

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



***REGLAS DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DEL RÍO
GRANDE DE MORELIA, ENFOCADAS AL USO
AGRÍCOLA***

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

**PRESENTA
RICARDO GAYTÁN TOCAVÉN**

**ASESORA DE TESIS
Dra. Ing. SONIA TATIANA SÁNCHEZ QUISPE**

MORELIA, MICHOACÁN, NOVIEMBRE 2005

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO

Facultad de Ingeniería Civil

REGLAS DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DEL RÍO
GRANDE DE MORELIA, ENFOCADAS AL USO
AGRÍCOLA

TESIS PROFESIONAL

POR

RICARDO GAYTÁN TOCAVÉN

DIRIGIDA POR: Dra. Ing. SONIA TATIANA SÁNCHEZ QUISPE

MORELIA, MICHOACÁN, NOVIEMBRE 2005.

U NIVERSIDAD MICHOACANA A
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



Facultad de **Ingeniería Civil**

Tesis Profesional

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el valioso apoyo científico – técnico del Dr. Abel Solera Solera del Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia. Apoyo enmarcado dentro del Programa de Formación y Fortalecimiento Académico del PROMEP-SEP.

Se agradece a la Comisión Nacional del Agua (Gerencia Estatal Michoacán) y al Distrito de Riego No. 020 Morelia-Queréndaro, por la información suministrada sobre datos de interés.

De igual forma, quiero dar las gracias a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por haber sido parte fundamental de mi formación académica. A la Dra. Ing. Sonia Tatiana Sánchez Quispe, asesora de esta tesis, por todo su apoyo, tiempo, disposición y motivación brindada durante la realización de este trabajo; al mismo tiempo quiero agradecer al Departamento de Hidráulica de la Fac. de Ingeniería Civil, al Ing. Everardo Urquiza Marín por haberme permitido formar parte de este proyecto, al Ing. Guillermo Benjamín Pérez Morales (Padrino de Generación 00-05 de la 1ra. Sección) por todos sus valiosos consejos dentro y fuera del aula de clases y por siempre predicar con el ejemplo. Un agradecimiento especial al Ing. Jesús Martín Caballero Ulaje por las innumerables buenas experiencias que me dejó al haberme dado la oportunidad de colaborar con él en varias ocasiones, por enseñarme tantas cosas buenas e interesantes que podré llevar a cabo en la vida profesional y principalmente en mi vida personal.

Por otro lado, quiero agradecer a la empresa CONSTRUCTORA LESLIE S.A. de C.V. por haberme dado tan valiosa oportunidad al permitirme colaborar en ella durante una buena parte de mi formación académica; al C.P. Arturo Zamora, al Lic. Ricardo Salas, al Ing. Honorio Salas, y principalmente al Ing. Luís González Hernández, al Ing. David Fuentes Rojas y a Don Rogelio Solórzano por todo lo que aprendí de ellos durante mi estancia en la empresa.

Gracias a Dios, por dejarme compartir este momento y toda mi vida con mi familia, a quienes con todo mi cariño, respeto y admiración dedico este trabajo... gracias mamá, gracias papá, Lore y Jessy, gracias por todo!! Gracias a toda mi familia por estar siempre conmigo y por apoyarme tanto.

Muchas gracias a todos mis increíbles amigos por todo su apoyo emocional, académico... por todos los buenos momentos, por todos los viajes, por todos los consejos, por la música, por las salidas en bicicleta, las idas a los tacos, etc. por todo lo que vivimos, aprendimos y compartimos durante este tiempo, muchas gracias Jaime Alberto Rivero Moreno, Eder Nateras Rodríguez, Juan López Valencia, Oscar Rangel Ramírez, Xochitl Peñaloza Rueda, Erick Oliver Cervantes Gutierrez, Miguel Ángel Fernández García, Miguel Velasco Romero, Irving Darinel Fabela, Apolo Dionisio López Cizniega, Fanny Olga Andrade Ruíz, Quetzalcoatl Ima Cervantes , Damián Vargas, etc.

	PAG.
CAPÍTULO I.- INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO II.- ANTECEDENTES	3
II.1. LOS SISTEMAS DE SOPORTE A LA DECISIÓN PARA LA GESTIÓN DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS	3
II. 1. 1. Introducción	3
II. 1. 2. ¿Qué es un Sistema de Soporte a la Decisión (SSD)?	4
II. 1. 3. La Modelación en los sistemas de recursos hídricos	8
II.1.3.1. Etapas de la modelación	8
II.1.3.2. Modelos de simulación para un sistema	9
II.1.3.3. Modelos Matemáticos	10
II.1.3.4. Tipos de Modelos Matemáticos	10
II.1.3.5. Simulación y Optimización	12
II.1.3.6. Simulación de Sistemas de Recursos Hídricos	12
II. 1. 4. Modelo SIMGES (SIMWIN) y SIMRISK del Sistema de Soporte a la Decisión AQUATOOL	17
II.1.4.1. Breve Explicación del Funcionamiento Interno del Modelo SIMGES	19
II.1.4.2. Elementos del Modelo de Simulación SIMGES	20
II.2. REGLAS DE OPERACIÓN PARA UN SISTEMA DE RECURSOS HÍDRICOS (SRH)	21
II.2.1. Reglas de operación genéricas	24
II.2.2. Concepto de gestión de un Sistema de Recursos Hídricos	28
II.2.3. Reglas de Operación Deterministas	30
II.2.4. Procedimientos de Operación No Deterministas	33
II.2.5. Incertidumbres en las Reglas de Operación	35
CAPITULO III.- INTRODUCCIÓN AL SISTEMA DE RECURSOS HÍDRICOS DEL RÍO GRANDE DE MORELIA	36
III.1.- AMBITO GEOGRAFICO DE ESTUDIO	36
III.1.1 Características Fisiográficas	36
III.1.2. Características Climatológicas	37
III.2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	38
III.2.1. Infraestructura Hidráulica	38
III.2.2. Usos del Recurso Hídrico	39
III.2.3. Recursos o Aportaciones	44
III.2.3.1. Ubicación de las Estaciones Hidrométricas	44
CAPITULO IV.- MODELOS HIDROLÓGICOS ESTOCÁSTICOS DE LAS APORTACIONES AL SISTEMA DEL RIO GRANDE DE MORELIA	46
IV.1. INTRODUCCIÓN	46
IV.2. DATOS HIDROLÓGICOS DEL SISTEMA (AFOROS)	47
IV.3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE DETERMINACIÓN DE LOS MODELOS	47
IV.3.1. Series Hidrológicas Restituidas A Régimen Natural	48
IV.3.1.1 Generalidades	48
IV.3.1.2. Restitución De Las Series Hidrológicas Del Río Grande De Morelia	52

IV.3.2. Análisis Estadístico De Las Series De Aportaciones	55
IV.3.3. Normalización De Las Series De Caudales	60
IV.3.4. Tipificación De Las Series Normalizadas	61
IV.3.5. Postulación De Los Modelos	62
IV.3.5.1. Modelos Estocásticos Multivariados ARMA	63
IV.3.5.2. Pruebas De Bondad De Ajuste De Las Series Residuales De Modelos ARMA	64
IV.3.5.3. Modelo Estocástico De Desagregación Espacial	65
IV.3.5.4. Modelo Estocástico De Desagregación Temporal	66
IV.3.6. Verificación Y Validación De Los Modelos Encontrados	66
IV.3.6.1. Generación de Series Sintéticas (validación final).	67
IV.3.6.2. Destipificación Y Desnormalización De Las Aportaciones Sintéticas	68
IV.4. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS	69
CAPITULO V.- MODELO DE SIMULACIÓN DE LA GESTIÓN DEL SISTEMA DEL RÍO GRANDE DE MORELIA	80
V. 1. INTRODUCCIÓN	80
V. 2. DESCRIPCIÓN DEL ESQUEMA DE SIMULACIÓN	80
V. 3. RÉGIMEN DE OPERACIÓN DEL SISTEMA	84
V. 4. VALIDACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN	84
V. 5. CONCLUSIONES DEL ANALISIS	85
CAPITULO VI.- REGLAS DE OPERACIÓN DETERMINISTAS ESTOCÁSTICAS PARA EL SUMINISTRO DEL RECURSO AL USO AGRÍCOLA	86
VI. 1. PARÁMETROS DE LA METODOLOGÍA DE GESTIÓN DE CUENCAS CON CONOCIMIENTO DEL RIESGO EN EL SISTEMA DEL RÍO GRANDE	86
VI.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE DETERMINACIÓN DE LAS REGLAS DE OPERACIÓN	87
VI. 3. ESCENARIOS	87
VI. 3. 1. Escenario 1: Regla basada en el modelo de gestión del sistema histórico	88
VI. 3.2. Escenario 2: Regla basada en la gestión histórica con distinción de año seco y año húmedo	98
VI. 3. 3. Escenario 3: Regla basada en la gestión histórica con una curva de restricción	100
VI. 4. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DE LOS ESCENARIOS	102
REFERENCIAS	104

CAPÍTULO I.- INTRODUCCIÓN

La gestión de los sistemas de recursos hídricos enfrentan condicionantes tales como: el planteamiento a futuro durante la etapa de diseño y la etapa de gestión de los sistemas, las heterogéneas incertidumbres siendo muy acentuada la incertidumbre de aparición del recurso agua, la influencia marcada de los aspectos económicos y sociales de una sociedad.

Razones por las cuales se hace prioritario efectuar un uso racional de los sistemas de recursos hídricos, de tal forma que la gestión de estos sistemas sea eficiente, integral y sostenible. Será eficiente si la estrategia de operación pretende dar solución al problema del recurso escaso, será integral si la estrategia de operación considera todos los elementos que actúan en el sistema y será sostenible si la estrategia de operación no pone en peligro el uso del recurso para generaciones futuras.

Se entiende como gestión de un sistema de recursos hídricos, al planteamiento de estrategias de operación que permitan contestar cuestionamientos en cada periodo de tiempo en que se toma decisiones. Al menos los siguientes cuestionamientos deben responderse: ¿Cuanta agua se va a suministrar?, ¿Cuál será la asignación del agua entre los diferentes usos?, ¿Cuál será la procedencia del agua entre las diferentes fuentes? Además, es conveniente tener información sobre, ¿En que situación queda el sistema para afrontar los periodos de tiempo siguientes? o ¿Qué probabilidades hay que sea satisfactorio en los próximos periodos?

Los modelos matemáticos de simulación de la gestión de un sistema de recursos hídricos, permiten resolver la gestión de un sistema mes a mes, pero requiere una entrada previa fundamental; esta es la estrategia de operación, esta estrategia se calibra o afina, mediante pruebas iterativas en el esquema de simulación del sistema de recursos hídricos en análisis.

Entre las estrategias de operación o reglas de operación generales, existen aquellas que permiten: decidir el suministro que dará el embalse a los diversos usos; determinar la procedencia del recurso; determinar la asignación del recurso entre los diversos usuarios del sistema.

La estrategia de operación, más comúnmente utilizada, que permite decidir el suministro que dará el embalse, es la regla de operación normal. Regla aplicable a sistemas de recursos hídricos con una demanda unificada y un embalse único. Esta regla considera servir la demanda en su totalidad siempre que se disponga de recurso en el embalse. O se sirve la totalidad del recurso almacenado en el embalse si este no es suficiente.

Las reglas de operación se pueden obtener con procedimientos donde las entradas al sistema, caudales, pueden ser las series de caudales históricos o series de caudales sintéticos. Siendo más recomendable una serie sintética por su gran longitud. El uso de series de caudales sintéticos en la simulación del sistema permite incluir en la modelación de forma explícita la incertidumbre de aparición del recurso agua.

En el presente trabajo se obtienen reglas de operación que se las denomina deterministas por el procedimiento de elaboración y se las califica como estocásticas explícitas porque se indica el riesgo asumido por la regla, y además se hace uso de series sintéticas.

Entre el conocimiento de una regla única útil para el sistema frente a una regla con conocimiento del riesgo asumido en las decisiones, esta última, permite que aceptemos o no la regla para el sistema. Si no se aprueba la regla propuesta, por los administradores del sistema, se procede a proponer una nueva regla, aumentando o disminuyendo el valor del riesgo que se planea asumir en la gestión futura del sistema. Obteniéndose en el primer caso reglas más arriesgadas que la asumida históricamente y en el segundo caso reglas más conservadoras.

CAPITULO II.- ANTECEDENTES

II.1. LOS SISTEMAS DE SOPORTE A LA DECISIÓN PARA LA GESTIÓN DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

II. 1. 1. Introducción

La utilización racional del agua implica una gestión eficiente, integral y sostenible del recurso. Los Sistemas de Recursos Hídricos (SRH) y las soluciones para aliviar sus problemas son cada vez más complejos. Por consiguiente, a efectos de analizar los sistemas de forma integrada y de abordar incertidumbres, clásicas relacionadas con los usos, demandas o recursos, así como nuevos temas tales como impactos de posibles cambios climáticos, será necesario utilizar herramientas tecnológicamente avanzadas.

La principal herramienta utilizada en el análisis de sistemas de recursos hídricos es la simulación matemática, ya que permite obtener una aproximación del comportamiento de un sistema mediante la representación numérica de los aspectos de interés y las propiedades del mismo.

Prácticamente la totalidad de la literatura científica referida a la gestión de recursos hídricos propone, justifica, describe o analiza modelos matemáticos concretos encaminados a analizar algunos aspectos de la misma, lo cual prueba la gran importancia de estos como ayuda en el análisis de recursos hídricos.

Dentro del área de gestión de recursos hídricos, se pueden encontrar modelos orientados a distintos objetivos complementarios entre sí, y que en conjunto permiten el estudio integral de un SRH. Enumerados según un orden racional que se seguiría en un estudio completo de un SRH se tendrían los siguientes: modelos para la restitución a régimen natural de datos de aforos; modelos de precipitación escurrentía; modelos de flujo de aguas subterráneas; modelos para la generación de escenarios hidrológicos (históricos o estocásticos); modelos para la gestión de SRH (basados en simulación o en optimización); modelos para la operación de SRH (deterministas o estocásticos); modelos para el análisis de la gestión. Además debemos considerar modelos que tienen en cuenta aspectos adicionales a la gestión cuantitativa del agua, como son modelos de calidad de aguas, modelos de análisis económico y modelos para análisis multiobjetivo, entre otros. Por encima de todos ellos estarían los Sistemas de Soporte a la Decisión (SSD), que integran diversos tipos de modelos para un análisis más general de un sistema. Un SSD completo debería integrar la totalidad de los modelos que se necesitan para un análisis integral de un SRH.

Actualmente, es un hecho que el desarrollo de los modelos anteriormente citados, ha evolucionado hacia los SSD, esto debido a sus múltiples ventajas. A su vez, la propia cualidad de los SSD ha sido utilizada para definir nuevas herramientas de muy diversas aplicaciones como: bases de datos relacionadas con Sistemas de Información Geográfica (SIG), modelos de cálculo de diversas aplicaciones asistidos mediante programas interactivos de edición de datos y resultados.

II. 1. 2. ¿Qué es un Sistema de Soporte a la Decisión (SSD)?

El término SSD, es un sistema de información basado en tecnologías informáticas que sirve de ayuda al gestor de un sistema en el proceso de toma de decisiones. Sin embargo, es habitual utilizar la misma definición para sistemas que en realidad son un conjunto de herramientas organizadas para el desarrollo de SSD. Este conjunto de herramientas podría llamarse entorno de desarrollo de SSD para distinguirlas de los SSD propiamente dichos.

Un SSD para la gestión de los SRH es un conjunto de herramientas, eficaz, potente, amplio y abierto para uso de todos los organismos o personas interesadas o involucradas en la problemática de la gestión de los recursos hídricos. Esto permite que estas personas tomen decisiones más acertadas debido a la amplia y rápida forma de generar escenarios de la misma situación en la cual deben tomar una decisión. Se ha pensado durante largo tiempo que estas herramientas son costosas o difíciles de desarrollar e implementar. Esto se ha debido a la falta de conocimientos de lo que es un SSD y como se puede implementar con las herramientas existentes.

A continuación se describe una estrategia sencilla para desarrollar e implementar un SSD para una cuenca específica.

La estrategia consta de los siguientes pasos básicos:

- a) Definir la situación que se desea analizar, definiendo claramente el objetivo que se desea obtener. Lo importante de definir un objetivo es establecer una medida, en ocasiones se desea minimizar el objetivo pero en otras se desea maximizar.
- b) Una vez definido el objetivo se debe identificar las VARIABLES o CAUSAS que afectan o influyen en la obtención de dicho objetivo. Normalmente la persona(s) que definen el objetivo son los que mejor pueden establecer cuales son las variables que afectaran el objetivo.
- c) Identificar si estas variables pueden ser obtenidas del sistema transaccional. En muchas ocasiones esto puede ser directo pero en otras se necesitan procesar algunos datos del sistema transaccional para obtener las variables que necesitamos. Algunas operaciones normales pueden ser sumariación de datos, cálculos adicionales etc. Por otro lado en muchas ocasiones los datos pueden venir de diferentes formatos en los diferentes sistemas transaccionales. Estas variables pueden ser almacenadas en un repositorio especial para datos analíticos.
- d) Se debe definir el modelo o los modelos para la situación que se desea analizar. El modelo (s) son los pasos o procedimientos de como las variables de entrada modifican el objetivo. Pueden definirse varios modelos, esto permitirá una mayor gama de alternativas para simular la situación. Los modelos pueden ser matemáticos o modelos heurísticos definidos por las personas expertas en la situación.
- e) Se debe definir los tipos de análisis "What if ". Uno de los objetivos de un SSD es permitir generar varias situaciones modificando los valores o variables de entrada, para ver QUE PASA con el objetivo.
- f) Se debe definir los tipos de análisis "Goal Seek". Otro objetivo de un SSD es permitir que se modifique el objetivo directamente y ver como las variables o valores de entrada deben adaptarse o modificarse para obtener el objetivo deseado. Pueden generarse varias

situaciones alternas para obtener el mismo objetivo, así que se pueden definir filtros adicionales, que permiten definir que variables deseamos que se ajusten y cuales no.

Lo anterior son algunos de los pasos básicos para entender todo lo que debe tener un SSD para su implementación y desarrollo. Sin embargo hay que aclarar que para desarrollar un SSD juega un papel muy importante la persona que conoce la situación que se desea modelar o simular. Las personas encargadas de desarrollarlo solamente se encargan de la parte técnica. En resumen, un SSD es una herramienta poderosa, que permite agilizar y mejorar la toma de decisiones semi-estructuradas en una situación específica. La implementación del mismo depende en su mayoría del conocimiento de la situación que se desea analizar.

El trabajo de científicos y expertos relacionado con la aplicación de herramientas informáticas destinadas a resolver distintos problemas del área de la hidrología y de la gestión de los sistemas de recursos hídricos se ha incrementado en la última década, prueba de ello son los numerosos sistemas de computación desarrollados para ayudar a los hidrólogos en el diseño, planeación y operación de un sistema hídrico. A continuación se presenta una breve descripción de algunos de los sistemas computacionales actualmente operativos en el campo de la gestión de sistemas de recursos hídricos.

ARIANE: Es una herramienta para toma de decisiones sustentable en forma inteligente en el proceso de desarrollo de la HydroQuebec. Incluye una guía a los usuarios de los procesos de planeación para la operación plurianual. El sistema permite monitorear la actualización sistemática y validación de datos, la consistencia de datos, el uso del conocimiento heurístico y la llamada secuencia de modelos matemáticos interdependientes de la Hydro-Quebec (Bakonyi, P. , 1993).

SID(WMS): Es un sistema experto destinado a la planeación en el manejo de sequías. **SID** está basado en una metodología en la cual el ambiente del sistema se usa en la evaluación y presentación gráfica de la información de los planes de manejo. Usa un modelo de programación lineal para generar políticas de operación óptima, en función de numerosas experiencias anteriores. Estas políticas se introducen en el sistema experto y el usuario identifica cual es el grado de similitud entre la situación de sequía actual y un evento similar pasado. El sistema ha sido diseñado para ser operado por el departamento de Aguas de Seattle (Palmer y Tull, 1987; Palmer y Colmes, 1988).

REZES: Es un programa diseñado como herramienta para la asistencia al análisis de embalses. El sistema formula el problema matemático del embalse mediante una descripción en pseudo-ingles a través de expresiones algebraicas. En base a esto, el programa reconoce la formulación y selecciona el algoritmo más apropiado para resolver el problema. Después de la selección el programa asiste al usuario durante la ejecución del programa y en la interpretación de los resultados. Actualmente se pueden incluir hasta nueve embalses (dimensionamiento, planeación de la operación, operación a tiempo real) y métodos de optimización (programación lineal y dinámica determinística) programación dinámica estocástica, cambio de restricciones y confiabilidad de la programación (Simonovic and Savic, 1989).

MHOES: Es un sistema experto desarrollado por Nagy et. al. (1989). El Sistema se ha desarrollado capturando algo de la experiencia de los ingenieros que programan el embalse de Manitoba, en una base de conocimientos. El desarrollo comenzó con tres sistemas prototipos que actuarían como un pre y post-procesador inteligente para el programa Energy Management and Maintenance Analysis (EMMA). **EMMA** es un modelo de optimización determinístico

usado para planear la operación integral de generación hidráulica y térmica y líneas enlazadas. En cuanto a las salidas el post-procesador del sistema experto negocia entre las soluciones factibles y no factibles. Teniendo una respuesta factible generada por EMMA, el sistema ayuda al usuario a evaluar la practicabilidad del plan de operación a través de la observación de estados y niveles de embalse históricos. Si la solución no es factible, EMMA señala las variables y restricciones involucradas. En base a las restricciones indicadas, el sistema indica las posibles causas de la no factibilidad y los valores de input correspondientes.

OASIS: De Floris Vinio; Goforth, Gary F., (1990), es un sistema de simulación inteligente y asesor de operaciones. En la primera fase del proyecto, se ha desarrollado un prototipo para probar la aplicabilidad de la inteligencia artificial a la operación y manejo de los recursos hídricos. La segunda fase de **OASIS** siguió un plan estratégico de cinco años para desarrollar y desplegar un sistema de asesoramiento con una base de conocimientos de gran escala para la operación y manejo de agua a tiempo real dentro de los límites del distrito de aguas de South Florida.

IRAS (Interactive River and Acuífer Simulation): De Taylor M., Loucks D. y French, P. (1995), puede simular escurrimientos y almacenamientos de agua, calidad de agua, y energía hidroeléctrica consumida y producida por un sistema de embalses superficiales y subterráneos interdependientes. Posee una interfaz gráfica que permite al usuario introducir datos, operar el modelo, producir y visualizar gráficas de series de tiempo y análisis estadístico de los resultados de la simulación. También permite al usuario definir y cuantificar la vulnerabilidad, resistencia y ocurrencia de fallo del sistema de aguas modelado. Por lo tanto **IRAS** permite ayudar a identificar el rango y probabilidad de variados impactos asociados con una política de operación diseñada para un sistema particular.

AQUARIUS De Díaz G. y Brown T. (1997), es un sistema orientado a la distribución temporal y espacial de agua entre los usuarios en una cuenca hidrográfica. La versión V2000 del modelo esta dirigida a un criterio de eficiencia económica operacional que permite la redistribución del agua hasta que los retornos marginales netos en todos los usos sean iguales, esto es, hasta que sea alcanzada una condición de Pareto Óptima. Esto se logra examinando en forma sistemática (usando optimización no lineal) la factibilidad de redistribuir los valores marginales o no utilizados de almacenamiento y descargas entre los usos alternativos. Debido a que los componentes del sistema pueden interpretarse como objetos de una red de flujo en la cual ellos interactúan, el modelo considera cada componente del sistema hídrico como un nodo equivalente o un enlace en el entorno de programación utilizando un lenguaje de programación orientado a objeto (C++). Este modelo no permite simular las reglas de distribución existentes ni las prioridades de uso.

AQUATOOL: De Andreu et al, (1996), es un Sistema de Soporte a la Decisión (SSD) en materia de planeación y operación de recursos hídricos formado por diversas unidades de control donde los módulos principales son el SIMWIN y OPTIWIN, desarrollado por el Departamento de Ingeniería Hidráulica y medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia. La valiosa experiencia obtenida hasta ahora con dicho SSD en su aplicación a casos reales de planeación y operación en cuencas españolas (Júcar, Segura, Tajo,..) y extranjeras (Argentina, Brasil, Italia, etc.), aseguran la robustez del mismo y su flexibilidad para modelar gran variedad de sistemas. La permanente mejora y adición de utilidades tiene por objetivo seguir liderando el estado del arte en esta área del conocimiento. Los sistemas de soporte a la decisión (SSD), como el sistema AQUATOOL aquí presentado, son la respuesta a la necesidad de poner a la mano de los encargados de tomar decisiones herramientas avanzadas de fácil

utilización para abordar los problemas habituales encontrados a la hora de planear y operar el uso del agua de una cuenca.

El entorno de desarrollo o sistema de soporte a la decisión AQUATOOL, como hemos mencionado anteriormente, es un sistema para la modelación de la operación y planeación de sistemas de recursos hídricos. El paquete, denominado AQUATOOL, incluye básicamente un módulo de optimización de cuencas (OPTIWIN), un módulo de simulación de cuencas (SIMWIN). El sistema no es específico para una cuenca determinada, sino que está previsto para uso general puesto que permite la representación de diferentes configuraciones de sistemas de recursos hídricos mediante el diseño gráfico y la entrada gráfica de datos.

En los últimos años, se han desarrollado postprocesadores de los módulos principales entre los que se encuentran: un módulo de evolución y optimización económica y un módulo de calidad del agua. En la Figura II.1.1 se muestra un diagrama con los diferentes módulos incluidos en esta herramienta de soporte a la decisión.

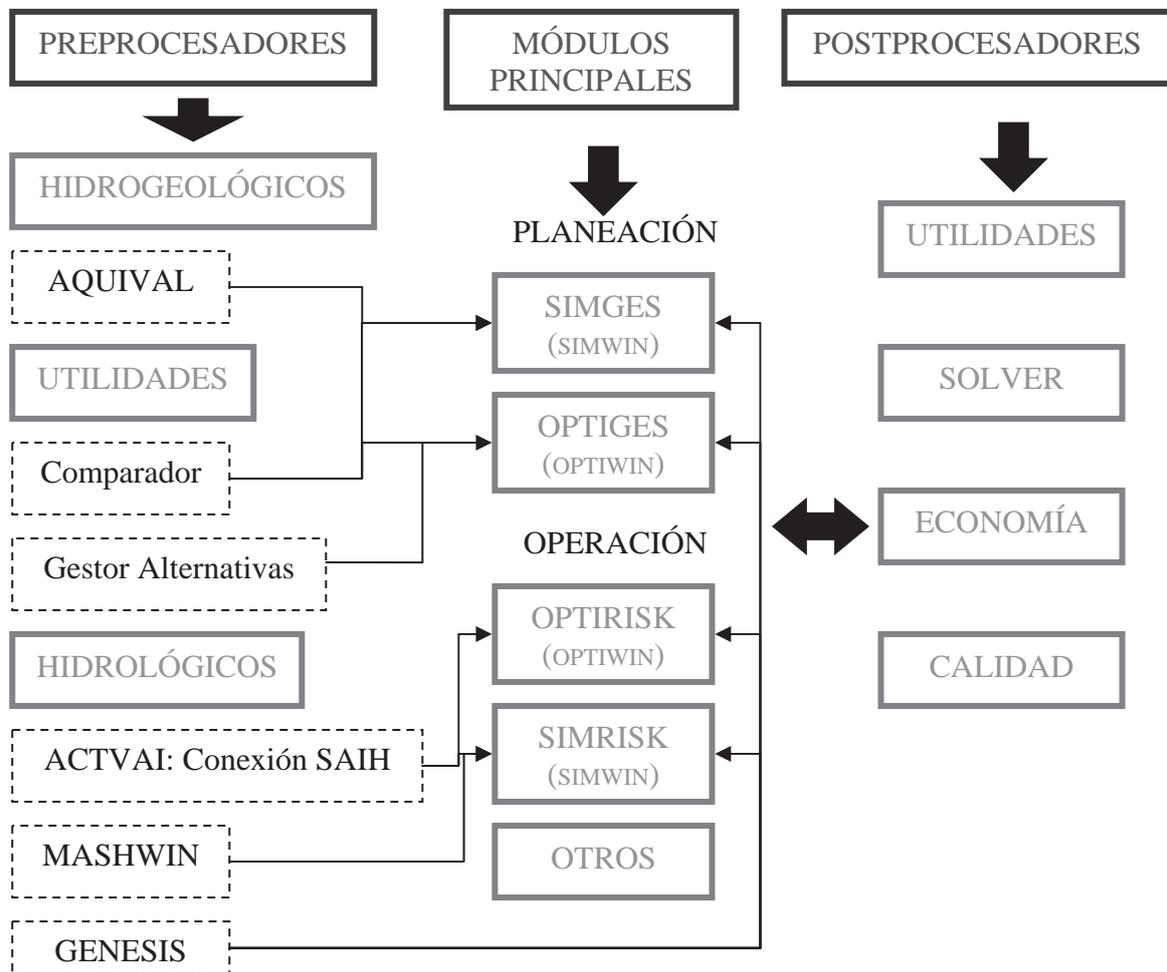


Figura II. 1. 1. Componentes del sistema de soporte a la decisión AQUATOOL

Los principales módulos de AQUATOOL son OPTIGES Y SIMGES. El módulo OPTIGES (optimización de la gestión) permite la resolución generalizada del problema de la asignación del agua en sistemas mediante la generación de una red de flujo y el uso de

algoritmos de programación lineal para el cálculo de la asignación óptima de recursos. Este módulo realiza la optimización de la gestión mensual para largos periodos de tiempo. Esto, junto con el análisis de los resultados, permite la deducción de reglas de operación óptimas para sistemas complejos de recursos hídricos. El módulo SIMGES (simulación de la gestión) incluye también la optimización de una red de flujo conservativa que, a diferencia del modelo de optimización, se formula para resolver la gestión en un solo mes. Otra diferencia fundamental entre el módulo de simulación y el de optimización es que el módulo de simulación requiere la definición de las reglas de operación del sistema. Las reglas de operación incluidas en SIMGES son:

- a) Curvas de volumen objetivo y zonas de embalses.
- b) Relaciones interembalses.
- c) Caudales mínimos objetivo por canales.
- d) Suministros objetivos.
- e) Caudales objetivo de turbinado para aprovechamientos hidroeléctricos.
- f) Relaciones entre demandas.
- g) Relaciones entre canales.
- h) Relaciones entre elementos: bombeos, recargas artificiales.

II.1.3. La Modelación en los sistemas de recursos hídricos

La modelación es el estudio analítico de un sistema (como ejemplo un sistema de recursos hídricos) que ayuda al encargado de tomar decisiones a identificar y seleccionar una alternativa entre un gran número de ellas. Es un enfoque lógico y sistemático donde se definen y especifican claramente las hipótesis, objetivos y criterios que ayudan al planificador a llegar a las mejores decisiones.

II.1.3.1. Etapas de la modelación

Enfocado en una forma sistemática el proceso de la modelación podría abordarse según los siguientes pasos:

- a) *Identificar el sistema a modelar.* Dentro de este paso se incluye también la decisión sobre la composición del modelo, esto es de los elementos o procesos identificados en el sistema, ver cuales han de ser incluidos en el modelo y cuales no.
- b) *Elección del tipo de modelo.* Aquí ha de verse por un lado como se van a resolver los problemas de reproducir determinados fenómenos en el modelo; y por otro lado la forma general del modelo. Para ello habrá de tenerse en cuenta que la información que se pretende obtener a través del modelo ha de ser: (1) Cuantitativa, e efecto de permitir una clasificación de los resultados. (2) De suficiente detalle y precisión.
- c) *Estimación de los parámetros.* También suele denominarse esto como “Calibración”.
- d) *Validación del modelo.* Para ello comparamos los resultados del modelo con valores observados que no hayan sido utilizados en la etapa de calibración. Si los resultados son satisfactorios, se puede comenzar el paso siguiente. Si no lo son, puede repetirse el paso anterior, o incluso volver a plantear el modelo.
- e) *Utilización del modelo para el fin pretendido.*

- f) *Análisis de sensibilidad.* En este paso se determina como varían los resultados obtenidos con respecto a los parámetros, de esta forma se puede acotar y tener en cuenta a las incertidumbres.

II.1.3.2. Modelos de simulación para un sistema

El modelo de un sistema puede ser definido como una conceptualización del mismo que preserva sus características esenciales para el fin que nos ocupa, sin necesidad de preservarlas todas. Según esta definición cualquier pensamiento es un modelo, incluso lo que vemos es un modelo creado por muestra mente, basándose en la información visual.

Por tanto hay muchos tipos de modelos, entre otros:

- a) Descriptivos.
- b) Gráficos.
- c) Experimentales o de juicio.
- d) Análogos.
- e) A escala o físicos.
- f) Matemáticos.

Y todos los anteriores pueden ser usados en la toma de decisiones. Los modelos matemáticos son los más fáciles de transmitir de forma intacta a otras personas y son cuantitativamente más precisos que los anteriores (pero no cualitativamente). Hay que tener siempre bien presente que los modelos matemáticos, son herramientas al servicio del juicio ingenieril y no sustitutos mejorantes del mismo.

Los pasos esenciales del análisis de un sistema en general son:

- a) Definición del problema que nos ocupa. Para nuestro caso, equivale a tener conocimiento del origen de la necesidad de plantear un desarrollo de recursos hídricos.
- b) Identificación del sistema y la captación de datos útiles. Consiste en adquirir conocimientos de diferentes tipos que puedan afectar el problema que nos ocupa.
- c) Definición de objetivos y metas. Una vez estudiado el problema, es más factible traducir su posible solución en la consecución de unas metas que a su vez generan una serie de objetivos más concretos a conseguir.
- d) Definición de medidas cuantitativas. Estas son utilizadas para evaluar las alternativas en cuanto a su mejor o peor cumplimiento de los objetivos.
- e) Generación de alternativas viables. Para ello ha de tenerse en cuenta que las alternativas generadas habrán de satisfacer las restricciones de tipo físico, social, político, económico, etc., presentes en el sistema.
- f) Evaluación y selección de las mejores alternativas.
- g) Revisión, puesta en marcha y retroalimentación. En este punto hemos de asegurarnos que después de todo el proceso, los objetivos y las metas originales se cumplen realmente y contribuyen realmente a resolver el problema.

Como hemos mencionado antes, la principal herramienta utilizada en el análisis de sistemas de recursos hídricos es la simulación matemática, ya que permite obtener una

aproximación del comportamiento de un sistema mediante la representación numérica de los aspectos de interés y las propiedades del mismo.

II.1.3.3. Modelos Matemáticos

Estos cuentan prácticamente con tres componentes:

- a) **Parámetros.-** son valores numéricos que describen propiedades físicas y supuestamente conocidas del sistema. Los parámetros son dados por el usuario, por los que suelen llamarse datos y no cambian en su utilización del modelo. Una división muy común de los datos es que la distingue entre datos controlables y datos no controlables, los segundos suelen ser aquellos que por estar ligados a características inherentes al sistema físico que difícilmente pueden ser cambiadas, se suponen invariables para un determinado sistema. Los datos controlables son aquellos que el usuario del modelo puede y a veces debe, cambiar para obtener y evaluar diferentes alternativas y por lo tanto varían de unas pasadas a otras, aunque dentro de la misma pasada permanecen con valores fijos.
- b) **Variables.-** son valores numéricos que reflejan el comportamiento del sistema y sus prestaciones. Solo reciben valores numéricos durante la ejecución del modelo. Normalmente se llaman resultados o salidas a un subconjunto de las variables que resulta interesante conocer en cada ejecución y que queda plasmado en forma escrita o almacenado en alguna otra forma.
- c) **Restricciones.-** Son expresiones matemáticas (aunque no siempre) que describen las relaciones entre variables y entre éstas y los parámetros. Suelen ser igualdades o desigualdades algebraicas o ecuaciones integrales o diferenciales.

Los modelos matemáticos están siendo muy utilizados debido a su fácil transmisión de unas personas a otras y al relativamente menor tiempo necesario para su elaboración. Las computadoras no son esenciales, pero son casi imprescindibles si el sistema es complejo, pues éste es capaz de almacenar gran cantidad de información y acceder a ella en poco tiempo y puede analizar y manipular números a grandes velocidades.

En conclusión los modelos matemáticos son útiles en el análisis de sistemas por sus cualidades:

- a) **Amplificadoras de experiencia,** debido a facilidad de transmisión (matemáticas) y velocidad de utilización (ordenadores).
- b) **Organizadoras de datos, resultados y alternativas,** debido a la forma de trabajar de las computadoras.
- c) **Evaluadoras de alternativas,** que en definitiva es lo que contribuye a la toma de decisiones.

II.1.3.4. Tipos de Modelos Matemáticos

Los modelos matemáticos pueden ser clasificados atendiendo a diversos conceptos, por lo que existen multitud de clasificaciones.

Veamos a continuación algunas clasificaciones posibles:

a) Una clasificación obvia sería atendiendo al proceso modelado, así tenemos modelos:

- Lluvia-escorrentía.
- Crecidas.
- Síntesis hidrológica.
- Flujo subterráneo.
- Gestión de embalses (Gestión de Cuencas).
- Escorrentía urbana.
- Estuarios y lagos.
- Etc.

Algunas de ellas podrían reagruparse en modelos de hidrología superficial o de hidrología subterránea. Podría también hablarse separadamente o conjuntamente de modelos de calidad, si incluyen esta característica del agua, o de modelos económicos si contemplan este aspecto del sistema.

- b) Generalmente los modelos hidrológicos se clasifican de estocásticos si las variables del modelo son contempladas como variables aleatorias, con distribuciones de probabilidad. En el caso de que esto no sea así y se desprecien los ruidos aleatorios y las relaciones se supongan perfectamente determinadas o únicas, el modelo se califica como no estocásticos o determinístico.
- c) Si el modelo está basado en observaciones de datos físicos reales, de las cuales se extraen ciertas consecuencias, el modelo sería empírico. Por otra parte un modelo es conceptual si se formula con referencia a alguna teoría básica o sin coeficientes empíricos.
- d) Un modelo se dice lineal, si las relaciones matemáticas pueden suponerse lineales y por lo tanto puede aplicarse el principio de superposición. Si esto no es así, el modelo se denomina no lineal.
- e) Si la distribución espacial de las características físicas y de localización de actuaciones en el sistema se tiene en cuenta, el modelo se dice distribuido, y si no, se dice agregado. Normalmente los modelos distribuidos incluyen la resolución de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, mientras que los agregados solo ecuaciones diferenciales ordinarias.
- f) Un modelo estacionario si las relaciones entradas-salidas no dependen del tiempo; si dependen, el modelo es no estacionario o transitorio.
- g) Según el problema que pretenda resolver el uso que se le de, un modelo puede ser:
- De predicción o de simulación si se utiliza para conocer “que pasa si...” , también llamados descriptivos.
 - De optimización si el modelo modifica internamente los valores de los datos controlables (que en este momento pasan a ser variables) y/o las variables para alcanzar el óptimo valor de una función objetivo previamente definida. A su vez los modelos de optimización pueden subdividirse en varias clases según la técnica de optimización utilizada.

- De identificación, en estos modelos los datos que para los anteriores han sido denominados incontrolables pasan a ser las variables o incógnitas a ser determinadas.
- h) Los modelos pueden clasificarse según las ecuaciones matemáticas utilizadas e incluso los métodos numéricos utilizados para resolver esas ecuaciones.
- i) Si la configuración física del sistema se considera conocida e invariable y lo que trata de determinar es la gestión del mismo, el modelo será de operación. En cambio si se utiliza el modelo para determinar la secuencia óptima de escalonamiento de infraestructura y de aprovechamiento, se trata de un modelo de planeación.

II.1.3.5. Simulación y Optimización

Se han utilizado los términos de simulación y optimización para clasificar los modelos matemáticos, estos se pueden utilizarse en un sentido mas amplio, como a continuación se explica.

Simulación es una técnica para resolver problemas que utiliza el siguiente esquema:

- a) Desarrollo de un modelo.
- b) Operación del modelo utilizando unos valores de los datos controlables.
- c) Observación e interpretación de resultados y con estos datos resolver el punto 2 con nuevos valores con los datos controlables que esperamos que mejoren las prestaciones del sistema.

Optimización es una técnica que utiliza los siguientes pasos:

- a) Desarrollo de un modelo.
- b) Operación del modelo. Éste dará como resultado unos valores de las variables de control que optimizan la función objetivo que hayamos utilizado.

Es muy común plantear el dilema “¿simulación u optimización?” y manejar las ventajas e inconvenientes de una técnica y otra. La ventaja de los modelos de simulación es que se obtienen valores óptimos de las variables de control, mientras que al ser la técnica de simulación una técnica de prueba y error, no es seguro que se vaya a dar el óptimo. No obstante, por ser el proceso de optimización un proceso muy laborioso, su nivel de detalle es mucho menor que el que se puede conseguir en un modelo de simulación. Según lo anterior es conveniente utilizar ambos aprovechando las ventajas de cada una de las técnicas. Así los modelos de optimización pueden ser utilizados con concepciones simplificadas del sistema para filtrar alternativas que después puedan ser evaluadas con más detalle con modelos de simulación.

II.1.3.6. Simulación de Sistemas de Recursos Hídricos

Los modelos de simulación de SRH pueden, en una rápida clasificación, estar basados en:

- a) Procedimientos secuenciales de simulación. Tantean la satisfacción período a período, de las demandas de cada embalse, comenzando por los situados aguas arriba y teniendo en cuenta que todos deben vaciarse a un ritmo compatible con su capacidad, tratando de mantener un equilibrio en el grado de llenado de todo el sistema (regla del espacio vacío o similares). Toman decisiones conjuntas cuando varios embalses abastecen una demanda única. Generalmente, dividen la capacidad de los embalses en fracciones, tomando las decisiones de desembalse en función de las demandas actuales y previsibles y su prioridad, el nivel del embalse actual, las limitaciones de los elementos del sistema y, en ocasiones, las aportaciones previsibles.
- b) Procedimientos de simulación basados algoritmos de optimización. Resuelven por procedimientos de optimización, generalmente basados en la teoría del grafo, en un solo tanteo para cada período de tiempo, el conjunto de relaciones entre embalses, recursos y demandas con las reglas de optimización especificadas, teniendo en cuenta las restricciones a que está sometido cada elemento del sistema, como en el caso de los procedimientos secuenciales.
- c) Procedimientos de optimización. Obtienen por métodos de investigación operativa el valor óptimo de la función objetivo, y por tanto la estrategia óptima de operación, para el período de tiempo que representan las series de aportaciones ensayadas, teniendo en cuenta las restricciones asociadas a cada una de las variables. Suelen emplearse métodos de programación lineal, programación dinámica, programación no lineal, entre otros.
- d) Procedimientos mixtos simulación-optimización. Tratan de combinar lo mejor de ambos métodos. En una primera fase, buscan la regla de operación más ventajosa con la serie de aportaciones que se haya adoptado, utilizando procedimientos clásicos de optimización. En la segunda fase, simulan el comportamiento del sistema intervalo a intervalo cuando se opera con las reglas antes calculadas.

Se han escrito cientos de programas con el planteamiento hasta ahora expuesto. De ellos, apenas han trascendido a nivel mundial una decena, no necesariamente por la calidad de sus formulaciones sino por la difusión que han tenido y la experiencia que se ha generado con su empleo masivo en casos reales. Los únicos programas difundidos a nivel de usuario por todo el mundo son de origen norteamericano y recientemente español.

Los programas escritos específicamente para un sistema concreto de recursos hídricos son muy numerosos. La mayoría adoptan los algoritmos de cálculo de alguno de los programas estándar, y en general incluyen nuevas opciones, no contempladas en aquellos.

Sus principales problemas se resumen en los puntos siguientes:

- a) La ausencia de difusión y por tanto de usuarios.
- b) Su ausencia o escasez de instrucciones de usuario, que quedan muchas veces sólo en la mente del programador y convierten a los programas en difíciles e inseguros de aplicar a extraños.
- c) Su mayor probabilidad para producir errores cuando se emplean opciones múltiples no contempladas en los test de prueba.

Precisamente, al uso intensivo de los programas de gran difusión se deben las mejoras que sucesivamente han sido introducidas en las nuevas versiones, pudiéndose afirmar:

- a) En la actualidad, carecen prácticamente de errores importantes, si bien una aseveración de éste tipo nunca es del todo cierta en programas tan complejos.

- b) Son capaces de simular casi cualquier circunstancia que pudiera pensarse en esquemas de empleo de recursos hídricos.

Los programas más conocidos para la simulación y optimización de recursos hídricos que existen en la actualidad son los que a continuación serán descritos en cuanto a sus características:

- a) HEC-3 y HEC-5, desarrollados por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE.UU.
- b) SIMYIELD, SIM-V y AL-V, desarrollados por el Departamento de Recursos Hidráulicos del Estado de Texas (EE.UU).
- c) MODSIM, desarrollado por el Departamento de Recursos Hidráulicos de Colorado State University (EE.UU.), que se añade aquí, no tanto por las novedades que en sí aporta, sino porque representa un ejemplo de la adaptación de procedimientos clásicos a microcomputadoras.
- d) SIMWIN, desarrollado por el Departamento de Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia, España.

Programas HEC-3 y HEC-5

Se trata de dos programas desarrollados bajo los mismos conceptos de modelos deterministas de formulación del tipo secuencial.

EL HEC-3 simula sistemas de embalses interconectados que satisfacen demandas que requieren almacenamiento de agua en los embalses (abastecimientos, regadíos, producción hidroeléctrica).

El HEC-5 surgió de la programación original del HEC-3, pero pronto amplió sus posibilidades, ya que permite simular, sin interrumpir el proceso normal de simulación de satisfacción de las demandas mes a mes, el control de las ondas de avenidas que entran a un sistema de embalses definidas a intervalos de horas o minutos. De hecho, el HEC-3 se dejó de actualizar y mantener en cuanto se formuló el HEC-5, por lo que aquél puede ya, de hecho, considerarse obsoleto.

El HEC-5 fue concebido como herramienta de apoyo a los técnicos que desarrollan estudios de planeación de futuros embalses, y necesitan un programa para evaluar la eficacia de nuevos embalses en un sistema existente.

Las respuestas básicas que proporciona el modelo, suponiendo que son conocidas las aportaciones mensuales, son:

- a) Cálculo de volúmenes de almacenamiento y control de avenidas que necesita cada embalse del sistema.
- b) Evaluación de unas reglas de operación concretas en un sistema de embalses de defensa contra avenidas que se emplea además para satisfacción de demandas, incluida la hidroeléctrica.
- c) Estimación de daños medios anuales, beneficios y costes del sistema de reducción de avenidas aguas abajo de los embalses.

En los últimos tiempos, se está adaptando el programa que tenga en cuenta la calidad de agua circulante a la hora de tomar decisiones de desembalse. Esta versión del programa se denomina HEC-5Q.

Programa SIMYIELD

El programa SIMYIELD, simula la operación de un conjunto de embalses, basándose en una representación numérica de la red de embalses y conducciones, que facilita el tratamiento.

La red puede ser abierta, cerrada o mixta, y está compuesta por los siguientes tipos de elementos:

- a) Arcos: son los elementos que unen unidades de la red entre sí o con el exterior (canales, tuberías o ríos)
- b) Nudos: son los puntos de confluencia de arcos, pudiendo representar embalses o simplemente puntos de control.

Tanto el extremo de entrada de caudales como el de salida deben ser nudos, aunque éstos sean ficticios. En los nudos de embalse, es necesario especificar el almacenamiento y el volumen deseado para cada mes del año. El algoritmo de solución empleado, sustituye la red física por otra en la cual todos los nudos son confluencias. De ésta manera, todo el volumen del sistema queda representado como si circulase por un sólo arco, con lo cual queda un sistema homogéneo de sencillo tratamiento matemático. La solución se realiza mediante un algoritmo de programación lineal en el cual se minimiza la función objetivo. Las restricciones al problema son las capacidades de los arcos y la conservación de masa en los nudos. Finalmente, se reinterpretan los resultados en la red física y se comienza a simular el mes siguiente empleando el estado anterior del sistema como estado inicial.

Programa SIM-V

El modelo SIM-V es un programa de simulación que se desarrolló tratando de mejorar las deficiencias del SIMYIELD, pero con la misma filosofía.

De forma análoga al anterior, el programa permite asignar los recursos disponibles en un sistema físico de embalses y ríos o conducciones a las demandas deseadas, siguiendo una estrategia de explotación predefinida, y respetando los condicionantes físicos. El programa SIM-V no se limita a tantear una solución viable para cada mes, sino que emplea un procedimiento matemático de optimización de grafos (algoritmo out-of-kilter) que da mucha flexibilidad a la simulación. Para ello, el programa transforma la red física original, arborescente o no, en una red cerrada constituida por nudos sin capacidad y arcos con capacidad (que, por otra parte, aumenta notablemente el número de nudos y arcos).

El programa construye para cada mes una función objetivo y unas restricciones, ambas lineales, que se maximizan para obtener la solución óptima. Para optimizar la función objetivo, se utiliza la solución de grafos con ganancia.

Resumiendo, las diferencias del SIM-V con respecto al SIMYIELD son las siguientes:

- a) Se asignan explícitamente los costes o beneficios ficticios de cada elemento del sistema para definir la estrategia de operación.
- b) Es posible simular los retornos de las demandas servidas al sistema, y las pérdidas por evaporación o filtración.
- c) Es posible obligar al programa a servir un porcentaje mínimo de cada demanda.
- d) La estrategia de operación de embalses se puede dar de forma más flexible, siendo posible utilizar una función beneficio-volumen de tipo poligonal. El programa SIM-V puede simular la producción hidroeléctrica.

Programa AL-V

Se trata de un programa de optimización de la estrategia de operación de un sistema de embalses que fue desarrollado en paralelo con el SIM-V para ayudar a los usuarios de éste a obtener la estrategia de operación más conveniente antes de proceder a la simulación propiamente dicha. Internamente, su estructura es igual que la del SIM-V. Sin embargo, por tratarse de un programa de optimización, en lugar de tomar la decisión de desembalses para el mes en curso de función del agua disponible, proporciona la estrategia de explotación mensual óptima de un período para el cual se conocen las aportaciones (en un máximo de cuatro años). Por éste motivo, tiene en cuenta el riesgo de sequías, pudiéndose establecer inclusive el volumen necesario de regulación interanual. Sin embargo, al desconocerse en la realidad la hidrología futura, los resultados obtenidos únicamente pueden considerarse como una aproximación al problema real, que debe ser refinada por simulación.

Programa MODSIM

El MODSIM es un programa desarrollado en Colorado State University que se basa, como el SIM-V, en un algoritmo de solución de grafos basado en programación lineal (out-of-kilter). Al ser el programa muy similar a aquél, no entraremos en demasiados detalles de diseño.

Las características principales del modelo son las siguientes:

- a) Trabaja indistintamente a intervalos de tiempo semanal o mensual.
- b) Utiliza el mismo sistema de costes ficticios que el SIM-V para definir la estrategia de operación.
- c) Si bien no está incluido de momento en el modelo, se pueden tener en cuenta las incertidumbres futuras con una optimización de las reglas de operación del tipo estocástico.
- d) La evaporación se calcula de forma iterativa. También puede tener en cuenta pérdidas por filtración.
- e) Se puede simular la producción hidroeléctrica.
- f) Las reglas de operación se introducen en forma de curvas, pudiendo definir hasta tres diferentes períodos (seco, medio y húmedo) en función de los volúmenes almacenados y de las aportaciones.
- g) Incorpora un procedimiento de entrada interactiva de datos y produce gráficos.
- h) No considera los retornos de agua al sistema procedentes de las demandas (como el SIMYIELD, al no adoptar el esquema de grafos con ganancia)

Programa SIMWIN

Es un programa para simular el funcionamiento de un sistema de recursos hídricos (SRH). Este programa forma parte del SSD AQUATOOL (Figura II.1.1) y permite representar en forma detallada casi cualquier sistema, mediante el empleo de los distintos elementos disponibles, y definir las reglas de operación de las infraestructuras. Este programa permite incorporar los distintos elementos del sistema (véase apartado II.1.4.2) en forma interactiva, e introducir al mismo tiempo sus propiedades. Luego de simulado el sistema, permite consultar los distintos resultados de forma gráfica, para una mejor comprensión del funcionamiento y respuesta de la cuenca bajo estudio.

Otra de las características destacables de este modelo es su capacidad para simular el aprovechamiento conjunto de las aguas superficiales y subterráneas de una cuenca, para conseguir un uso más racional del recurso.

El programa permite fácilmente realizar modificaciones en el sistema, tanto incluyendo o eliminando elementos o modificando las características y reglas de operación de los mismos. De esta forma se puede estudiar la respuesta de un SRH frente a posibles modificaciones, respondiendo a la pregunta ¿qué pasaría si ... ?.

El programa construye una red de flujo interna, cerrada y conservativa, a partir del sistema diseñado en pantalla por el usuario. Luego minimiza la función objetivo del sistema usando el algoritmo 'out-of-kilter' (o de las desviaciones) en forma iterativa, para poder tener en cuenta procesos no lineales tales como la evaporación de embalses, filtraciones de ríos a acuíferos, etc.

II.1.4. Modelo SIMGES (SIMWIN) y SIMRISK del Sistema de Soporte a la Decisión AQUATOOL

El modelo SIMGES es un modelo general para la SIMulación de la GESTión de cuencas, o SRH complejos, en los que se dispone de elementos de regulación o almacenamiento tanto superficiales (embalses) como subterráneos (acuíferos), de captación, de transporte, de utilización y/o consumo, y de dispositivos de recarga artificial.

La simulación se efectúa a nivel mensual y reproduce a la escala de detalle espacial que el usuario desee, el flujo del agua a través del sistema. Para los subsistemas superficiales el flujo es calculado simplemente por continuidad o balance, mientras que para los subsistemas subterráneos o acuíferos el flujo es simulado mediante modelos de celda, uni o pluricelulares, según convenga, o incluso mediante modelos distribuidos de flujo lineal. Se tiene asimismo en cuenta en la simulación las pérdidas por evaporación y filtración en embalses y cauces, así como, las relaciones entre aguas superficiales y aguas subterráneas.

La gestión de los recursos hídricos se efectúa mediante reglas de operación tendientes a mantener un nivel similar de llenado en los embalses a partir de unas curvas de zonado de embalse. Dichas curvas son las reglas de explotación propiamente dichas y son suministradas por el usuario del modelo. Se admite la definición de caudales mínimos ecológicos, así como de diferentes prioridades de los usuarios para el aprovechamiento del agua.

La simulación y gestión del sistema superficial se efectúan a un tiempo mediante el uso de un algoritmo de optimización de redes de flujo conservativo. Dicho algoritmo se encarga de determinar el flujo en el sistema tratando de satisfacer al máximo los objetivos múltiples de

minimización de déficit, y de máxima adaptación a las curvas de volumen objetivo de embalses y objetivos de producción hidroeléctrica.

- a) Los resultados del modelo incluyen la evolución de todas las variables de interés a nivel mensual, a nivel anual, valores medios del período de simulación, así como garantías.

Sobre el módulo SIMGES (SIMWIN) y módulo OPTIGES existe un desarrollo informático que incluye diversas interfaces gráficas de usuario basadas en el sistema operativo Windows de Microsoft.

Esta interfaz interactiva permite al usuario:

- a) Introducir y modificar, si es necesario, la configuración de un sistema de recursos hídricos; ya sea para optimización (módulo OPTIWIN) o para simulación (módulo SIMWIN). Esto incluye la posibilidad de obtener una copia en papel de diseño efectuado.
- b) Introducir y gestionar bases de datos que contienen las características físicas de los componentes de los esquemas, así como las características de la gestión.
- c) Llevar a cabo una optimización de la gestión para una alternativa dada y un tiempo horizonte dado utilizando diferentes datos hidrológicos.
- d) Llevar a cabo una simulación de la gestión para una alternativa dada y un tiempo horizonte dado, utilizando diferentes datos hidrológicos y también diferentes reglas de gestión.
- e) Obtener los resultados de la optimización y de la simulación en forma de informe escrito, ya sea detallado para todo el tiempo horizonte o resumido como valores medios e indicadores de garantías.
- f) Obtener los resultados de la optimización y de la simulación en la forma de gráficos de series temporales, gráficos de valores medios y de valores para un año determinado.
- g) Obtener los resultados de la optimización y de la simulación almacenados en archivos que puedan ser utilizados como datos de entrada para cualquier tipo de postprocesador específico que no esté incluido en AQUATOOL.

Estas capacidades pueden ser utilizadas en un sistema de recursos hídricos para lo siguiente:

- a) Filtrar alternativas de diseño mediante el módulo de optimización.
- b) Filtrar alternativas de gestión, mediante el uso del módulo de optimización obteniendo criterios de operación a partir del análisis de los resultados óptimos.
- c) Comprobar y refinar las alternativas filtradas mediante el uso del modelo de simulación.
- d) Llevar a cabo análisis de sensibilidad comparando los resultados después de cambios en el diseño o en las reglas de operación.
- e) Llevar a cabo análisis de riesgo simulando y/u optimizando con diferentes series sintéticas hidrológicas.
- f) Ganar conocimiento del sistema en los aspectos físicos y de gestión, además de ganar en el aspecto de organización de datos.
- g) Utilizar el modelo una vez que se implanta una alternativa como ayuda en la operación del sistema de recursos hídricos (off-line), principalmente para reparto de recursos entre demandas conflictivas, y para estudiar impactos de cambios en el sistema.

Además, este sistema de soporte a la decisión (SIMGES / AQUATOOL) no es específico para una cuenca determinada sino que está previsto para uso general puesto que

permite la representación de diferentes configuraciones de sistemas de recursos hídricos mediante el diseño gráfico y la entrada gráfica de datos.

Finalmente, uno de los más modernos es el módulo de evaluación del riesgo SIMRISK. A diferencia de los módulos anteriores, que se aplican en la fase de planeación, este módulo está orientado a su uso en la fase de operación.

Como hemos podido observar en la Figura II. 1. 1. cada módulo principal está formado por diferentes procedimientos que se pueden dividir en tres tipos: lectura de datos, operaciones y salida de resultados.

La entrada de datos, para el módulo SIMWIN (modelos SIMGES y SIMRISK), en primer lugar, está compuesta por la lectura de datos provenientes de la interface gráfica, datos resultado de la modelación hidrológica (series sintéticas) o datos de series de gastos históricos. Cabe mencionar, que para realizar el presente trabajo de tesis se ha utilizado, para obtener las series de caudales sintéticos, el programa llamado GENESIS (Figura II. 1. 1.), cuya función es generar series sintéticas de caudales de longitud considerable para efectuar la simulación de diferentes escenarios, logrando con esto caudales estadísticamente representativos como se explicará más adelante.

Una vez realizados todos los cálculos para la simulación de la gestión del sistema se realiza la llamada a una serie de módulos para la salida de resultados a archivo, ya sean a modo de informe o con formato importable desde una hoja de cálculo.

Además de los SSD mencionados anteriormente, se encuentra una gran diversidad de estos con funciones muy variadas que no siempre incluyen la gestión de SRH. Esta diversidad reduce las posibilidades del entorno para analizar la gestión de SRH complejos como los que se puede encontrar en la mayoría de las cuencas reales.

II.1.4.1. Breve Explicación del Funcionamiento Interno del Modelo SIMGES

Como ya se ha dicho, con el modelo SIMGES, la simulación y gestión del subsistema superficial, se van a resolver simultáneamente mediante el uso de un algoritmo de optimización de redes de flujo conservativo.

Para utilizar el modelo SIMGES, hay que proporcionar un esquema del usuario (para el sistema del río Grande se describe el esquema en el CAPITULO V), mismo que constituye una red de flujo. Pero dicha red no cumple el requisito de ser conservativa, pues no es cerrada y hay nudos en los que hay almacenamiento (los correspondientes a los embalses). Por tanto, la primera tarea del modelo después de la lectura de datos es la adaptación del esquema del usuario como una red de flujo conservativo. Para ello es necesario, por una parte, el establecimiento de unos nudos de cierre de la red, y por otra, el desdoblamiento de cada elemento tipo en un subesquema de arcos y nudos tal que aseguren que la simulación del comportamiento hidráulico y de gestión del elemento es adecuada. El resultado es una red de flujo interna, mucho más compleja que la del usuario, que ya es conservativa, y que es la que manejará el modelo SIMGES sin trascendencia exterior al usuario.

Una vez confeccionada dicha red interna, se entra en la dinámica de la simulación, en la que para cada mes del período de simulación se resuelve la red de flujo con los valores de aportaciones, demandas, y parámetros de gestión correspondientes a ese mes, se simulan los acuíferos, se itera entre estos dos últimos pasos (debido a las no linealidades y a las relaciones río-acuífero), y se almacenan valores para su escritura anual y estadísticas.

Finalmente, una vez terminado el período de simulación, se procede a la confección de estadísticas, y cálculos de garantías.

II.1.4.2. Elementos del Modelo de Simulación SIMGES

La definición de unos elementos tipo, que son combinados por el usuario de diferentes formas, permite la adaptación del modelo SIMGES a cualquier esquema propuesto. Los elementos considerados para construir el esquema del sistema son:



a) Embalses (superficiales), con su aportación intercuenca incluida. Quedan definidos mediante sus parámetros físicos, sus parámetros de gestión (volúmenes máximos, volúmenes objetivos, y prioridad de almacenamientos con respecto a otros embalses).



b) Aportaciones intermedias, se consideran como tales aquellas que no puedan ser consideradas o no convenga sean consideradas directamente como entradas de embalse.



c) Conducciones, se contempla bajo esta misma denominación a los tramos de río, canales, y cualquier otra conexión que convenga establecer. Quedan definidas por sus parámetros físicos (incluyendo capacidades máximas), y por sus posibles caudales mínimos (normalmente ecológicos). Se distingue en este grupo de conducciones cinco tipos:



• Tipo 1.- Responden básicamente a la definición del párrafo anterior.



• Tipo 2.- Contemplan pérdidas por filtración en el cauce.



• Tipo 3.- Contemplan conexión hidráulica entre el río y un acuífero subyacente, y por tanto flujo del acuífero al río y viceversa, en función del estado del acuífero.



• Tipo 4.- responden a la definición del tipo 1 con caudal máximo instantáneo función de la diferencia de cota entre la entrada y la salida de la conduccion. Si en su origen o final se tiene un embalse, se considera la variación de cota a efectos de determinar el máximo que puede circular a lo largo del mes.



• Tipo 5.- Se trata de conexiones hidráulicas entre nudos y/o embalses, para las que el caudal circulante es función de la diferencia de cota entre sus extremos. La circulación de agua

puede tener lugar en ambos sentidos y se considera la variación de cota que pueda tenerse en los embalses a lo largo del mes.



d) Demandas consuntivas, son aquellos elementos que utilizan el agua y en los que parte de ella es consumida y por tanto se pierde para el sistema. Quedan incluidas dentro de este tipo tanto las zonas regables como las demandas urbanas e industriales. Se definen por su curva de demanda, sus parámetros de consumo, sus tomas y su conexión con algún elemento de retorno. Se admite el suministro a una misma zona a partir de distintas fuentes.



e) Elementos de retorno, son simplemente definiciones de puntos de reintegro de agua al sistema provenientes de demandas consuntivas.



f) Demandas no consuntivas (centrales hidroeléctricas), son aquellos elementos que utilizan el agua sin consumirla. Se definen mediante sus datos físicos y de producción y por su caudal mensual objetivo a utilizar.



g) Recarga artificial, son elementos cuyo flujo va a recargar acuíferos, utilizándose para tal fin los sobrantes. Se definen por sus características físicas.



h) Bombeos adicionales, son elementos de captación de agua procedente de acuíferos que es incorporada al sistema superficial para su utilización en lugar distinto de la zona donde se efectúa el bombeo.



i) Acuíferos, quedan definidos mediante sus parámetros físicos y mediante unos parámetros de explotación, que una vez rebasados anulan las extracciones. SIMGES permite contemplar varios modelos de acuíferos.

II.2. REGLAS DE OPERACIÓN PARA UN SISTEMA DE RECURSOS HÍDRICOS (SRH)

Al tratar cualquier aspecto relacionado con SRH, es muy importante señalar que para lograr una gestión eficiente de los mismos, debemos considerar las reglas de operación de estos como un elemento fundamental, ya que contribuyen de manera determinante a controlar e incluso a mitigar los efectos de la naturaleza aleatoria (sequías, fuertes lluvias).

Considerando que los principales responsables de la demanda a nivel mundial son el riego agrícola, la industria, los usos domésticos y la generación de energía, que de ellos, el más importante es la agricultura con un 70% aproximadamente, se hace evidente que la satisfacción de las necesidades globales de alimentación constituye el factor del desarrollo más amenazado por la escasez del agua; pero más allá de la importancia que tiene asegurar la producción de alimentos, el objetivo esencial de establecer reglas de operación eficientes, y más aún de la gestión de los mismos SRH es el denominado desarrollo sostenible; se entiende por sistemas de

recursos hídricos sostenibles aquellos que se diseñan y gestionan para contribuir plenamente, ahora y en el futuro a los objetivos de la sociedad, preservando su integridad hidrológica y medioambiental, lo cual se logra en una perspectiva a largo plazo, dentro de la cual una de las consideraciones más importantes es la *toma de decisiones bajo condiciones de incertidumbre*.

Lo anterior, conduce a la necesidad de una gestión eficiente de los SRH, cuya importancia será cada vez mayor, ya que la cantidad de agua en la tierra es constante y la población y sus demandas son crecientes.

En resumen, las máximas preocupaciones que hay actualmente en materia de recursos hídricos se fundamentan en el aumento de la demanda causado por el crecimiento de la población combinado con la necesidad de evolución basada en un desarrollo sostenible.

La comprensión de la dinámica de los SRH y de la compleja interacción de los factores y variables que rigen su comportamiento, exige el desarrollo de teorías, técnicas, modelos y algoritmos, mediante los cuales se pueda tener una aproximación a la realidad física. Lo anterior, se viene desarrollando desde hace bastante tiempo pero es a partir de la década de los cincuentas que toman mayor auge, gracias al surgimiento del Análisis de Sistemas mismo que a su vez es propulsado por la aparición de los ordenadores.

El análisis de sistemas resulta particularmente útil cuando se trata de establecer la forma en que debe usarse un recurso escaso, gracias a que su aplicación permite entender mejor el sistema y sus relaciones internas, ampliar la información básica que se tiene de él, y predecir las posibles consecuencias de las distintas alternativas. Cabe mencionar que, la principal herramienta de la que se vale el análisis de sistemas para abordar el problema de gestión, es la Simulación Matemática; misma que se utiliza ampliamente en el Capítulo V y Capítulo IV del presente trabajo de tesis.

Algunos autores (López, 1993; Loucks, 2000) son más enfáticos al destacar que la gran virtud de la simulación es que ayuda a planear la expansión de los SRH y a determinar su gestión más conveniente, previendo los posibles impactos de cualquier plan o política de operación.

Como ya se ha mencionado, la teoría del desarrollo sostenible se ha convertido durante los últimos años en un objetivo que condiciona la evolución de la planeación de SRH. Diversos autores enlazan la sostenibilidad de los recursos con la evaluación del riesgo y la incertidumbre de los procesos hidrológicos. Todo trabajo de análisis requiere realizar dos tareas básicas: primero, la preparación y planeación de lo que se va a hacer, y posteriormente, poner en práctica lo planeado. En la gestión de SRH esta distinción sigue siendo válida, aunque a veces, ambas actividades se mezclan debido a la especial característica de los SRH que es la incertidumbre sobre la cuantía de las aportaciones futuras.

Dentro de la planeación se incluyen todos los trabajos orientados a definir el propio sistema, infraestructuras, concesiones, garantías y también los estudios que proporcionan las reglas de operación que delimitan las decisiones a tomar durante la operación del sistema. Las reglas de operación en general persiguen la mejora en el uso de los recursos del sistema; este objetivo tiene una componente fundamental que es la reducción de los impactos causados por las sequías. La planeación y la operación de sistemas necesariamente deben estar muy vinculadas ya que el desarrollo de reglas de operación debe contar siempre con los intereses y procedimientos implicados en la gestión.

Las sequías son un fenómeno complejo y difícil de identificar, se puede decir que una sequía se da en un periodo de tiempo y una zona geográfica en que se sufre una escasez de agua en relación con los volúmenes normales. Una definición más adecuada de sequía requiere primero ubicarla en una determinada perspectiva, Wilhite (1985) define la sequía dentro de 4 tipos:

- a) Sequía meteorológica; corresponde a un periodo de tiempo con precipitación por debajo de un determinado umbral.
- b) Sequía agrícola; cuando la duración de la sequía meteorológica es tal que genera un déficit de evapotranspiración en los cultivos.
- c) Sequía hidrológica; se daría cuando los caudales circulantes en un punto de un río estén por debajo de un determinado umbral.
- d) Sequía socioeconómica; esta, expresa características de los efectos sociales y económicos causados por las sequías meteorológicas, agrícolas o hidrológicas.

Sánchez (1999) después de repasar los conceptos anteriores de sequía introduce otro concepto de sequía llamado Sequía Operativa que es el periodo durante el cual permanece en estado de fallo un SRH. Esta sequía operativa puede ser consecuencia de una sequía hidrológica, pero no siempre es así, puesto que el fallo en un uso puede también tener su origen en un mal diseño del sistema, en una mala gestión, en un accidente, o incluso en una combinación de dos o más de estas causas. De entre las definiciones anteriores, la sequía operativa depende en gran medida de la gestión que se hace del sistema, en consecuencia, es la que ocupa la mayor parte de los trabajos orientados a la operación de sistemas por su gran importancia económica y social.

Las sequías operativas en un SRH concreto se manifiestan en un déficit de suministro a las demandas establecidas en el mismo.

Es evidente pues, que un SRH en estado de sequía sufre impactos de diversa índole (medioambiental, sociopolítico, económico, etc.), esto ha creado la necesidad de adoptar medidas de mitigación de esos efectos, que tienen como finalidad reducir los daños y las pérdidas económicas asociadas a ellos. Como ejemplo de medidas preventivas podemos mencionar las siguientes, trasvases entre cuencas, uso conjunto de aguas subterráneas y superficiales, programación de reducciones en el suministro, reciclaje de aguas residuales, desalinización de agua de mar y explotación alternativa de fuentes subterráneas, etc. Por otro lado, las medidas correctivas están casi siempre orientadas a hacer ajustes en el suministro o bien en la demanda. Es razonable entonces, pensar que cualquier estrategia que se vaya a adoptar en alguna de esas direcciones, deba pasar primero por la evaluación previa del comportamiento del SRH en estudio.

En el libro Sánchez y otros (2001), se presenta una metodología de gestión basada en la estimación del riesgo de fallo en sistemas complejos de recursos hídricos, también define una clasificación de las actuaciones que pueden adoptarse de cara a la prevención de sequías, que distingue entre la operación determinista de sistemas y la operación basada en el riesgo. El primer caso se refiere a reglas de operación que son definidas en la planeación y se aplican directamente durante la operación. Por el contrario, en el segundo caso las reglas de operación no definen las decisiones a tomar en la gestión, sino que dan una estimación de las consecuencias que puede tener una decisión concreta. Tales consecuencias se miden en estimaciones del riesgo asociado a una decisión.

Las políticas de operación a adoptar están condicionadas por los años secos, medios y húmedos que se puedan dar según la abundancia de lluvia, escorrentía y reservas que exista.

De manera análoga, la gran variabilidad de los recursos hídricos hace que incluso en cuencas con permanentes problemas de escasez de agua, ocasionalmente puedan darse situaciones de abundancia de recursos; esta situación podría derivar en riesgo de vertidos que, naturalmente deben ser previstos y tratados con la diligencia necesaria.

El desarrollo histórico de las cuencas se ha producido con el objetivo de obtener un mayor grado de aprovechamiento de los recursos y de una reducción de los efectos de las sequías hidrológicas y de las crecidas.

Durante la operación de los SRH así desarrollados, pueden darse inevitablemente situaciones en las que no sea posible suministrar de forma satisfactoria los usos establecidos (sequía operativa). De acuerdo con las definiciones anteriores de sequía, esta situación estará normalmente relacionada con una sequía hidrológica pero, también puede deberse a un defecto de gestión. El diseño de un SRH pasa por el diseño de su configuración física (infraestructuras y suministros previos), y por el diseño de reglas de operación adecuadas.

Las reglas de operación de SRH son las herramientas que sirven de guía para la toma de decisiones durante la operación del sistema. El uso de una regla u otra, o de ninguna regla, es determinante para el desarrollo y rendimiento del sistema; un mismo sistema de recursos hídricos, con diferentes criterios de gestión, puede dar rendimientos muy diferentes (Solera, 1997).

Resulta conveniente, hacer una separación y clasificación de los diversos problemas para ser tratados de la forma más independiente posible, considerando que en muchas ocasiones se han tratado conjuntamente los problemas de planeación, operación y reglas de operación; las reglas de operación han de ser desarrolladas y ensayadas en la fase de planeación del sistema, y es en la fase de operación cuando se aplican. El modo de obtener las reglas de operación es mediante el ensayo con modelos matemáticos.

II.2.1. Reglas de operación genéricas

La regla más sencilla, y probablemente la más utilizada en la práctica, es la regla de operación normal o estándar, que se representa en la Figura II.2.1 y en la Ecuación II.1; consiste en suministrar la totalidad de la demanda mientras se dispone de agua y toda el agua disponible cuando su cantidad es inferior a la demanda.

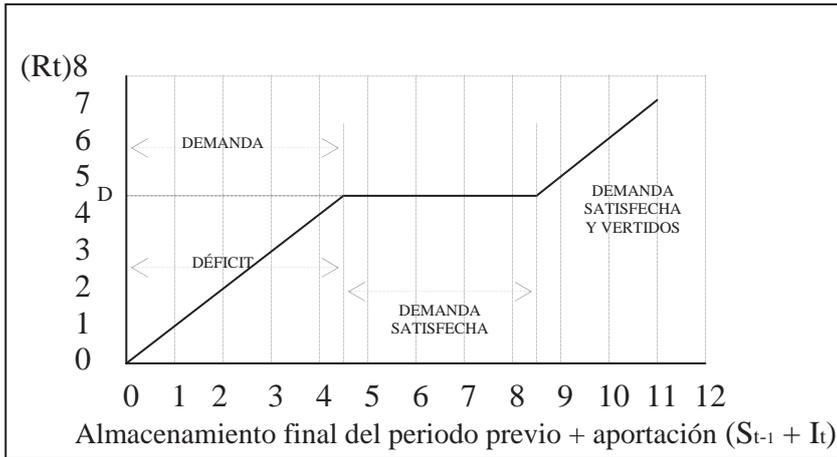


Figura II.2.1: Regla de Operación Normal

$$\begin{aligned}
 R_t &= S_{t-1} + I_t & \text{si} & \quad S_{t-1} + I_t \leq D_t \\
 R_t &= D_t & \text{si} & \quad D_t \leq S_{t-1} + I_t \leq C \\
 R_t &= S_{t-1} + I_t - C & \text{si} & \quad S_{t-1} + I_t - D_t > C
 \end{aligned}
 \quad \left| \quad \text{Ecuación II.1}$$

Donde: R_t = Sueltas de Embalse durante el periodo t
 S_t = Volumen Almacenado en el Embalse al Final del periodo t
 I_t = Entradas durante el periodo t
 D_t = Demanda en el periodo t
 C = Capacidad del embalse

Esta es una regla determinista, y además no es la más apropiada para sistemas habituales en los que las pérdidas ocasionadas por fallos no son lineales con respecto a la cuantía del déficit. Si se quieren disminuir los efectos negativos de grandes déficit, la regla se puede modificar con la definición de indicadores de alarma (por ejemplo, un volumen crítico de embalse) y el consiguiente establecimiento de restricciones. La Figura II.2.2 y la Ecuación II.2 muestran un ejemplo de reglas de operación con restricciones.

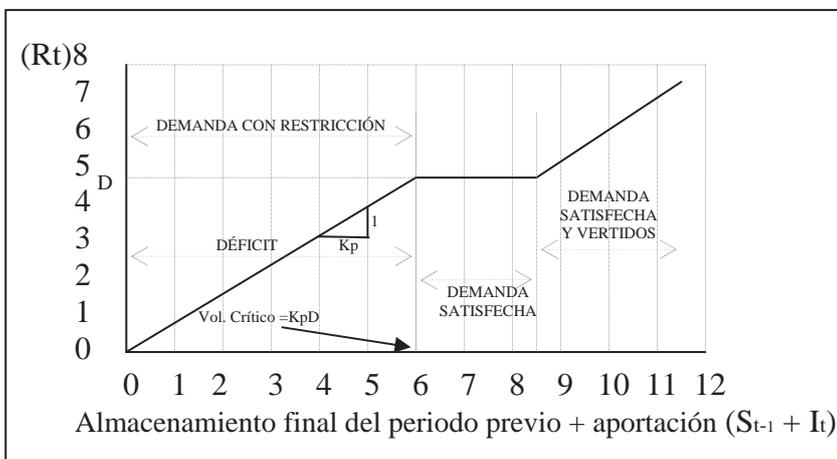


Figura 2.2.2. Regla con restricción anticipada

$$\begin{aligned}
 R_t &= \frac{1}{Kp} (S_{t-1} + I_t) & \text{si } S_{t-1} + I_t < Kp \bullet D_t \\
 R_t &= D_t & \text{si } Kp \bullet D_t \leq S_{t-1} + I_t \leq C \\
 R_t &= S_{t-1} + I_t - C & \text{si } S_{t-1} + I_t - D_t > C
 \end{aligned}$$

Ecuación II.2

Donde: Kp = Pendiente del tramo con restricción
 El resto de variables con el mismo significado que en la Ecuación II.1

En la práctica, es más realista la definición de escalones en las restricciones, que consiste en la definición de intervalos de volumen embalsado en los que el valor de la restricción es el mismo (Figura II.2.3). Cabe mencionar que este método es muy utilizado en la práctica, porque resulta mucho más comprensible y facilita el diálogo con los usuarios.

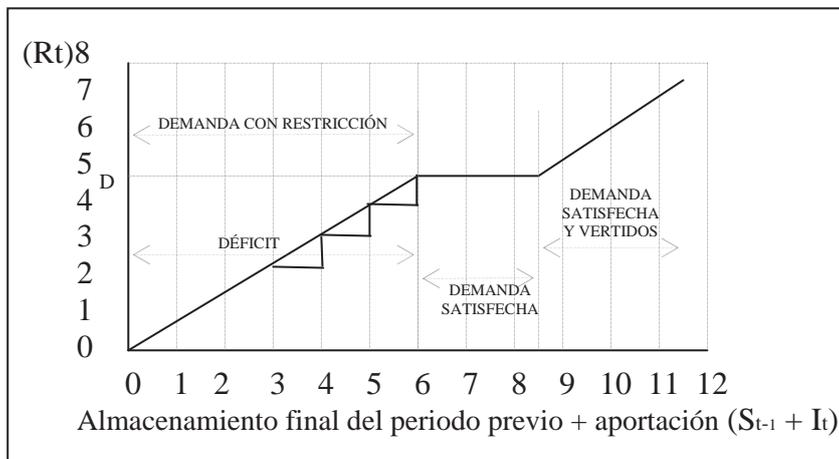


Figura II.2.3: Regla de operación escalonada

La definición de este tipo de reglas de operación requiere dar respuesta a más preguntas que las anteriores, como son:

- ¿Cuántos escalones se definen?
- y para cada escalón:
- ¿Cuándo se comienza la restricción?
- ¿Cuánta es la restricción adecuada?

La aplicación de este tipo de reglas es limitada al estar definidas para sistemas con un solo embalse y una sola demanda, aunque muchos casos reales se pueden simplificar para su análisis a un problema de este tipo. Asimismo, en sistemas en los que más de un embalse puede ser utilizado como fuente para abastecer un mismo uso, la regla no determina cuanta agua se debe extraer de cada fuente de recursos. Para ello, pueden utilizarse reglas que tratan de mantener el mismo porcentaje de espacio vacío en los embalses que pueden ser utilizados en paralelo.

Desde el punto de vista del análisis de sistemas para el diseño de reglas de operación se pueden citar diversos métodos. Chaturvedi (1987) distingue entre planeación determinista, simulación estocástica, optimización estocástica implícita y optimización estocástica explícita

en función del tipo de datos de aportaciones de caudal y del método matemático de análisis utilizado, **todos ellos dan lugar a reglas de operación fijas o deterministas.**

De cara a la fase de operación estas reglas no dan una idea del riesgo asociado a la decisión (Sánchez y otros, 2001). **Para incorporar el riesgo en el proceso de decisión es necesario recurrir a reglas de operación estocásticas.** Ejemplo de este tipo de reglas se encuentra en la regla de decisión lineal con restricción-riesgo (Revelle et al, 1969; Revelle y Gundelach, 1975; Loucks, 1970), y la regla de programación de la garantía con restricción-riesgo (Colorni y Fronza, 1976; Simonovic y Marino, 1980). Estas reglas estocásticas se han obtenido en la mayor parte de los casos para sistemas muy sencillos, resultando de difícil aplicación las metodologías que figuran en dichos trabajos a sistemas complejos con múltiples fuentes y usos del recurso.

Estas reglas más o menos elementales deben poder ser introducidas de forma general en modelos de simulación de cuencas de propósito general para poder abordar el problema de definir las reglas de operación para sistemas reales.

Las reglas anteriores pueden dar una gestión eficiente en sistemas sencillos, sin embargo cuando se estudian sistemas reales normalmente este tipo de reglas no son suficientes, y es necesario recurrir al uso de modelos matemáticos de simulación que permitan estudiar distintas alternativas de gestión para deducir las más apropiadas.

Velasco y Collado (2000) calculan unas políticas de operación óptimas para algunos embalses en México haciendo uso de un modelo de optimización. Para el diseño de estas adoptan como referencia la situación en el mes de Octubre para la definición de la regla de operación de todo el año. Como indicadores de estado se basan en el volumen almacenado a final de este mes y las aportaciones totales durante el año anterior. Distinguen entre año seco, medio o húmedo según sea la aportación del año anterior; y formulan una regla de sueltas para el año siguiente distinta según sea el año seco (Ecuación II.3), medio (Ecuación II.4) o húmedo (Ecuación II.5). La principal limitación de esta técnica es que se aplica a embalses aislados, sin considerar la gestión conjunta de todos los embalses de la cuenca.

$$R_t^* = \mu \cdot S_t + \alpha + \beta_1 \cdot Q_{t-1} \quad \text{si} \quad \sum_{j=1}^{12} Q_{j,t-1} < V_1 \quad \text{Ecuación II.3}$$

$$R_t^* = \mu \cdot S_t + \alpha + \beta_1 \cdot V_1 + \beta_2 \cdot (Q_{t-1} - V_1) \quad \text{si} \quad V_1 < \sum_{j=1}^{12} Q_{j,t-1} < V_2 \quad \text{Ecuación II.4}$$

$$R_t^* = \mu \cdot S_t + \alpha + \beta_1 \cdot V_1 + \beta_2 (V_2 - V_1) + \beta_3 \cdot (Q_{t-1} - V_2) \quad \text{si} \quad V_2 < \sum_{j=1}^{12} Q_{j,t-1} \quad \text{Ecuación II.5}$$

Donde: R_t^* = Valor óptimo de Suelas del Embalse
 $\mu, \alpha, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ = Son los parámetros que definen la regla de operación.
 S_t = Volumen almacenado a final del mes de Octubre
 Q_{t-1} = Valor de la aportación en el año anterior
 V_1, V_2 = Umbrales que delimitan los años secos, medios y húmedos según el valor de la aportación anual, que se calculan como los porcentajes 33 y 66 de las aportaciones históricas.

Cuando se hace uso de modelos de simulación, estos permiten el tratamiento de un gran volumen de información, lo que hace posible el análisis de SRH mediante métodos

estocásticos, frente a los anteriores que llamaremos métodos deterministas. Los métodos estocásticos permiten realizar estudios de probabilidad y riesgo de fallo en los SRH.

En Sánchez y otros (2001) se propone un método de operación de sistemas basado en la estimación del riesgo, que parte de la generación estocástica de múltiples escenarios hidrológicos basados en la situación presente del sistema, seguida de la simulación de la gestión del sistema para todos los escenarios, lo que da una muestra de múltiples resultados posibles de la gestión que puede ser analizada por métodos estadísticos para deducir el riesgo de fallo del sistema durante los próximos meses. Este método de operación requiere el desarrollo previo de unas reglas de operación basadas en el mismo que permitan interpretar correctamente los estadísticos que se obtienen.

En resumen, se puede encontrar reglas de operación deterministas que definen exactamente la forma de proceder en una situación dada de un sistema. También se pueden encontrar reglas de operación basadas en criterios de riesgo, las cuales en lugar de proponer un modo de operación dan información del riesgo asociado a una decisión determinada. Los sistemas reales requieren para su gestión de un conjunto de reglas de operación, pudiendo mezclarse reglas de operación deterministas con reglas estocásticas.

II.2.2. Concepto de gestión de un Sistema de Recursos Hídricos

Para manejar un SRH en cada unidad de tiempo de decisión (usualmente cada mes) es necesario contestar al menos las siguientes preguntas:

1. ¿Cuánta agua se va a suministrar?
2. ¿Cuál será la asignación del agua entre los diferentes usos?
3. ¿Cuál será la procedencia del agua entre las diferentes fuentes?
4. Además es conveniente tener información sobre ¿en qué situación queda el sistema para afrontar los periodos de tiempo siguientes? Es decir, ¿qué probabilidades hay de que el funcionamiento sea satisfactorio en los próximos periodos?

Para responder estas cuestiones es necesario, como mínimo, partir del conocimiento de la situación actual de las reservas disponibles (estado de almacenamiento en los embalses).

Para definir la gestión de un SRH utilizaremos el concepto de **Estrategias de Operación**. Éstas, son un conjunto de reglas, procedimientos, criterios, etc., que establecen una relación entre la situación actual de todo el sistema y todas las variables de decisión que responden a las preguntas formuladas arriba.

El diseño de estrategias de operación requiere un análisis del sistema que demuestre la idoneidad de las mismas para obtener el mejor rendimiento del sistema en situaciones futuras.

Como se ha mencionado anteriormente, el análisis del sistema puede realizarse con un enfoque **determinista** y/o un enfoque **estocástico**.

- El enfoque determinista consiste en analizar el comportamiento del sistema frente a situaciones hidrológicas concretas (por ejemplo, la hidrología histórica), y a partir del mismo, definir la estrategia de operación.

- El enfoque estocástico, sin prescindir de las reglas de operación deterministas, establece además unos “procedimientos de operación no deterministas” que proporcionan información acerca de la situación en que quedaría el sistema en términos probabilísticas según cada una de las posibles decisiones que podrían tomarse. Dejando libertad de decisión al responsable de la gestión. Los procedimientos de operación no deterministas dan respuesta a la 4ta. pregunta planteada arriba.

El uso de reglas de operación deterministas tiene la ventaja de que permite realizar una gestión totalmente objetiva, pero a veces esto es sólo en teoría, pues en la realidad, en situaciones críticas las reglas de operación deterministas no son usadas rigurosamente, sino que la decisión es resultado de un diálogo o negociación más acorde con el tipo de gestión no determinista.

En un sistema de recursos hídricos se puede distinguir entre tres situaciones diferentes, basándose en los problemas que pueden implicar unas estrategias de operación inadecuadas. Estas son: situación de sequía o riesgo de sequía, situación de riesgo de vertidos o alta probabilidad de que se generen excedentes no aprovechables, y situación intermedia o de tranquilidad.

En el caso de riesgo de sequía son necesarias estrategias de operación encaminadas a la anticipación y la mitigación. Estas medidas pueden incluir el uso sustitutivo de otras fuentes de recursos o una reducción controlada del suministro a determinados usuarios, con el consiguiente costo asociado. Una reducción excesiva del suministro o una anticipación excesiva en la identificación de esta situación implicaría costos innecesarios impuestos sin verdadera necesidad. Por el contrario, si las medidas de mitigación no son suficientes o no se realizan con la suficiente anticipación, estas pueden ser ineficaces, lo que daría como resultado, unos mayores déficit futuros con costos mucho más elevados.

En el caso de una alta probabilidad de vertidos, las estrategias de operación deben encaminarse a aumentar el volumen de agua utilizado. De esta manera se consigue en primer lugar maximizar la rentabilidad del sistema, y en segundo lugar reducir el riesgo de que puedan producirse avenidas en el sistema con sus daños asociados. En este caso, una anticipación excesiva tendría como consecuencia negativa la reducción de los recursos futuros para usos más importantes, y la posibilidad de generación de sequías operativas que podrían haberse evitado. Por otro lado una falta de anticipación reduciría el aprovechamiento del sistema o aumentaría el riesgo de avenidas.

La delimitación de cada una de estas fases o situaciones no es nada fácil, ya que depende de criterios previos que no pueden ser totalmente objetivos, y a demás, los resultados dependen de la hidrológica futura, que es desconocida y variable. Para esta delimitación se puede recurrir a criterios rígidos y objetivos, lo que da lugar a las reglas de operación deterministas ya descritas. Y también se puede recurrir al análisis por métodos estadísticos de las consecuencias esperables para las distintas alternativas de decisión consideradas para llegar a una decisión mas acorde con los criterios e intereses actuales de todas las partes implicadas, lo que daría lugar a procedimientos de operación estocásticos.

II.2.3. Reglas de Operación Deterministas

En los sistemas reales más complejos, las reglas de operación deterministas dejan de ser tan claras y deben ser estudiadas para su validación. Dicho estudio implica necesariamente el uso de modelos matemáticos.

a) Regla para determinar el volumen del suministro

En un órgano de gestión de cuencas se tiene identificado con mayor o menor detalle los volúmenes de agua asignados a cada demanda en la cuenca. En consecuencia, en situaciones normales el volumen de suministro ha de corresponder con la totalidad de las asignaciones.

Sin embargo, tales asignaciones vienen asociadas con una garantía. La garantía en los SRH, cualquiera que sea su definición ha de contemplar la posibilidad de una reducción ocasional en el suministro debido a que la variabilidad de los recursos naturales hace que se den situaciones de sequía. Esto supone que se dará en el futuro alguna situación en que no es posible mantener el nivel de suministro habitual produciéndose una sequía operativa.

Cuando se trata de un SRH que dispone de regulación, es posible y conveniente la aplicación de políticas de aplicación que contribuyan a la anticipación y mitigación de los efectos de las sequías. Tales políticas suelen consistir en el uso de recursos alternativos o en la aplicación de restricciones en el suministro cuando el nivel de las reservas baja de un límite dado.

Para evaluar estas políticas eficientemente en un SRH real, es necesario evaluar en su conjunto todas las propiedades del sistema y deducir normas de gestión completas para todo el sistema. Esto no es posible hacerlo por métodos directos, y la única solución posible es el uso de modelos matemáticos. Estos modelos permiten combinar los criterios de gestión de cada componente con las relaciones entre ellas, para reproducir el funcionamiento completo del SRH y deducir el conjunto de reglas de operación que contribuyen a la mejor gestión del sistema.

b) Reglas para la asignación de recursos entre distintos usos

En este punto se revisan los diferentes tipos de uso del agua con el propósito de deducir los criterios básicos a tener en cuenta en la definición de reglas de operación deterministas que definen el reparto de agua entre los distintos usos que existen en una cuenca.

La situación deseable en un sistema de recursos hídricos es aquella en que el volumen de recursos disponibles supera holgadamente al volumen de las demandas. A esta situación se le puede llamar situación normal, y como mencionábamos anteriormente, en ella se suministraría la totalidad de las demandas.

Sin embargo, como se ha dicho, en un sistema de recursos hídricos se dan situaciones de sequía en que el recurso no es suficiente para suministrar todas las demandas y tal caso una medida de mitigación es no dar toda el agua que requiere alguna demanda, con los correspondientes perjuicios que esto supone. Para decidir los usos sobre los que aplicaran

restricciones en el suministro se necesita establecer un orden de preferencia o prioridad entre las demandas o usos del agua.

En el caso de tener una situación de sequía en que es necesario aplicar restricciones en el suministro a una demanda determinada es necesario decidir de forma justificada el valor de las restricciones. Será necesario realizar un estudio sobre la relación entre el déficit de suministro a una demanda y el costo del mismo. De este modo se puede deducir una serie de escalones en el valor de la demanda, de manera que el costo de no suministrar cada uno de ellos suponga un incremento importante frente al anterior.

- **Usos Urbanos**

En un uso urbano puede definirse escalones según los siguientes criterios:

- a) Un primer escalón sería el ahorro de agua que se consigue por ahorro de los consumidores mediante una campaña de información pública sobre la situación de riesgo de agotamiento de los recursos y la necesidad de ahorro.
- b) Los siguientes escalones mucho más costosos se conseguirían mediante la programación de cortes intermitentes en el suministro de agua. Sería necesario estudiar la relación entre el tiempo de corte del suministro y el ahorro conseguido.

- **Usos Agrícolas**

En el caso de un uso agrícola la definición de escalones dependerá mucho del tipo de cultivos de que se trate. En general, los escalones se generarán en base a los siguientes criterios:

- a) El primer escalón ha de ser la adopción de medidas de control en el riego y los turnos de riego que pueden mejorar la eficiencia global del sistema.
- b) El segundo escalón sería forzar en los cultivos un cierto estrés hídrico que reducirá la producción, pero no se perderá la cosecha.
- c) Si las medidas se adoptan con suficiente antelación, otro escalón puede consistir en la elección de cultivos de menor consumo de agua.
- d) Si la temporada de riego ya ha comenzado y la situación lo justifica, se podría recurrir al abandono durante el cultivo de cosechas menos productivas.
- e) El último escalón es llegar a perder todos los cultivos de temporada para salvar el arbolado, perdiendo también la producción del mismo en esta temporada.

- **Usos Hidroeléctricos**

En el caso de un uso hidroeléctrico, el criterio es diferente. Diariamente el precio de la energía es variable, de manera que si se reduce las horas en que se turbinan el precio de la energía es mayor. Esto significa que si se analiza el suministro a escala mensual, a diferencia de como ocurre con los usos consuntivos, el beneficio obtenido en una central hidroeléctrica por unidad de volumen de agua suministrado sería decreciente.

Así pues, en el caso de aprovechamientos hidroeléctricos, las pérdidas asociadas a la reducción de suministro se deberían en mayor medida al posible aumento de los vertidos de embalses no turbinados. Por esta razón, las reglas de operación deben ir encaminadas a reducir estos vertidos.

Cuando se comparan dos usos con diferente prioridad como son el abastecimiento y el riego, puede procederse como en el caso anterior, definiendo escalones en ambas demandas, y ordenando escalones en ambas demandas y ordenando estos escalones mediante prioridades marcadas por es costo económico y social de cada una de las restricciones.

c) Reglas para la gestión de embalses

Las reglas anteriores se definen para decidir el reparto de agua entre diferentes usos. Cuando se dispone además de varios embalses en un sistema de recursos hídricos es necesario determinar también la procedencia del agua que se suministra. Para responder a esta cuestión es necesario definir reglas para la operación conjunta de la totalidad de los embalses y demás recursos disponibles en el sistema.

Las restricciones vistas anteriormente, mismas que van en función de la preferencia entre las demandas, dependen del volumen de los recursos del sistema en cada momento, que consiste principalmente en el almacenamiento de embalse.

En un sistema de recursos hídricos con múltiples embalses y múltiples demandas habrá demandas que puedan servirse desde cualquier embalse, y también demandas que solo se puedan abastecer desde uno o algunos embalses, en estos casos será necesario establecer reservas en estos últimos embalses para que los criterios de prioridad entre las demandas puedan cumplirse.

Cuando el volumen total de reservas se acerca a la capacidad de almacenamiento del sistema, el criterio de operación pasa a ser la maximización de los recursos regulados y también la protección del sistema contra vertidos. Para ello será necesario gestionar una correcta distribución de las reservas entre los embalses para que el espacio libre quede en los embalse que van a recibir más aportaciones.

En el caso de tener embalses dispuestos en serie, será más conveniente consumir antes el agua del embalse de aguas abajo que del de aguas arriba porque el resultado es siempre una reducción del volumen total de agua vertida conocida como **regla de almacenamiento aguas arriba**.

En al caso de tener embalses dispuestos en paralelo, no existe la ventaja anterior de que los vertidos de uno se puedan almacenar en el siguiente, sino que los vertidos de cualquiera de los dos saldrían del sistema. Por esta razón, ha de evitarse que un embalse esté lleno mientras el otro está vacío. Debido a esto Maas et al (1962) formularon la **regla del espacio vacío** que consiste en condicionar las sueltas tratando de mantener un volumen vacío en cada uno de los dos embalses proporcional a las aportaciones medias esperadas en cada uno de ellos.

Al igual que para los usos, en la modelación de los embalses se ha de definir distintas prioridades para primar el almacenamiento de agua en unos embalses más que en otros, logrando con esto un reparto más homogéneo del agua entre los embalses.

d) Reglas para la gestión de acuíferos

Podría decirse que los acuíferos son un embalse natural de agua. Sin embargo existen numerosas diferencias importantes entre los acuíferos y los embalses como órganos de almacenamiento de agua:

- La extracción del agua subterránea es generalmente más cara que el agua superficial.
- Un embalse tiene pérdidas por evaporación que no tiene un acuífero.
- Los embalses pueden tener usos múltiples como es de contención de avenidas que requiere tener el embalse parcialmente vacío.
- El flujo en acuíferos es más lento.
- El flujo en acuíferos es menos controlable que en embalses.

Con frecuencia, el volumen que puede almacenar un acuífero es de una magnitud superior al de los embalses superficiales. Esto hace que el servicio a la demanda esté garantizado si se crea la capacidad de extracción necesaria.

Estas condiciones hacen que los acuíferos sean un recurso adicional importante para aumentar la garantía de suministro del sistema superficial mediante el uso conjunto de las aguas subterráneas, que puede consistir en:

- el uso mayoritario de aguas superficiales en años húmedos y de aguas subterráneas en años secos.
- Efectuar recargas artificiales de acuíferos en años húmedos.

e) **Reglas para otros objetivos**

En un SRH real existen criterios y objetivos de uso que no se atienden únicamente mediante asignaciones de agua, sino que implican otros requisitos. Un ejemplo habitual es la necesidad de mantener la cota de embalse alta para aumentar la producción de las centrales de pie de presa.

En el análisis de sistemas de recursos hídricos, hay que considerar todas las condicionantes existentes y traducirlas en restricciones u objetivos que se modelan en las aplicaciones matemáticas desarrolladas para el análisis del sistema.

II.2.4. Procedimientos de Operación No Deterministas

Las reglas de operación mencionadas anteriormente, suelen ser reglas rígidas, además de que establecen una relación objetiva entre la situación del sistema en un momento dado y las decisiones consecuentes sobre la gestión. En la realidad, en situaciones críticas no suele actuarse de esta manera, lo habitual en tales situaciones es debatir la situación entre las partes implicadas para llegar a una decisión más acorde con los criterios e intereses actuales. Este es más acorde con los procedimientos de operación no deterministas.

A diferencia entre las reglas de operación deterministas, los procedimientos de operación no deterministas o reglas estocásticas, no proponen una decisión concreta, sino que con ellas se procede a evaluar por métodos estadísticos las probabilidades asociadas a la evolución futura del sistema como consecuencia de la adopción de cada una de las opciones de gestión propuestas. Con esta herramienta se puede disponer de un criterio objetivo para la

comparación de las consecuencias esperables de cada una de las decisiones propuestas, lo cual, facilita el diálogo y el entendimiento entre las partes implicadas en un momento dado en un conflicto de gestión.

Para obtener reglas estocásticas explícitas es necesario haber determinado los parámetros óptimos de la metodología propuesta por Sánchez (1999), obtenidos para el río Grande por Arellano (2002) y seguir los pasos que se desarrollan en el CAPITULO VI.

En Sánchez y otros (2001) se presenta la metodología de operación de SRH basada en la evaluación del riesgo de sequía. Esta metodología requiere el siguiente proceso (Figura II.2.4)

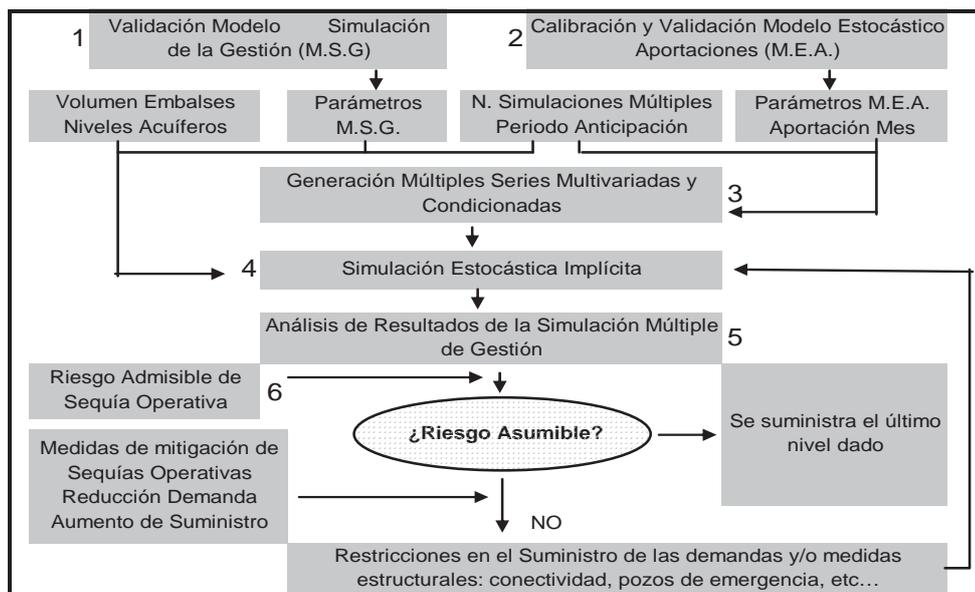


Figura II.2.4 Metodología de gestión de SRH basada en la evaluación del riesgo de sequía (Sánchez y otros, 2001).

La metodología de evaluación del riesgo consiste básicamente en los pasos 3,4, 5 y 6 representados en la Figura II.2.4. De ellos, los tres primeros constituyen un análisis de la gestión del sistema, mientras que el último incluye la toma de decisión, la cual se basa en:

- Asumir un determinado riesgo de fallo del sistema. Este riesgo se calcula como la probabilidad de que en una fecha futura dada se den unas condiciones desfavorables definidas.
- Asumir unas medidas de anticipación adecuadas frente a cada uno de los indicadores de fallo considerados

La asociación de los dos conceptos anteriores puede compararse a las reglas de operación deterministas escalonadas descritas anteriormente.

El modo de proceder en la gestión para determinar las medidas a adoptar consistiría en lo siguiente:

- Evaluar el riesgo correspondiente a la gestión normal

- b) Si el riesgo calculado es superior al valor a partir del cual se considera que se deben adoptar medidas, determinar en qué nivel de riesgo se encuentra el sistema.
- c) Definir las medidas de anticipación correspondientes a ese nivel en el modelo de análisis del riesgo para evaluar el riesgo correspondiente a la adopción de esas medidas.
- d) Si el nuevo riesgo calculado se encuentra en el mismo nivel de riesgo para el que se ha calculado, estas serán las medidas a proponer en la gestión, si por el contrario, el nivel de riesgo ha cambiado, habrá que volver al paso 3 con las medidas de anticipación correspondientes a este, hasta encontrar un nivel de equilibrio.

Para disponer de una estimación sobre riesgo de fallo futuro, es necesario disponer de los resultados de la gestión según un gran número de diferentes escenarios futuros equiprobables. Para ello, son necesarios los pasos siguientes: 1) Generación de múltiples series multivariadas sintéticas, 2) Simulación estocástica implícita, que consiste en realizar múltiples simulaciones de la gestión futura del sistema con múltiples escenarios; y 3) Análisis de resultados de la simulación, considerando los resultados de todas las simulaciones sobre cada elemento del sistema como una muestra estadística.

II.2.5. Incertidumbres en las Reglas de Operación

Se han hecho avances con respecto a considerar las incertidumbres como fenómeno inherente en las reglas de operación en un SRH. Las incertidumbres de los procesos hidrológicos (sequías, crecidas) y de las demandas impuestas, así como las incertidumbres económicas y sociales son los factores aleatorios que tienen mayor impacto en la operación de un SRH. Con los modelos matemáticos se logra ofrecer una aproximación certera de la realidad, simplificando la gran diversidad y complejidad de los sistemas en un número reducido de procesos claramente discernibles y en general fácilmente asimilables a las leyes físicas. Para la gestión de los SRH complejos ya sea en las etapas de planeación y/o operación se han hecho uso de modelos matemáticos en sus diversas formas: optimización, simulación. Los métodos de optimización estocástica generalmente no pueden acomodar todas las incertidumbres inherentes en la operación de un SRH del mundo real. Esto es debido parcialmente a la incapacidad de cuantificar la estocasticidad de cada uno de los procesos que se encuentra envuelto un SRH (por ejemplo el desarrollo económico, la migración poblacional y los cambios resultantes es casi imposible traducirlos en cantidad y distribución de agua a las demandas). El incluir varios aspectos de las incertidumbres dentro del análisis, daría como resultado una modelación más compleja y costosa.

La formulación de modelos estocásticos está en la mayoría de casos concentrada en la consideración explícita de una única incertidumbre, que se considere más relevante. Por lo que comúnmente, la única incertidumbre incluida en la etapa de diseño (fase de planeación) de las reglas de operación de un SRH esta frecuentemente asociada a la naturaleza estocástica de los caudales del río (incertidumbres hidrológicas).

CAPITULO III.- INTRODUCCIÓN AL SISTEMA DE RECURSOS HÍDRICOS DEL RÍO GRANDE DE MORELIA

III.1- AMBITO GEOGRAFICO DE ESTUDIO

III.1.1 Características Fisiográficas

La zona de estudio que se muestra en las Figuras III.1.1 y III.1.2 se localiza en la porción centro-norte del estado de Michoacán, entre los paralelos 19°35' y 20°05' de latitud norte y los meridianos 100°45' y 101°25' de longitud oeste. Geográficamente, colinda con: el estado de Guanajuato, al norte; el poblado de Quiroga al occidente; Zinapécuaro, al oriente y al sur, las sierras altas y mil cumbres.

Las elevaciones topográficas que se observan en la zona varían desde 1920 msnm, en la porción centro-norte (el lago de Cuitzeo y el poblado Álvaro Obregón) hasta de 2500 msnm.



Figura III.1.1.- Localización de la cuenca del río Grande de Morelia

La **cuenca del río Grande**, sub-cuenca de la cuenca del **Lago de Cuitzeo**, comprende un área de 1,577 Km² aproximadamente (río Grande de Morelia y afluentes). En altitudes del orden de 2000 msnm el río Grande de Morelia nace en los límites de la cuenca el lago de Pátzcuaro y la del río Turicato, afluente del Balsas. Sus principales tributarios son el río Tiripetí y el río Tirio que se unen un poco arriba de la población de Santiago Undameo. Su

principal afluente es el río Chiquito, que confluye con el río Grande en la parte oeste de la ciudad de Morelia. El río Chiquito se origina en los monte de la Lobera y la Lechuguilla.

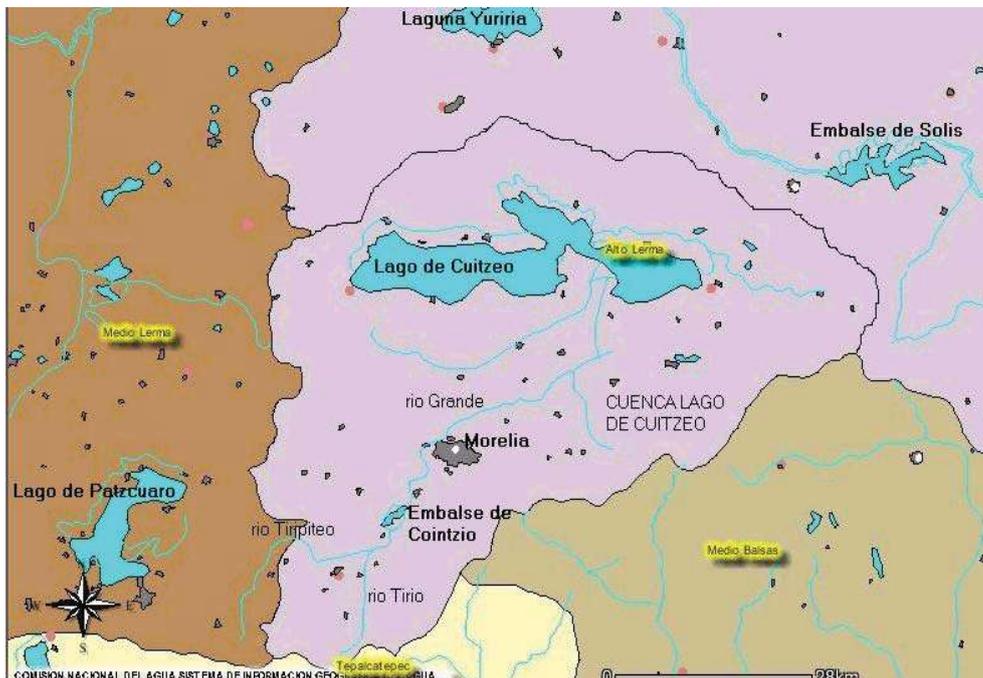


Figura III.1.2 - Localización de la cuenca del río Grande de Morelia

A unos 7 Km. debajo de Santiago Undameo se regula este río mediante la presa de almacenamiento Cointzio, que tiene usos múltiples (proporciona agua a Morelia, suministra agua de riego agrícola y regula las crecidas). Después el cauce continúa hacia el noreste en dirección a la ciudad de Morelia, recibiendo en ese trayecto la aportación de tres arroyos: el de la Huerta, el Retajo y el más importante, el río Chiquito de Morelia, y suministrando agua para el uso agrícola del distrito de riego No. 020 Morelia-Queréndaro hasta su desembocadura en el lago de Cuitzeo.

Después de pasar por la ciudad de Morelia, a unos 25 Km. aguas abajo se deriva una parte de su caudal mediante las presas Joconoles, hacia la margen izquierda y Zacapendo hacia la margen derecha.

Desde el punto de vista hidrológico el régimen de lluvias escurrimientos en la zona marca claramente el estiaje en el periodo noviembre-junio (aunque se pueden observar escurrimientos de consideración en el período marzo-mayo) y la temporada de lluvia es en el período junio-octubre.

III.1.2. Características Climatológicas

El clima imperante en la zona estudiada varía conforme al relieve de acuerdo con la clasificación de COPEN, en su porción montañosa es semi-frío, sub-húmedo y sin lluvias invernales, mientras que en su porción baja es semi-cálido, semiseco y sin lluvias de invierno; en su porción media ambos tipos climáticos se traslapan, resultando un clima templado.

Principalmente en los valles y en las zonas altas al sureste de Morelia, se encuentran instaladas 11 estaciones climatológicas.

Durante el período 1970-83, se observó que las temperaturas ascienden de abril a septiembre, registrándose los valores máximos de 36°C durante el verano (mayo y junio) y valores mínimos hasta de 0°C durante el invierno (diciembre y enero). El rango de variación de la temperatura mensual es de 11.2°C a 21.9°C.

Durante el período 1990-92 la precipitación media anual fue de 664.9 mm. Durante este período se pudo observar que los meses más lluviosos son junio, julio y agosto, con una precipitación media mayor a los 200 mm.

Durante el período 1970-83, la evaporación potencial media anual varía en el área entre 1300.4 mm a 2368 mm. La lámina anual promedio en el área, en este lapso analizado fue de 1790 mm.

III.2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

III.2.1. Infraestructura Hidráulica

La infraestructura consiste en: una presa de almacenamiento, Cointzio, 7 presas derivadoras, 14 plantas de bombeo, 109 pozos profundos, 280.6 Km. de canales, 292.6 Km de drenes, 549.9 Km. de caminos y 882 estructuras.

Presa Cointzio: Esta presa se construyó sobre el río Grande de Morelia, es una presa de usos múltiples: abastecimiento de agua potable, riego, generación de energía eléctrica y regulación de la corriente del río. Las principales características de esta presa son:

El vaso tiene una capacidad total de 84.8 Hm³, una capacidad útil de 74.8 Hm³ y una capacidad de azolves de 15.0 Hm³.

La obra de toma es una tubería a presión alojada en la margen derecha del río, la cual consiste en un túnel. La carga máxima es de 3.80 mts. El gasto máximo es de 12.0 m³/s. (378.3 Hm³/año) Y una superficie regable es 14,888 Has.

La obra de excedencias es un vertedor controlado por cinco compuertas radiales que vierte a un canal. La carga máxima es de 3.50 mts. La longitud de la cresta es 29.90 mts. Y el gasto máximo es de 600 m³/s.

De la obra de toma existe una derivación que alimenta mediante un acueducto de 10 Km a la planta potabilizadora de Morelia.

Presas Derivadoras: Las 7 presas derivadoras son: La Huerta, Cointzio, Atapaneo, Corrales, La Goleta, Quirio y Zacapendo.

También se dispone de un sistema de drenaje vertical compuesto por **14 plantas de bombeo** que utilizan 36 equipos eléctricos, para el desalojo de aguas pluviales y desfuegos de áreas más bajas a los cauces naturales.

III.2.2. Usos del Recurso Hídrico

La disponibilidad media de agua, en la cuenca del lago de Cuitzeo es de 675.5 Hm³/año: (1) Escurrimiento Superficial de 426 Hm³/año, (2) Recarga Natural de Acuíferos 249.5 Hm³/año.

Se estima que el aprovechamiento del escurrimiento superficial en la cuenca del Lago de Cuitzeo es de 334 Hm³/año (200 Hm³/año para el uso agrícola de distrito de riego, 46 Hm³/año para el uso agrícola de pequeña irrigación, 23 Hm³/año para el uso Pecuario, 44 Hm³/año para el uso urbano, 21 Hm³/año para el uso Industrial), pérdidas por evaporación de 199.7 Hm³/año y variación del almacenamiento de 16.1 Hm³/año; y retorna del aprovechamiento 20 Hm³/año. **No existe disponibilidad superficial para nuevos uso en la cuenca del Lago de Cuitzeo.**

El escurrimiento natural medio, medido, de la cuenca del río Grande, aguas arriba de la estación de Atapaneo es de 136 Hm³/año, el cuál no es posible aprovechar totalmente especialmente en los meses que es más abundante, debido a la variabilidad temporal y espacial de los mismos, afirmándose que **no existe disponibilidad superficial en la cuenca del río Grande**. Se estima que el aprovechamiento del recurso superficial es de 96.38 Hm³/año. (Véase Tabla III.2.1)

En la cuenca se consideran 3 puntos de medición del escurrimiento natural, aguas arriba del embalse de Cointzio (estación de Cointzio) con una media de 72 Hm³/año, aguas abajo del embalse (estación de Atapaneo) con una media de 54.26 Hm³/año y la subcuenca del río Chiquito (estación Chiquito) de 10 Hm³/año.

El uso agrícola utiliza el 47% del agua suministrada para todos los usos en la cuenca del río Grande, donde el 80% del agua suministrada al distrito de riego es de origen superficial, por lo que **es de gran importancia el recurso superficial para la agricultura de la cuenca del río Grande**.

Se ha definido un acuífero dentro de la cuenca del lago de Cuitzeo, localizado en el valle Morelia-Queréndaro, al Sur del Lago de Cuitzeo, donde se localizan las cuencas del río Grande y del río Queréndaro. Se estima que las extracciones para uso urbano y agrícola, son de 155.95 Hm³/año, la descarga natural por manantiales es de 76.047 Hm³/año. El balance global del recurso subterráneo nos indica que se tiene disponibilidad subterránea para diversos usos, sin embargo este balance no revela la situación crítica que prevalece en ciertas zonas de la cuenca del río Grande, especialmente en la zona de la ciudad de Morelia.

El acuífero Morelia-Queréndaro suministra el 53% de la totalidad de la demanda de la cuenca del río Grande, donde el 70% del agua suministrada es de origen subterráneo, abastece aproximadamente a 550,000 habitantes ubicados en Morelia, por lo que **el agua subterránea es el elemento indispensable para los habitantes de esta ciudad**.

Las aguas de la cuenca del río Grande, son empleadas para suministrar de agua al uso agrícola (parte del distrito de riego No.020 Morelia-Queréndaro), al uso urbano (abastecimiento de la ciudad de Morelia y otros poblados) y al uso industrial destacando la planta Celulosa y Papel de Michoacán, S.A. de C.V. Donde **los usos consuntivos predominantes en la cuenca son el agrícola y el urbano, representan el 47.38% y el 46.49% respectivamente del agua extraída de la cuenca del río Grande.** (Véase Tabla III.2.1)

Uso	Origen		Volumen	Porcentaje
	Superficial	Subterráneo	Total	Total
	Hm ³	Hm ³	Hm ³	%
Agrícola	77.46	20.14	97.60	47.38
Urbano	18.92	76.85	95.77	46.50
Industrial	0.00	12.61	12.61	6.12
Pecuario	0.00	0.00	0.00	
Total A.(1)	96.38	109.60	205.98	100.00
	47%	53%	100%	
Total A.(2)	334.00	231.997	566.00	
Total D.(3)	426.00	249.50	675.50	

(1) Aprovechamiento 2000/01, cuenca río Grande,
(2) Aprovechamiento, cuenca del Lago de Cuitzeo
(3) Disponibilidad, cuenca del Lago de Cuitzeo

Tabla III.2.1 Volúmenes superficial y subterráneo para los diferentes usos.

El uso urbano que suministra el río Grande Morelia es a través de una derivación directa de la presa Cointzio que conduce aproximadamente 600 lts/seg (18.92 Hm³/año) constantes, hacia la planta potabilizadora “Los Filtros”. También hay un importante abastecedor del líquido que son las salidas naturales aprovechadas del acuífero Morelia-Queréndaro mismas que se muestran en la Figura III.2.1 y Tabla III.2.2, y son:

- a) El manantial la Mintzita.- es la fuente de agua subterránea más importante, se encuentra ubicado a 4.5 km hacia el suroeste de la ciudad. Aporta aproximadamente 683 lts/seg (21.54 Hm³/año). En la actualidad se tienen dos concesiones para su extracción, una por parte de una industria papelera y otra por parte del Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (OOAPAS).

- b) El manantial San Miguel.- el cual se ubica a una distancia aproximada de 11 km al sureste de la ciudad en el poblado de San Miguel del Monte. El agua producida por este manantial está siendo captada por OOAPAS y tiene una producción de 131 lps.
- c) Manantiales El Salto y La Higuera.- estas fuentes se localizan al poniente dentro de la misma ciudad, se ubican en una zona llamada La Quemada. Los manantiales tienen una producción de 15 y 20 lps respectivamente, y el agua que se extrae es para abastecer a las colonias cercanas a los manantiales.

Las extracciones de los 91 pozos, ubicados en toda el área urbana de la ciudad son utilizados como complemento al suministro de agua potable, los cuales varían en profundidad y en producción, aportando un total de 1588 lps. Además existen 92 pozos registrados y autorizados por la CNA para ser explotados por particulares.

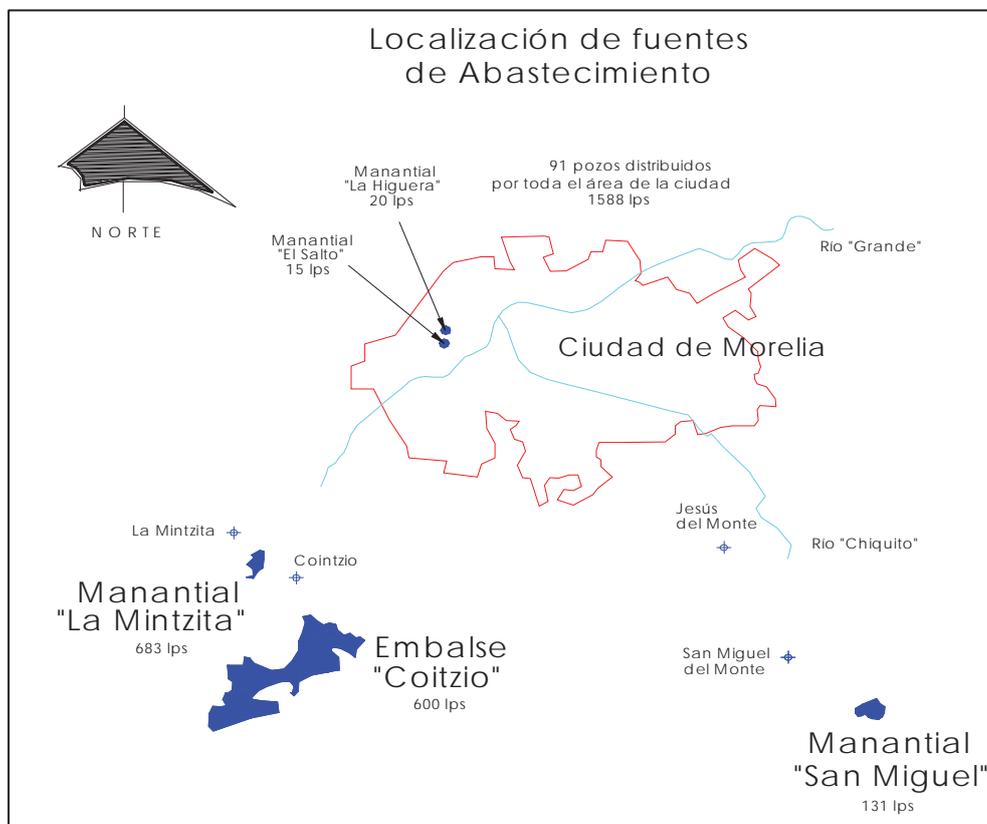


Figura III.2.1. Localización de fuentes de abastecimiento

Origen	Fuente	Volumen		% Total
		lps	Hm ³	
Subterráneo	M. Mintzita	683	21.54	33.45
	M. San Miguel	131	4.13	3.70
	M. Salto	15	0.47	0.42
	M. La Higuera	20	0.63	0.56
	91 Pozos A.M.Q.	1588	50.08	44.90
	T. Subterráneo	2437	76.85	
Superficial	E. Cointzio	600	18.92	16.96
	T. Superficial	600	18.92	
Total		3037	95.77	

Aprovechamiento Morelia, 2000

Tabla III.2.2. Volúmenes suministrados por cada fuente

El valor de la demanda anual, incluyendo la extracción del recurso de los pozos profundos, es de 95.77 Hm³ (3037 lps), la que es afectada por tomas clandestinas, llegando a la ciudad 2857 lps. (90.1 Hm³); El 50% del agua que llega a la red de distribución se pierde por fugas, llegando a las tomas domiciliarias 1428.5 lps (45 Hm³), e infiltrando al acuífero Morelia-Queréndaro 50% de lo suministrado; de los 45 Hm³ que llegan a la toma domiciliaria retorna al sistema el 70% mediante el alcantarillado sanitario de la ciudad que descarga al cauce del río Grande.

Menos de la mitad del agua que se sirve a la ciudad de Morelia se obtiene por escurrimiento, esto es por gravedad, sin necesidad de inversión o gasto electromecánico, pero casi un 80 % del total del agua servida se debe mover por acción electromecánica con el correspondiente costo de energía eléctrica. **Morelia ha crecido en ambas márgenes de los ríos que originalmente la circundaban y tira sus aguas residuales al río, que a través del Valle Morelia-Queréndaro las vierte en el Lago de Cuitzeo.**

La capacidad total del suministro es un poco más de 3,000 lps (95 Hm³/año), de ellos 600 lps (19 Hm³/año) provienen del embalse de Cointzio, 849 lps (27 Hm³/año) de los manantiales y 1588 lps de los pozos (49 Hm³/año).

La superficie de la cuenca del río Grande con infraestructura para riego es de aproximadamente 15,000 Ha. que se atiende mediante cuatro de los cinco módulos del distrito de riego No. 020 Morelia-Queréndaro (Módulo I, II, III y IV). En lo que se refiere a la distribución de la superficie agrícola, destacan el módulo III y IV al ocupar el 60% y 25% respectivamente, del área total de riego de la cuenca. La agricultura regable de la cuenca demanda 97 Hm³ anuales, según los datos del año agrícola 1999-2000, para que se rieguen casi la totalidad de las hectáreas demandadas para uso agrícola.

De los cinco módulos que consta el distrito de riego No. 020, el río Grande de Morelia abastece a cuatro. La Figura III.2.2 muestra la ubicación de los módulos a lo largo del río Grande de Morelia y la Tabla III.2.3 muestra algunas características de cada uno de los módulos.

MODULO	Superficie física (Ha)	Superficie de riego (Ha)	Volumen concesionable (Hm ³)	Lamina de riego (cm)
I. Aguas de Morelia	1,395.65	1,288.68	6.97	54.09
II. Río Grande de Morelia	796.66	794.19	4.29	54.02
III. Valle de Álvaro Obregón-Tarímbaro	8,821.84	8,813.37	47.65	68.82
IV. Canal de Zacapendo	3,658.08	3,651.28	19.94	64.69
Total	14,672.23	14,547.52	78.85	241.62

Referencia "Proyecto de Reglamento del Distrito de Riego No.020(1999)

Tabla III.2.3.- Módulos suministrados a través del río Grande de Morelia.

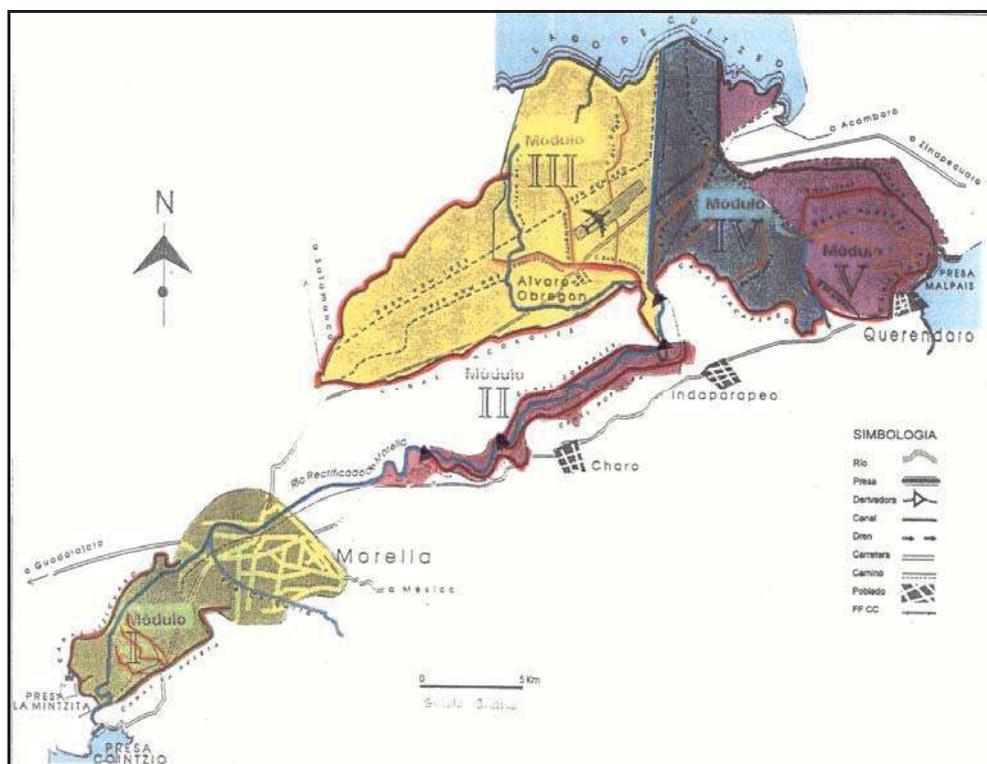


Figura III.2.2.- Módulos de riego del Distrito de Riego No.020 Morelia-Queréndaro

III.2.3. Recursos o Aportaciones

Las aportaciones a la cuenca son de origen superficial y subterráneo. El aprovechamiento de los recursos hídricos superficial y subterráneo se utilizan para satisfacer las demandas de los diferentes usos de la cuenca.

Las fuentes de suministro del recurso superficial son el río Grande de Morelia, los afluentes, retornos de riego (drenaje vertical) y retornos urbanos (aguas residuales).

a) Aportación Coíntzio

Esta aportación superficial comprende la intercuenca del río Grande de Morelia desde el punto donde nace este río hasta donde es regulado por el embalse Coíntzio.

La información disponible de las entradas al embalse por esta estación es medida por la estación hidrométrica denominada Santiago Undameo (Estación 5, Tabla III.2.3). Información de la cual se obtiene una media de 72 Hm³/año.

b) Aportación Chiquito

Esta aportación corresponde al río Chiquito, la cual se ubica en la ciudad de Morelia y es medida por la estación hidrométrica del mismo nombre (Estación 8, Tabla III.2.3). Información de la cual se obtiene una media de 10 Hm³/año.

c) Aportación Atapaneo

Esta aportación corresponde a los escurrimientos del río Grande de Morelia provenientes de la intercuenca del tramo desde el embalse Coíntzio hasta la derivadora Atapaneo (Estación 2, Tabla III.2.3), razón por la cual, para determinar el valor de esta aportación, se tuvo que hacer la deducción de los valores de las aportaciones del río Chiquito, sobrantes del agua suministrada a la demanda industrial, demanda agrícola, y demanda urbana (retornos), y también se le quita la aportación procedente del embalse Coíntzio y la demanda del módulo I, siendo que el caudal de este último suministro se realiza unos metros aguas abajo del embalse y por consiguiente no llega a la intercuenca. Una vez realizadas las operaciones antes mencionadas, se obtiene una media de 54.26 Hm³/año.

El Sistema del Río Grande de Morelia cuenta con recurso subterráneo, dos grandes acuíferos: “acuífero Morelia-Querendaro” de donde se extrae recurso para la demanda urbana y para dos demandas agrícolas (Módulo III y Módulo IV). Y el “acuífero la Mintzita” de donde se extrae recurso para la demanda urbana y la demanda industrial. El acuífero la Mintzita incluye los cuatro manantiales que se explotan en la cuenca: Manantial San Miguel. La Mintzita, El Salto y La Higuera.

III.2.3.1. Ubicación de las Estaciones Hidrométricas

A lo largo de la cuenca se encuentran ubicadas algunas estaciones hidrométricas colocadas estratégicamente en la cuenca para conocer las características hidrológicas que imperan en el lugar. En la Tabla III.2.3 se lista la ubicación de cada una de ellas, habiéndose

utilizado para la determinación de las aportaciones a régimen natural los datos de las estaciones Cointzio (12), Atapaneo (2), Santiago Undameo (5), El Salto (6) y Chiquito (8).

	ESTACIÓN	LATITUD	LONGITUD
En el río Grande de Morelia			
1	Cointzio	19°38'30"	101°15'30"
2	Atapaneo	19°43'30"	101°10'35"
3	Lavaderos (suspendida)	19°50'55"	101°04'20"
4	Salida Túnel	19°38'00"	101°15'33"
5	Santiago Undameo	19°36'05"	101°17'17"
6	El salto	19°38'15"	101°15'35"
7	El plan	19°49'10"	101°00'40"
Cuenca río Grande de Morelia			
8	Chiquito	19°41'45"	101°11'25"
9	Monterrubio	19°39'15"	101°14'20"
10	San Bartolo	19°48'55"	101°00'40"
11	Zacapendo	19°48'55"	101°00'15"
12	Cointzio	19°38'15"	101°15'25"
13	Joconoles	19°48'07"	101°00'30"

Tabla III.2.3.- Estaciones hidrométricas de la cuenca del río Grande.

CAPITULO IV.- MODELOS HIDROLÓGICOS ESTOCÁSTICOS DE LAS APORTACIONES AL SISTEMA DEL RIO GRANDE DE MORELIA

IV.1. INTRODUCCIÓN

Considerando que una de las preocupaciones más importantes de la Hidrología es la circulación cerca de la superficie terrestre, se han tenido que hacer múltiples evaluaciones respecto a los recursos hídricos en diferentes territorios, mismas que tienen por objeto determinar en los puntos de interés la cantidad de este recurso y su distribución en el tiempo, por lo que el resultado del diseño de sistemas de recursos hídricos depende en gran parte de los caudales que se suponga va a afrontar el sistema durante su vida económica. Los cuales varían considerablemente de unos ríos a otros y debido a ello la historia de caudales en un cauce particular supone una valiosa pista sobre el comportamiento futuro del río.

Razón por la cual la serie histórica es utilizada en modelos de simulación u optimización, para evaluar o generar alternativas de diseño o de gestión de sistemas de recursos hídricos.

Pero el uso exclusivo de la serie histórica implica algunos problemas serios:

- a) Por una parte es común que las series históricas disponibles sean bastante cortas, con frecuencia de menos de 25 años.
- b) Es muy improbable que la serie histórica se repita exactamente durante la vida operativa del sistema.
- c) Es muy probable también que los valores de máximos caudales y mínimos caudales históricos sean sobrepasados durante dicha vida operativa.
- d) Si se utiliza la serie histórica exclusivamente, no tenemos idea de los riesgos afrontados en términos de probabilidad de fallos, que no es lo mismo que la probabilidad de fallos en el período histórico.

De acuerdo con las consideraciones anteriores, es de suma importancia obtener datos futuros de caudales en la zona de interés, es por ello que a partir de los datos históricos, se deben generar series de caudales futuros, mismas que son conocidas como series sintéticas, las cuales son producto de la aplicación de un modelo hidrológico estocástico, es decir un modelo matemático cuya programación se basa en gran medida en las leyes del azar, y cuyas variables por lo tanto, son caracterizadas en términos de probabilidad.

Los modelos estocásticos tienen su fundamento en el máximo aprovechamiento de la información, su utilización como modelos predictores de entrada-salida en la evaluación de caudales es muy poca, dada su sencillez (son generalmente lineales) están limitados en cuanto a la representación de los procesos hidrológicos. Sin embargo presentan como ventaja que su formulación estocástica facilita la obtención de incertidumbres en la estimación de parámetros y variables en la evaluación y análisis de los recursos hídricos, por lo que se aplican principalmente para dos aspectos:

- a) Completado de series de precipitaciones y de caudales en la red fluvial.

b) Generación de series sintéticas de caudales.

Cabe hacer mención de que la finalidad de la generación de series sintéticas, no es propiamente la evaluación del recurso, ya que esta se tiene con la serie histórica, sino el análisis probabilístico. Al mismo tiempo, es conveniente mencionar también, que las series a generar, deben cumplir con un requisito fundamental: estas deben preservar lo más aceptablemente posible los estadísticos básicos, de almacenamiento y de sequía de la serie histórica, es decir, que las series sintéticas arrojen valores estadísticos cercanos a los correspondientes de la serie histórica. Lo cual asegura que las series generadas tengan la misma probabilidad de ocurrencia que las históricas.

Los modelos estocásticos más utilizados para lo anteriormente descrito son los modelos Autorregresivos (AR), los modelos de Media Móvil (MA), los modelos Autorregresivos de Media Móvil (ARMA), los modelos de desagregación espacial y temporal y de correlación múltiple.

Este capítulo tratará sobre el procedimiento seguido para la elección de un modelo hidrológico estocástico, cuyo objetivo es generar múltiples series sintéticas condicionadas de caudales en la cuenca del río Grande de Morelia. Hay que indicar, que este modelo hidrológico formará parte de los datos de entrada de un modelo útil para la toma de decisión sobre el aprovechamiento de los recursos hídricos en la cuenca. El modelo hidrológico seleccionado deberá representar en forma adecuada los estadísticos básicos de los caudales de la cuenca, sus características de almacenamiento y de sequía.

IV.2. DATOS HIDROLÓGICOS DEL SISTEMA (AFOROS)

La cantidad de datos de la serie histórica de caudales que debemos utilizar nos obliga a ordenarlos y clasificarlos para conocer sus características y con estas poder crear series sintéticas. La hidrología utiliza en sus métodos de análisis conceptos de probabilidad y estadística para tratar de explicar el comportamiento de los registros en el tiempo, es importante conocer pues, donde se concentran los datos, su alejamiento con respecto a su valor central, la forma de distribución de los datos en cuanto a su simetría, lo anterior en forma general, pero en particular para la hidrología también es necesario diferenciar y conocer las características en el caso de la existencia de sequías y en el caso de poder contar con la cantidad de recurso suficiente para su almacenamiento, por esta razón es importante conocer las características estadísticas básicas, de sequía y de almacenamiento.

IV.3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE DETERMINACIÓN DE LOS MODELOS

Para la determinación de los modelos hidrológicos estocásticos es necesario. Restituir a régimen natural los datos hidrológicos del sistema que se desea modelar, luego se hace un análisis de los estadísticos de las series restituidas; y finalmente se procede a evaluar, determinar y validar el modelo que mejor se ajuste a las series hidrológicas del sistema del río Grande de Morelia.

IV.3.1. Series Hidrológicas Restituidas a Régimen Natural

IV.3.1.1 Generalidades

Como paso previo a cualquier evaluación de recursos hídricos, de forma directa o indirecta, debe procederse a restituir a régimen natural las series o aportaciones de la cuenca, modificando los registros de caudales en las estaciones de hidrométricas a partir de los datos de operación del sistema. Con ello se pretende conocer el funcionamiento del sistema hídrico en régimen natural, para posteriormente, en los estudios de gestión del mismo, superponer el efecto que tendrían sobre el, diferentes formas de operación.

Se considera como régimen natural del sistema el que existiría sin intervención humana, esto es excluyendo trasvases intercuenas, obras de regulación, derivaciones en el río y extracciones en el acuífero.

Para obtener las aportaciones a régimen natural, básicamente es necesario conocer datos de evaporaciones y filtraciones en las presas, operación de los mismos, así como suministros y retornos de agua y posibles trasvases artificiales entre cuencas. Si las extracciones en acuífero son importantes habrá que conocer también la repercusión que estas tienen en los caudales del río. El término de filtración en las presas suele ser, en la mayoría de los casos, despreciable y únicamente en las presas que se tenga constancia de la importancia de las mismas deberá ser considerado.

Una fase muy pesada y laboriosa, pero imprescindible para realizar la restitución a régimen natural, es la recopilación en el tiempo de todos los datos.

Cuando la restitución afecte a aguas superficiales y se disponga de los datos de operación, su realización operativa es sencilla, ya que, tras plantear la ecuación de balance entre entradas, salidas y almacenamiento, el cálculo queda reducido a sencillas operaciones aritméticas. Cuando el uso de agua es no consuntivo (centrales hidroeléctricas) el cálculo es inmediato, solo hay que conocer los puntos de toma y vertido y su desfase en el tiempo, mientras que cuando es consuntivo (riego, urbano) el problema se plantea en la estimación de los retornos al río. En el caso de uso consuntivo para riego a este problema se añade el de la determinación de la zona en la que se produce el retorno difuso.

Cuando la restitución afecte a las aguas subterráneas su realización es más compleja. En el caso de importantes extracciones en acuíferos conectados con el río o afluentes el régimen natural se restituye evaluando las repercusiones que las extracciones del acuífero tienen sobre los caudales fluyentes por el río. Esta evaluación puede abordarse mediante la modelización del movimiento del flujo subterráneo en el acuífero y sus intercambios con el río. Deberán también estimarse los retornos puntuales o difusos de los excedentes de aprovechamientos a los cauces.

Para realizar la restitución debe definirse el esquema estructural del sistema para así efectuar balances hídricos en cada punto a restituir, teniendo en cuenta:

- a) El caudal restituido en el punto precedente.
- b) El caudal medido que aporta dicho tramo.
- c) Los caudales vertidos artificialmente en dicho tramo.

- d) Los caudales regulados por la existencia de un embalse.

El proceso de cálculo debe iniciarse en cabecera, y arrastrar sus efectos aguas abajo hasta el fin del sistema. En la Figura IV.3.1 se muestra un esquema que puede adoptarse para realizar los balances. En el se emplea la siguiente simbología:

- Las estaciones de aforo de caudales se representan con círculos.
- Los embalses se representan mediante triángulos.
- Las tomas y vertidos en el río para los cuales se dispone de series de caudales, se representan por una flecha que parte o incide en el río, respectivamente. Las extracciones en el acuífero pueden representarse como una toma del río tras plantear la función que relaciona extracciones-caudales detraídos. En la Figura IV.3.1 se representa mediante una "X".
- Para las tomas o vertidos en que no se dispone de series de medida, se pueden definir funciones que simulen la toma de un volumen de agua en un punto y su devolución en otro, con una distribución temporal determinada. Es habitual definir dos tipos de funciones, una para abastecimiento y otra para regadíos. En la Figura IV.3.1 la función de distribución para abastecimiento se ha representado con un cuadrado y la de usos agrarios con un círculo.

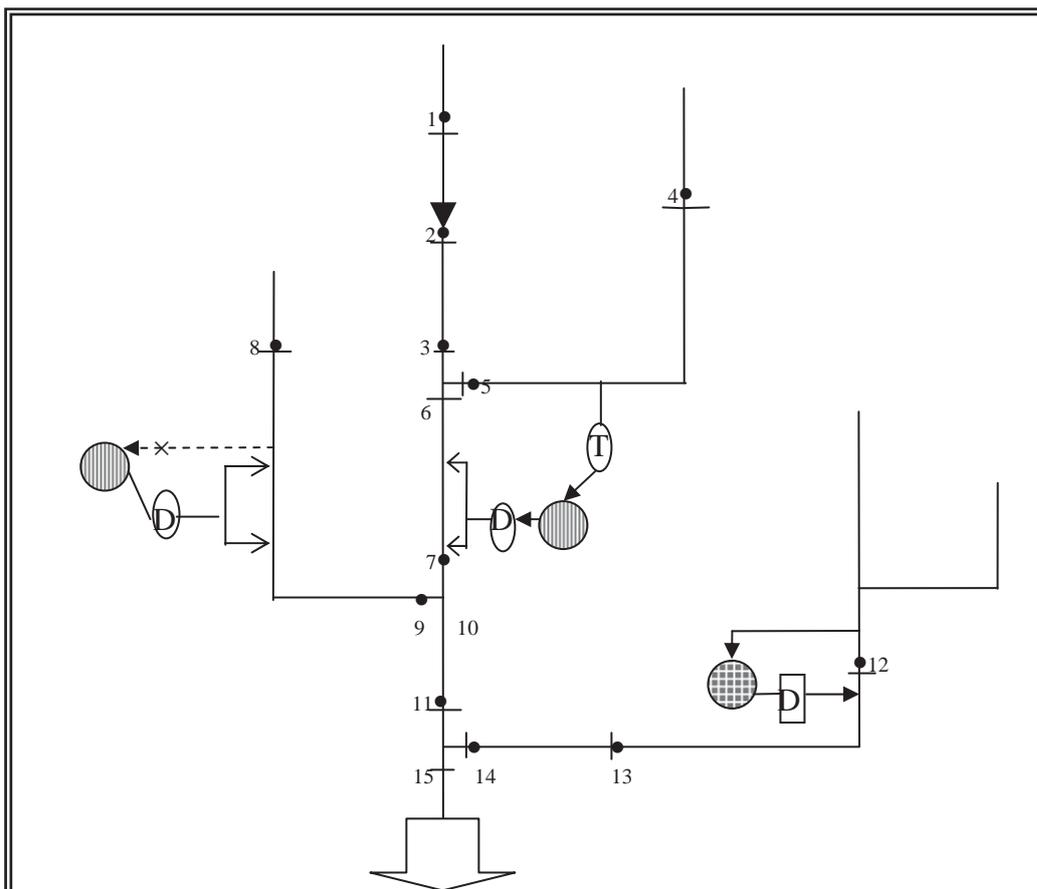


Figura IV.3.1.- Ejemplo de esquema para la restitución a régimen natural del sistema.

La simbología empleada en la Figura IV.3.1 es la siguiente:

-  Punto de cálculo.
-  Estación de medida.
-  Embalse.
-  Zona demanda riego.
-  Zona demanda abastecimiento urbano e industrial.
-  Tomas y retornos puntuales en/del río.
-  Detracción de caudal al río por extracciones en el acuífero.
-  Retorno difuso al río.
-  Función que relaciona extracciones en el acuífero y caudal detraído al río.
-  Función de toma o devolución para usos agrarios.
-  Función de toma o devolución para abastecimiento urbano e industrial..

En la restitución a régimen natural de los caudales medidos en las estaciones de aforo intervienen, por tanto, los siguientes elementos que alteran el régimen:

a) Embalses

La restitución del régimen natural de los caudales en los embalses se realiza en base al balance hídrico siguiente:

Aportación natural = A desaguada + A filtrada + A evaporada \pm incremento del volumen embalsado.

b) Abastecimientos

La influencia del abastecimiento en la restitución al régimen natural viene dada por las tomas y por los vertidos de las poblaciones abastecidas.

Si se conocen los caudales derivados sólo hay que sumarlos a los puntos situados aguas abajo, en los que se busca el régimen natural. Si no se conocen habría que estimarlos en función de la dotación y número de habitantes. En ese cálculo habrá que tener en cuenta la evolución temporal histórica de ambas variables.

En cuanto a caudales de vertido, es habitual definir una función de devolución en base a una distribución mensual del volumen anual de retorno. Este último valor puede estimarse como un porcentaje del volumen suministrado. Suele oscilar entre el 75% y 90%.

Conocidos los volúmenes de retorno, solo habrá que restarlos en los puntos a los que afecte.

c) Regadíos

Los volúmenes de agua para regadío suelen suponer el efecto más importante a considerar para lograr la restitución a régimen natural.

Si no existen datos de caudales derivados para riego puede seguirse el siguiente proceso:

- a) Consideración de los tramos entre puntos donde se restituye el régimen natural.
- b) Para cada tramo se define la superficie regada con agua procedente del propio tramo.
- c) Se determina a continuación el volumen detráido en cada tramo, producto de la superficie regada por las dotaciones reales para riego.

Este volumen debe calcularse para cada año, por lo cual debe tenerse en cuenta:

- a) Evolución histórica de las hectáreas regadas.
- b) Evolución histórica de las dotaciones de riego por hectárea.

Si no se dispone de esos datos habrá que hacer una serie de hipótesis realistas sobre los mismos. Los volúmenes anuales aplicados pueden distribuirse mensualmente teniendo en cuenta las necesidades medias.

Debe suponerse una eficiencia del riesgo, que suele oscilar entre el 50 y 75% y, consecuentemente unas pérdidas, entre el 50 y 25%, respectivamente.

El retorno a los cauces puede fijarse como un porcentaje de las pérdidas en la forma que define la Ecuación IV.1.

$$F_i = A_1 C_i + A_2 C_{i-1} + \dots + A_n C_{i-n+1} \quad (\text{IV.1})$$

Donde:

- F_i volumen que retorna en el mes i .
- C_i volúmenes aplicados al riego en el mes i .
- A_1, A_2, \dots, A_n coeficientes a definir.

Estos coeficientes se pueden deducir en función de la relación de las pérdidas respecto al volumen aplicado y de la inercia del acuífero.

Para estimar el retorno pueden aplicarse también modelos de flujo subterráneo que consideren la interrelación río-acuífero y donde la recarga del acuífero la constituyan las pérdidas en los volúmenes aplicados.

Los volúmenes derivados, representados por cada una de las funciones, se deben sumar en los puntos de aguas abajo del de derivación y los volúmenes de retorno restarse a los puntos que afecten.

Una vez obtenidas las series restituidas, debe procederse a su contraste mediante análisis estadísticos, los cuales pueden detectar posibles irregularidades en la restitución.

Para la cuenca del río Grande, se ha seguido un procedimiento similar a lo establecido en este apartado, y en el presente trabajo de Tesis se ha contrastado la restitución a régimen natural desarrollada de acuerdo al esquema de la Figura IV.3.2

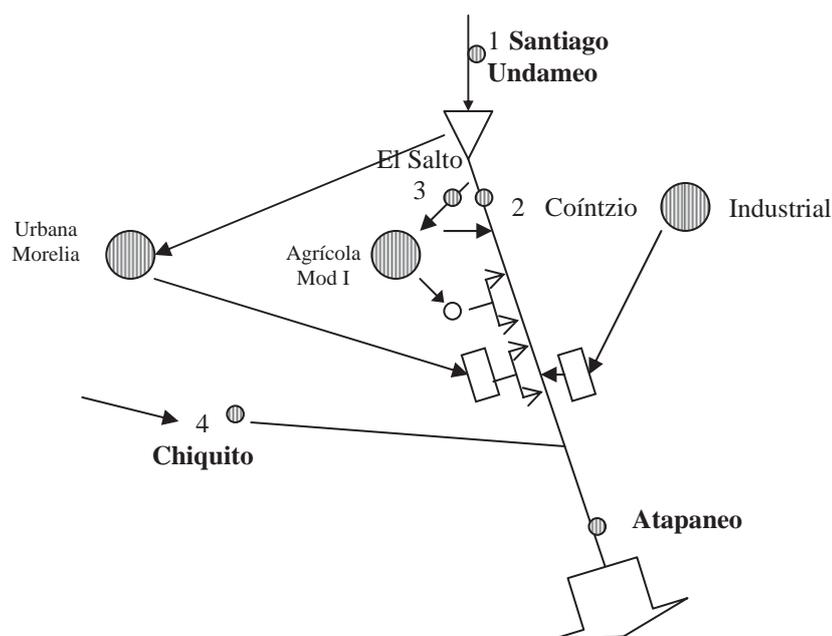


Figura IV.3.2 Esquema para la restitución a régimen natural del sistema del río Grande

IV.3.1.2. Restitución De Las Series Hidrológicas Del Río Grande De Morelia

Con el objetivo de analizar el aspecto hidrológico (superficial) de la cuenca se han revisado estudios anteriores relacionados con el tema e información de las estaciones hidrológicas actualizada. La restitución a régimen natural fue realizada por Barajas (2002).

a) RESTITUCIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO GRANDE DE MORELIA HASTA LA PRESA DE COINTZIO

La aportación a régimen natural del río Grande de Morelia en la presa de Cointzio ha de ser sensiblemente coincidente con la aforada (dejando a salvo el efecto regulador del embalse), ya que los aprovechamientos y detracciones aguas arriba son muy reducidos frente a la magnitud de los caudales circulantes.

- Información disponible

Las entradas hidrológicas en la presa Cointzio se encuentran adecuadamente registradas mediante una estación hidrológica situada en el cauce de entrada a la presa, estando asimismo aforada la salida. Las estaciones hidrológicas son las siguientes:

Entradas: Estación Santiago Undameo, ubicada en el río Grande de Morelia.

Salidas: Estación Túnel, ubicada en el Túnel de salida de la presa al río.

De forma complementaria, se dispone de la información de operación procedente del propio embalse: salidas, variación de volumen y entradas obtenidas por balance.

- Análisis de los datos de la estación Santiago Undameo

Los datos originales fueron proporcionados por la CNA Gerencia Estatal de Michoacán (1939 a 1985) y la otra parte (1986 a 1998) fue proporcionada por el Distrito de Riego No. 020 Morelia – Queréndaro.

Esta estación presentaba algunos vacíos (falta de datos en algunos meses de la estación), que fueron rellenos obteniendo la media de los 4 años cercanos al mes que se desea relleno.

- Solución adoptada para la restitución de la serie

El periodo de análisis adoptado es 1940-1989.

La Solución adoptada es:

APORT. COINTZIO = estación hidrológica Santiago Undameo

b) **RESTITUCIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO CHIQUITO.**

El río Chiquito tiene una cuenca de 80 km², su aportación a régimen natural al río Grande de Morelia (a la altura de la ciudad de Morelia) ha de ser sensiblemente coincidente con la aforada en la estación hidrométrica ubicada sobre el río Chiquito.

- Información disponible

La entrada del río Chiquito al río Grande de Morelia se encuentra adecuadamente registrada mediante una estación hidrométrica situada sobre el río Chiquito y muy cerca de la confluencia con el río Grande.

La estación hidrológica es la siguiente: Estación Chiquito, ubicada en el río Chiquito.

- Análisis de los datos de la estación Chiquito

Del análisis de los datos se observa que muchos meses presentan S/D (sin datos) especialmente a partir de 1990. Los años anteriores a 1990 no presentan problemas de falta de datos. Esta estación muestra el régimen del río con aguas broncas en época de avenidas y caudales de cero en época de estiaje.

- Solución adoptada

El periodo de análisis, se limita de 1940-1989, por la imposibilidad de obtener datos después de 1989.

La solución adoptada fue:

APORT. CHIQUITO = estación hidrométrica Chiquito

c) **RESTITUCIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO GRANDE DE MORELIA DESDE LA PRESA COINTZIO HASTA ATAPANEO**

La restitución a régimen natural de la aportación intermedia en este tramo de río resulta muy compleja, debido al elevado nivel de retornos urbano, industrial y agrícola que tiene esta parte del río Grande, situación que, además, ha variado gradualmente a lo largo del tiempo.

Todo ello ha dado como resultado una gran cantidad de datos de aforos correspondientes a diversos lugares y periodos de tiempo, que obliga a hacer un examen detallado del sistema para poder alcanzar conclusiones adecuadas.

- Información disponible

El punto de entrada al tramo considerado, está aforado por la estación hidrológica de Atapaneo, aguas arriba de la derivadora del mismo nombre. Para la determinación a régimen natural, también se hace uso de los datos de la estación Cointzio y la estación El Salto.

- Análisis de los datos

Del análisis de datos se observa que las 3 estaciones a utilizar para la restitución presentan vacíos en los últimos meses del periodo impuesto por la estación del río Chiquito. Se aplico un procedimiento sencillo de relleno de datos, similar al aplicado en la estación Santiago Undameo.

- Solución adoptada para la restitución de la serie:

El periodo de análisis adoptado es de 1940 a 1989.

La solución adoptada parte del conocimiento que se desea restituir a régimen natural la aportación de la intercuenca comprendida desde la presa Coíntzio hasta la estación de Atapaneo.

La estación Atapaneo, además de contener la aportación de la intercuenca, contiene el efecto de operación de la cuenca. Existen puntos de toma y vertido en el tramo, así como la entrega del río Chiquito y la presa de Cointzio. (Véase Figura IV.3.2)

ESTACIÓN ATAPANEO = Estación Chiquito – Tomas + Vertidos + Aport. Atapaneo (Aport. de intercuenca) + Entrega presa Cointzio

APORT. ATAPANEO = Estación Atapaneo – Estación Chiquito - Vertidos + Tomas - Entrega presa Cointzio

Los puntos de vertidos están representados por el retorno urbano (drenaje de la ciudad de Morelia), retorno industrial y retorno agrícola (redes de riego).

La toma esta representada por el suministro a la demanda agrícola (Módulo I).

La entrega de la presa se cuantifica con lo medido en las estaciones El Salto y Cointzio.

$$\text{APORT. ATAPANEO} = \text{Estación Atapaneo} - \text{Estación Chiquito} - (\text{Retorno Industrial} + \text{retorno Urbano} + \text{retorno Agrícola}) + \text{Demanda Modulo I} - (\text{Estación el Salto} + \text{Estación Cointzio})$$

Esta fórmula fue utilizada para cada mes de los años de simulación.

IV.3.2. Análisis Estadístico De Las Series De Aportaciones

El análisis de las propiedades estadísticas de las series de caudales históricos restituidos a régimen natural, se realizará en base a las series anuales y mensuales que están dadas en hectómetros cúbicos (Hm^3).

a) SERIES ANUALES

Los datos de caudales disponibles corresponden a tres series de valores mensuales en régimen natural para años hidrológicos, octubre a septiembre, en las estaciones de Cointzio, Chiquito y Atapaneo respectivamente.

- Propiedades estadísticas

Las principales propiedades estadísticas de las series de caudales anuales se resumen en la Tabla IV.3.1

	Cointzio	Chiquito	Atapaneo
Media	70.548	9.938	46.404
Desv. Típica	20.714	5.356	25.801
Sesgo	0.602	0.112	0.096
Máximo	122.250	41.179	108.266
Mínimo	41.179	0.000	8.053
Autocorrelación(1)	0.330	0.121	0.683

Tabla IV.3.1.- Estadísticos anuales de las tres series de caudales

Se puede observar que la media de cada estación tiene valores que no se pueden despreciar en relación con los de las demás estaciones, sin embargo las estaciones de Cointzio y Atapaneo son más relevantes que lo que respecta a la estación Chiquito. En lo que respecta a la variabilidad de los caudales, la mayor se presenta en la estación de Atapaneo y menor en la estación de Cointzio. También podemos ver que la desviación típica en las estaciones Chiquito y Atapaneo es aproximadamente la mitad de la media, solo en el caso de Cointzio esto no sucede así.

De acuerdo con los valores del sesgo las tres series de caudales pueden ser consideradas como normales para el caso de serie anual, puesto que los tres valores están dentro de los límites de la prueba de normalidad del sesgo.

La dependencia entre valores anuales sucesivos es relativamente alta en las estaciones de Cointzio y Atapaneo, con coeficientes de autocorrelación de orden uno estadísticamente no nulos y en el caso de la estación Chiquito es estadísticamente nulo.

En la Figura IV.3.3 se muestra el correlograma para las tres estaciones del río grande, en ella podemos observar como la estación Chiquito está completamente dentro de los límites de probabilidad de Anderson, por lo tanto todos los valores de su correlograma se supondrán no significativos, o no dependientes. En el caso de la estación Cointzio solo tres valores (cuando $k = 1, 3, 4$) se salen de estos límites por lo que solo estos tres valores se suponen significativos, o dependientes. En la estación Atapaneo notamos al contrario de las estaciones de Cointzio y Chiquito prácticamente todo su correlograma esta fuera de los límites de Anderson a excepción de cuando $k = 12$ por lo que se supondría solo un valor como no significativo. Se observa también que ningún punto se sale del límite inferior.

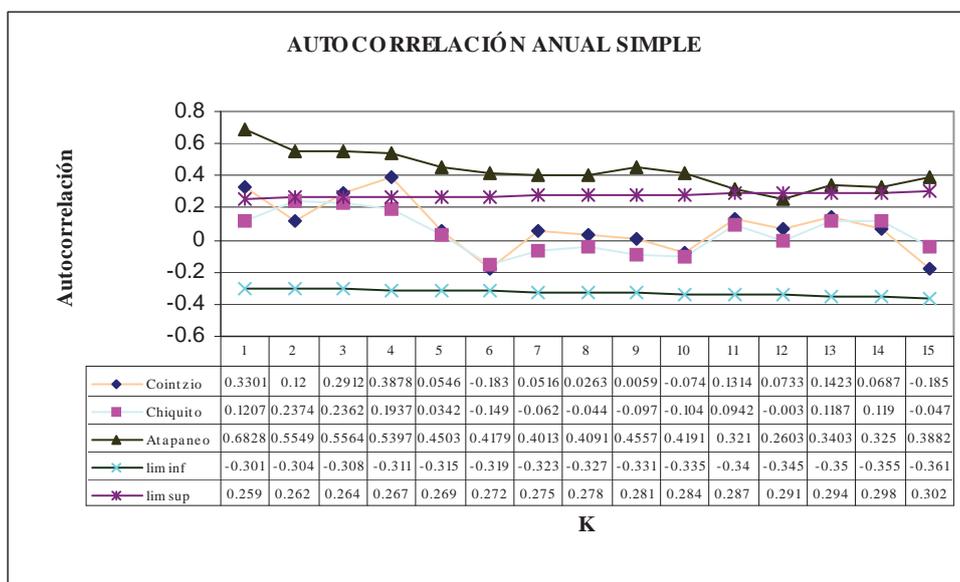


Figura IV.3.3.- Correlograma anual de las tres series con los límites de probabilidad de Anderson.

- Propiedades de almacenamiento

Las propiedades de almacenamiento de las series se pueden apreciar cuantitativamente a través del rango Rn^* , el rango ajustado Rn^{**} y el coeficiente de Hurst; cuyos valores para las series anuales de caudales consideradas son los que se presentan en la Tabla IV.3.2

	Cointzio	Chiquito	Atapaneo
Rn^*	312.322	70.039	448.344
Rn^{**}	15.078	13.077	17.377
Hurst (k)	0.854	0.809	0.898

Tabla IV.3.2.-Estadísticos de Almacenamiento.

En lo que respecta al rango podemos observar que la estación de Atapaneo es la que requiere mayor capacidad de embalse, aun mas que la propia estación de Cointzio, también podemos notar que los valores del rango en las estaciones de Cointzio y Atapaneo son altos comparados con el valor de la estación Chiquito.

El coeficiente de Hurst nos muestra que para las tres estaciones estudiadas existe una gran persistencia, además se puede observar que sus valores son similares entre ellos.

A continuación se muestran en las Figuras IV.3.4, IV.3.5 y IV.3.6 los almacenamientos de cada estación para observar su capacidad de embalse en los años aforados históricamente.



Figura IV.3.4.- Gráfica de almacenamiento anual en la estación de Cointzio.

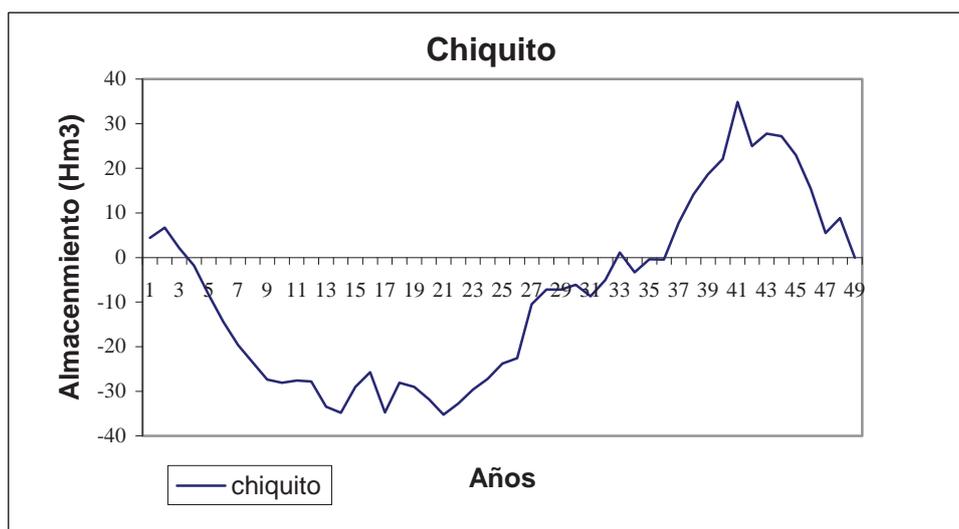


Figura IV.3.5.- Gráfica de almacenamiento anual en la estación de Chiquito.

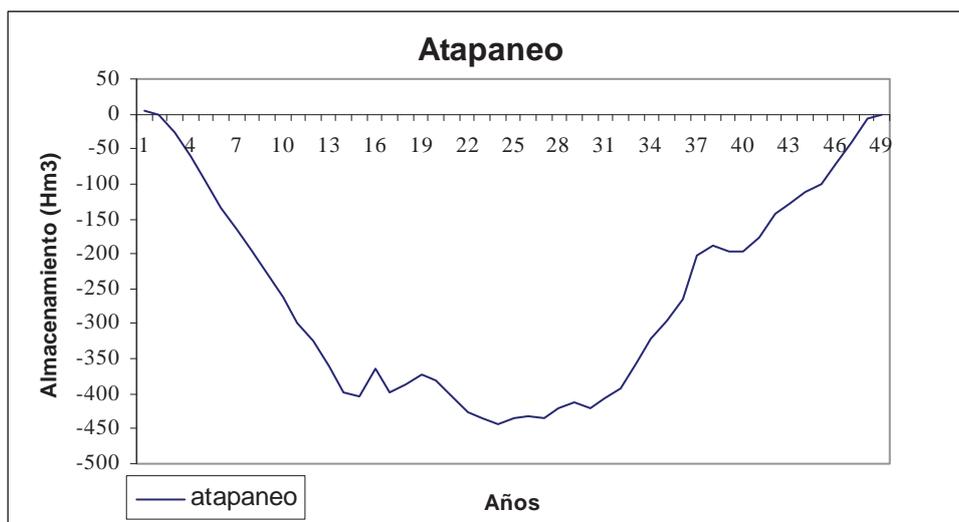


Figura IV.3.6.- Gráfica de almacenamiento anual en la estación de Atapaneo.

- Propiedades de las sequías

Las sequías, o periodos durante los cuales los caudales no alcanzan a satisfacer la demanda, pueden ser caracterizados mediante sus propiedades. Entre ellas son de interés la duración, la intensidad y la magnitud. Considerando una demanda constante igual a 0.9 veces los caudales medio anuales se detectan en las series históricas las cantidades de sequías así como los estadísticos para la duración, intensidad y magnitud; que se indican en las Tablas IV.3.3, IV.3.4 y IV.3.5, para las estaciones de Coitzio, Chiquito y Atapaneo respectivamente.

Nº SEQUÍAS 9

ESTADÍSTICOS	DURACIÓN	INTENSIDAD	MAGNITUD
MEDIA	2.333	16.335	27.728
D.TIP.	2.236	5.481	23.878
MÍNIMO	1.000	5.895	5.895
MÁXIMO	8.000	22.314	86.454

Tabla. IV.3.3.- Número de sequías y estadísticos de sequía para la estación Coitzio.

Nº SEQUÍAS 9

ESTADÍSTICOS	DURACIÓN	INTENSIDAD	MAGNITUD
MEDIA	2.111	5.713	9.433
D.TIP.	1.965	2.857	8.278
MÍNIMO	1.000	1.540	1.540
MÁXIMO	7.000	8.944	27.080

Tabla IV.3.4.- Número de sequías y estadísticos de sequía para la estación Chiquito.

Nº SEQUÍAS 5			
ESTADÍSTICOS	DURACIÓN	INTENSIDAD	MAGNITUD
MEDIA	4.400	18.073	86.266
D.TIP.	5.639	13.339	145.484
MÍNIMO	1.000	4.193	4.193
MÁXIMO	14.000	33.711	344.438

Tabla IV.3.5.- Número de sequías y estadísticos de sequía para la estación Atapaneo.

La media de la duración de las estaciones de Cointzio y Chiquito presentan valores similares, alrededor de 2 años y sus máximas son también similares de 8 y 7 años respectivamente. Mientras que Atapaneo presenta mayor duración de sequías.

Los caudales restituidos a régimen natural se emplearán para evaluar la gestión del sistema de aprovechamiento de recursos hídricos del río Grande de Morelia. Su empleo conjunto hace que exista interés en el comportamiento regional o espacial de los caudales naturales. Para ello es importante considerar los grados de dependencia espacial de las series anuales, la que puede medirse mediante la matriz de coeficientes de correlación cruzada. En la Tabla IV.3.6 se muestra la matriz de correlación cruzada para un desfase temporal nulo ($k=0$).

K=0	Cointzio	Chiquito	Atapaneo
Cointzio	1.0000	0.7148	0.4186
Chiquito	0.7148	1.0000	0.3193
Atapaneo	0.4186	0.3193	1.0000

Tabla IV.3.6.- Matriz de correlación cruzada $k = 0$

La Tabla IV.3.6 nos muestra una dependencia espacial relativamente alta entre las estaciones de Cointzio y Chiquito, en cambio se presenta una dependencia espacial baja para las otras dos combinaciones.

Como puede verse se ha realizado un análisis completo de las series de caudales, para las tres estaciones del cual podemos destacar la no necesidad de normalización de la serie de caudales anuales. No así en el caso de las series mensuales. Así mismo la correlación espacial nos señala la conveniencia de hacer uso de modelos multivariados.

b) SERIES MENSUALES

En la Tabla IV.3.7 se muestran los estadísticos básicos de las series mensuales, tomando en cuenta todos los meses juntos.

	Cointzio	Chiquito	Atapaneo
Media	5.8790	0.8282	3.8670
Desv. Típica	6.0054	1.7115	4.5870
Sesgo	2.0656	2.9542	3.7849
Máximo	48.1690	12.3790	54.4460
Mínimo	0.0000	0.0000	0.0000
Autocorrelación(1)	0.6125	0.5303	0.5465

Tabla IV.3.7.- Estadísticos de todos los meses.

Se puede observar que la media de Cointzio y Atapaneo son muy cercanas y la estación Chiquito es obviamente menor, en lo que respecta a las desviaciones, estas son mayores a la media en las tres estaciones, siendo sus valores mas cercanos a la media en Cointzio y en Atapaneo, y en el caso de Chiquito la desviación es aproximadamente el doble de la media.

La dependencia entre valores mensuales sucesivos es semejante para las tres estaciones como era de esperarse debido a la persistencia manifiesta en los valores del mismo mes en diferentes años, los valores son relativamente altos en las tres estaciones, con coeficientes de autocorrelación de orden uno estadísticamente no nulos.

Ninguna de las tres series se puede considerar normal puesto que sus valores de sesgo son superiores al límite de la prueba de normalidad.

IV.3.3. Normalización De Las Series De Caudales

Del análisis anterior se identificó cuando las series requieren ser normalizadas, a partir de ahí, se procede a la determinación del modelo que mejor se ajusta.

La normalización de las series de caudales consiste en transformar las series de caudales originales (caudales históricos restituidos a régimen natural) mediante los distintos tipos de funciones que incluye el modelo MASHWIN del SSD AQUATOOL (Véase Figura II.1.1), tales como: logarítmica $y=Ln(x+1)$, doble logarítmica $y=Ln[Ln(x+1)+1]$, raíz cuadrada $y=\sqrt{x}$ y potencial $y=(x-a)**b$.

Puesto que los modelos hidrológicos estocásticos asumen que las series hidrológicas están normalmente distribuidas, es necesario verificar que las series tengan una distribución normal, en caso de que esto no sea así será necesario realizar la normalización en las series. Para evaluar si una serie de datos esta normalmente distribuida se puede utilizar una de las siguientes pruebas de normalidad, pruebas que permiten identificar si se acepta la normalidad o no, de las series hidrológicas estudiadas.

- Uso de papel probabilístico normal, en el que los puntos de frecuencias acumuladas de la muestra habrían de resultar aproximadamente en una línea recta.
- Prueba del sesgo. Debido a que la distribución normal tiene un coeficiente de sesgo nulo. Se pueden definir límites de probabilidad en el sesgo de muestras extraídas a partir de

poblaciones normales y utilizarlas para decidir si el sesgo de la muestra que tenemos es significativo o no. El procedimiento a seguir es el siguiente: calculamos el sesgo de la muestra, si esta proviene de una distribución normal $(0, \frac{6}{N})$, con lo que los límites de probabilidad $(1-\alpha)$ alrededor del valor nulo pueden definirse con la Ecuación IV.2.

$$\left[\pm \sqrt{\frac{6}{N}} u_{1-\frac{\alpha}{2}} \right] \quad (IV.2)$$

Donde: $u_{1-\alpha/2}$ es el $1-\alpha/2$ cuantil de la distribución normal $(0, 1)$, y N es el número de años de la serie (aun cuando esta sea mensual).

Si $\hat{\gamma}$ (el sesgo muestral) cae fuera de esos límites se rechaza la hipótesis de normalidad.

Los límites anteriores han sido deducidos de muestras grandes ($N > 150$), es mejor utilizar otros valores para comparar $\hat{\gamma}$ en el caso de que las muestras sean pequeñas, lo cual es común en hidrología. Los valores de comparación dados por Snedecor y Cochran para $N < 150$, pueden tomarse de la Ecuación IV.3 o bien de los valores dados en la Tabla IV.3.8.

$$\pm (-3.9601N^{-0.4598}) \quad (IV.3)$$

Al igual que en la Ecuación IV.2 si el valor del sesgo cae fuera de los límites dados en la Ecuación IV.3 se rechaza la hipótesis de normalidad.

N	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	125	150
$\gamma_{0.10}^{(N)}$	0.711	0.662	0.621	0.587	0.558	0.534	0.492	0.459	0.432	0.409	0.389	0.35	0.321

Tabla IV.3.8.- Valores de comparación de Snedecor y Cochran

Para la Tabla IV.3.8 si $\hat{\gamma} < \gamma_{0.10}^{(N)}$, la hipótesis de normalidad es aceptada con un nivel de probabilidad del 10%.

Para el caso del Río grande de Morelia, la longitud de la serie histórica es de 49 años por lo que los límites de la prueba del sesgo se tomaron de la Ecuación IV.3, y su valor es: ± 0.662 .

Por lo que, como ya se vio en el apartado anterior las series de caudales anuales no requieren normalización, ya que los valores del sesgo de las tres estaciones están dentro del límite de la prueba de normalidad del sesgo. En cambio, los caudales mensuales sí requieren normalización.

IV.3.4. Tipificación De Las Series Normalizadas

Después de normalizar las series de caudales, se tipificaron con el fin de estandarizarlas, es decir, eliminar sus periodicidades, ya que solo así son mutuamente comparables. Para esta tipificación se emplearon la media y desviación típica de los caudales

normalizados, tal como se indica en las Ecuaciones IV.4 y IV.5, para series mensuales y anuales respectivamente.

$$\text{S. mensuales} \quad z_{v,\tau} = \frac{y_{v,\tau} - \hat{y}_\tau}{\hat{s}_{x_\tau}} \quad (\text{IV.4})$$

$$\text{S. anuales} \quad z_v = \frac{y_v - \hat{y}}{\hat{s}_x} \quad (\text{IV.5})$$

IV.3.5. Postulación De Los Modelos

Los modelos propuestos pertenecen al grupo de modelos Autorregresivos de Media Móvil de orden (p, q) , es decir con p parámetros Autorregresivos y q parámetros de Media Móvil. Mediante ellos se generan series sintéticas a partir de unas series muestrales.

Estos modelos tienden a conservar los estadísticos de primer orden (media y desviación típica) de dichas series muestrales, así como su estructura de dependencia temporal en los primeros períodos (las primeras p Autocorrelaciones). Debido a estas características resultan bastante útiles cuando se trata de generar series de caudales futuros equiprobables a la serie histórica.

Puesto que el modelo **MASHWIN del SSD AQUATOOL** dispone de tres tipos de modelos estocásticos (a) tipo ARMA; b) de DESAGREGACIÓN ESPACIAL; y c) de DESAGREGACIÓN TEMPORAL, a pesar de tener una idea del modelo más adecuado se procedió a realizar todos los modelos, con todas sus combinaciones posibles, para decidir cual o cuales tienen mejor comportamiento, para que con el modelo o modelos elegidos se proceda a generar las series sintéticas.

Se determinaron 4 esquemas de simulación clave y los modelos para cada esquema se detallan en la Tabla IV.3.9.

En la Tabla IV.3.9. se muestra la siguiente simbología:

AU = Anual Univariado

AM = Anual Multivariado

MU = Mensual Univariado

MM = Mensual Multivariado

C = Estación Coíntzio

CH = Estación Chiquito

A = Estación Atapaneo

ESQUEMA	AR 1		AR 2				ARMA (1,1)			Desag. Espac	Desag. Temp.
	A U	A M	M U	M M	A U	A M	M U	M M			
1 Anual Mult. (C+CH+A) +Desagregación Temporal		X									X
2 *Mensual Multivariado (C+CH+A)			X					X			X
3 *Mensual Univariado (C) +Desag. Espacial			X				X				X
4 Anual Univariado (C) +Desag. Espacial +Desagregación Temporal	X				X				X		X

Tabla IV.3.9.- Esquemas con sus respectivos modelos estudiados.

* Los modelos ARMA mensuales tienen la opción de con ajuste o sin ajuste de Fourier.

IV.3.5.1. Modelos Estocásticos Multivariados ARMA

a) Formulación de Modelos ARMA.

El MASHWIN del SSD AQUATOOL tiene tres modelos, modelo AR(1), modelo AR(2) y modelo ARMA(1,1), que pertenecen al grupo de los modelos Autorregresivos de Media Móvil de orden (p, q) .

El programa emplea modelos ARMA de parámetros constantes o estacionarios cuya formulación general está dada por la Ecuación IV.6. Cuando las series son mensuales, los modelos de parámetros constantes, en oposición a los de parámetros periódicos, resultan más consecuentes con el principio de parsimonia estadística (menos parámetros) y en la mayoría de los casos resultan suficientemente adecuados para la modelación de dichas series.

$$\{Z\}_t = [\Phi]_1 \{Z\}_{t-1} + [\Phi]_2 \{Z\}_{t-2} + \Lambda + [\Phi]_p \{Z\}_{t-p} + [\Theta]_0 \{\varepsilon\}_t - [\Theta]_1 \{\varepsilon\}_{t-1} - \Lambda - [\Theta]_q \{\varepsilon\}_{t-q} \quad (\text{IV.6})$$

Donde: $\{Z\}_t$: Vector de caudales del período (mes o año) t.
 $[\Phi]_p$: Matriz de parámetros autorregresivos.
 $[\Theta]_q$: Matriz de parámetros de media móvil.

$\{\varepsilon\}_t$: Vector de residuos del período t (valores aleatorios independientes entre sí y normalmente distribuidos con media cero y varianza unitaria).

b) Funciones de autocorrelación teóricas

Para este cálculo, el MASHWIN del SSD AQUATOOL evalúa las matrices teóricas de correlación cruzada IV.7 de cada modelo para tantos intervalos de desfase temporal k como el modelador especifique (en nuestro caso se escogió un $k=10$), y luego extrae los elementos de sus diagonales para conformar los correlogramas teóricos multivariados (FACT).

$$\mathbf{M}_k(z) = \begin{bmatrix} r_k^{1,1}(z) & r_k^{1,2}(z) & r_k^{1,3}(z) & \Lambda & r_k^{1,n}(z) \\ r_k^{2,1}(z) & r_k^{2,2}(z) & r_k^{2,3}(z) & \Lambda & r_k^{2,n}(z) \\ r_k^{3,1}(z) & r_k^{3,2}(z) & r_k^{3,3}(z) & \Lambda & r_k^{3,n}(z) \\ M & M & M & & M \\ r_k^{n,1}(z) & r_k^{n,2}(z) & r_k^{n,3}(z) & \Lambda & r_k^{n,n}(z) \end{bmatrix} \quad (IV.7)$$

IV.3.5.2. Pruebas De Bondad De Ajuste De Las Series Residuales de modelos ARMA

El MASHWIN del SSD AQUATOOL presenta la mayor parte de la información que se requiere para que se revise cada una de las pruebas de bondad, tales como:

- a) IGUALDAD DE LA MEDIA A CERO. La media de las series residuales deben ser estadísticamente iguales a cero.
- b) IGUALDAD DE LA DESVIACIÓN TÍPICA A UNO. Las desviaciones típicas de las series residuales deben ser estadísticamente iguales a uno.

Se observó que los modelos calibrados con ajuste por Fourier (parte esquemas 2 y 3), su desviación típica es muy lejana a uno, especialmente en Cointzio, sin embargo en la desagregación espacial los resultados fueron buenos, el resto de los modelos cumplieron satisfactoriamente esta prueba.

- c) NORMALIDAD DE LAS SERIES RESIDUALES. La distribución de probabilidad de las series residuales debe ser normal.
- d) INDEPENDENCIA TEMPORAL DE LAS SERIES RESIDUALES. Las series residuales deben ser no correlacionadas en el tiempo, es decir no debe existir una estructura de dependencia temporal entre ellas.
- e) INDEPENDENCIA ESPACIAL DE LAS SERIES RESIDUALES. Las series residuales deben ser no correlacionadas en el espacio, para lo que se les calculó la matriz de correlación cruzada de orden cero y se revisó que los coeficientes fuesen estadísticamente no significativos.

IV.3.5.3. Modelo Estocástico De Desagregación Espacial

Para elaborar el esquema de desagregación espacial se definieron la estación principal o de primer nivel, que es la que se modela con un modelo tipo ARMA, y las estaciones secundarias o de segundo nivel, que dependen de la principal y se modelan con un modelo de DESAGREGACIÓN ESPACIAL. Con ellas se formó un grupo de desagregación, con una estación principal y el resto de estaciones secundarias.

La conformación del grupo de desagregación se realizó seleccionando primero la estación principal y luego las secundarias. Los criterios en que se basó la selección de la estación principal consistieron básicamente en: (a) importancia desde el punto de vista estratégico en la gestión del sistema de las estaciones postuladas como principales; (b) grado de representatividad geográfica de cada una de las estaciones dentro de todo el sistema y (c) fiabilidad de las aportaciones.

El grupo de desagregación para el sistema del río Grande, quedó finalmente conformado de la siguiente manera:

Estación principal: Cointzio.

Estaciones secundarias: Chiquito y Atapaneo.

A partir de este punto se calibraron dos modelos interrelacionados por la estructura de desagregación, un modelo tipo ARMA para la estación principal y un modelo de DESAGREGACIÓN ESPACIAL para las estaciones secundarias.

El modelo disponible en el MASHWIN del SSD AQUATOOL es el modelo de DESAGREGACIÓN ESPACIAL DE LANE que está basado en el modelo de desagregación de Valencia y Schaake. Este modelo es especialmente idóneo para problemas multivariados con un gran número de estaciones, es decir, casos en los cuales se tendría un alto número de parámetros si fuesen abordados sólo con una modelación multivariada tipo ARMA.

a) *Formulación del modelo*

Éste es un modelo lineal que da como resultado series de caudales, Y , en un conjunto de *estaciones secundarias*, a partir de un conjunto de caudales, X , provenientes de unas cuantas *estaciones principales*. Para la calibración del modelo se requieren series históricas de caudal con el mismo número de datos en todas las estaciones, y correspondientes a un mismo período. La Ecuación IV.8 muestra la forma del modelo de Lane.

$$\{Y\}_t = [A]\{X\}_t + [B]\{\varepsilon\}_t + [C]\{Y\}_{t-1} \quad (IV.8)$$

Donde: Y : Vector de los caudales de las estaciones secundarias.

X : Vector de los caudales de las estaciones principales.

ε : Vector de valores aleatorios distribuidos normalmente con media cero, desviación típica unitaria e independientes en el tiempo.

A , B y C : Matrices de parámetros.

El modelo puede trabajar a escala mensual o anual.

El modelo de desagregación espacial de Lane está diseñado para preservar las medias y las varianzas de las series históricas en las series generadas, así como las correlaciones de orden cero entre estas últimas.

IV.3.5.4. Modelo Estocástico De Desagregación Temporal

El programa MASHWIN del SSD AQUATOOL dispone de un modelo para desagregar series de caudales anuales en sus respectivas series de caudales mensuales, es decir, cuenta con un modelo de *desagregación temporal*. En particular, el programa trabaja con el MODELO CONDENSADO DE DESAGREGACIÓN TEMPORAL DE LANE, que se basa igualmente en el modelo de Valencia y Schaake, y es básicamente una versión resumida de éste, con una drástica reducción de parámetros.

a) Formulación del modelo

Éste también es un modelo lineal en el que el caudal de un mes, Y_τ , es función del caudal del mes anterior, $Y_{\tau-1}$, del caudal del año t , X_t y de una componente aleatoria ε_τ .

$$\{Y\}_\tau = [A]_\tau \{X\}_t + [B]_\tau \{\varepsilon\}_\tau + [C]_\tau \{Y\}_{\tau-1} \quad (IV.9)$$

El modelo tiene una Ecuación como IV.9 para cada mes τ , es decir, hay un total de 12 ecuaciones o, lo que es igual, hay 12 conjuntos de matrices de parámetros, A_τ , B_τ y C_τ ($\tau=1, 2, \dots, 12$). Como puede verse fácilmente, este modelo, a diferencia de los dos anteriores, tiene una mayor cantidad de parámetros, pero aún así, dentro de los modelos de desagregación es el que menos parámetros requiere; de ahí su denominación de *condensado*.

Para su calibración, el modelo precisa de series de caudales anuales con sus correspondientes valores mensuales.

Este modelo preserva las covarianzas entre los valores anuales y sus respectivos valores mensuales, y las varianzas y covarianzas de desfase 1 ($k=1$) entre los valores mensuales.

IV.3.6. Verificación Y Validación De Los Modelos Encontrados

Una vez realizadas las pruebas de bondad de ajuste y considerando los resultados obtenidos en dichas pruebas se decidió descartar completamente los modelos mensuales ajustados por Fourier por los malos resultados dados en todas las pruebas.

Para cada esquema de simulación se seleccionó el modelo que mejor cumplía las pruebas de bondad de ajuste, quedando los siguientes:

- a) AR (1) Anual Multivariado +Desagregación Temporal, del esquema 1.
- b) ARMA (1, 1) Mensual Multivariado, del esquema 2.
- c) AR (2) Mensual Univariado (Cointzio) + Desagregación espacial, del esquema 3.

- d) AR (1) Anual Univariado (Cointzio) + Desagregación Espacial + Desagregación Temporal, del esquema 4.

Hay que anotar que si bien las pruebas de bondad de ajuste son necesarias en el proceso de selección del modelo, ellas no son garantía del buen o mal comportamiento del modelo durante la fase de generación. La verdadera capacidad que tenga el modelo calibrado para preservar la media, la desviación típica, la estructura de dependencia temporal y, especialmente, los estadísticos de sequía y almacenamiento, sólo puede verse claramente en la fase de generación.

IV.3.6.1. Generación de Series Sintéticas (validación final).

El procedimiento de generación de series sintéticas consistió en un proceso inverso al de calibración.

Para generar series sintéticas de caudales y lograr preservar los parámetros, además de incluir algún tipo de persistencia en el fenómeno. Para esto se utilizan las funciones de distribución que generan números aleatorios (normal, lognormal, gamma, etc.).

Inicialmente se generaron series de números aleatorios ε_t distribuidos normalmente, independientes en el tiempo, con media cero y varianza uno. De esta manera se obtuvieron las denominadas series residuales, tanto de los modelos ARMA, como de los modelos de Desagregación, tanto Espacial y Temporal de Lane.

Para la generación de los números aleatorios se utilizó la ecuación de Box y Muller, Ecuación IV.10. En cada estación se generaron tantas series de números aleatorios como series sintéticas, es decir, 500 y de la misma longitud de éstas (588 meses o 49 años); esta longitud es igual a la de las series históricas.

$$\varepsilon_t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{u_1^2}\right)} \cos(2\pi u_2) \quad (\text{IV.10})$$

Donde u_1 y u_2 son números aleatorios distribuidos uniformemente entre 0 y 1 obtenidos mediante un generador de congruencia lineal.

A cada serie de residuos se le hicieron las pruebas de normalidad del sesgo, independencia temporal, igualdad de la media a cero e igualdad de la varianza a uno. Solo se aceptaron como válidas aquellas series de números aleatorios que pasaron las cuatro pruebas.

Luego se generaron 500 series de caudales sintéticos en las estaciones mediante la ecuación matricial del modelo correspondiente (AR (1) para el esquema 1 y esquema 4, AR (2) para el esquema 3, ARMA (1, 1) para el esquema 2, desagregación espacial y temporal), en el campo tipificado, es decir, se generaron las series \mathbf{z}_t con la ecuación correspondiente al modelo con el cual se va generar, asumiendo que los caudales \mathbf{z}_{t-1} \mathbf{z}_{t-2} eran iguales a cero. Para eliminar la alteración que esta aproximación pudiese producir en los primeros caudales generados, se adopto un periodo de calentamiento de 120 meses (10 años), adicionales a los 588 meses de las series sintéticas.

IV.3.6.2. Destipificación y Desnormalización de las Aportaciones Sintéticas.

Posteriormente se hizo la destipificación de las series generadas, mediante la Ecuación IV.11. para series mensuales y la destipificación de las series anuales.

$$X_{v,\tau} = \hat{X}_{\tau} + \hat{S}_{X_{\tau}} Z_{v,\tau} \quad (\text{IV.11})$$

Donde: \hat{X}_{τ} : Media de los caudales normalizados del mes τ .

$\hat{S}_{X_{\tau}}$: Desviación típica de los caudales normalizados del mes τ .

$Z_{v,\tau}$: Es la misma series z_t con $t=12(v-1)+\tau$.

Después se procedió a la desnormalización de las series mensuales destipificadas mediante las funciones inversas a la aplicadas durante la fase de normalización, y finalmente se llevo a cabo el cálculo de los estadísticos. Éstos, al igual que en las series históricas, estan comprendidos dentro de tres grupos: estadísticos básicos, estadísticos de sequía y estadísticos de almacenamiento.

Dentro de los estadísticos básicos se calcularon la media, la desviación típica y los coeficientes de sesgo; adicionalmente, dentro de esta categoría también se incluyeron los correlogramas y las matrices de correlación cruzada, para cada una de las series sintéticas, de la misma forma en que se procedió para las series históricas. Luego se hallaron los valores medios de dichos estadísticos para cotejarlos con sus homólogos de las series históricas.

En cuanto a estadísticos de sequía, éstos se calcularon para los mismos valores de los umbrales que los que se emplearon en las series históricas, es decir, para umbrales de 0.9 del caudal medio. A cada serie sintética se le calculó el número de sequías y a cada una de éstas se le evaluó su duración, intensidad y magnitud. Luego a cada serie de sequías se le calcularon sus valores medios y máximos de duración, intensidad y magnitud, y sus respectivas desviaciones típicas. Después, y a partir de estos estadísticos, se obtuvo el número medio, máximo y mínimo de sequías, los promedios de las duraciones, intensidades y magnitudes medias y máximas, los promedios de la desviación típica, y la desviación típica de las duraciones máximas.

Finalmente se evaluaron los estadísticos de almacenamiento para umbrales del 0.9 del caudal medio. A cada una de las series sintéticas se le calcularon dichos estadísticos de la misma forma en que se procedió para las series históricas. Luego se calcularon los valores medios, máximos y mínimos del rango ajustado, rango ajustado reescalado y coeficiente de Hurst para cada serie generada.

Del análisis preliminar de los cuatro esquemas se concluyó que las series generadas con los modelos del esquema 1 y esquema 4 son los que mejor representan la serie histórica.

IV.4. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS

A partir de las tres aportaciones hidrológicas históricas del sistema, en las que se estudiaron de forma multivariada los caudales aforados (restituidos a régimen natural) se calibró y validó diversos modelos hidrológicos estocásticos, que pertenecen al grupo de modelos estocásticos Autorregresivos de Media Móvil de orden (p,q) combinados o no con modelos desagregación temporal y/o espacial .

Para el presente trabajo se ha utilizado un modelo de simulación hidrológica estocástica (validado y calibrado) para las tres aportaciones del Sistema de río Grande en forma conjunta (Cointzio, Chiquito, Atapaneo); es el **modelo Anual Multivariado AR (1) con Desagregación Temporal (Esquema 1)**, cuya estructura estocástica, es la que mejor se ajusta al conjunto de series temporales de caudales históricos, de acuerdo con lo que se muestra a continuación.

Como ya se mencionó, el esquema de modelación hidrológica AR(1) anual multivariado con Desagregación Temporal (Mensual) que se representa en la Ecuación (IV.12) y Ecuación (IV.13), y cuyos parámetros se presentan en la Ecuación (IV.14) y Ecuación (IV.15) respectivamente, fue el que mejor representó la estructura estocástica de las aportaciones hidrológicas del sistema del río Grande de Morelia, puesto que preserva satisfactoriamente los estadísticos básicos, los estadísticos de sequías y los estadísticos de almacenamiento, a nivel anual. Los parámetros del modelo de desagregación temporal, Ecuación (IV.13), varían para cada mes del año; y el que se presenta en la Ecuación (IV.15) corresponde al del mes de Marzo (Mes 3).

$$\{Z\}_t = [\Phi]_t \{Z\}_{t-1} + [\Theta]_0 \{\varepsilon\}_t \quad (IV.12)$$

$$\{Y\}_\tau = [A]_\tau \{X\}_t + [B]_\tau \{\varepsilon\}_\tau + [C]_\tau \{Y\}_{\tau-1} \quad (IV.13)$$

$$\{Z\}_t = \begin{bmatrix} 0.228 & 0.175 & -0.077 \\ 0.106 & 0.044 & -0.015 \\ 0.027 & 0.039 & 0.658 \end{bmatrix} \{Z\}_{t-1} + \begin{bmatrix} 0.937 & 0.000 & 0.000 \\ 0.713 & 0.688 & 0.000 \\ 0.372 & 0.025 & 0.626 \end{bmatrix} \{\varepsilon\}_t \quad (IV.14)$$

$$\{Y\}_3 = \begin{bmatrix} 0.308 & -0.011 & -0.212 \\ 0.081 & 0.030 & -0.063 \\ 0.390 & -0.168 & -0.075 \end{bmatrix} \{X\}_t + \begin{bmatrix} 0.464 & 0.000 & 0.000 \\ 0.087 & 0.356 & 0.000 \\ 0.151 & 0.020 & 0.653 \end{bmatrix} \{\varepsilon\}_3 + \begin{bmatrix} 0.639 & -0.060 & 0.265 \\ -0.079 & 0.951 & 0.121 \\ -0.212 & 0.015 & 0.699 \end{bmatrix} \{Y\}_{3-1} \quad (IV.15)$$

Entre los estadísticos básicos que se preservan se tienen la media, desviación típica y sesgo; entre los estadísticos de sequía que se preservan se tienen la intensidad, magnitud, y duración; y entre los estadísticos de almacenamiento que se conservan se tienen el rango, rango ajustado y coeficiente de Hurst.

Para validación y determinación del grado de ajuste final del modelo hidrológico estocástico ya mencionado de las aportaciones del sistema del río Grande, se generaron 500 series para cada una de las aportaciones, con una longitud igual a los 49 años de las series hidrológicas históricas. En la Tabla IV.4.1, Tabla IV.4.2 y Tabla IV.4.3, se presentan la media,

límite superior (LS) y límite inferior (LI) de los estadísticos para las 500 series generadas frente a los estadísticos de la serie histórica.

En la Tabla IV.4.1, se presenta un resumen del análisis para la aportación de Cointzio, que muestra los estadísticos básicos, de sequía y de almacenamiento de la estación Cointzio, y en ella podemos distinguir en los estadísticos básicos, que el valor de la media anual de la serie sintética es prácticamente igual a la media correspondiente de la serie histórica, además de que, dentro de sus límites inferior y superior se encuentra en un rango aceptable; de igual forma en la desviación típica aunque con un poco más de variación entre la sintética y la histórica, pero aún así mostrando una adecuada preservación de desviación típica; se puede ver también que la desviación típica se encuentra adecuadamente dentro de los límites.

Por el contrario, la media del coeficiente de sesgo presenta una diferencia numérica un tanto mayor, pero cabe señalar que el modelo estocástico elegido (Esquema 1) al igual que los modelos descartados (Esquemas 2,3, y 4), generalmente no preservan este estadístico. Y como era de esperarse en un modelo anual la autocorrelación se representa bastante bien.

En el caso de los estadísticos de sequía, podemos observar que los valores medios sintéticos de sus principales conceptos de caracterización, que son la duración, la intensidad y la magnitud, presentan un adecuado comportamiento con respecto a sus correspondientes valores históricos, tomando en cuenta además el hecho de que se encuentran dentro de sus respectivos límites superior e inferior de manera aceptable;

En el caso de los valores máximos de duración, intensidad y magnitud de sequías en la misma estación de Coíntzio, podemos observar en la comparación de los valores históricos con los sintéticos, una diferencia notoria pero no exagerada, sobre todo en los valores máximos de intensidad, además, cabe señalar el hecho de que en los tres conceptos anteriores, el valor histórico respectivo se sale un poco del rango marcado en los límites, pero debemos considerar que estos límites son parte de los datos sintéticos y por lo tanto los valores que deben quedar dentro del rango comprendido son los valores o datos generados. Es conveniente también, mencionar que el análisis de los estadísticos de sequías para las tres estaciones, se llevó a cabo sólo para una definición de sequía del 90% del caudal medio.

En los estadísticos de almacenamiento, se puede ver que existe mayor variación en los valores cotejados, sobre todo en el rango, pero se puede apreciar también que dichos valores, aunque distantes, se encuentran dentro del rango comprendido entre los límites, considerados como límites de la población, lo cual hace aceptable tal discrepancia. Así en el caso del coeficiente de Hurst, la serie histórica presenta un valor de 0.854, la media de las series generadas presenta un valor de 0.700, los valores mínimo y máximo se encuentran entre 0.500 a 0.890 respectivamente, quedando el valor histórico dentro de este intervalo. Los valores empíricos del coeficiente de Hurst para series de caudales anuales son cercanos a 0.73. Observándose en la Tabla IV.4.3, que en las series de caudales generadas para las tres estaciones tienen valores del coeficiente de Hurst cercanos al valor empírico.

		SERIE	SERIES GENERADAS		
		HISTORICA	MEDIA	LI	LS
BASICOS	MEDIA	70.548	70.547	59.581	80.618
	DESV. TIPICA	20.714	20.519	16.702	24.812
	SESGO	0.602	0.021	-0.815	0.874
	AUTOCORRELACIÓN	0.330	0.279		
SEQUIAS (9)	MEDIA DE DURACIÓN	2.333	2.200	1.300	3.000
	MEDIA DE INTENSIDAD	16.335	18.870	11.120	26.620
	MEDIA DE MAGNITUD	27.728	30.070	13.430	46.710
	MAXIMO DE DURACIÓN	8.000	4.400	4.300	4.500
	MAXIMO DE INTENSIDAD	22.314	38.470	37.810	39.140
ALMA	MAXIMO DE MAGNITUD	86.454	79.600	76.960	82.230
	Rn* (Rango)	312.322	195.220	94.520	383.240
	Rn** (Rango Ajustado)	15.078	9.560	4.940	17.090
	Hurst (k)	0.854	0.700	0.500	0.890

Tabla IV.4.1: Análisis de los estadísticos de la aportación anual en Coitzio.

En la Tabla IV.4.2, que muestra los estadísticos básicos, de sequía y de almacenamiento de la estación Chiquito, podemos apreciar en lo que respecta a los estadísticos básicos, que los valores cotejados que presentan un adecuado comportamiento, incluso el coeficiente de sesgo, considerando que en la estación de Coitzio la diferencia entre estos valores era considerablemente mayor, además, en ambos casos los datos históricos y sintéticos se mantienen dentro de sus correspondientes límites; pero como se mencionaba anteriormente, el modelo estocástico elegido al igual que los modelos descartados, generalmente no preservan este estadístico. En el caso de los estadísticos de sequía, podemos observar que los valores medios sintéticos de sus principales conceptos de caracterización, que son la duración, la intensidad y la magnitud, presentan un adecuado comportamiento con respecto a sus correspondientes valores históricos, observando que sólo en el caso de la magnitud media, la diferencia entre los valores cotejados en un poco mayor, se debe tomar en cuenta además el hecho de que se encuentran dentro de sus respectivos límites superior e inferior de manera aceptable.

En el caso de los valores máximos de duración, intensidad y magnitud de sequías en la misma estación Chiquito, podemos observar en la comparación de los valores históricos con los sintéticos, una diferencia notoria pero no exagerada, pero no así en el caso de la intensidad máxima, donde la diferencia entre los valores es considerablemente menor que en los dos casos restantes, de la misma manera que en el caso anterior, en los tres conceptos característicos de la sequía, el valor histórico respectivo se sale un poco del rango marcado en los límites, pero debemos considerar que estos límites son parte de los datos sintéticos y por lo tanto los valores que deben quedar dentro del rango comprendido son los valores o datos generados.

En los estadísticos de almacenamiento, se puede ver que existe mayor variación en los valores cotejados, sobre todo en el rango, pero se puede apreciar también que dichos valores, aunque distantes, se encuentran dentro del rango comprendido entre los límites, lo cual, como ya hemos mencionado, hace aceptable tal discrepancia.

		SERIE	SERIES GENERADAS		
		HISTORICA	MEDIA	LI	LS
BASICOS	MEDIA	9.938	9.994	7.401	12.148
	DESV. TIPICA	5.356	5.187	4.101	6.281
	SESGO	0.112	0.140	-0.719	1.191
	AUTOCORRELACIÓN	0.121	0.081		
SEQUIAS (9)	MEDIA DE DURACIÓN	2.111	2.000	1.300	2.800
	MEDIA DE INTENSIDAD	5.713	5.030	3.370	6.690
	MEDIA DE MAGNITUD	9.433	7.620	4.060	11.180
	MAXIMO DE DURACIÓN	7.000	4.500	4.300	4.600
ALMA	MAXIMO DE INTENSIDAD	8.944	8.800	8.740	8.870
	MAXIMO DE MAGNITUD	27.080	20.130	19.540	20.720
	Rn* (Rango)	70.039	44.020	22.470	78.400
	Rn** (Rango Ajustado)	13.077	8.550	4.310	15.240
	Hurst (k)	0.809	0.660	0.460	0.850

Tabla IV.4.2: Análisis de los estadísticos de la aportación anual en Chiquito

		SERIES	SERIES GENERADAS		
		HISTORICAS	MEDIA	LI	LS
BASICOS	MEDIA	46.404	46.553	27.458	64.313
	DESV. TIPICA	25.801	24.135	15.666	34.795
	SESGO	0.096	0.139	-0.763	1.363
	AUTOCORRELACIÓN	0.683	0.614		
SEQUIAS (5)	MEDIA DE DURACIÓN	4.400	3.700	1.600	5.800
	MEDIA DE INTENSIDAD	18.073	23.820	13.140	34.490
	MEDIA DE MAGNITUD	86.266	66.670	16.510	116.820
	MAXIMO DE DURACIÓN	14.000	7.800	7.500	8.000
ALMA	MAXIMO DE INTENSIDAD	33.711	39.750	39.240	40.250
	MAXIMO DE MAGNITUD	344.438	175.830	169.290	182.360
	Rn* (Rango)	448.344	322.860	119.310	623.800
	Rn** (Rango Ajustado)	17.377	13.340	6.380	20.230
	Hurst (k)	0.898	0.800	0.580	0.940

Tabla IV.4.3: Análisis de los estadísticos de la aportación anual en Atapaneo.

En la Tabla No. IV.4.3, que muestra también la comparativa de estadísticos pero de la estación Atapaneo, se puede observar un comportamiento similar en su mayoría a las dos estaciones anteriores entre los datos cotejados, sólo en el caso de la magnitud máxima de sequía, se puede apreciar una diferencia un tanto mayor con el valor histórico cotejado. Sin embargo este valor sintético se encuentra adecuadamente dentro del rango entre los límites.

En la Figura IV.4.1 y IV.4.2, tenemos la media y desviación típica respectivamente, y en ellas podemos apreciar que los valores sintéticos se han preservado bastante bien, además de que se encuentran adecuadamente dentro de los límites superior e inferior en las tres estaciones, cabe destacar que en la estación Chiquito existe una variabilidad considerablemente menor en comparación a las dos estaciones restantes.

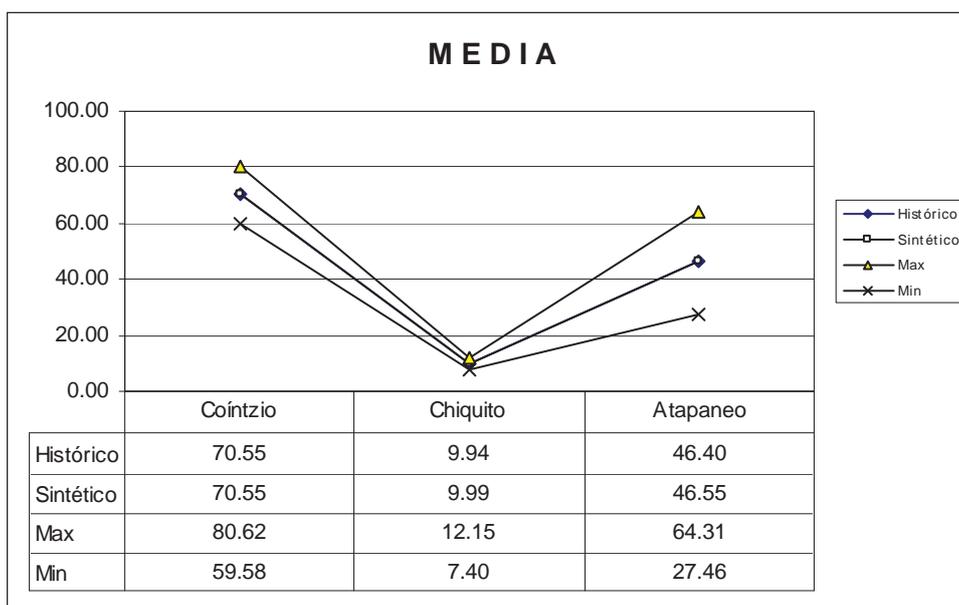


Figura IV.4.1 Estadístico básico, media

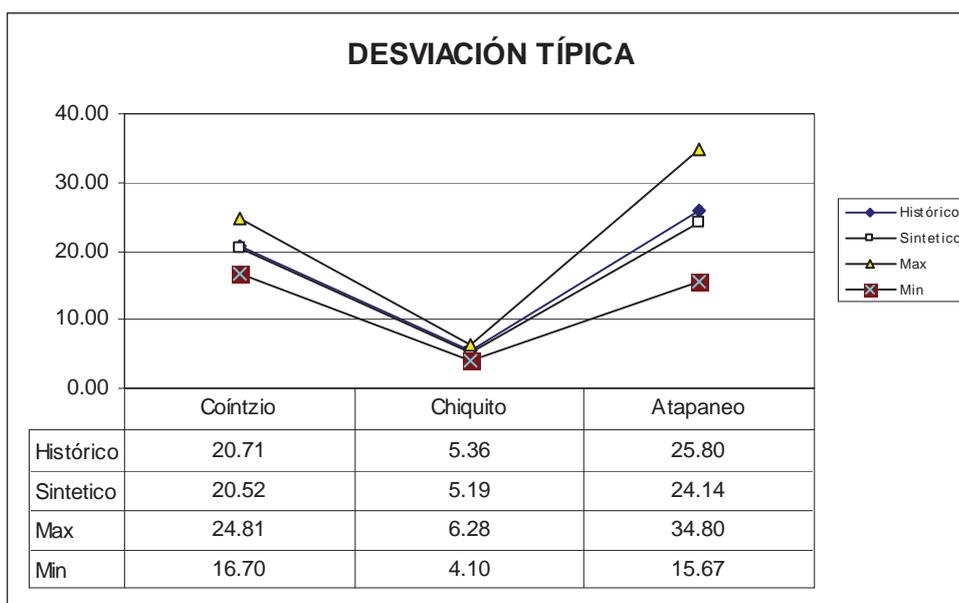


Figura IV.4.2 Estadístico básico, desviación típica

En la Figura IV.4.3, se muestra el coeficiente de sesgo también en las tres estaciones; en esta gráfica vemos que los valores sintéticos de este estadístico en las estaciones Chiquito y Atapaneo se han mantenido muy cercanos a los valores históricos correspondientes, no así en la estación Coíntzio cuya diferencia es un tanto mayor, de cualquier modo, en las tres estaciones se han mantenido dentro de sus límites; es conveniente mencionar que este esquema analizado, al igual que los tres descartados anteriormente, generalmente no preservan este estadístico.

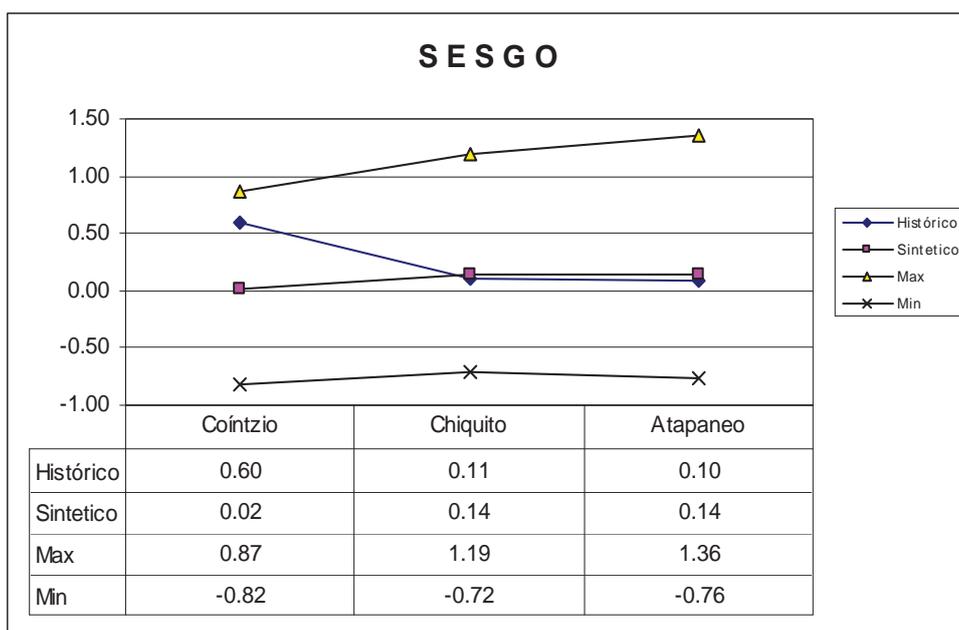


Figura IV.4.3 Estadístico básico, sesgo

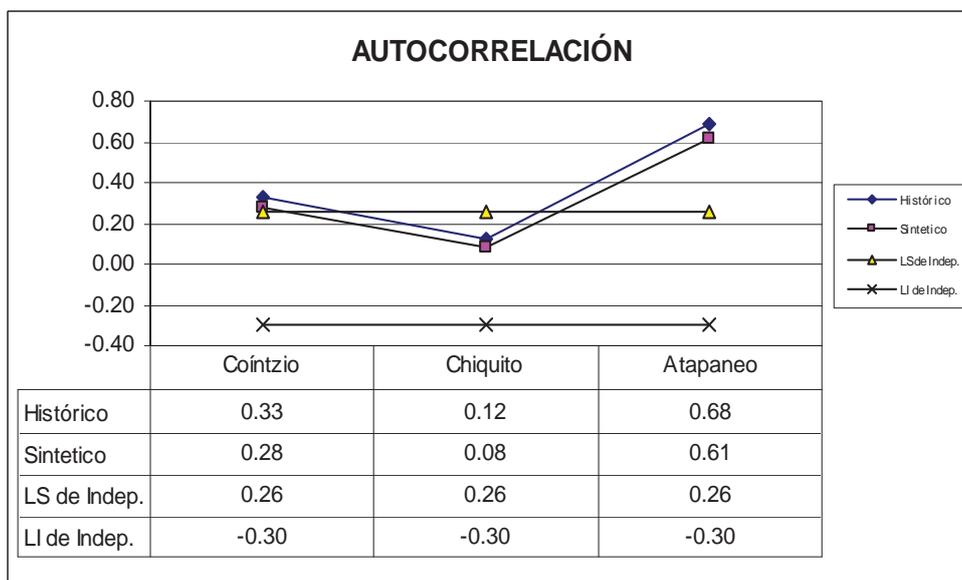


Figura IV.4.4 Estadístico básico, autocorrelación

La autocorrelación se muestra en la Figura IV.4.4, en ella podemos ver que para las tres estaciones se han preservado adecuadamente los valores sintéticos de cada una, sin embargo, esta gráfica nos muestra también que solamente en la estación Chiquito existe independencia, debido a que los valores histórico y sintético de la misma se encuentran dentro de los límites de independencia, en las dos estaciones restantes se puede observar lo contrario, ya que estos valores quedan por fuera de dichos límites, lo cual muestra cierta dependencia de un valor anual respecto al siguiente.

En las Figuras IV.4.5, IV.4.6 y IV.4.7, respectivamente se muestra la media de la duración, de la intensidad y de la magnitud de sequías, y en los tres casos podemos ver, en primer lugar, una pequeña variabilidad en la estación Chiquito en comparación con Coíntzio y Atapaneco en las que, de igual forma es apreciable la diferencia entre ellas existiendo mayor variabilidad en Atapaneco; en los tres casos se han preservado adecuadamente los valores sintéticos, sin embargo, se aprecia una diferencia un tanto mayor nuevamente en Atapaneco para los tres estadísticos, aunque en todos los casos los valores han caído dentro de los límites.

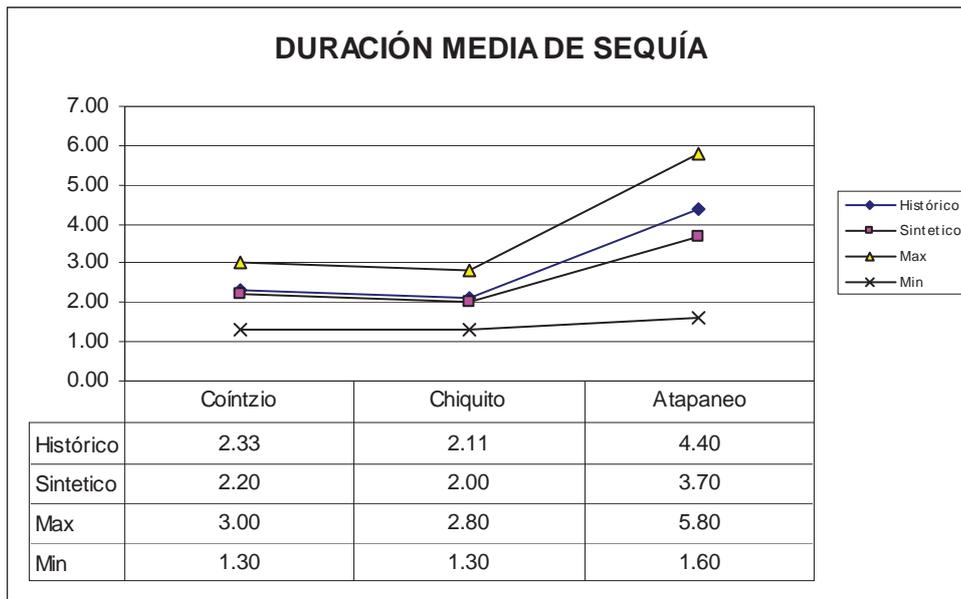


Figura IV.4.5 Estadístico de sequía, duración media

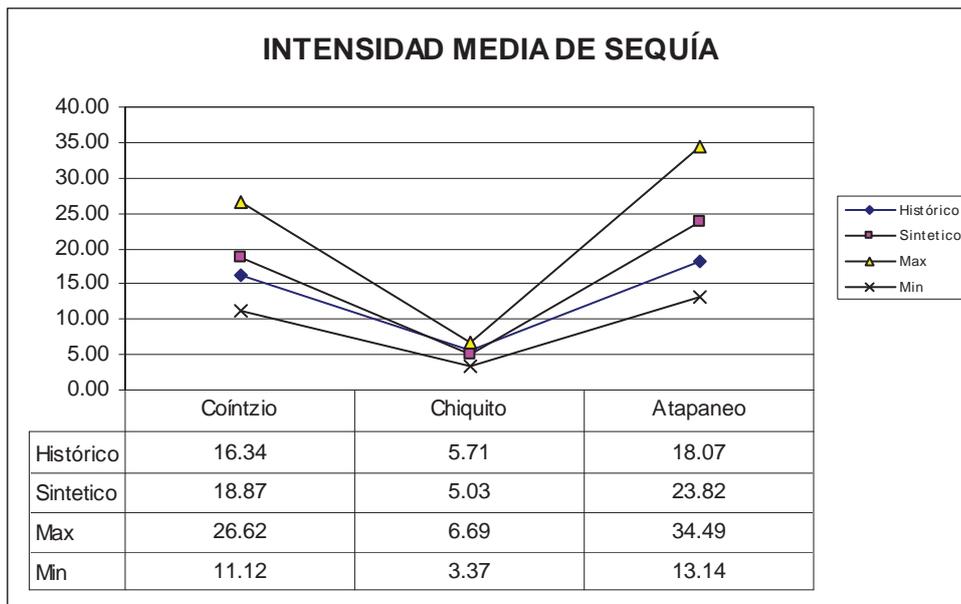


Figura IV.4.6 Estadístico de sequía, intensidad media

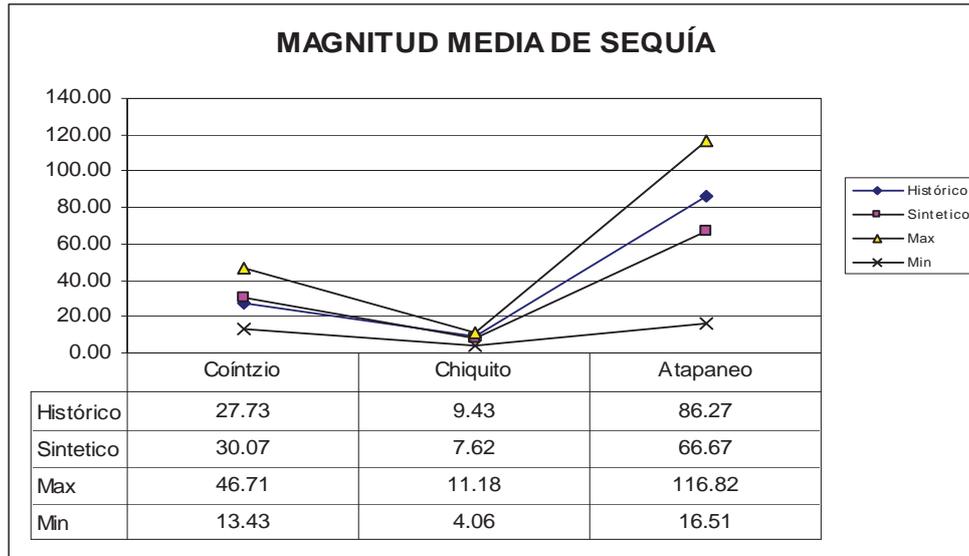


Figura IV.4.7 Estadístico de sequía, magnitud media

En las Figuras IV.4.8, IV.4.9 y IV.4.10, podemos ver los valores máximos también de duración, intensidad y magnitud de sequías en las series de caudales históricos y sintéticos; para el caso de la duración (Figura No. IV.4.8), es notoria la diferencia entre el valor histórico y el sintético en las tres estaciones, siendo mayores los valores históricos, sin embargo los sintéticos, se han mantenido muy cercanos a los límites, pero dentro de estos; además hay que considerar que para las tres estaciones la variabilidad es muy pequeña. En relación a la intensidad máxima (Figura IV.4.9), se observa que los valores históricos de las estaciones Coíntzio y Atapaneo son inferiores a los sintéticos, sobre todo en Coíntzio, inclusive se encuentran debajo del límite inferior generado; sin embargo, el valor sintético de estas dos estaciones se mantiene dentro de los límites; en la estación Chiquito, la diferencia entre los valores comparados es casi nula; en el caso de la magnitud (Figura IV.4.10), se preservan muy bien, los valores sintéticos para las estaciones Coíntzio y Chiquito, y en Atapaneo se muestra una diferencia un tanto mayor, el valor sintético queda por debajo del histórico; no obstante, en las tres estaciones el valor sintético se mantiene adecuadamente dentro de sus límites.

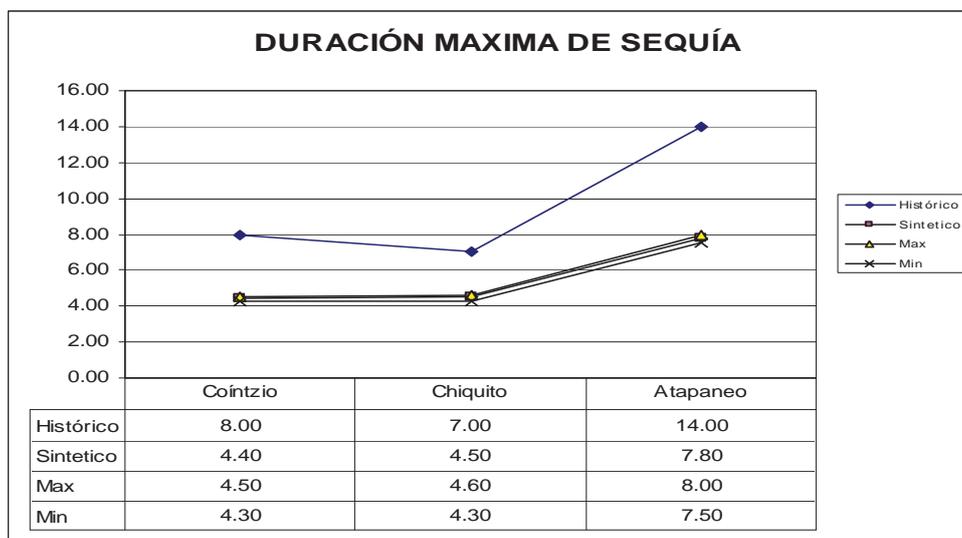


Figura IV.4.8 Estadístico de sequía, duración máxima

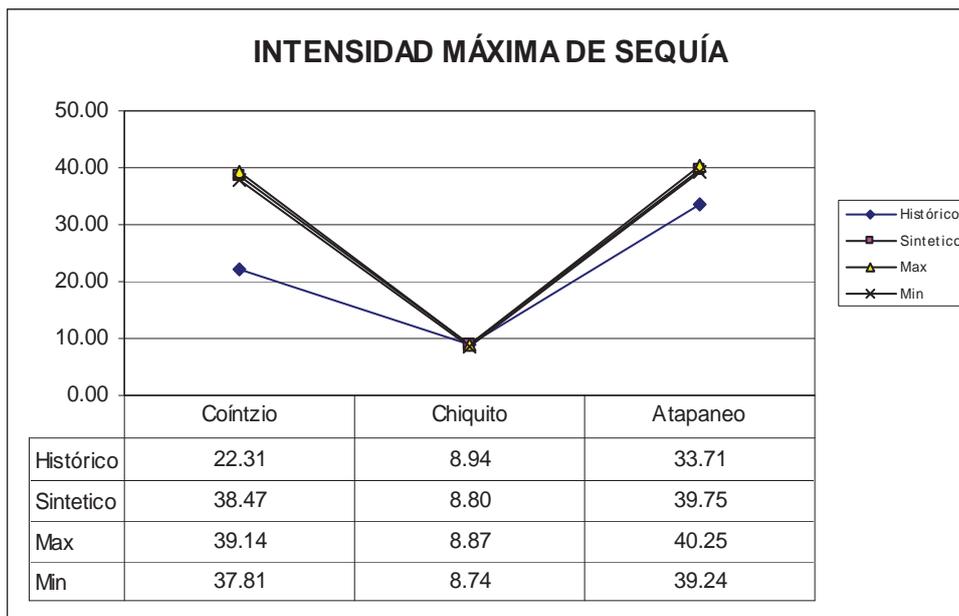


Figura IV.4.9 Estadístico de sequía, intensidad máxima

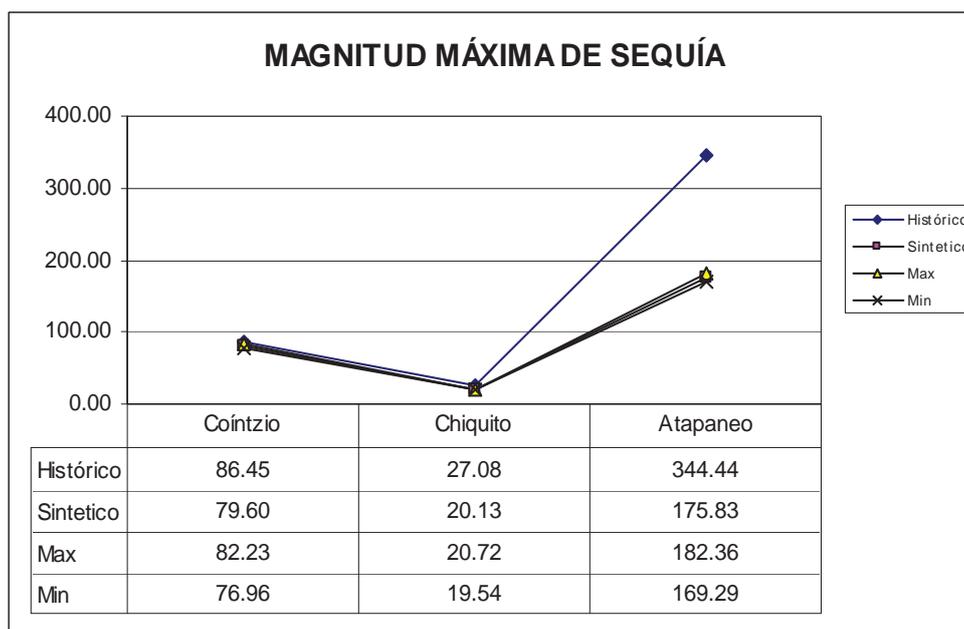


Figura IV.4.10 Estadístico de sequía, magnitud máxima

Los estadísticos de almacenamiento se muestran en las Figuras IV.4.11, IV.4.12 y IV.4.13, y en ellas se observa, que para el caso del rango ajustado y para el coeficiente de Hurst se tiene uniformidad entre las respectivas diferencias de las tres estaciones, además de que se observa una amplia variabilidad en el caso del rango ajustado en las tres estaciones; la diferencia entre los valores históricos y sintéticos del coeficiente de Hurst es pequeña y uniforme para las tres estaciones; en la Figura IV.4.11 se observa una amplia variabilidad en Coíntzio y Atapaneo y también una diferencia considerable entre sus respectivos valores sintéticos e históricos pero manteniéndose dentro de los límites. En el caso de este mismo estadístico pero en la estación

Chiquito se observa una variabilidad considerablemente menor a las otras estaciones y de igual forma sus valores comparados se mantienen dentro de los límites, lo cual indica una adecuada preservación del rango en esta estación.

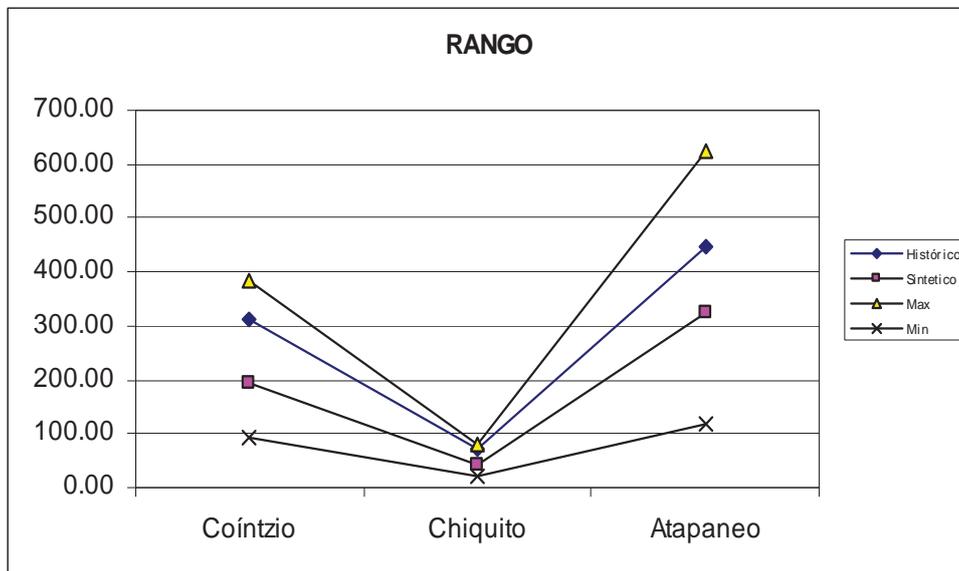


Figura IV.4.11 Estadístico de almacenamiento, rango

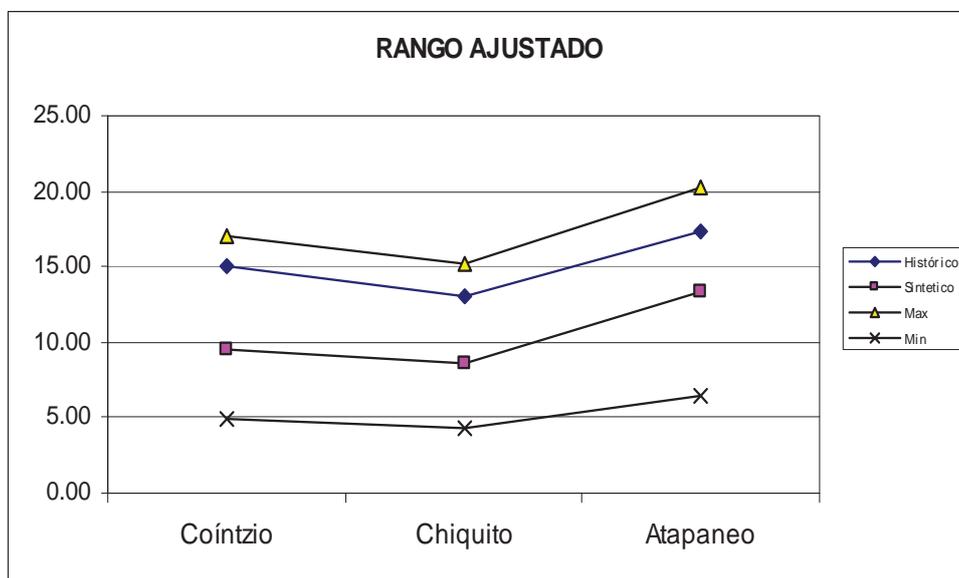


Figura IV.4.12 Estadístico de almacenamiento, rango ajustado

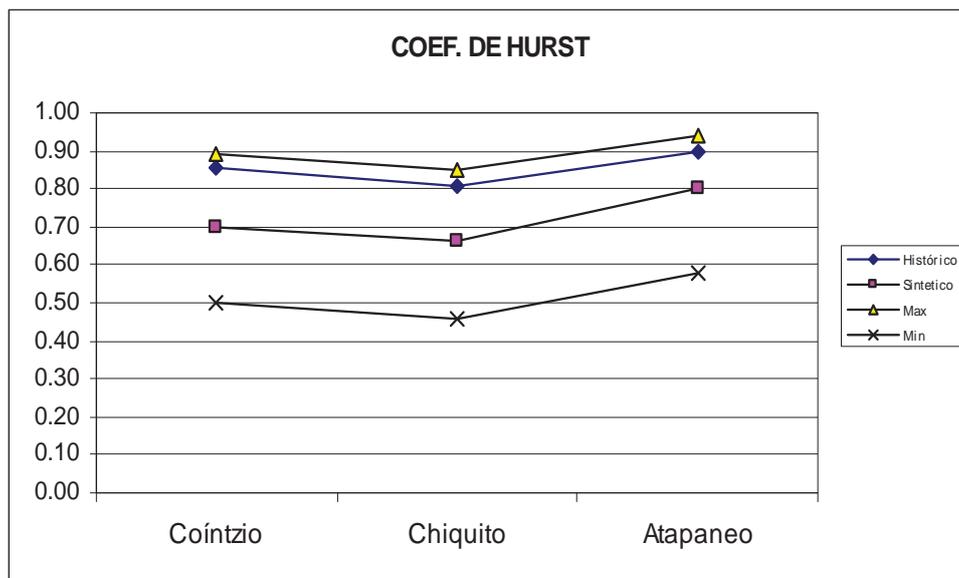


Figura IV.4.13 Estadístico de almacenamiento, coeficiente de Hurst

Considerando el análisis de la generación, podemos decir que el *Modelo Anual Multivariado AR (1) con Desagregación Temporal*, se ha elegido correctamente, ya que de manera general muestra un buen comportamiento, considerando la adecuada preservación de los estadísticos que mantiene, y por esta razón, este modelo será el que se va a utilizar para la generación de las series sintéticas de caudales para la modelación de la gestión con conocimiento del riesgo.

CAPITULO V.- MODELO DE SIMULACIÓN DE LA GESTIÓN DEL SISTEMA DEL RÍO GRANDE DE MORELIA

V. 1. INTRODUCCIÓN

Como consecuencia del desarrollo de las cuencas, los organismos encargados de la distribución del agua se han dado a la tarea de mejorar la eficiencia en el manejo de este recurso, para lo cual se ha hecho uso de la tecnología con la finalidad de lograr estos objetivos; una herramienta muy importante es el desarrollo de las computadoras, por medio de las cuales se ha conseguido llevar a los modelos de simulación las características de un SRH, y en base a estos, observar el comportamiento de la cuenca a través del tiempo, proporcionando así una valiosa herramienta para elaborar reglas de operación que hagan más eficiente la operación de los SRH.

V. 2. DESCRIPCIÓN DEL ESQUEMA DE SIMULACIÓN

A partir de información disponible, se ha planteado el esquema conceptual de la cuenca del río Grande de Morelia (Figura V.2.1). Para el diseño del esquema de la cuenca se aprovechó la posibilidad de diseño gráfico asistido del Sistema de Soporte a la Decisión AQUATOOL que permite elaborar el esquema con una estructura lo más parecida a la disposición geográfica real.

Para la definición del esquema se requiere definir nudos que representan los puntos donde realmente se produce la toma de la demanda así como otros puntos de confluencia y bifurcaciones. Los elementos que constituyen el esquema (aportaciones, demanda, ríos, etc.) se describen a continuación:

1. El nudo 1 corresponde al embalse Cointzio. Se considera una aportación de agua superficial correspondiente a la cuenca vertiente del mismo (desde el nacimiento del río Grande hasta el Embalse) denominada Aportación Cointzio. En el nudo 1 se presenta una toma para suministrar agua a la demanda urbana de la ciudad de Morelia (superficial) la cual suministra 600 lps constantes. El embalse tiene un volumen inicial de 70 Hm³ y un caudal máximo de sueltas de 50 Hm³/ mes y sus características físicas son las que se presentan en la Tabla V.2.1 y en la Figura V.2.1

ELEVACION S.L.A. (m)	AREA (Ha)	ALMACENAMIENTO (Hm ³)
1993.50	553.10	84.00
1992.00	520.10	75.45
1988.03	441.50	56.73
1985.30	394.30	45.20
1980.06	312.80	26.70
1978.00	280.00	20.60
1975.50	229.00	15.64
1970.00	105.00	4.76
1968.00	80.00	3.50
1967.00	71.67	3.06
1966.00	63.33	2.63
1965.00	55.00	2.19
1962.00	30.00	0.88

Tabla V.2.1.- Cota (metros) – Superficie (Ha) – Volumen (Hm³) del embalse Cointzio.

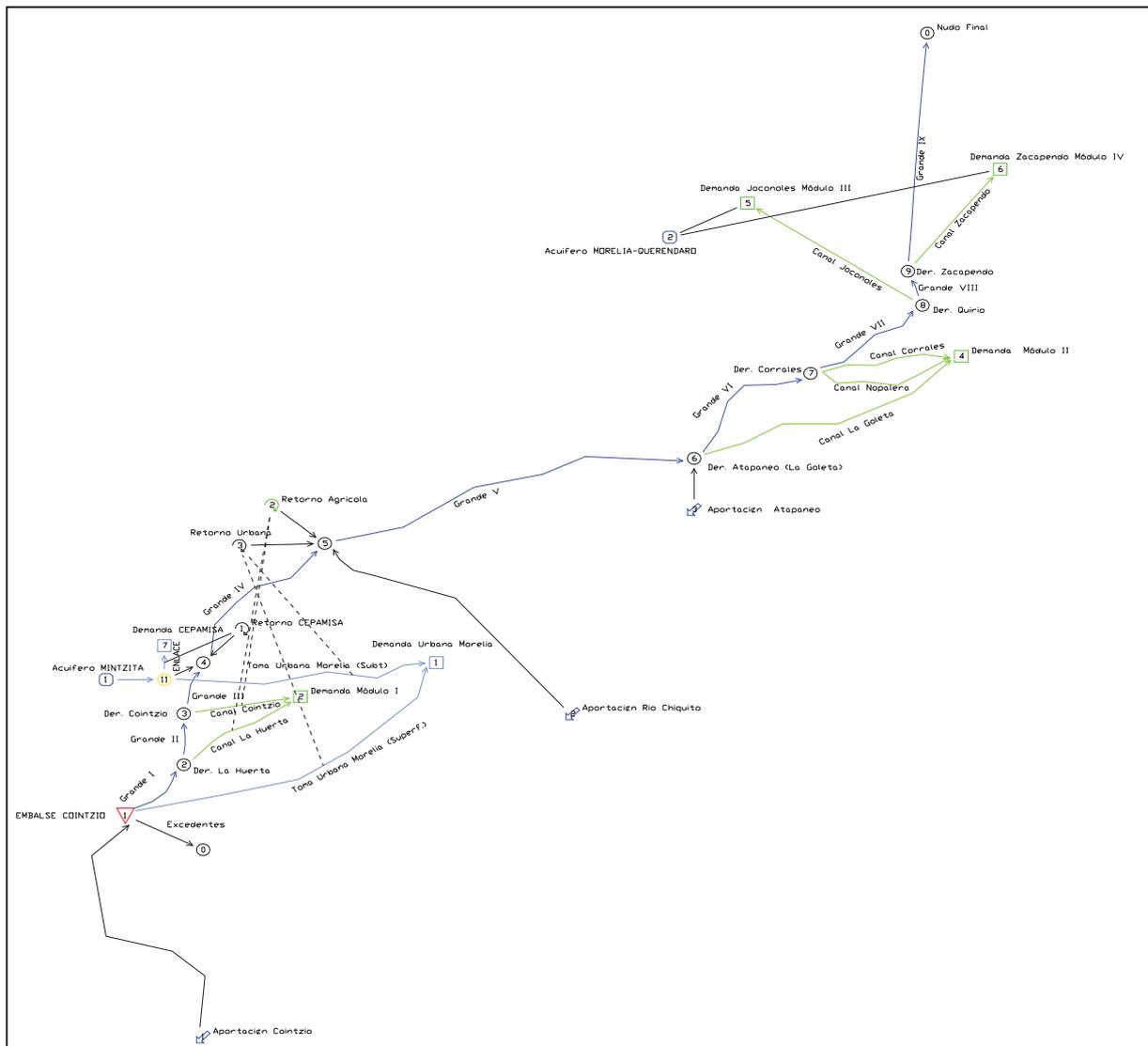


Figura V.2.1.- Esquema de Simulación Existente de la Cuenca del río Grande de Morelia.

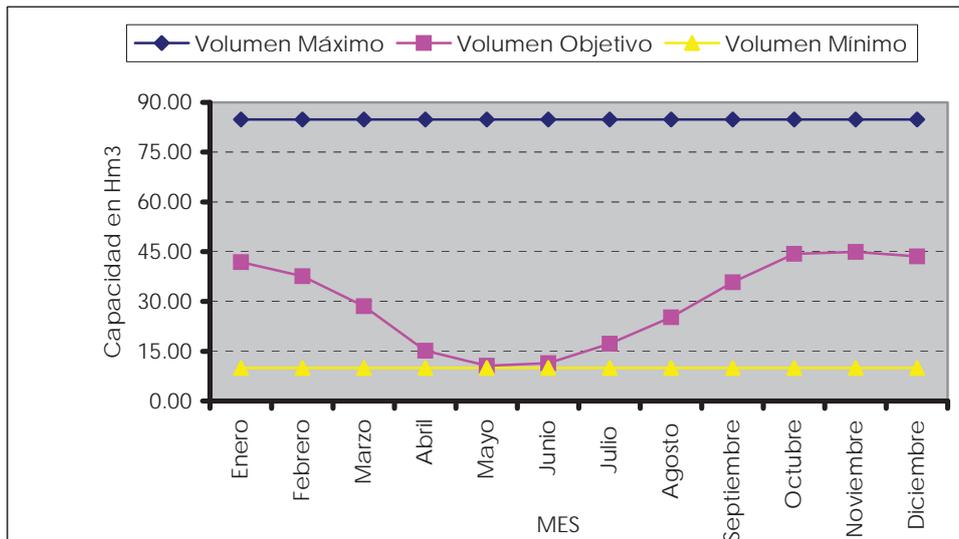


Figura V.2.2.- Almacenamiento, máximo, mínimo y objetivo del embalse Cointzio.

2. El tramo de río denominado "Grande 1", es una conducción a régimen natural, representado en el esquema por una conducción tipo 1 que parte desde el nudo 1 (Embalse Cointzio), hasta el nudo 2 (Derivadora La Huerta).
3. El nudo 2. Este nudo representa en nuestro esquema a la "Derivadora la Huerta". Por medio de esta derivadora se suministra el agua de riego para una parte de la demanda agrícola del Módulo 1 del Distrito de Riego No. 020 Morelia-Queréndaro.
4. Toma "Canal la Huerta" esta toma sale de la derivadora la Huerta, la cual distribuye el agua de riego a una parte de la demanda del módulo 1, por su margen derecha del río grande de Morelia.
5. El tramo de río denominado "Grande II" es la continuación del río Grande de Morelia desde el nudo 2 (derivadora la Huerta), hasta el nudo 3 (Derivadora Cointzio).
6. El nudo 3. En este se localiza la "Derivadora Cointzio", por medio de la cual se suministra la otra parte de la demanda agrícola del módulo I a través del canal Cointzio, ubicado en la margen izquierda del río Grande.
7. El tramo de río denominado "Grande III" es la continuación del río Grande partiendo de la derivadora Cointzio (nudo 3) hasta el punto donde descarga aguas residuales la planta industrial (nudo 4).
8. El manantial de La Mintzita y San Miguel, es un manantial que se representa en el esquema como "Acuífero Mintzita", de donde se toma agua para la demanda industrial (500 lts/seg) y para la demanda urbana (1000 Ips), los dos manantiales suministran a la demanda urbana entre 800 y 1000 lps. Esta toma se representa por un bombeo que va del acuífero al nudo 11 ficticio (el modelo para suministrar agua de un acuífero a la demanda, por bombeo, requiere este artificio - un nudo artificial- para que llegue el agua bombeada).
9. El nudo 11 ficticio se une al sistema (requerimiento de la red de flujo), mediante una conducción ficticia denominado "ENLACE". Del nudo 11 se representan las 2 tomas del agua de origen subterráneo a las demandas industrial y urbana.
10. El tramo ENLACE es una conducción ficticia con caudal circulante cero.
11. El nudo 4. Se ubica el Retorno Industrial, es el punto donde se incorpora el agua utilizada por la planta industrial, al río Grande de Morelia; se considera se entrega el 100% del agua empleada por la planta que es del orden de 500 lts/seg constantes (15.552 Hm³/mes).

12. El tramo de río "Grande IV", corresponde al río Grande de Morelia desde el nudo 4 (descarga de agua industrial), hasta el nudo 5, punto donde se encuentra ubicada la aportación del río Chiquito.
13. El nudo 5. Corresponde al punto donde llega la "Aportación del Río Chiquito" el cual cruza la ciudad de Morelia. En el nudo 5 se ha representado la entrada de la cuenca del "Retorno de uso agrícola". El tramo del río Grande desde el embalse hasta este punto, es una zona donde físicamente llegan los drenes al río, y se determinó que representan el 30% del total suministrado al modulo I. También en este nudo se representa la entrada del "Retorno Urbano", que es un retorno de agua proveniente de la ciudad de Morelia, el cual es del 70% del agua suministrada para uso urbano.
14. El tramo de río denominado "Grande V" es la continuación del cauce natural río Grande de Morelia desde el punto donde se le une el río Chiquito (nudo 5), hasta la Derivadora Atapaneo (nudo 6).
15. El nudo 6. Representa la "Derivadora Atapaneo (La Goleta)" de la cual se deriva agua para una parte de la demanda agrícola del modulo 11 a través del canal la Goleta que sale por su margen izquierda. En este mismo nudo se colocó la aportación "Atapaneo", que es la aportación de la intercuenca desde el embalse Cointzio hasta la derivadora Atapaneo.
16. Toma "Canal la Goleta". Este canal sale de la margen izquierda del río Grande y es el encargado de distribuir el agua de uso agrícola a una parte del modulo II.
17. El tramo de río denominado "Grande VI", es la continuación del río Grande de Morelia desde la derivadora Atapaneo (nudo 6), hasta la derivadora Corrales y Nopalera (nudo 7).
18. El nudo 7 representa a las "derivadoras Corrales y Nopalera", por medio de las cuales se deriva el agua para uso agrícola del modulo II.
19. Toma "Canal Corrales", sale por la margen izquierda del río Grande y transporta parte del agua de riego para la demanda del módulo II.
20. Toma "Canal Nopalera", este canal sale también del nudo 7 y distribuye la otra parte del agua de riego de la demanda del módulo II, por la margen derecha del río Grande.
21. Tramo de río "Grande VII", es la continuación del río Grande de Morelia desde las, Derivadoras Corrales y Nopalera (nudo7), hasta la Derivadora Quirio (nudo 5).
22. El nudo 8 representa la "Derivadora Quirio" por medio de la cual se deriva agua a la demanda agrícola del módulo III, a través del canal Joconoles.
23. Toma "Canal Joconoles" esta toma se encarga de distribuir el agua de riego procedente del río Grande al Módulo III.
24. Tramo de río "Grande VIII", es la continuación del Río Grande desde la derivadora Quirio (nudo 8) hasta la Derivadora Zacapendo (nudo 9).
25. El nudo 9. En este punto se ubica la "Derivadora Zacapendo" por medio de la cual se suministra agua a la demanda agrícola del módulo IV a través del canal Zacapendo.
26. Toma "Canal Zacapendo". Por medio de este canal se distribuye el agua de riego proveniente del río Grande, para el módulo IV.
27. Tramo de río "Grande IX". Este tramo es la continuación del río Grande de Morelia desde la Derivadora Zacapendo hasta el punto donde desemboca el lago de Cuitzeo.
28. El nudo final es la desembocadura del río Grande de Morelia al "Lago de Cultzeo".
29. Acuífero Morelia-Queréndaro. Este acuífero tiene relación con la cuenca, ya que las demandas agrícolas de los módulos III y IV bombean agua para el riego; así mismo la demanda urbana de Morelia bombea agua para consumo humano, aunque en le esquema de simulación no ha sido representado.

V. 3. RÉGIMEN DE OPERACIÓN DEL SISTEMA

Al existir un solo embalse, se ha asignado el número de prioridad 0, al embalse de Cointzio, en caso de existir más de un embalse habría que determinar la estrategia de operación de todos los embalses de la cuenca. Así mismo al no conocer el volumen objetivo del embalse este fue determinado mediante una optimización mediante el modelo OPTIGES del SSD AQUATOOL (Andreu, 1992), obteniéndose así la regla óptima de operación del embalse, para la información histórica suministrada.

A las demandas se les ha asignado diferente grado prioridad; a la “Demanda Urbana de Morelia” por ser uno de los propósitos de regulación de la cuenca, se le ha asignado el número 0 de prioridad (cabe señalar que el valor de 0 es el que tiene la más alta prioridad de suministro), esta demanda recibe recurso superficial del embalse y recurso subterráneo del manantiales; la demanda industrial “Demanda CEPAMISA” obtiene su suministro del manantial de la MINTZITA y se le ha asignado una prioridad de 0; las demandas agrícolas presentan prioridades 1 y 2. La demanda “Demanda Módulo I”, obtiene el total de su suministro del embalse, por tanto tiene prioridad 1; la demanda “Demanda Módulo II” obtiene su suministro, del embalse y de la aportación de la intercuenca comprendida entre el embalse y la estación hidrométrica de Atapaneo; y las demandas denominadas “Demanda Módulo III” y “Demanda Módulo IV” obtienen su suministro, del embalse, de la aportación de la intercuenca comprendida entre el embalse y la estación hidrométrica de Atapaneo y del acuífero Morelia-Queréndaro (bombeo).

V. 4. VALIDACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN

La validación consiste en comparar los resultados que nos arroja la simulación con los valores actuales proporcionados por el Distrito de Riego No.020 Morelia - Queréndaro o por los informes consultados.

Los valores medios de retorno obtenidos en la simulación (Tabla V.4.1), son bastante cercanos a los valores medios históricos. Hay que observar que el retorno industrial es igual a lo suministrado, ya que el caudal que entra a la papelera es devuelto al río Grande de Morelia en su totalidad.

RETORNO HISTÓRICO	SIMULADO	
Agrícola	2.47	2.5
Urbano	36.06	36.1
Industrial	15.55	15.55

Tabla V.4.1 Análisis de los retornos medios a la cuenca en Hm³

De la misma forma, se ha realizado la comparativa entre resultados que arroja la simulación con valores históricos de los siguientes aspectos: Bombeo en los acuíferos, entregas medias al lago de Cuitzeo (debidas a los sobrantes de intercuenca y los excedentes del embalse Coíntzio, mismos que se analizaron de manera separada), suministro a módulos del Distrito de Riego No. 020, suministro medio histórico a la demanda urbana e industrial, etc.; y en dicha comparativa se han encontrado resultados muy satisfactorios. Por lo tanto, podemos asegurar que el modelo de simulación es útil para la gestión de las demandas agrícolas.

V. 5. CONCLUSIONES DEL ANALISIS

De la simulación de la gestión histórica se concluye, que el sistema del río Grande no es extremadamente deficitario pero no se puede **garantizar el suministro a las demandas de regadío según los** criterios de garantía establecidos por el modelo de simulación de la gestión.

Razones por las cuales se planteó el presente trabajo, de determinación de reglas de operación para el uso agrícola, que den una idea del riesgo que se asume al planear anualmente u operar mensualmente el recurso agua, teniendo sólo en cuenta el almacenamiento en el embalse de Coíntzio.

CAPITULO VI.- REGLAS DE OPERACIÓN DETERMINISTAS ESTOCÁSTICAS PARA EL SUMINISTRO DEL RECURSO AL USO AGRÍCOLA

VI. 1. PARÁMETROS DE LA METODOLOGÍA DE GESTIÓN DE CUENCAS CON CONOCIMIENTO DEL RIESGO EN EL SISTEMA DEL RÍO GRANDE

La descripción de la metodología utilizada para la determinación de las reglas de operación, se presenta en el Capítulo II, aquí solamente se aplican los parámetros de la metodología obtenidos, para la cuenca del río Grande de Morelia, y se establece un procedimiento de obtención.

La metodología que se representa en la Figura II.2.4 requiere de datos: entre ellos se requiere del modelo de simulación de la gestión del sistema del río Grande (Capítulo V), y del modelo hidrológico estocástico de las aportaciones de la cuenca. (Capítulo IV).

Por otro lado se conocen los parámetros de la metodología de gestión con conocimiento del riesgo, para la cuenca del río Grande de Morelia, estos son: el número de simulaciones múltiple que es de 500, el periodo de anticipación que es de 2 años, el riesgo asumido históricamente que es del 30% (Arellano, 2002).

Finalmente se debe aportar los datos iniciales para la generación de series sintéticas, estas son los caudales históricos correspondientes al año y mes anterior de inicio de la simulación. También se debe aportar el volumen almacenado en el embalse de Cointzio al mes anterior de la simulación de la gestión.

Con estos datos, el modelo de simulación de la gestión con la metodología de evaluación del riesgo, permite determinar el riesgo de la cuenca mes a mes, si es igual o inferior al admisible o asumido históricamente, se sigue al calculo de la gestión para el siguiente mes, caso contrario se hace una restricción al suministro, esto hasta llegar al ultimo mes del periodo de simulación.

Con los resultados de la simulación de la gestión, para un riesgo admisible del 30%, se procedió a determinar las reglas de operación para el uso agrícola.

Con la aplicación de la metodología de gestión con conocimiento del riesgo, aquí resumida, es posible gestionar la cuenca para un riesgo asumido del 30%, o modificar el riesgo asumido con un riesgo de menor o mayor valor numérico. Dando como resultado para el primero reglas de operación más conservadoras que las obtenidas con el riesgo del 30%, y dando con el segundo reglas de operación más arriesgadas que las obtenidas con el riesgo del 30%.

VI.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE DETERMINACIÓN DE LAS REGLAS DE OPERACIÓN

Para obtener reglas estocásticas explícitas es necesario haber determinado los parámetros óptimos de la metodología de gestión de cuencas con conocimiento del riesgo para la cuenca en estudio y seguir los siguientes pasos:

- a) Preparar una serie de aportaciones básica. Esta serie básica puede ser la serie histórica, pero como se verá a continuación, es más indicado que sea una serie sintética de gran longitud. Para preparar esta serie puede utilizarse el modelo GENESIS del módulo hidrológico del SSD AQUATOOL, generando 1 serie de 1500 años y despreciando los 50 primeros para evitar los efectos de los valores iniciales adoptados.
- b) Simular para distintos niveles de riesgo la aplicación de la metodología propuesta; para ello se hace uso del modelo MSIMRISK del SSD AQUATOOL. O simular para el nivel de riesgo asumido históricamente; para ello se hace uso del modelo SIMGES del SSD AQUATOOL.
- c) Identificar decisiones agregadas en el sistema. Una decisión agregada es por ejemplo, la cantidad de suministro a un grupo de demandas que puedan considerarse de forma agregada. También puede ser el caudal a desembalsar de un embalse. O también el grado de restricciones a adoptar para las demandas de un determinado tipo.
- d) Identificar posibles indicadores de estado del sistema. Estos pueden referirse a volúmenes embalsados en embalses individuales, o volúmenes agregados de varios embalses. También pueden ser caudales individuales o agregados.
- e) Para cada nivel de riesgo asumido o el nivel de riesgo asumido históricamente, y para cada decisión agregada, y a partir de los resultados obtenidos, correlacionar el valor numérico de la decisión en cada uno de los meses (o años) de las simulaciones efectuadas en el punto 2 con el indicador o los indicadores más apropiados.

Como puede adivinarse ya, la aplicación de estos pasos no es en general sencilla, ni tiene garantizada la obtención de resultados significativos en la práctica. Por lo tanto se trata en cierto modo de un “arte” cuyos resultados dependen de la habilidad del analista para identificar las decisiones agregadas adecuadas para el sistema, los indicadores agregados adecuados, y la forma de la correlación adecuada entre ambos.

VI. 3. ESCENARIOS

Los escenarios, muestran las diversas propuestas de reglas de operación para el uso agrícola planteadas para el sistema del río Grande de Morelia.

En el sistema del río Grande de Morelia, la decisión agregada es clara y única: el suministro a las demandas de riegos. El suministro a la demanda urbana al tener la más alta prioridad no requiere el desarrollo de una regla de operación específica. El suministro a la demanda agrícola, requiere el desarrollo de una regla de operación con la finalidad de gestionar el sistema de forma óptima.

El indicador de estado del sistema es claro: el volumen embalsado en la presa de Cointzio. Se ha seleccionado este indicador por que siempre se tiene el volumen almacenado del mes anterior, al momento de tomar una decisión en el presente mes. Por otro lado existe una alta correlación evidente entre el indicador de estado y la decisión agregada.

Las reglas de operación de un sistema están condicionadas por los años secos, medios y húmedos, que se pueden dar en el sistema, que en nuestro caso es la cuenca del río Grande de Morelia. Por tal razón se han planteado los escenarios 1 y 2, el primero permite determinar las reglas de operación para los años con gastos medios, el segundo permite determinar las reglas de operación para situaciones extremas, como los años secos y húmedos.

Por otro lado cuando se pretende disminuir los efectos negativos de los grandes déficit, la regla de operación propuesta en el escenario 1, es posible modificarla con la definición de indicadores de alarma, elemento que se incluye en el SSD AQUATOOL. Estos indicadores de alarma se aplican a dos de las cuatro demandas agrícolas. Siendo el indicador de alarma, el volumen del embalse de Cointzio para las diferentes situaciones de almacenamiento consideradas críticas, y el establecimiento de restricciones correspondientes al volumen crítico (Tabla VI.3.1). Esta modificación del escenario 1 da como resultado el escenario 3.

Volumen embalse Cointzio	Coefficiente restricción
15	1
20	0.45
25	0.35
30	0.15

Tabla VI.3.1 Indicador de alarma para el embalse de Cointzio

VI. 3. 1. Escenario 1: Regla basada en el modelo de gestión del sistema histórico

Con los parámetros óptimos de la metodología de gestión con conocimiento del riesgo, se han aplicado los pasos arriba descritos en dos situaciones: (1) La serie hidrológica básica es la serie histórica. (2) La serie hidrológica básica es una serie sintética de 1500 años de longitud.

Como se trata de la gestión histórica, el nivel de riesgo de la regla, será el nivel de riesgo asumido históricamente durante la gestión de la cuenca, el cual fue valorado en el 30%.

Los resultados obtenidos en el caso de la serie básica histórica pueden verse en la Figura VI.3.1. Los puntos representan la decisión agregada de suministro a la demanda agrícola a escala anual para un riesgo del 30%. En este caso parece que un ajuste lineal por tramos de la nube da un resultado aceptable, con lo que las regla estocástica explícita será los tramos de recta. Así por ejemplo, si en el mes de Octubre se tiene un volumen embalsado de 20 Hm³ y se acepta un riesgo del 30%, el suministro de ese año a la demanda de riegos será 19 Hm³.

De la misma forma pueden analizarse las decisiones mensuales para cada mes que pueden verse en la Figura VI.3.2 para el mes de noviembre, en la Figura VI.3.3 para el mes de diciembre, Figura VI.3.4 para el mes enero, en la Figura VI.3.5 para el mes de febrero, en la Figura VI.3.6 para el mes de marzo, en la Figura VI.3.7 el mes de Abril, y en la Figura VI.3.8 el mes de mayo. Los meses no graficados no requieren suministro de recurso agua. Los puntos representan la decisión agregada de suministro a la demanda agrícola a escala mensual para un riesgo del 30%. Para cada mes arriba indicado se tienen los resultados de la Figura VI.3.2,

VI.3.3, VI.3.4, VI.3.5, VI.3.6 y VI.3.7; a los que se les ajustan las rectas correspondientes, que constituyen las reglas de operación mensuales. Así, por ejemplo, si en el mes de Marzo (Figura VI.3.6) se tiene un volumen de embalse de 20 Hm³, el suministro a la demanda agrícola en ese mes será de 8.8 Hm³ si se quiere asumir un riesgo del 30%.

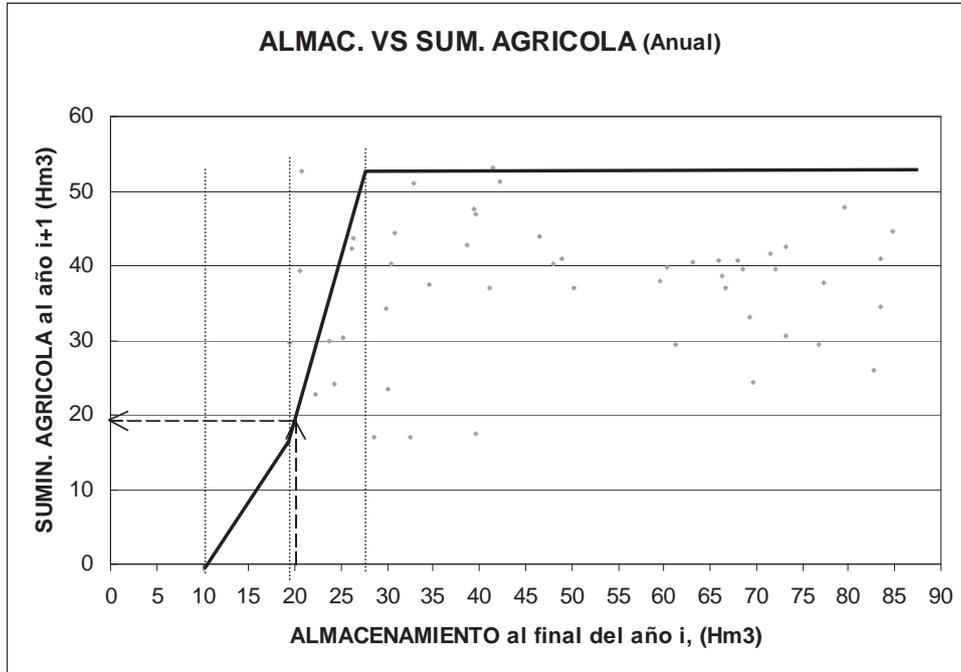


Figura VI.3.1. Regla estocástica explícita anual, obtenida con la serie histórica, para un riesgo admisible del 30%

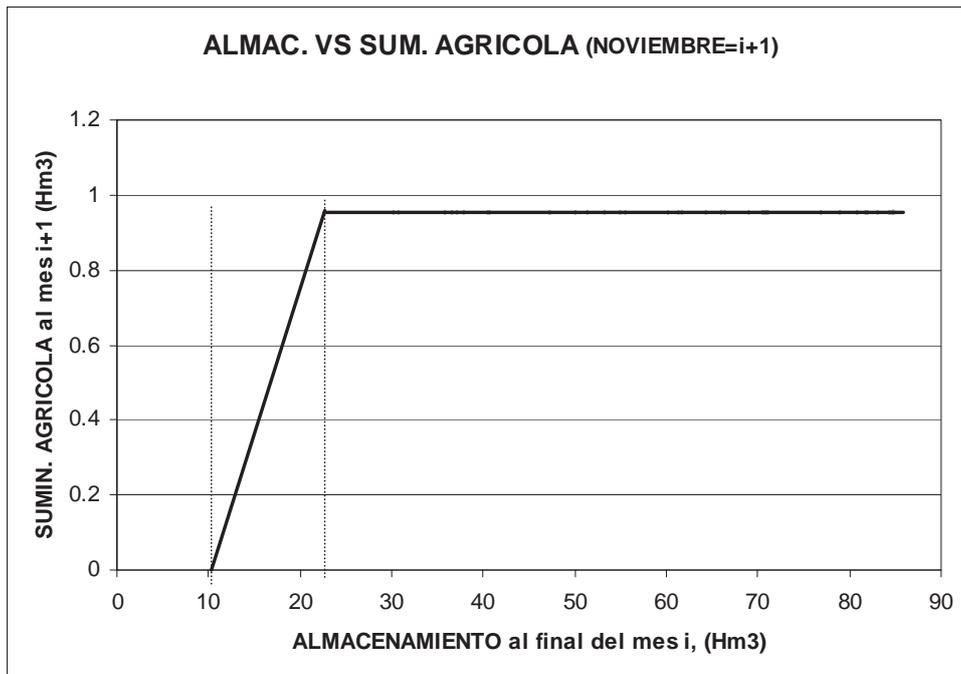


Figura VI.3.2. Regla estocástica explícita mensual (mes de Noviembre), obtenida con la serie histórica, para un riesgo admisible del 30%

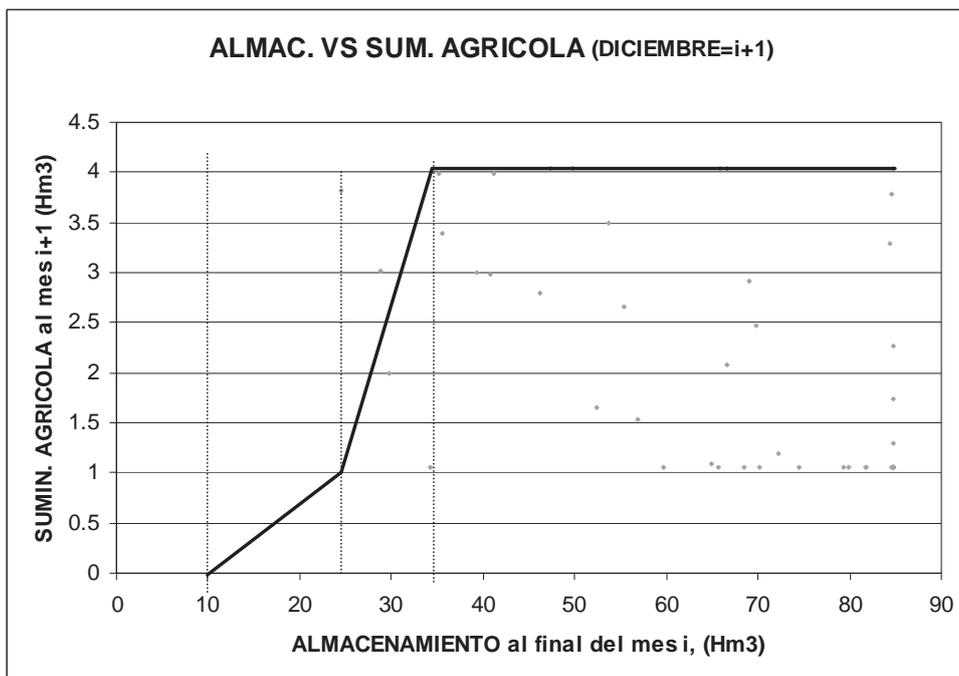


Figura VI.3.3. Regla estocástica explícita mensual (mes de Diciembre), obtenida con la serie histórica, para un riesgo admisible del 30%

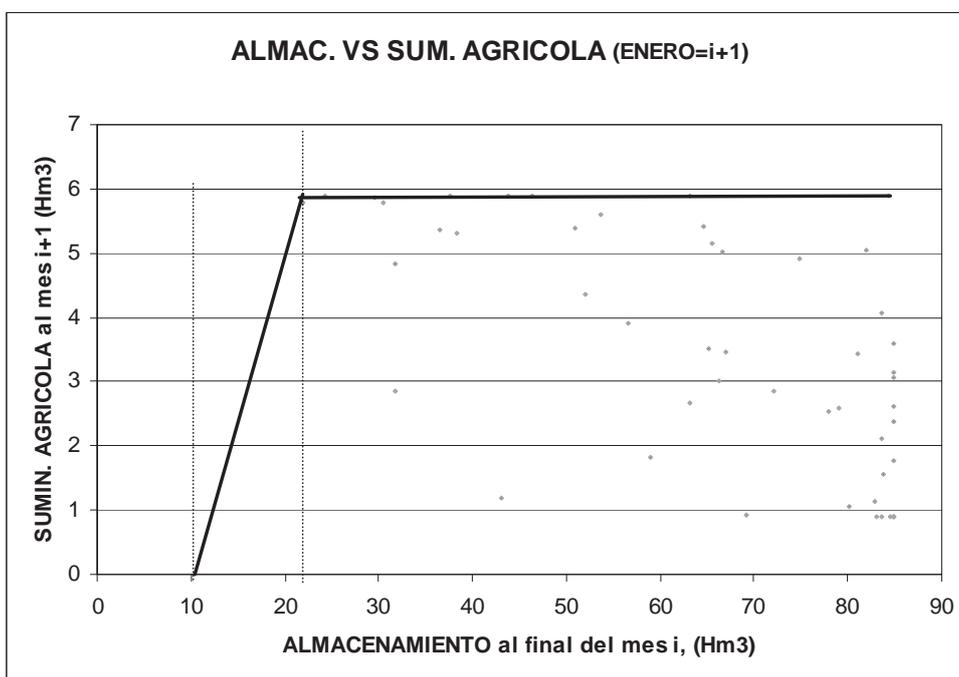


Figura VI.3.4. Regla estocástica explícita mensual (mes de Enero), obtenida con la serie histórica, para un riesgo admisible del 30%

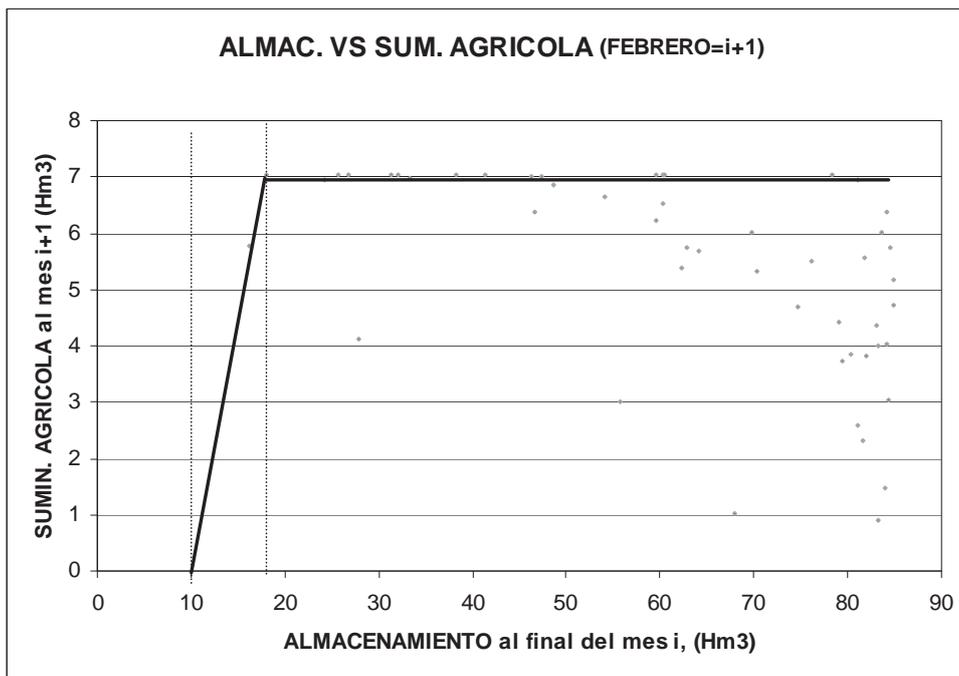


Figura VI.3.5. Regla estocástica explícita mensual (mes de Febrero), obtenida con la serie histórica, para un riesgo admisible del 30%

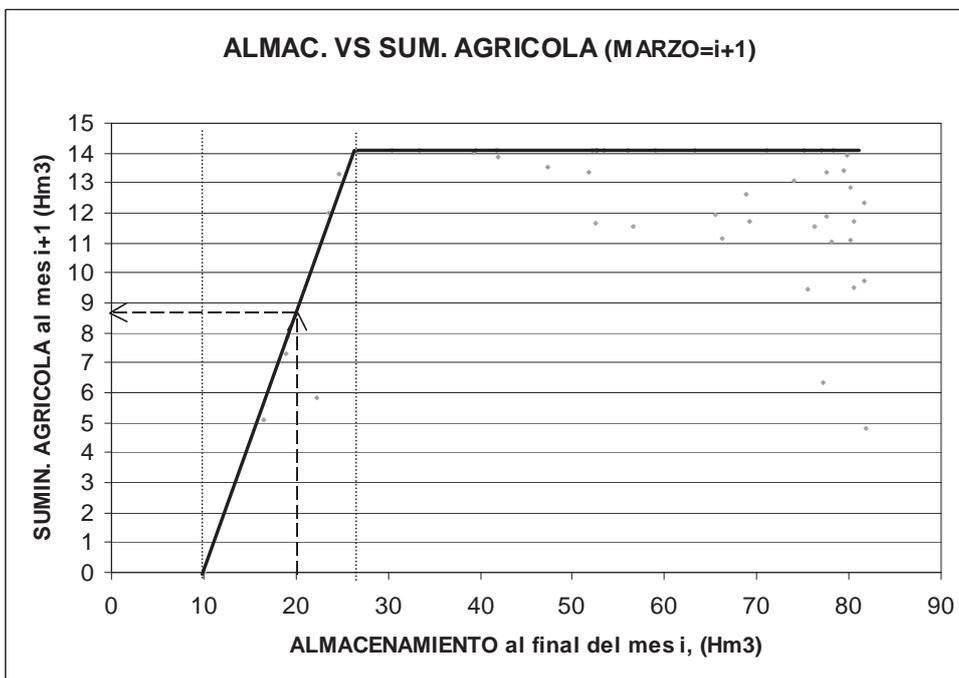


Figura VI.3.6. Regla estocástica explícita mensual (mes de Marzo), obtenida con la serie histórica, para un riesgo admisible del 30%

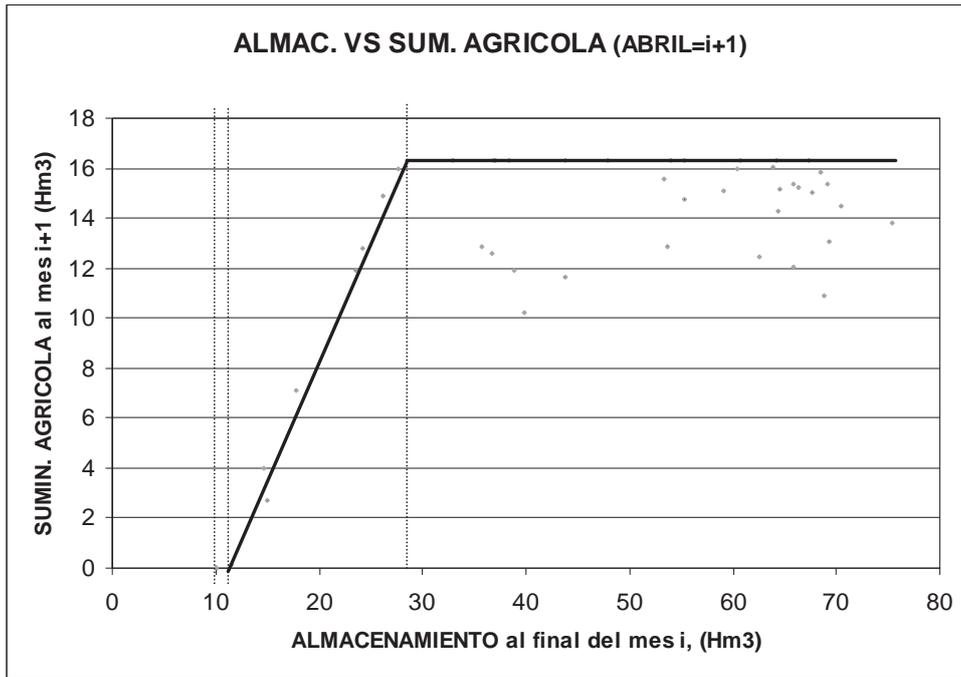


Figura VI.3.7. Regla estocástica explícita mensual (mes de Abril), obtenida con la serie histórica, para un riesgo admisible del 30%

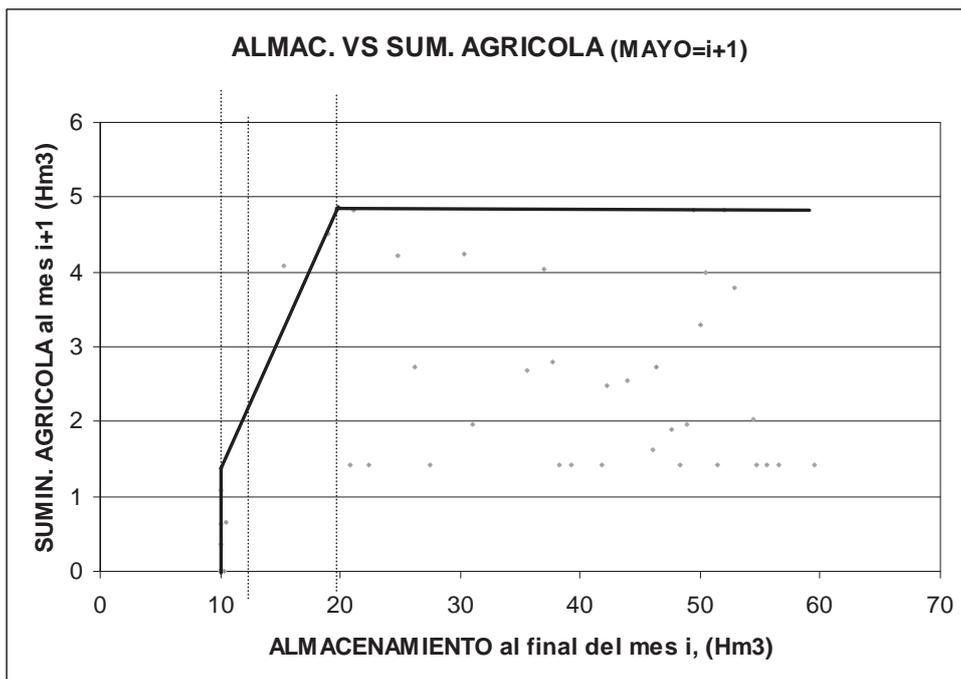


Figura VI.3.8. Regla estocástica explícita mensual (mes de Mayo), obtenida con la serie histórica, para un riesgo admisible del 30%

Las decisiones mensuales para todos los meses pueden representarse en una sola gráfica, que en realidad es una superposición de cada una de las graficas vistas anteriormente. Los puntos representan la decisión agregada de suministro a la demanda agrícola a escala mensual para un riesgo del 30%. Para todos los meses se tienen los resultados de la Figura VI.3.9; a los que se les ajustan las rectas correspondientes, que constituyen la regla de operación mensual general. Así, por ejemplo, si en el mes de Marzo (Figura VI.3.9) se tiene un volumen de embalse de 20 Hm³, el suministro a la demanda agrícola en ese mes será de 8.2

Hm^3 si se quiere asumir un riesgo del 30%. Es evidente que es recomendable utilizar la regla mensual para cada mes deseado, que la regla mensual general que se indica en la Figura VI.3.9, por su mejor precisión.

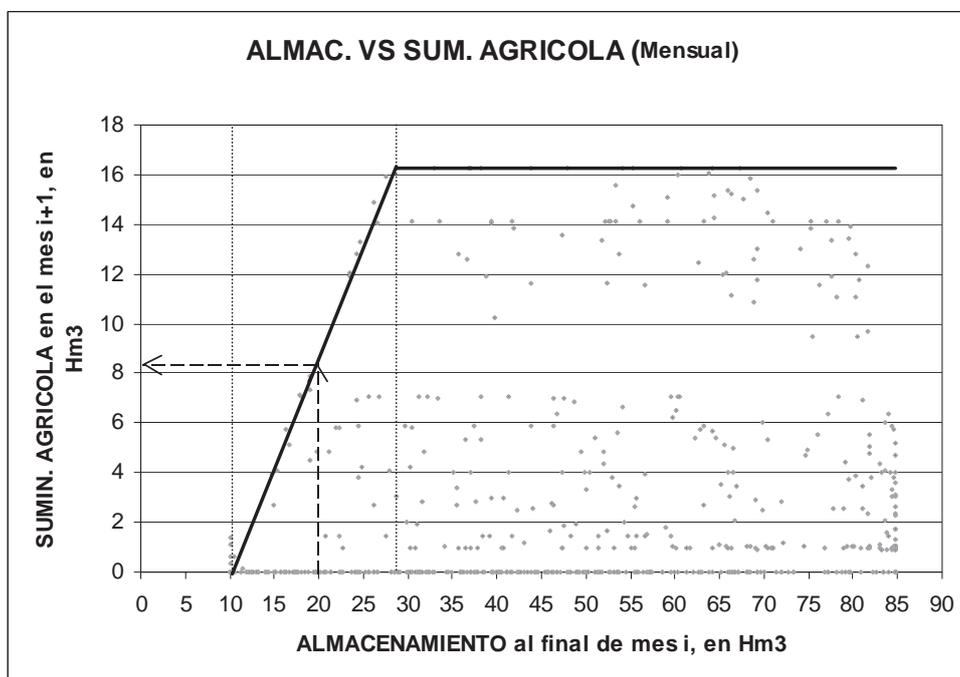


Figura VI.3.9. Regla estocástica explícita mensual general, obtenida con la serie histórica, para un riesgo admisible del 30%

Cuando se usa la serie histórica como serie hidrológica básica, se dispone de pocos datos desde el punto de vista estadístico (49 para el caso del sistema del río Grande). Esto se puede obviar usando una serie sintética de gran longitud. No obstante, el análisis con la serie histórica resulta conveniente como referencia para los resultados obtenidos con la serie sintética.

Usando una serie de 1500 años de longitud, los resultados obtenidos para el sistema del río Grande, agregados anualmente, pueden verse en la Figura VI.3.10, con sus correspondientes rectas de ajuste. Con lo que la regla estocástica explícita serán los tramos de rectas. Para el mismo ejemplo de la serie histórica, si en el mes de Octubre se tiene un volumen embalsado de 20 Hm^3 y se acepta un riesgo del 30%, el suministro de ese año a la demanda de riego será 31 Hm^3 .

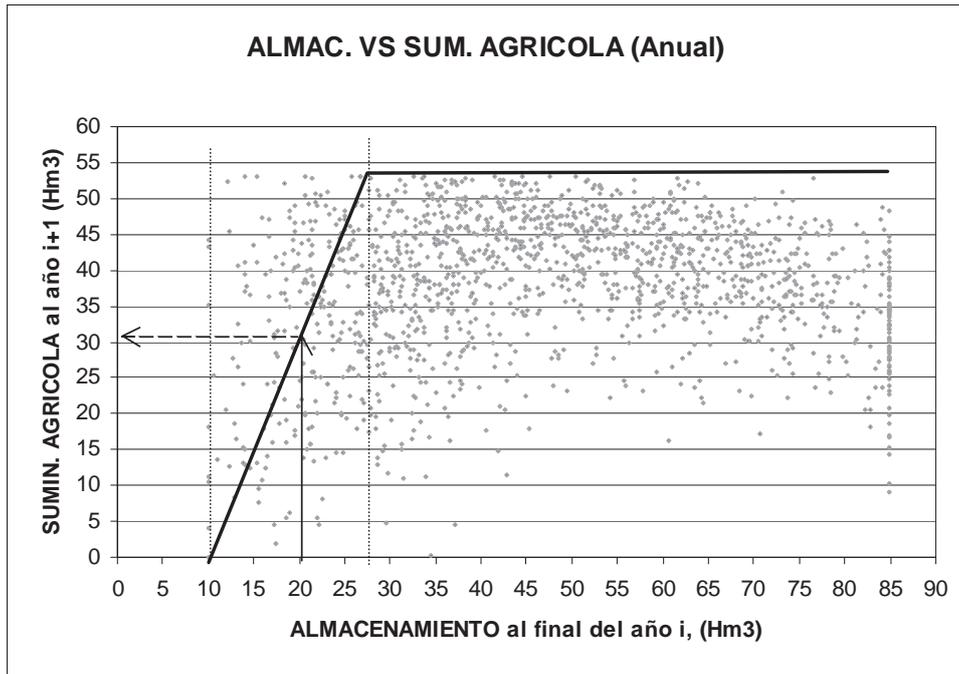


Figura VI.3.10. Regla estocástica explícita anual, obtenida con la serie sintética, para un riesgo admisible del 30%

Los resultados obtenidos para el sistema del río Grande, agregados mensualmente, pueden verse en la Figura VI.3.11, VI.3.12, VI.3.13, VI.3.14, VI.3.15, VI.3.16, VI.3.17. con sus correspondientes rectas de ajuste.

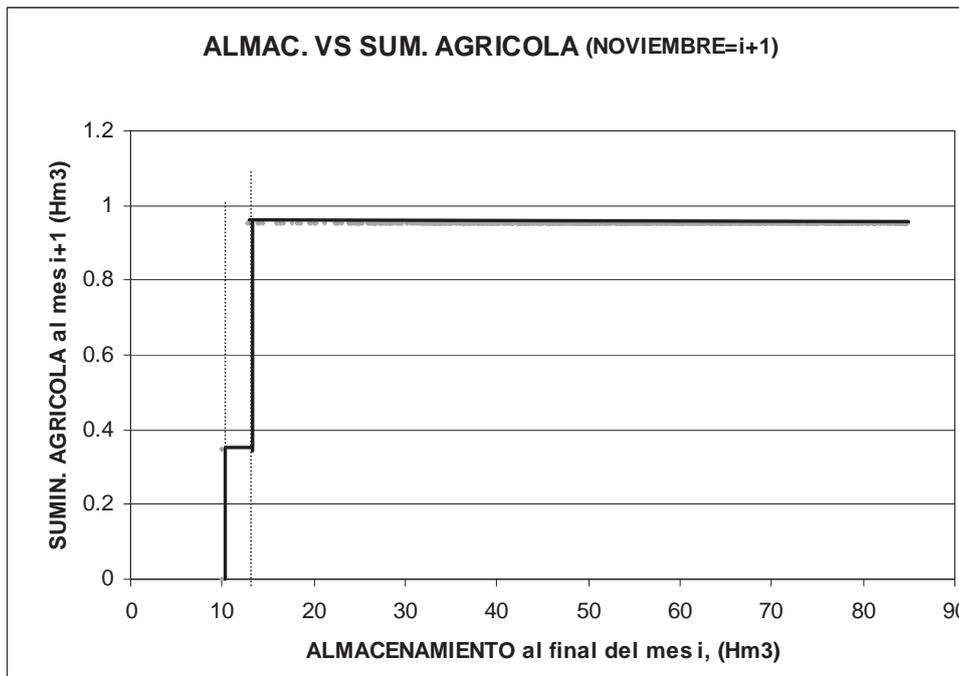


Figura VI.3.11. Regla estocástica explícita mensual (mes de Noviembre), obtenida con la serie sintética, para un riesgo admisible del 30%

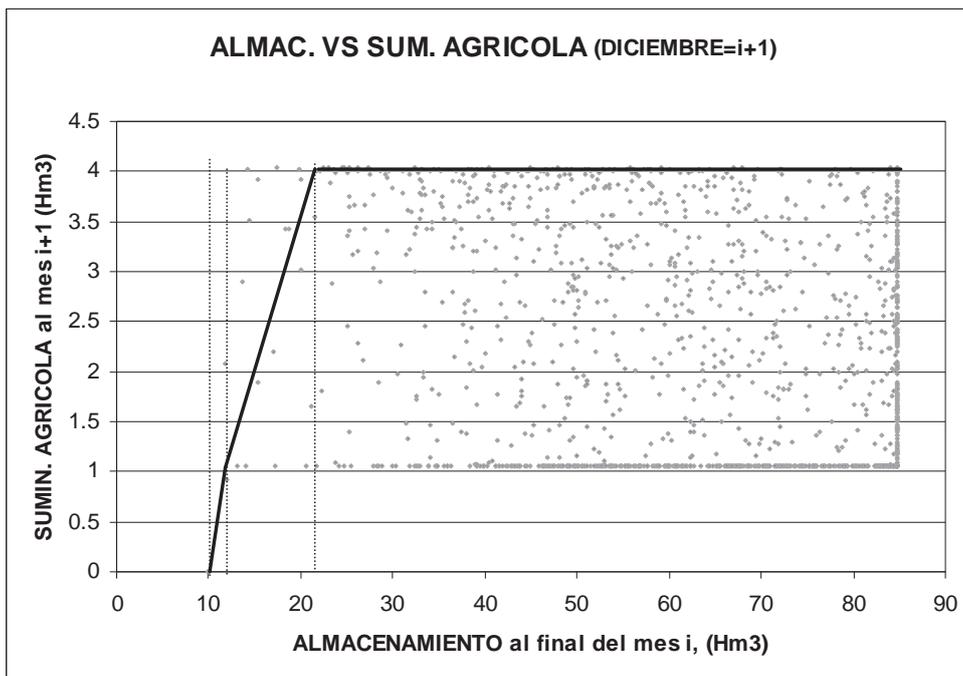


Figura VI.3.12. Regla estocástica explícita mensual (mes de Diciembre), obtenida con la serie sintética, para un riesgo admisible del 30%

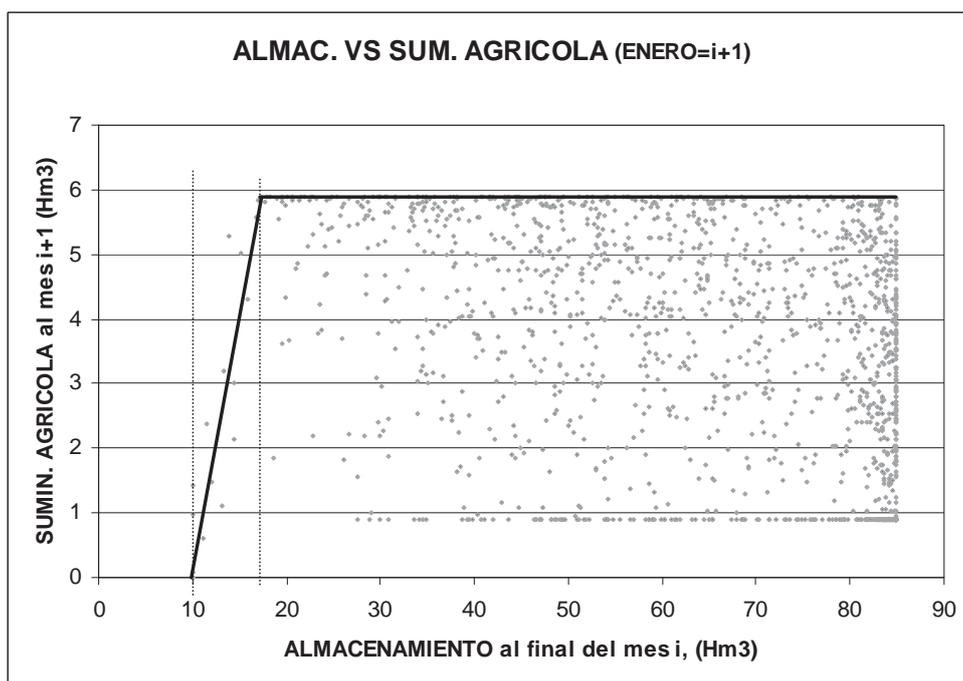


Figura VI.3.13. Regla estocástica explícita mensual (mes de Enero), obtenida con la serie sintética, para un riesgo admisible del 30%

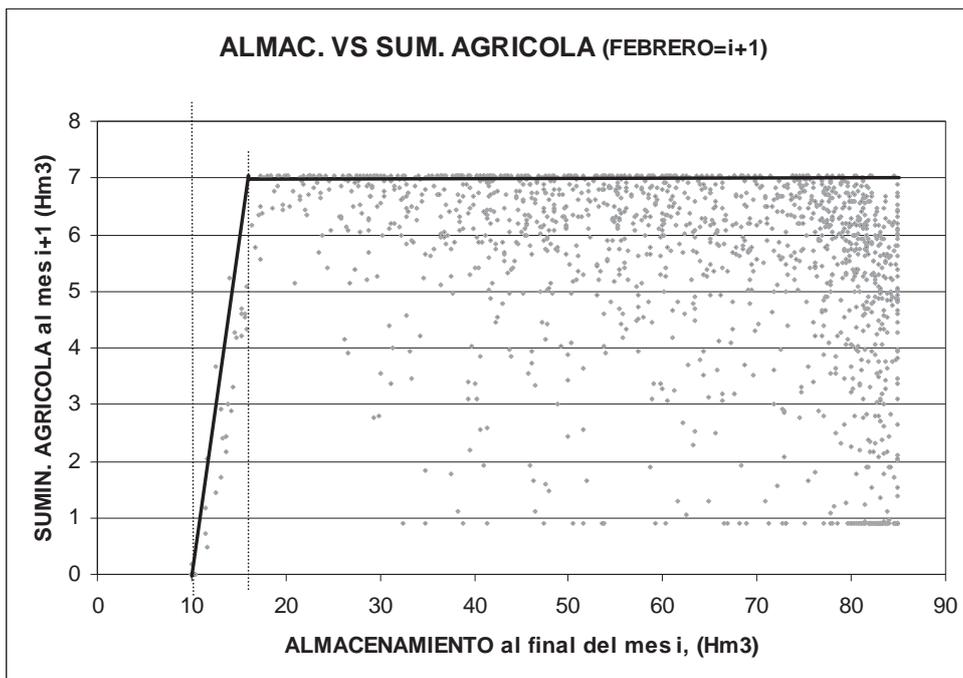


Figura VI.3.14. Regla estocástica explícita mensual (mes de Febrero), obtenida con la serie sintética, para un riesgo admisible del 30%

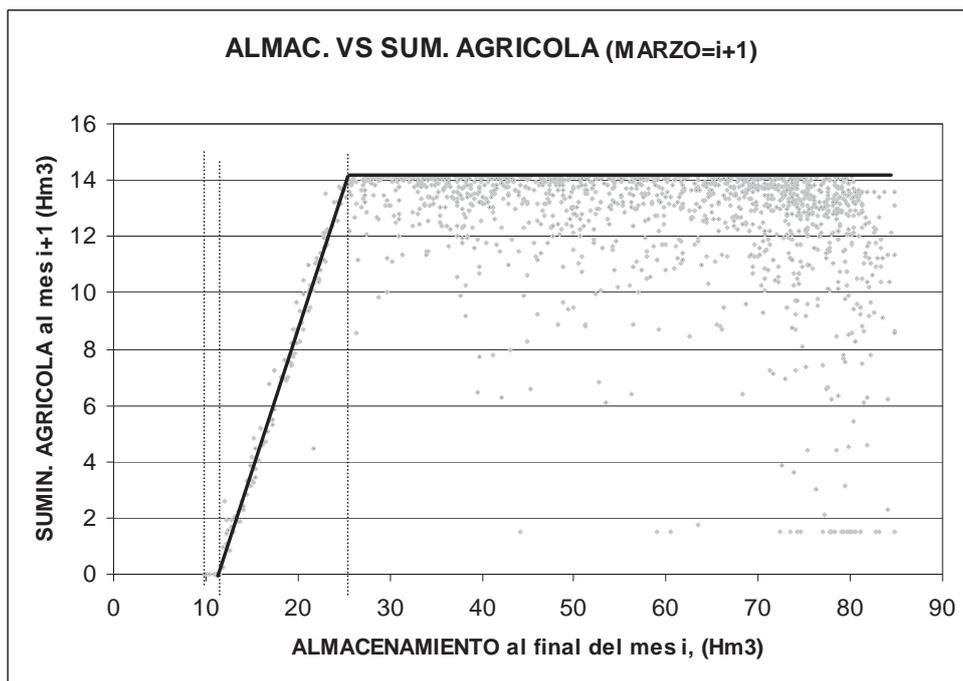


Figura VI.3.15. Regla estocástica explícita mensual (mes de Marzo), obtenida con la serie sintética, para un riesgo admisible del 30%

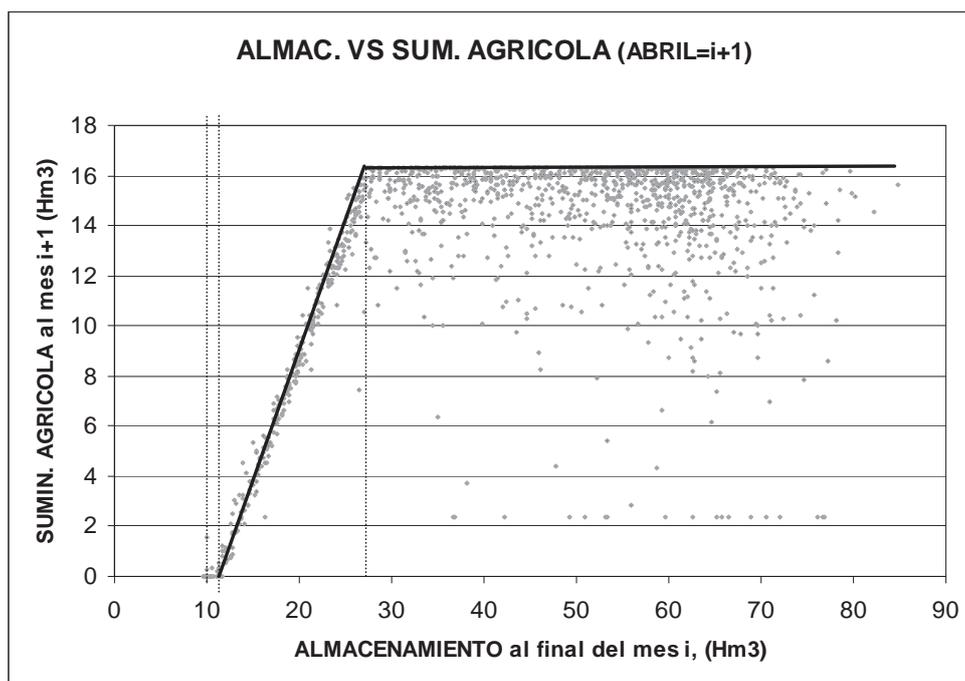


Figura VI.3.16. Regla estocástica explícita mensual (mes de Abril), obtenida con la serie sintética, para un riesgo admisible del 30%

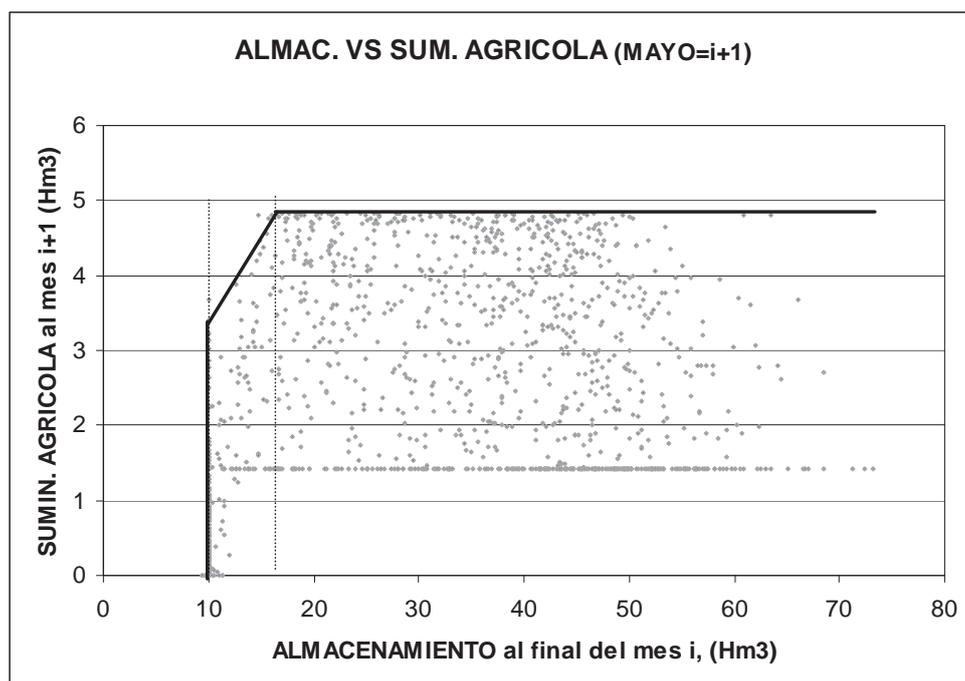


Figura VI.3.17. Regla estocástica explícita mensual (mes de Mayo), obtenida con la serie sintética, para un riesgo admisible del 30%

La gráfica de la regla mensual general también se obtiene para la serie sintética, que es una superposición de cada una de las graficas vistas anteriormente. Los puntos representan la decisión agregada de suministro a la demanda agrícola a escala mensual para un riesgo del 30%. Para todos los meses se tienen los resultados de la Figura VI.3.18; a los que se les ajustan las rectas correspondientes, que constituyen la regla de operación mensual general. Así, por

ejemplo, si en el mes de Marzo (Figura VI.3.18) se tiene un volumen de embalse de 20 Hm³, el suministro a la demanda agrícola en ese mes será de 8.9 Hm³ si se quiere asumir un riesgo del 30%. En este caso se observa que la regla mensual para cada mes deseado, se ajusta bastante bien con la regla mensual general que se indica en la Figura VI.3.18.

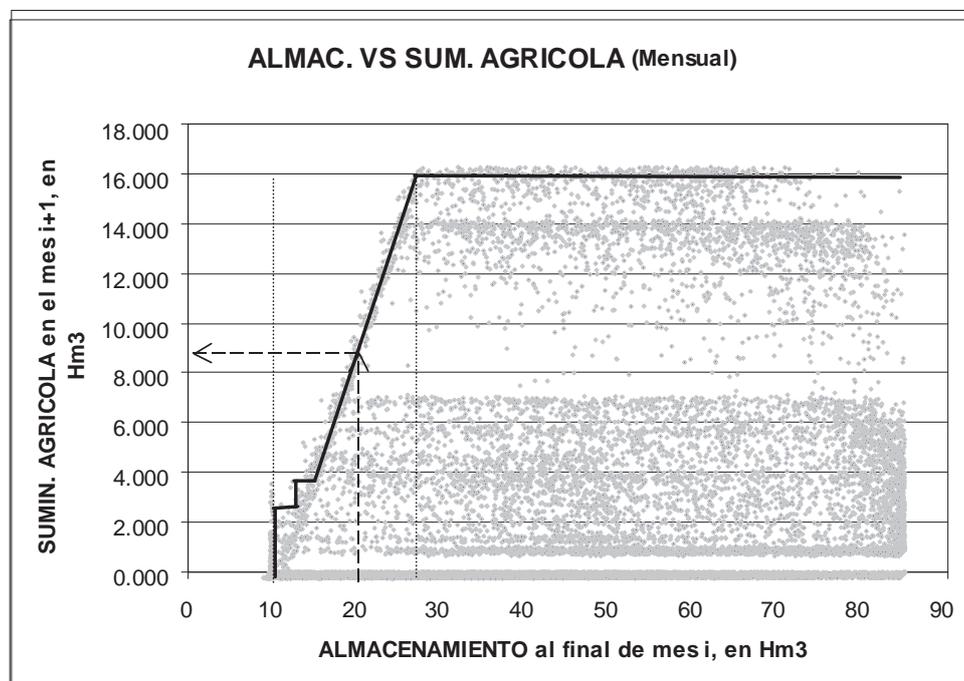


Figura VI.3.18. Regla estocástica explícita mensual general, obtenida con la serie sintética, para un riesgo admisible del 30%

En principio las reglas con mas significación serían las obtenidas con la serie sintética de gran longitud, pero también podría optarse por usar las obtenidas con la serie histórica, que en este caso son más conservadoras como se puede observar al comparar los resultados obtenidos en los ejemplos de lectura para la regla anual y para la regla mensual (marzo).

VI. 3.2. Escenario 2: Regla basada en la gestión histórica con distinción de año seco y año húmedo

Con los parámetros óptimos de la metodología de gestión con conocimiento del riesgo, ajustados para la cuenca del río Grande, se han aplicado los pasos descritos, para la situación en que la serie hidrológica básica es una serie sintética de 1500 años de longitud (Escenario 1, situación 2), pero en este caso se han determinado los años superiores al 90% del caudal medio anual y los años inferiores al mismo, es decir se determinaron en los caudales sintéticos los años secos y años húmedos. Se simuló con la totalidad de la serie, 1500 años, y posteriormente se separaron los resultados de la gestión cuando estos se obtuvieron de caudales de años secos o de caudales de años húmedos.

Los resultados obtenidos en el caso de años húmedos pueden verse en la Figura VI.3.19. Los puntos representan la decisión agregada de suministro a la demanda agrícola a escala anual para un riesgo del 30% y para un periodo totalmente húmedo. En este caso parece

que un ajuste lineal por tramos de la nube da un resultado aceptable, con lo que la regla estocástica explícita será los tramos de recta. Así por ejemplo, si en el mes de Octubre se tiene un volumen embalsado de 20 Hm^3 y se acepta un riesgo del 30%, el suministro de ese año a la demanda de riego será 41 Hm^3 .

La regla para año húmedo (Figura VI.3.19) presenta una holgura del suministro, con respecto a la regla para año medio (Figura VI.3.10) cuando se analiza para un mismo volumen almacenado del embalse de Cointzio. Esto es un suministro de 41 Hm^3 frente a 31 Hm^3 para un mismo volumen almacenado de 20 Hm^3 .

Al graficar los años secos, que pueden verse en la Figura VI.3.20. Para la que se siguió el mismo procedimiento que la correspondiente a años húmedos. Así por ejemplo, si en el mes de Octubre se tiene un volumen embalsado de 20 Hm^3 y se acepta un riesgo del 30%, el suministro de ese año a la demanda de riego será 22 Hm^3 .

Aquí la regla para año seco (Figura VI.3.20) es restrictiva, con respecto a la regla para año medio (Figura VI.3.10) cuando se analiza para un mismo volumen almacenado del embalse de Cointzio. Esto es un suministro de 22 Hm^3 frente a 31 Hm^3 para un mismo volumen almacenado de 20 Hm^3 .

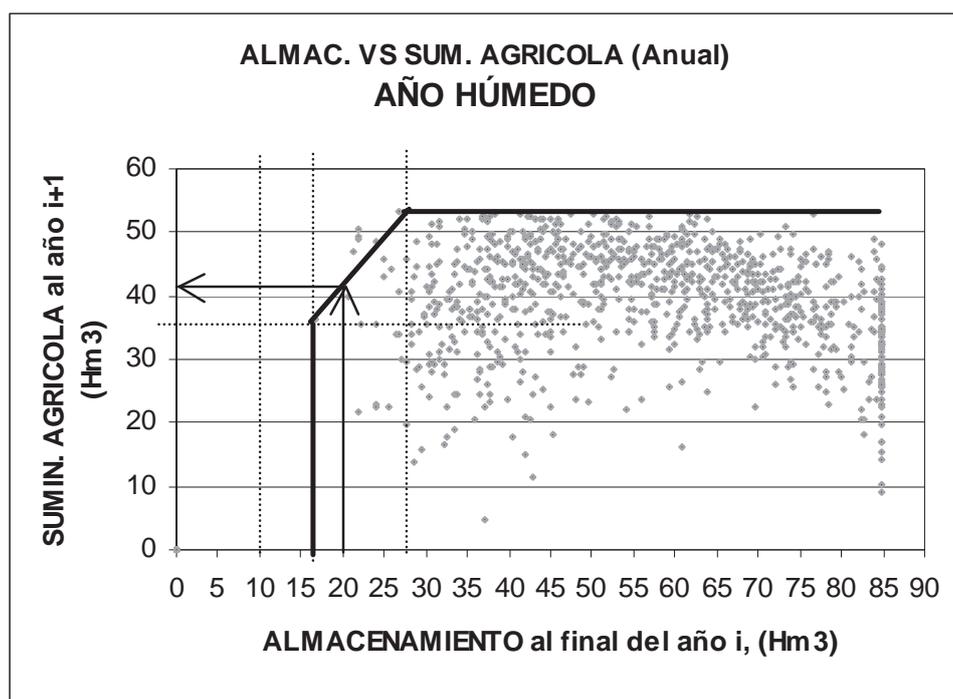


Figura VI.3.19. Regla estocástica explícita anual, cuando se encuentra en año húmedo, obtenida con la serie sintética, para un riesgo admisible del 30%

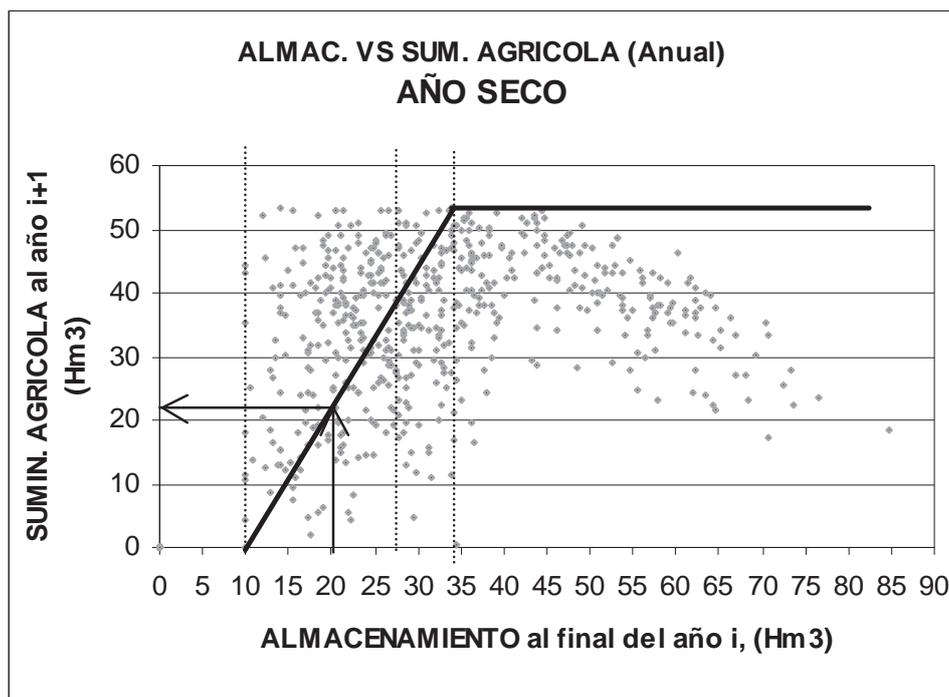


Figura VI.3.20. Regla estocástica explícita anual, cuando se encuentra en año seco, obtenida con la serie sintética, para un riesgo admisible del 30%

VI. 3. 3. Escenario 3: Regla basada en la gestión histórica con una curva de restricción

Con los parámetros óptimos de la metodología de gestión con conocimiento del riesgo, ajustados para la cuenca del río Grande, se han aplicado los pasos descritos, para la situación en que la serie hidrológica básica es una serie histórica (Escenario 1, situación 1), pero en este caso se ha incluido en la modelación de la gestión un regla de operación de restricción al suministro cuando el embalse Cointzio se encuentra en determinados niveles, se la modifica en la modelación como indicadores de alarma. Es decir la gestión histórica se modificó con una regla restrictiva para situaciones críticas del embalse.

Los resultados obtenidos para el caso de aplicación de los indicadores de alarma pueden verse en la Figura VI.3.21. La determinación de la regla de operación es mediante ajuste lineal en tramos. Así por ejemplo, si en el mes de Octubre se tiene un volumen embalsado de 25 Hm³ y se acepta un riesgo del 30%, el suministro de ese año a la demanda de riego será 33 Hm³.

Aquí la regla con indicador de alarma (Figura VI.3.21) es restrictiva, con respecto a la regla para año medio (Figura VI.3.1) cuando se analiza para un mismo volumen almacenado del embalse de Cointzio. Esto es un suministro de 33 Hm³ frente a 40 Hm³ para un mismo volumen almacenado de 25 Hm³.

La gráfica de la regla mensual general con indicador de alarma, también se obtiene, que se entiende como una superposición de cada uno de los meses. Los puntos representan la decisión agregada de suministro a la demanda agrícola a escala mensual, con indicador de alarma, para un riesgo del 30%. Para todos los meses se tienen los resultados de la Figura VI.3.22; a los que se les ajustan las rectas correspondientes, que constituyen la regla de operación mensual general con indicadores de alarma. Así, por ejemplo, si en el mes de Marzo

(Figura VI.3.22) se tiene un volumen de embalse de 20 Hm³, el suministro a la demanda agrícola en ese mes será de 7.9 Hm³ si se quiere asumir un riesgo del 30%.

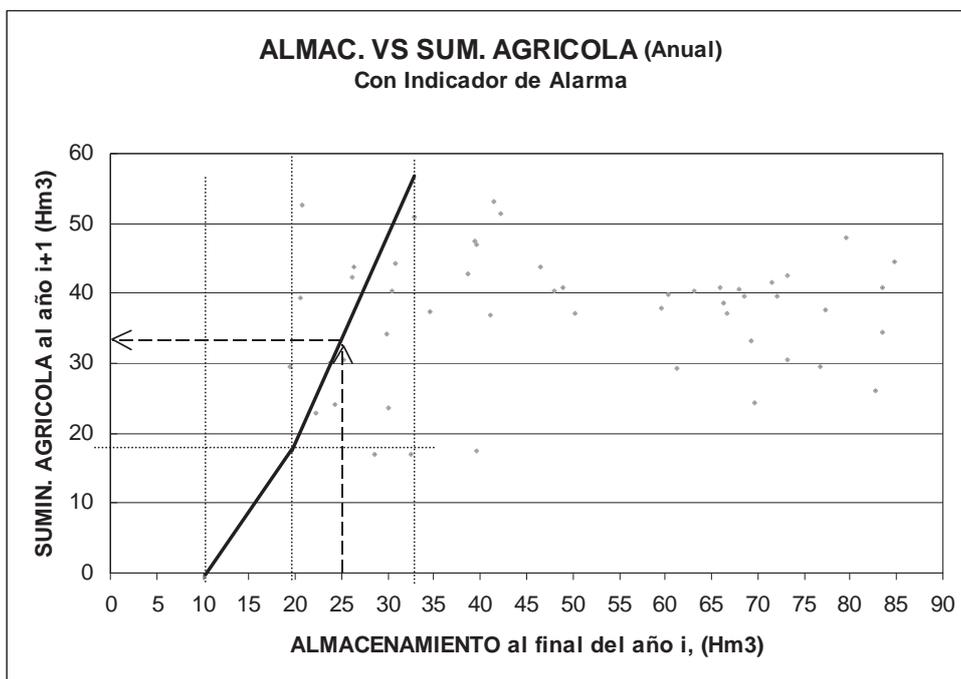


Figura VI.3.21. Regla estocástica explícita anual, cuando se aplica indicadores de alarma en la simulación, obtenida con la serie histórica, para un riesgo admisible menor del 30%

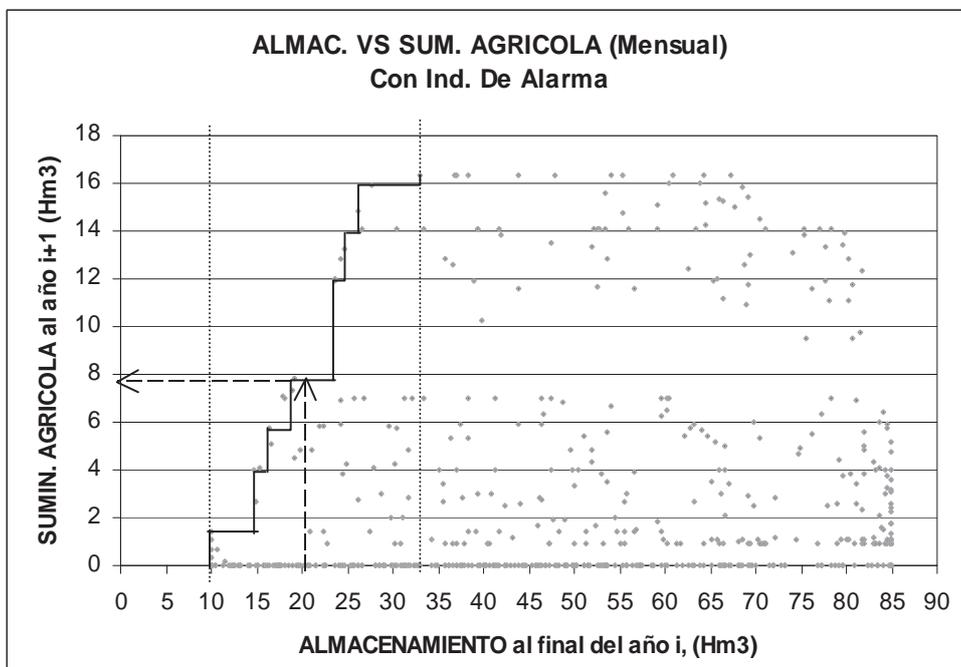


Figura VI.3.22. Regla estocástica explícita mensual general, cuando se aplica indicadores de alarma en la simulación, obtenida con la serie histórica, para un riesgo admisible menor del 30%

Se observa que la regla general mensual con indicador de alarma (Figura VI.3.22) es restrictiva, con respecto a la regla general mensual (Figura VI.3.1) cuando se analiza para un mismo volumen almacenado del embalse de Cointzio. Esto es un suministro de 7.9 Hm^3 frente a 8.2 Hm^3 para un mismo volumen almacenado de 20 Hm^3

VI. 4. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DE LOS ESCENARIOS

La realidad de la gestión de cuencas nos dice que, en situaciones de abundancia o escasez lo habitual es debatir entre las partes implicadas para llegar a una decisión acorde con los criterios e intereses actuales. Por tal razón la propuesta de las diversas reglas de operación propuestas para el río Grande de Morelia, ajustadas con procedimientos de operación no deterministas, es un aporte valioso para la gestión del sistema.

Las reglas aquí obtenidas son para la operación del uso agrícola en la cuenca del río Grande de Morelia, donde se asume un riesgo del 30%. Y del análisis de las mismas se vislumbran reglas con mayor o menor riesgo asumido.

El procedimiento que aquí se ha desarrollado permite la propuesta de mas de una regla de operación para el sistema del río Grande, (1) acorde al riesgo que se desee asumir por los tomadores de decisión, adoptado restricciones cuando se supera el riesgo admitido, (2) periodo hidrológico en que se ubica la toma de decisión, (3) asumiendo restricciones puntuales en el sistema para indicadores críticos de almacenamiento del embalse, donde se admite que el riesgo asumido es menor del 30%.

Del **escenario 1** se puede concluir claramente lo siguiente:

Con la serie histórica es posible determinar reglas de operación, pero con las series sintéticas es posible obtener un mejor ajuste de las reglas de operación

Las reglas anuales son útiles como referencia al inicio de un año en cualquier mes, para proponer un suministro anual para un almacenamiento conocido del embalse de Cointzio

Las reglas mensuales son útiles para proponer un suministro del mes en que se encuentra, para un almacenamiento conocido del embalse de Cointzio

Las reglas mensuales generales, evitan el tener una regla para cada mes, pero se aprecia que no tenían un mejor ajuste con respecto a las reglas de cada mes.

En resumen las reglas aquí obtenidas en especial si se usan las obtenidas con series sintéticas son de gran utilidad para una operación del suministro adecuado, para un riesgo asumido del 30%. Si se pretende asumir un menor riesgo, Sánchez y otros (2001), proponen una nueva simulación de la gestión, admitiendo un riesgo menor. Lo que permitirá construir reglas parecidas en su forma a las aquí presentadas pero desplazadas a la izquierda, quedando estas últimas paralelas a las reglas con riesgo del 30%

Finalmente cabe indicar, que las reglas aquí obtenidas, son aceptables para años ubicados en el periodo hidrológico medio.

Del **escenario 2** se concluye lo siguiente

Las reglas obtenidas en el escenario anterior, no tienen en cuenta los periodos de años húmedos y periodos de años secos (en la cuenca del río Grande se tiene una media de 8 años consecutivos de sequía, Capítulo IV), por lo que se obtuvo una regla anual para periodos secos y una regla anual para periodos húmedos.

La regla de operación para años húmedos es bastante holgada respecto a la regla de operación anual media, de igual manera la regla de operación para años secos es bastante restrictiva respecto a la regla de operación anual media. También se advierte que esta regla de operación tiene un riesgo asumido del 30%.

La regla de operación para años secos está encaminada a la mitigación y correspondiente mitigación del estado sequía en el sistema del río Grande, permitiendo una reducción controlada del suministro al uso agrícola.

La regla de operación para años húmedos está encaminada a aumentar el volumen de agua suministrada, permitiendo así reducir el riesgo de que puedan producirse avenidas en el sistema.

Del **escenario 3** se concluye lo siguiente:

En este escenario se obtienen reglas de operación con un riesgo menor del 30%, siendo por tanto reglas más restrictivas respecto a la regla de operación para periodos Hidrológicos medio (escenario 1).

Esta regla se obtiene al aplicar un indicador de alarma a determinadas demandas agrícolas, esto es hacer restricciones variables de acuerdo a la situación del almacenamiento en el embalse de Cointzio. Resultado una regla de operación mensual escalonada.

REFERENCIAS

- [1] A. Colorni y G. Fronza. (1976) “Reservoir Management via Reliability Programming”
- [2] Andreu J. (1999) “SIMGES” “Conceptos y Métodos para la planificación Hidrológica” Departamento de Ingeniería Hidráulica, Universidad Politécnica de Valencia, España.
- [3] Andreu Joaquín A., Salas José D., (1988); “ La Modelación en Planificación Hidráulica: Modelos de Simulación y Síntesis de Hidrología Superficial”, Universidad Politécnica de Valencia, DIHMA, Valencia, España.(1996)
- [4] Arellano Molina J.P. (2002). “Evaluación de los Parámetros de un Modelo de Gestión de Sequías Aplicados a la Cuenca del Río Grande de Morelia”. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería Civil, U.M.S.N.H.
- [5] Báez Durán J. A. (2002). “Modelo Hidrológico Estocástico de las Aportaciones a la Cuenca del Río Grande de Morelia”. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería Civil, U.M.S.N.H.
- [6] Barajas Salcedo, J. (2002) “Simulación de la Gestión de Recursos Hídricos en la Cuenca del Río Grande de Morelia”. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería Civil, U.M.S.N.H.
- [7] C. Revelle y J. Gundelach, (1975) “ The Linear Decision Rule in Reservoir Management and Design 4, A Rule that Minimizes Output Variance”
- [8] C. Revelle, F. J. y W. Kirby. (1969) “ The Linear Decision Rule in Reservoir Management and Design I. Development of the Stochastic Model”
- [9] D. Valencia y J. C. Schaake, (1973) “Dissagregation Processes in Stochastic Hydrology”
- [10] D.P. Loucks, (1970) “Some Comments on Linear Decision Rules on Chance Constrains”
- [11] Gerencia Estatal de Michoacán (2000). “Plan de Riegos del Distrito de Riego 020 Morelia – Queréndaro. Comisión Nacional del Agua, Estado de Michoacán, México.
- [12] I. Velasco y J. Collado, (2000) “La Sequía en los Reglamentos de operación de distritos de riego”
- [13] Jesús López García, (1993) “Restitución de Datos de Aforo al Régimen Natural”

-
- [14] Maas et al, (1962). “Design of water Resources System”, Harvard University, Press Cambridge.
- [15] Mases C. Chaturvedi. (1987) “Water Resources Systems Planning and Management” Ed. McGraw Hill Publishing Company Limited. New Delhi.
- [16] P. Loucks, (2000) “ Sustainable Water Resources Management”
- [17] Sánchez S. Q., Andreu Joaquín A., y Solera Abel S., (2001); “Gestión de Recursos Hídricos con Decisiones Basadas en Estimación del Riesgo”, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- [18] Sánchez. S. (1999). “Gestión de sistemas de recursos hídricos con toma de decisiones basada en riesgo”. Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Valencia España.
- [19] Slovodan P. Simonovic y M. A. Marino, (1980) “Reliability Programming in Reservoir Management, I, Single Multipurpose Reservoir”
- [20] Solera A. (2003). “Herramientas y Métodos para la Ayuda a la Decisión en la Gestión Sistemática de Recursos Hídricos. Aplicación a las cuencas de los ríos Tajo y Júcar” Tesis Doctoral. escuela técnica superior de ingenieros de caminos canales y puertos Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia.
- [21] Solera A., (1997). “Estudio sobre las políticas de explotación del sistema de la cabecera del Tajo y del acueducto Tajo – Segura” Tesis de Licenciatura, Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, Valencia, España.
- [22] Wilhite D.A. y Glantz M. H. (1985) “Understanding the Drought Phenomenon The role of definitions”