.5	170,000.0	170,000.0	170,000.0	170,000.0	170,000.0	169,999.9	170,000.0
	Cártamo	6,687.60	13,036.59	5,856.40	8,858.54	0.00	0.00	2,810.14	5,887.29	4,271.23	2,462.67
	Cebada	0.00	25.05	78.40	0.49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.61	0.00
	Garbanzo	4,952.75	4,999.92	2,070.66	4,982.92	5,000.00	5,000.00	5,000.00	5,000.00	5,000.00	5,000.00
	Hortalizas	10,000.00	9,999.94	9,997.62	9,999.88	10,000.00	10,000.00	10,000.00	10,000.00	10,000.00	10,000.00
	Sorgo	0.00	0.00	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
	Algodón	616.00	114.61	2,959.10	1,050.13	0.00	0.00	0.00	0.09	0.02	32.60
	Alfalfa	4,000.00	3,999.90	1,825.88	1,945.41	0.00	0.00	0.00	1.36	3,299.87	2,765.20
	Frutales	16.36	159.16	558.43	42.26	0.00	0.00	0.22	0.12	0.02	192.08

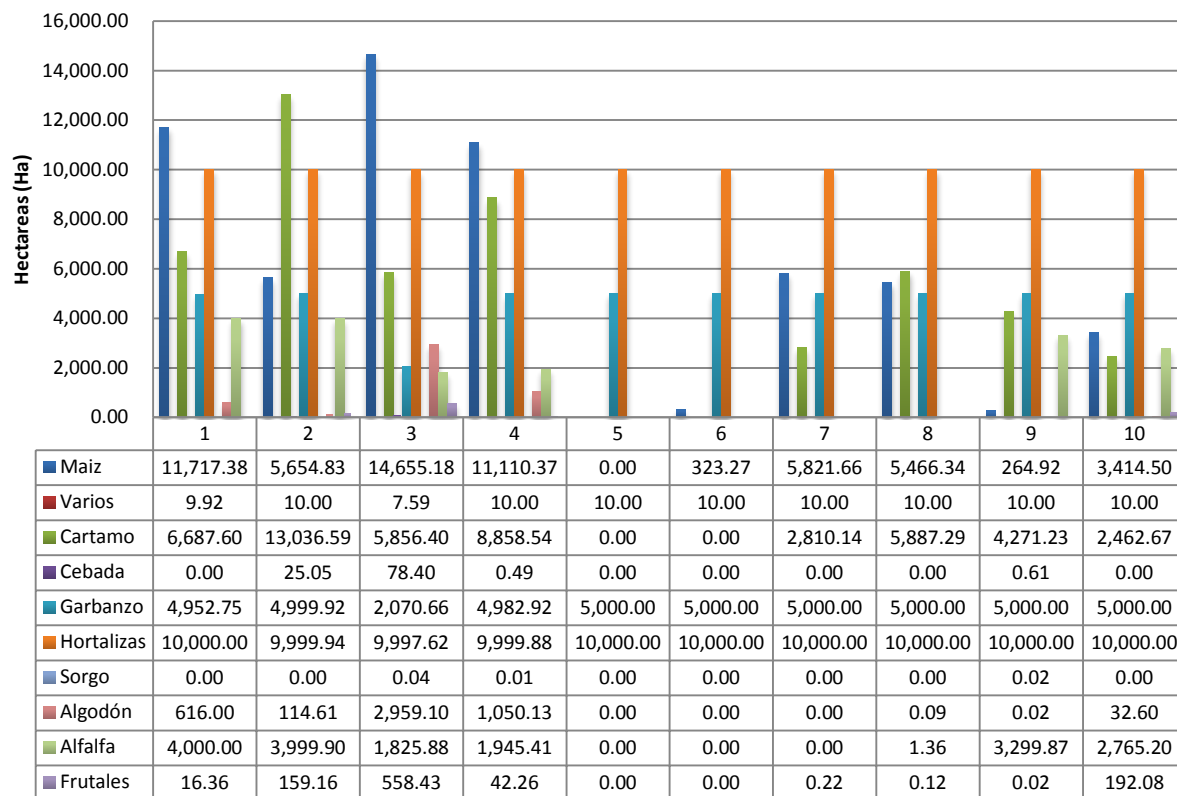


Figura 17. Comparativo de hectáreas por cultivo sembradas en panorama con aumento de bombeo.

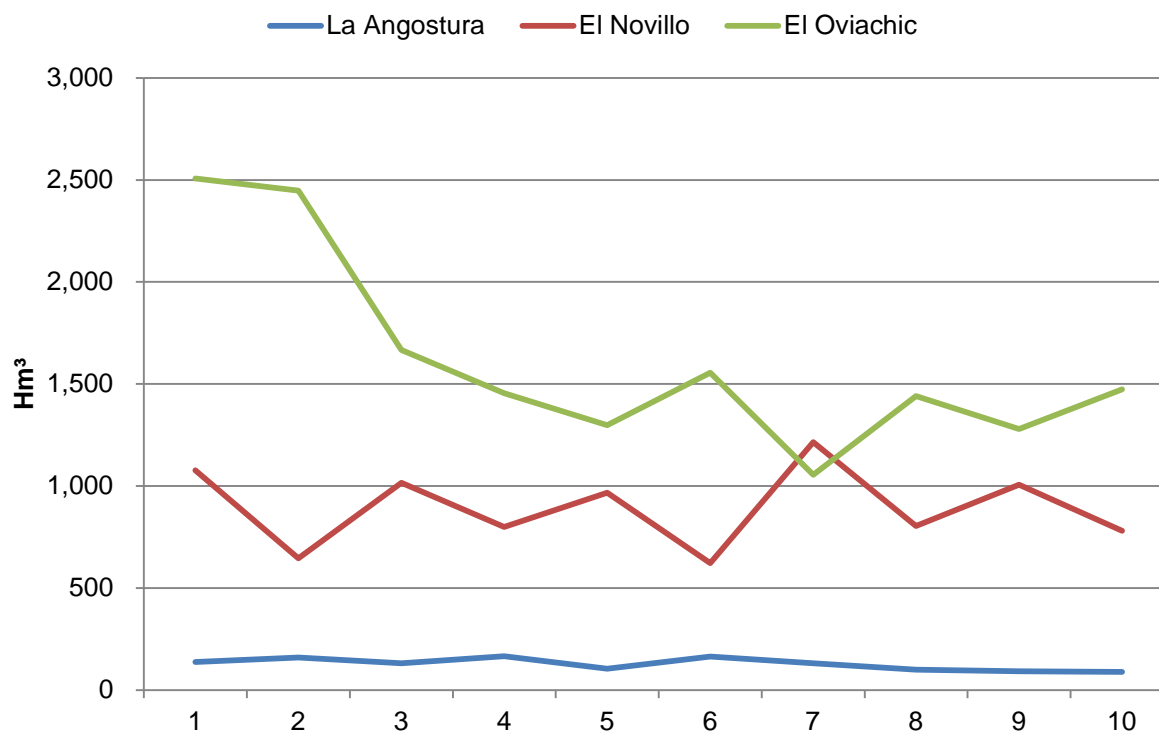


Figura 18. Evolución del volumen de almacenamiento final anual por presa durante la simulación.

Tabla 8. Datos obtenidos para el estudio de sequía en un plazo extendido de 10 años sin aumento de bombeo.

Observación	Bombeo = 400	Bombeo = 400	Bombeo = 400	Bombeo = 400	Bombeo = 400	Bombeo = 400	Bombeo = 400	Bombeo = 400	Bombeo = 400	Bombeo = 400	Bombeo = 400	
Año de Estudio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10a	10b	
Volumen de almacenamiento final de la Angostura (Hm³)	92.844	103.279	95.431	113.857	148.059	89.122	85.395	191.231	130.065	115.302	100.884	
Volumen de almacenamiento final del Novillo (Hm³)	1,077.849	1,236.631	1,362.340	1,189.355	770.799	806.242	788.109	835.784	944.042	927.399	997.249	
Volumen de almacenamiento final del Oviachic (Hm³)	2,125.74	1,658.138	1,257.483	1,131.086	1,401.998	1,447.456	1,479.816	1,333.349	1,291.176	1,315.794	1,261.42	
Volumen Total (Hm³)	3,296.429	2,998.049	2,715.254	2,434.297	2,320.856	2,342.820	2,353.319	2,360.364	2,365.284	2,358.495	2,359.55	
Volumen Disponible para Segundos Cultivos (Hm³)	-688.983	-1,024.68	-1,344.94	-1,634.65	-1,780.56	-1,785.08	-1,772.02	-1,783.82	-1,785.33	-1,794.55	-1,785.20	
Superficie Sembrada Primer Cultivo (Ha)	208,000	208,000	208,000	208,000	197,562	190,509	192,774	195,650	194,010	199,395	194,270	
Beneficios Económicos (miles)	\$ 2,675.067	\$ 2,668.980	\$ 2,668.981	\$ 2,669.070	\$ 2,606.083	\$ 2,565.889	\$ 2,571.518	\$ 2,583.913	\$ 2,575.302	\$ 2,594.232	\$ 2,580.60	
Derrames en el Sistema de Presas (Hm³)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Déficit en el Sistema de Presas (Hm³)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.610	0.00	0.00	0.00	41.186	0.00	
Recarga (Hm³)	720.29	723.57	723.57	723.62	671.99	636.99	641.46	650.95	644.02	660.17	647.78	
Superficie Sembrada por Cultivo (Ha)	Maíz	19,033.65	19,656.77	19,656.81	19,663.27	12,390.40	5,499.07	5,092.20	6,279.99	5,266.72	6,706.17	6,116.20
	Varios	9.75	2.10	2.20	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
	Trigo	170,000.0	170,000.0	170,000.0	170,000.0	170,000.0	170,000.0	170,000.0	170,000.0	170,000.0	170,000.0	170,000.0
	Cártamo	39.76	745.42	745.42	714.79	5.22	0.00	2,304.86	4,069.34	3,709.69	7,449.95	2,670.43
	Cebada	58.75	3.86	3.87	4.03	70.22	0.00	0.00	0.04	0.00	49.66	5.42
	Garbanzo	4,965.51	3,113.39	3,113.38	3,117.28	5,000.00	5,000.00	5,000.00	5,000.00	5,000.00	4,966.20	5,000.00
	Hortalizas	10,000.00	10,000.00	10,000.00	10,000.00	10,000.00	10,000.00	10,000.00	10,000.00	10,000.00	10,000.00	10,000.00
	Sorgo	0.31	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	171.31	0.00
	Algodón	2.77	10.96	10.96	18.52	28.34	0.00	0.01	0.00	19.79	19.32	41.60
	Alfalfa	3,871.46	3,900.10	3,900.11	3,904.49	27.18	0.00	119.17	201.99	3.64	3.02	425.31
	Frutales	18.03	567.25	567.25	567.62	30.88	0.00	247.65	88.54	0.00	19.67	1.13

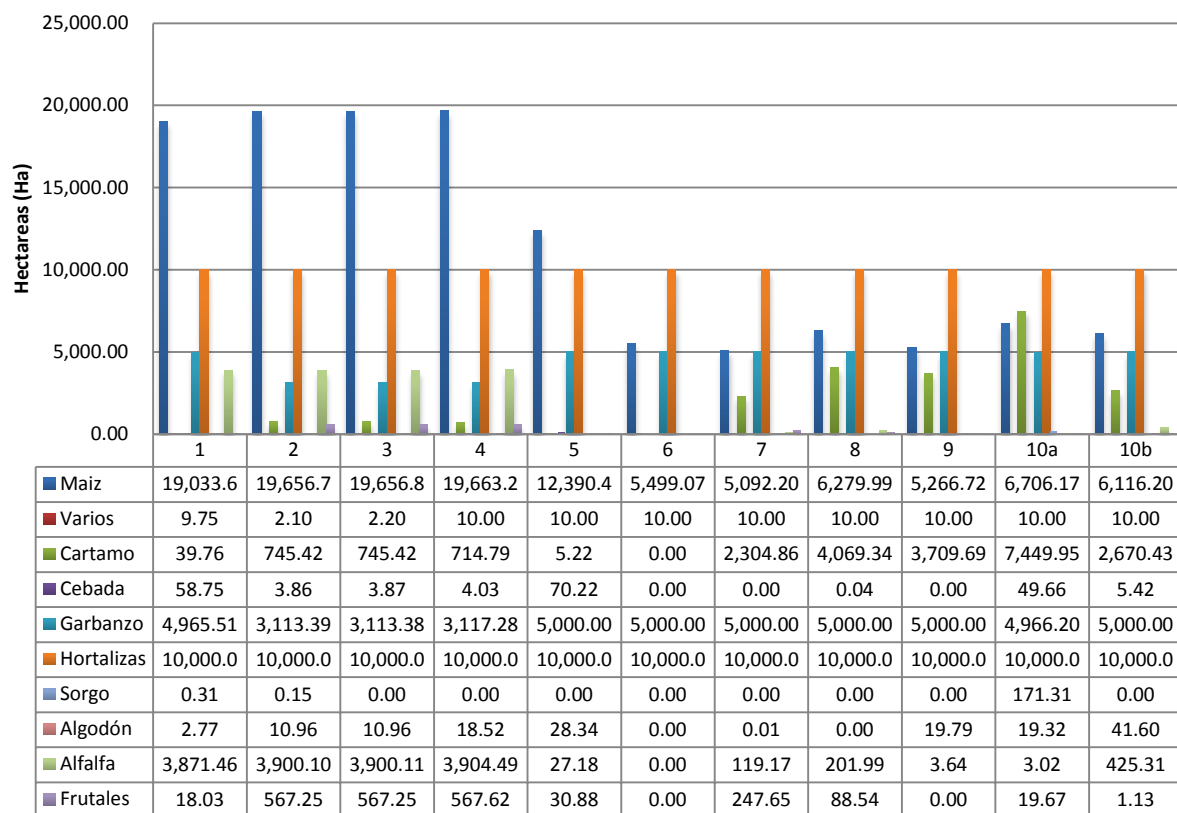


Figura 19. Comparativo de hectáreas por cultivo sembradas en panorama sin aumento de bombeo.

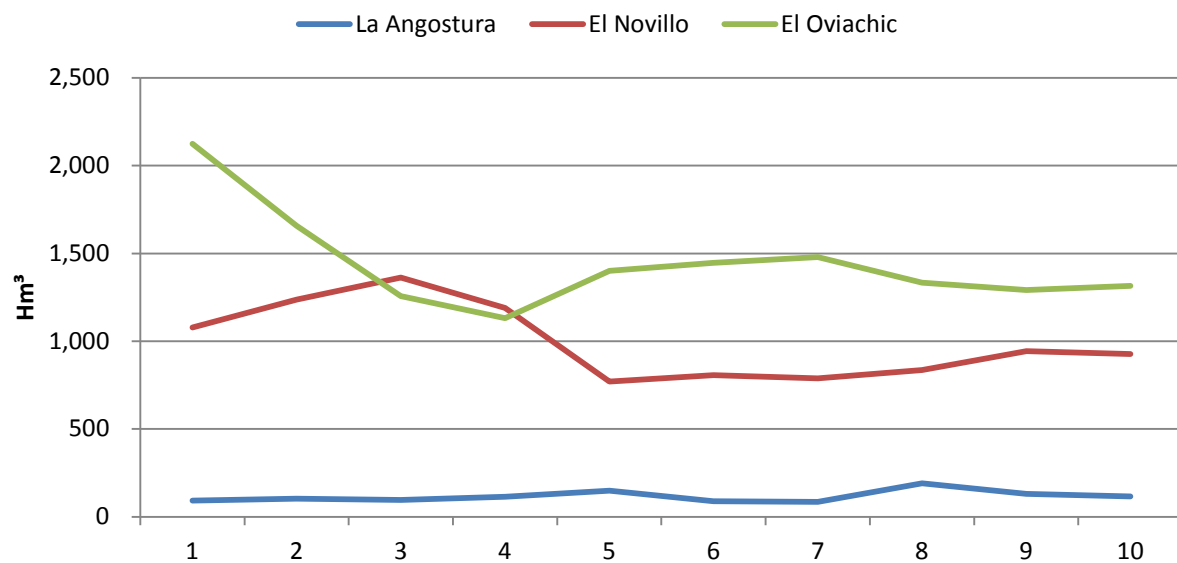


Figura 20. Evolución del volumen de almacenamiento final anual por presa durante la simulación.

El segundo ensayo realizado se trató de un lapso de 10 años bajo las mismas condiciones que presentaba el primero con la diferencia que desde el inicio se mantuvo un bombeo de 400 Hm<sup>3</sup> (ver Figura 19). Durante la realización del ensayo en el décimo año se observó un incremento del déficit que se presenta en la Tabla 8 como el año 10a causado por la falta de tiempo para realizar la correcta optimización, por lo anterior, se decidió realizar una nueva optimización solo de ese año con un tiempo de parada de 30 minutos para observar el cambio que se generaría. Como consecuencia de lo anterior, se redujo la cantidad de hectáreas sembradas en primeros cultivos eliminando por completo el déficit presentado.

En general, durante el segundo ensayo se observó un comportamiento similar en cuanto a la reducción en el volumen almacenado (ver Figura 20) pero se obtuvo un mayor volumen acumulado total en el primer ensayo que en el segundo debido a que en este último se obtuvo un mayor número de hectáreas sembradas y a su vez un mayor beneficio económico total lo cual requiere utilizar un volumen mayor de agua (ver Figura 21 y 22).

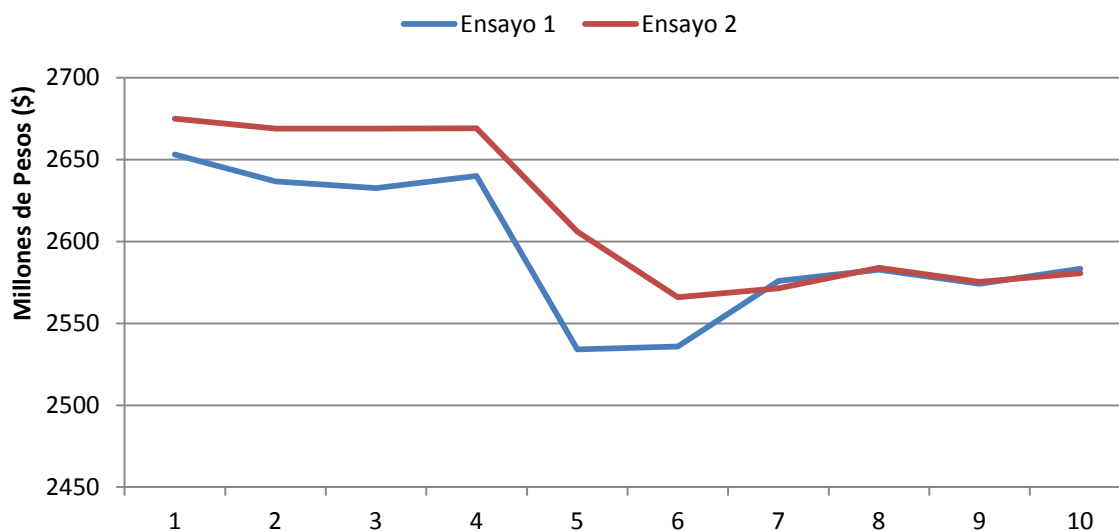


Figura 21. Comparativa de beneficios económicos obtenidos.

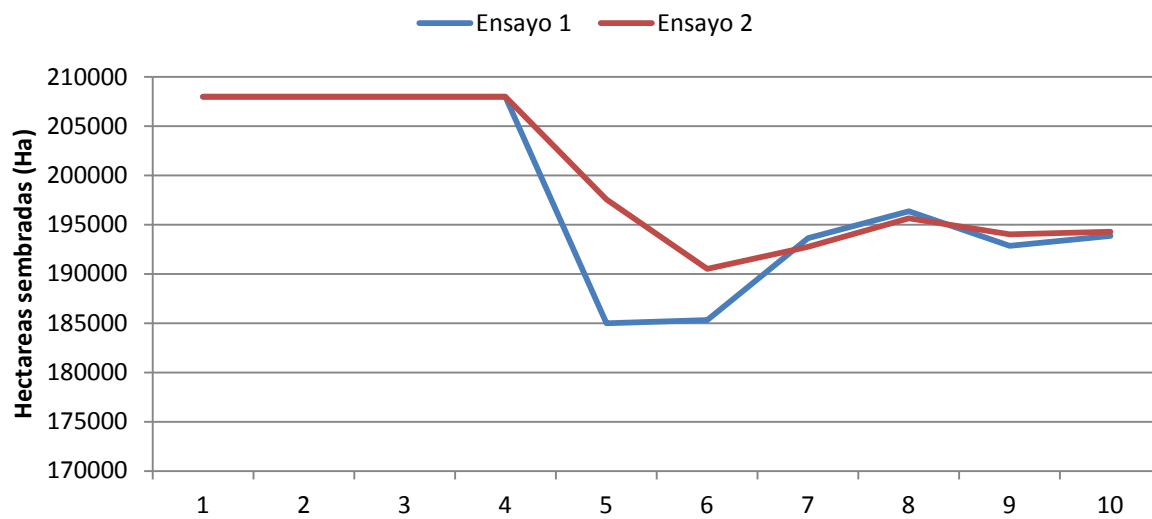


Figura 22. Comparativa de hectáreas sembradas en primer cultivo.



## **CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1. Conclusiones**

Después de haber realizado una evaluación de ciertas variables dentro de un enfoque sustentable se puede concluir con los resultados obtenidos que se prevé un escenario bastante complicado en caso de presentar una sequía prolongada. Esta situación exigirá a los encargados de la gestión de los recursos hidráulicos de la cuenca un esfuerzo considerable y un conocimiento del sistema para evitar un colapso de éste y poder continuar satisfaciendo de manera sustentable las demandas establecidas tanto domésticas como agrícolas.

Es de suma importancia considerar como punto central de este trabajo la necesidad de la planeación a futuro basada en la experimentación y resultados obtenidos que soporten las decisiones tomadas en fin de asegurar el correcto funcionamiento del sistema y optimizar su producción. Se insiste también en la utilidad de los modelos de simulación y optimización como complemento a la experimentación de campo, la experiencia y el sentido común de los encargados de la administración de los

recursos hidráulicos con la finalidad de obtener información relevante en la generación de políticas y directrices para la gestión del agua.

Así mismo, se concluye que la utilización de modelos de simulación y optimización, tal como el utilizado en la presente investigación, puede ser usado en la toma de decisiones tanto en el Comité Hidráulico del Distrito de Riego, como por otras instancias de planeación en la cuenca.

## **5.2. Recomendaciones**

A partir del análisis de los resultados obtenidos, se proponen una serie de recomendaciones a ser consideradas por los encargados de la gestión de los recursos hidráulicos.

- Generar una serie de políticas de emergencia para ser aplicadas en caso de un escenario de sequía.
- Respalidar el almacenamiento del sistema de presas con la disponibilidad en los acuíferos, tanto en escenarios con escurrimientos normales como en casos de sequía.
- Considerar el desarrollo e implementación de un modelo de simulación y optimización con capacidad de realizar análisis en escenarios multianuales y con objetivos múltiples.
- Utilizar cada ciclo agrícola la totalidad de la capacidad instalada de bombeo y que éste sea tomado en cuenta como una disponibilidad anual de agua y no como una opción alterna considerada sólo en caso de déficit en escurrimientos.
- Con el fin de darle sustentabilidad a la recarga anual de los acuíferos, se recomienda el establecimiento cada ciclo agrícola de cuando menos la totalidad de la superficie regable del Distrito de Riego, es decir, el establecimiento de primeros cultivos.

## REFERENCIAS

- Andreu, J., Capilla, J., & Cabezas, F. (1994). Los Sistemas Soportes de Decision en la Planificación y Gestión Racionales de los Recursos Hídricos. *Ingeniería del Agua*, 1(2), 7-20.
- Aparicio, F. J. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie* (Primera ed.). Mexico: Editorial LIMUSA.
- Balek, J. (1983). *Hidrology and Water Resources in Tropical Regions*. Praga: SNTL Publishers of Technical Literature.
- Bithin, D., & Harikrishna, V. (2004). Optimization Applications in Water Resources Systems Engineering. *DIRECTIONS*, 6(3), 57-64.
- Cai, X., McKinney, D. C., & Rosegrant, M. W. (2001). *Sustainability Analysis for Irrigation Water Management: Concepts, Methodology, and Applications to the Aral Sea Region*. Washington, D.C.: International Food Policy Research Institute.
- CONAGUA. (2009a). *Disponibilidad Media Anual de Agua Subterranea (2640 Valle del Yaqui)*. Mexico: CONAGUA.
- CONAGUA. (2009b). *Disponibilidad Media Anual de Agua Subterranea (2641 Cocoraque)*. Mexico: CONAGUA.
- CONAGUA. (2012). *Escurrecimientos Anuales Diciembre 2012*. Ciudad Obregon: CONAGUA.
- CONAGUA. (2013a). *Programa Nacional Contra la Sequía*. Recuperado el 01 de Mayo de 2013, de <http://pronacose.uacj.mx/acerca.html>

- CONAGUA. (2013b). Mapa de la Cuenca del Río Yaqui. Gerencia de Distritos de Riego.
- CONAGUA. (2014a). *Situación Actual del Sistema de Presas del Río Yaqui, Sonora*. Departamento de Hidrometría. México: CONAGUA.
- CONAGUA. (2014b). *Servicio Meteorológico Nacional*. Recuperado el 12 de Abril de 2014, de [http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=236&Itemid=74](http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=236&Itemid=74)
- FAO. (Diciembre de 2012). *Aquastat*. Recuperado el 17 de Marzo de 2014, de [http://www.fao.org/nr/water/aquastat/globalmaps/AquastatWorldDataEng\\_2012\\_1214\\_Withdrawal.pdf](http://www.fao.org/nr/water/aquastat/globalmaps/AquastatWorldDataEng_2012_1214_Withdrawal.pdf)
- Gen, M., & Cheng, R. (2000). *Genetic Algorithms & Engineering Optimization*. Canadá: John Wiley & Sons.
- Grigg, N. S. (1996). *Water Resources Management*. Nueva York: McGraw-Hill.
- Holland, J. (1992). Algoritmos genéticos. *Investigacion y Ciencia*, 38-45.
- IIT Kharagpur. (2008). *Water Resources Engineering*. India: IIT Kharagpur.
- Lant, C. (2004). Water Resources Sustainability: An Ecological Economics Perspective. *Water Resources Update*, 1(127), 20-30.
- López, L. (Diciembre de 2013). *Caracterización de la sequía en la cuenca del Río Mayo*. Ciudad Obregon, Mexico: Tesis de Licenciatura (no publicada).
- Loucks, D. P., & van Beek, E. (2005). *Water Resources System Planning and Management, An Introduction to Methods, Models and Applications*. Italy: UNESCO.

- Lutz, A., & Curl, K. (2012). Panorama de la cuenca del Rio Yaqui. Tucson: University of Arizona.
- Matson, P. A., & Falcon, W. (2012). Why the Yaqui Valley? An Introduction. En P. A. Matson (Ed.), *Seeds of Sustainability* (págs. 3-12). Washington, DC: Island Press.
- Minjares, J. L., Salmón, R. F., Oroz, L. A., & Cruz, I. R. (Julio-Septiembre de 2008). Modelo hidrológico-agronómico-económico para la operacion optima del sistema de presas del rio Yaqui, usando algoritmos genéticos. *Ingenieria hidraulica en Mexico, XXIII(3)*, 37-48.
- Minjares, J. L., Salmón, R. F., Váldez, J. B., Oroz, L. A., & López, R. (2009). Índice económico para el manejo interanual del agua: caso del Distrito de Riego 041 Río Yaqui, México. *Ingeniería hidráulica en México, XXIV(1)*, 41-54.
- Minjares, J. L., Valdés, J. B., Salmón, R. F., Oroz, L. A., & López, R. (Enero-Marzo de 2010). Planeación, Manejo y Evaluación Sustentable de los Recursos Hidráulicos en el Distrito de Riego 041, Río Yaqui, México. *Tecnología y Ciencias del Agua, I(1)*, 137-151.
- National Program for Sustainable Irrigation. (2006). *Improving Productivity and Sustainability in Irrigation. Case Studies of Success*. Canberra: Land & Water Australia.
- Palmer, W. C. (1965). *Meteorological Drought*. Washington, D.C.: Office of Climatology, U.S. Weather Bureau.
- SEMARNAT. (24 de Enero de 2013). *Comunidado de Prensa No. 002-13. Se instala grupo de trabajo para manejo de la sequia en el Valle del Yaqui*. Recuperado el 2014 de Abril de 14, de Comision Nacional del Agua:  
<http://www.conagua.gob.mx/OCNO07/NotaP/002%20Se%20instala%20grupo>

%20de%20trabajo%20para%20atenciona%20%20a%20sequ%C3%ADa%20e  
n%20el%20V%20del%20Yaqui.pdf

Sivakumar, B. (2011). Water crisis: From conflict to cooperation -an overview.  
*Hydrological Sciences Journal*, 4(56), 531-552.

Solorzano, C. R. (2002). *Diseño de Indicadores de Sustentabilidad por Cuencas  
Hidrograficas*. Mexico D.F.: Instituto Nacional de Ecología.

Task Commiettee on Sustainability Criteria, Water Resources Planning and  
Management Division, American Society of Civil Engineers and the working  
group of UNESCO/IHP IV Project M-4.3. (1998). *Sustainability Criteria for  
Water Resource Systems*. Estados Unidos: American Society of Civil  
Engineers.

Tolmos , P. (2003). *Introduccion a los algoritmos geneticos y sus aplicaciones*.  
Madrid: Universidad Rey Juan Carlos, Servicio de Publicaciones.

United Nations Water. (Mayo de 2012). *A Guide to UN Water*. Recuperado el 25 de  
Marzo de 2014, de  
[http://www.unwater.org/downloads/unw\\_brochure\\_en\\_webversion.pdf](http://www.unwater.org/downloads/unw_brochure_en_webversion.pdf)

United Nations Water. (2012). *The United Nations World Water Development Report  
4 - Facing the Challenges*. Paris, France: UNESCO.

Valiente, Ó. M. (2001). Sequia: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación.  
*Investigaciones Geográficas*, 59-80.

Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding: the Drought Phenomenon: The  
Role of Definitions. *Water International*, 10(3), 111-120.

Winz, I., & Brierley, G. (2007). *The Use of System Dynamics Simulation in Integrated Water Resources Management*. Auckland: University of Auckland.

## ANEXOS

### Anexo 1. Modelo de Optimización, Minjares-Lugo et al. (2008, pp. 39-41)

El modelo se ha dividido en seis secciones: la función objetivo, restricciones de almacenamiento en el sistema de presas, restricciones de extracciones del sistema de presas, restricciones de continuidad, restricciones del riego y restricciones de mercado.

#### Función objetivo

Se ha desarrollado una función objetivo múltiple, donde se pretende determinar la operación óptima del sistema de presas basado en la maximización anual de los beneficios económicos netos del sector agrícola, optimizando las extracciones mensuales de agua para la irrigación de diferentes cultivos, minimizando la posibilidad de déficit o derrames del sistema de presas en un periodo de planeación de 12 meses. Matemáticamente, la función objetivo puede ser representada de la siguiente manera:

$$\text{Máx } B = w_1 \left[ \sum_k A_k \cdot (CP_k Y_k - C_k) \right] - w_2 [df_{it}] - w_3 [sp_{it}] \quad (1)$$

donde  $B$  es la función objetivo múltiple;  $A_k$ , la superficie anual sembrada en hectáreas;  $CP_k$ , el precio del cultivo en pesos por tonelada;  $C_k$ , el costo del cultivo en pesos por hectárea;  $Y_k$ , el rendimiento del cultivo en toneladas por hectárea;  $df_i$ , el déficit en el sistema de presas en  $\text{Hm}^3$ ;  $sp$ , los derrames del sistema de presas en  $\text{Hm}^3$ ;  $k$ , el índice del cultivo;  $i$ , el índice de presas;  $t$ , el índice del periodo mensual, y el índice  $w$  es el peso que dé el tomador de decisiones a cada objetivo para evaluar los beneficios económicos ( $w_1$ ), el déficit en el sistema de presas ( $w_2$ ) y los derrames del sistema de presas ( $w_3$ ).



### Restricciones de almacenamiento

Al final del periodo  $t$ , un volumen para el control de avenidas de al menos  $FB_i$  debe ser considerado, y el almacenamiento  $S_{it}$  en la presa  $i$  al final del periodo  $t$  debe estar por arriba del nivel mínimo de operación  $SL_i$ .

$$SL_i \leq S_{it} \leq SC_i - FB_i \quad (2)$$

Donde  $S_{it}$  es el volumen almacenado en la presa  $i$  al inicio del periodo  $t$ ,  $SC_i$ , el nivel máximo de operación en la presa  $i$ ;  $FB_i$ , la capacidad de almacenamiento para control de avenidas, y  $SL_i$  es el nivel mínimo de operación en la presa  $i$ . Las unidades de volumen están en  $\text{Hm}^3$ . El volumen mínimo de almacenamiento para las presas Angostura, Novillo y Oviachic es de 85, 365 y 550  $\text{Hm}^3$ , y el volumen de almacenamiento máximo para cada una de ellas es de 703.3, 3 020.0 y 2 989.1  $\text{Hm}^3$ , respectivamente.

### Restricciones de extracción

La extracción  $R_{it}$  de la presa  $i$  para el periodo  $t$  debe ser mayor o igual que el mínimo volumen requerido  $R_{mín_{it}}$ , y no debe ser mayor al volumen que cause los menores daños  $R_{máx_{it}}$ .

$$R_{mín_{it}} \leq R_{it} \leq R_{máx_{it}} \quad (3)$$

Donde  $R_{it}$  son las extracciones de la presa  $i$  durante el periodo  $t$ ,  $R_{mín_{it}}$  son las extracciones mínimas de la presa  $i$  durante el periodo  $t$  y  $R_{máx_{it}}$  son las extracciones máximas de la presa  $i$  durante el periodo  $t$ . La extracción máxima por la obra de toma considerada en este estudio para la presa La Angostura es de 40  $\text{m}^3/\text{s}$ , ya que se considera este gasto como el máximo que no causa problemas de inundación en los pueblos ribereños; para la presa El Novillo se considera un gasto máximo de extracción de 150  $\text{m}^3/\text{s}$ , considerando las tres tomas, y para la presa El Oviachic, el gasto máximo de extracción es de 205  $\text{m}^3/\text{s}$ , el cual es la capacidad máxima de

conducción de los canales principales alto y bajo, y del canal principal Colonias Yaquis.

#### Restricciones de continuidad

El balance de agua en cada una de las presas es gobernado por la ecuación de continuidad de la siguiente manera:

$$S_{i, t+1} = S_{it} + I_{it} + P_{it} - E_{it} - R_{it} \quad (4)$$

Donde  $S_{i, t+1}$  es el volumen almacenado en la presa  $i$  al final del periodo  $t$ ,  $I_{it}$  es el volumen de agua que entra a la presa  $i$  durante el periodo  $t$ ,  $P_{it}$  es la precipitación sobre el vaso de la presa  $i$  en el periodo  $t$  y  $E_{it}$  es el volumen evaporado de la presa  $i$  en el periodo  $t$ . Las unidades de volumen están en  $\text{Hm}^3$ .

La evaporación ( $e_{it}$ ) de la presa  $i$  durante el periodo  $t$  se obtiene de los datos históricos del distrito de riego. El volumen de agua evaporado ( $E_{it}$ ) de cada presa en  $\text{Hm}^3$  durante el periodo  $t$  es estimado de la siguiente manera:

$$E_{it} = (e_{it} * A_{sit}) * 10^{-6} \quad (5)$$

Dónde:

$$A_{sit} = a * (S_{it})^b \quad (6)$$

De las ecuaciones (5) y (6) tenemos que  $e_{it}$  es la evaporación de un tanque tipo "A" en cada presa en metros,  $A_{sit}$  es la superficie de agua por volumen de almacenamiento activo en cada presa en  $\text{m}^2$ , y  $a$  y  $b$  son coeficientes de la regresión.

El volumen de agua esperado (escurrimiento) de entrada a cada una de las presas puede ser calculado de la siguiente manera:

$$I_{it}=f(FDP_e(\theta)_{it}|P[Q\geq q]) \quad (7)$$

Donde  $I_{it}=f(FDP_e(\theta)_{it}|P[Q\geq q])$  es la estimación del volumen de agua que entra a la presa  $i$  durante el periodo  $t$ , dado un factor de riesgo  $P[Q\geq q]$ , esta estimación depende de la función de probabilidad de los escurrimientos  $FDP_e(\theta)_{it}$  que, a su vez, depende del parámetro vectorial  $\theta$ ;  $Q$  es el escurrimiento esperado y  $q$  es un valor específico del escurrimiento, cuyos valores están dados en  $\text{Hm}^3$ . Los escurrimientos iguales a cero, en los meses de estiaje, se pueden tratar mediante mezclas de funciones de probabilidad como lo hizo Palacios (1999); en este trabajo, los escurrimientos nulos se sustituyeron por valores cercanos a cero.

El volumen de agua precipitado (lluvia) sobre la superficie de agua de cada una de las presas puede ser obtenido de la siguiente manera:

$$P_{it}=As_{it}*f(FDP_p(\omega)_{it}|P[Rn\geq rn]) \quad (8)$$

Donde  $f(FDP_p(\omega)_{it}|P[Rn\geq rn])$  es la estimación del volumen de agua de lluvia sobre la superficie de la presa  $i$  durante el periodo  $t$ , dado un factor de riesgo  $P[Rn\geq rn]$ ; esta estimación depende de la función de probabilidad de las precipitaciones  $FDP_p(\omega)_{it}$  que, a su vez, depende del parámetro vectorial  $\omega$ ;  $Rn$  es el volumen de lluvia esperado y  $rn$  es un valor específico de la precipitación sobre el embalse, cuyos valores están dados en  $\text{Hm}^3$ .

### Restricciones de riego

El volumen de agua mensual que será extraído de la presa Oviachic para suministrar los requerimientos para el riego de los diferentes cultivos y para el uso urbano está dado por la restricción de la ecuación (9), la cual relaciona el volumen requerido para uso urbano ( $Mu$ ) y la superficie regada ( $A_{kt}$ ) de cada uno de los cultivos establecidos con el volumen de agua extraído de la presa Oviachic.

$$Mu \leq R_{Ovt} \leq \sum_{k=1}^n \sum_{t=1}^n L_{kt} * A_{kt} \quad (9)$$

Donde  $R_{Ovt}$  es el volumen de agua extraído de la presa Oviachic durante el periodo  $t$ ,  $Mu$  es el volumen mensual bruto requerido para satisfacer la demanda de uso urbano y  $L_{kt}$  es la lámina bruta necesaria para satisfacer los requerimientos del  $k^{th}$  cultivo, el cual incluye la evapotranspiración de los cultivos, las pérdidas de agua por parcela y las pérdidas de conducción de la red de canales y cuyos valores están dados en metros.

La restricción que refleja que la cantidad de área regable  $A_{kt}$  con los diferentes cultivos debe ser menor o igual a la superficie total regable del distrito de riego, se expresa de la siguiente manera:

$$\sum_{k=1}^n \sum_{t=1}^n A_{kt} \leq 227\,224 \text{ hectáreas} \quad (9)$$

Donde la superficie total regable del Distrito de Riego 041, Río Yaqui es igual a 227,224 hectáreas.

#### Restricciones de mercado

Algunos cultivos establecidos en el distrito de riego están sujetos a restricciones de mercado y la superficie sembrada en cada uno de ellos se lleva a cabo bajo contrato en los diferentes mercados nacionales e internacionales. En el presente estudio, los cultivos considerados con restricciones de mercado son cártamo, hortalizas, garbanzo, algodón, alfalfa y frutales. La superficie máxima considerada a sembrar de estos cultivos (restricción de superficie) en el modelo fue la superficie establecida en el año agrícola 2000-2001. Matemáticamente, esta restricción puede ser expresada de la siguiente manera:

$$0 \leq A_{kt} \leq Md_k \quad (11)$$