

## *Capítulo IV*

### **PROBLEMAS QUE SE PUEDEN RESOLVER EMPLEANDO TÉCNICAS SISTÉMICAS**

A continuación se mostrarán una lista de ejemplos en los cuales es posible aplicar técnicas sistémicas.

Para cada situación en particular, se hablará de las técnicas convenientes para su solución.

#### **IV-1. MODELACION DETERMINISTICA DE CUENCAS DE RIOS.**

Los modelos determinísticos para la planeación de sistemas de cuencas de ríos no consideran la incertidumbre de las variables hidrológicas o los parámetros del modelo. Sin embargo, para análisis preliminares de alternativas anteriores a optimización estocástica más detallada o estudios de simulación, los modelos determinísticos usan valores de datos de entrada conocidos, parámetros y variables que pueden ser de utilidad.

**a.1) ESTIMACION DE CAUDALES.** [9,10,11].

El método usado para estimar flujos dependerá de las características de la subcuenca [12]. En regiones húmedas donde la distribución espacial y temporal de lluvias no varía significativamente de una parte de la cuenca a otra; es posible estimar el flujo de algún sitio mediante un sencillo modelo estático-determinístico, como el que a continuación se muestra:

$$Q_t^s = Q_t^{s'} \left( \frac{A^s}{A^{s'}} \right)$$

donde:

$Q_t^s$  = Flujo estimado de un sitio  $s$  en un tiempo  $t$ .

$A^s$  = Area de la cuenca del sitio  $s$ .

$Q_t^{s'}$  = Flujo obtenido del sitio de medición  $s'$ , en el tiempo  $t$ .

$A^{s'}$  = Area de la cuenca del sitio de medición  $s'$ .

En regiones áridas donde pueda existir una disminución de flujo corriente abajo debido a la evaporación y filtración, también es posible crear un modelo estático-determinístico que estime el flujo en algún lugar  $s$ .

$$Q_t^s = Q_t^{s'} \cdot 10^{-\beta_t L_{s,s'}}$$

donde:

$L_{s,s'}$  = Longitud del canal entre el sitio  $s$  y el sitio de medición  $s'$ .

$\beta_t$  = Parámetro que puede ser estimado de los flujos promedio y de las longitudes de los canales de varios sitios de medición.

En el caso donde las cuencas se caracterizan por cambios significativos de elevación y consecuentemente variabilidad de lluvias, se podrá utilizar un modelo estático-determinístico para estimar el flujo medio en un período.

**b.1) ESTIMACION DE LA CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO EN UN SITIO DE RESERVA.**

Para determinar la capacidad de almacenamiento requerida conociendo una salida específica, es posible emplear modelos estáticos-deterministas a partir de un "análisis de diagrama de masa" [13,14], en donde se involucran las salidas deseadas y las entradas históricas, como se muestra en el siguiente modelo:

$$K_a = \max \left[ \sum_{t=i}^j (R_t - Q_t) \right]$$



EL SABER ES HIJOS  
PARA MI GRANDEZA  
INGENIERIA INDUSTRIAL  
BIBLIOTECA

donde:

$K_a$  = Capacidad de almacenamiento requerida en un tiempo  $t$ .

$R_t$  = Salidas específicas de la reserva en un tiempo  $t$ .

$Q_t$  = Flujo de entrada conocido históricamente o simulado.

También es posible determinar capacidades de almacenamiento mediante el uso de técnicas más precisas, como "el procedimiento

de secuencia cumbre" [15] que nos lleven a desarrollar modelos dinámicos-determinísticos, como el que a continuación se ilustra:

$$K_t = R_t - Q_t + K_{t-1}$$

donde:

$K_t$  = Capacidad de almacenamiento requerido al inicio del periodo  $t$ .

$K_{t-1}$  = Capacidad de almacenamiento en el tiempo  $t-1$ , donde  $K_0 = 0$ .

Mediante métodos de programación matemática (optimización) es posible mejorar los modelos al incluir variables como pérdidas por filtración y evaporación. A continuación se muestra un modelo dinámico-determinista que calcula capacidades mediante la inclusión de volúmenes iniciales y pérdidas por filtración.

$$S_t + Q_t - R_t - L_t = S_{t+1}$$

donde:

$L_t$  = Pérdida por evaporación y filtración en cada periodo  $t$ .

$S_{t+1}$  = Volumen de almacenamiento en la reserva en el periodo  $t+1$ .

$S_t$  = Volumen de almacenamiento en la reserva al inicio del periodo  $t$

#### **c.1) ALTERNATIVAS PARA EL CONTROL DE INUNDACIONES. [16,17]**

Existen dos tipos de estructuras alternativas para el control de inundaciones, con reservas corriente arriba cuya capacidad sea lo suficiente para captar grandes flujos y reducir los flujos corriente abajo, y/o canales de protección o estructuras similares que puedan contener los flujos pico.

#### **1. ESTIMACIONES DE CAPACIDADES DE ALMACENAMIENTO CORRIENTE ARRIBA.**

Es posible determinar la capacidad de almacenamiento en un sitio corriente arriba mediante modelación matemática determinística, con el objetivo de disminuir las posibilidades de

daños, en un sitio o poblado corriente abajo. Considerando que las inundaciones tienen un comportamiento determinado, será posible emplear la simulación [18,19] para estimar los flujos picos a partir de una capacidad inicial de almacenamiento, de tal manera que nos permita conocer la capacidad de almacenamiento requerida para minimizar los daños en los lugares que puedan verse afectados.

## 2. PROTECCION DE INUNDACIONES EN SITIOS POTENCIALES DE DAÑOS.

Una manera de controlar las inundaciones reduciendo los flujos pico, es por medio de reservas corriente arriba o conteniéndolos dentro de canales; un modelo de programación entera-mixta que pueda ser resuelto por los métodos de programación lineal entera-mixta [20], será de gran ayuda para evaluar los costos de estas dos alternativas con el objetivo de maximizar los beneficios esperados en el sitio protegido de las inundaciones. Un ejemplo de estos modelos se muestra a continuación:

$$\max \sum_T (BF_T^S X_T^S) - Cost_R(QR^S) - Cost_K(K_f)$$

donde:

$Cost_K(K_f) = \text{Costo de la reserva.}$

$Cost_R(QR^s) = \text{Costo del canal.}$

$BF_T^s = \text{Beneficio anual esperado en el sitio s protegido de inundaciones con periodo de retorno T.}$

$X_T^s = \text{Nivel más benéfico considerado en el diseño para la protección de inundaciones.}$



EL SABER ES HIJOS  
HARA MI GRANDEZA  
INGENIERIA INDUSTRIAL  
BIBLIOTECA

#### d.1) PRODUCCION DE ENERGIA ELECTRICA. [21].

La generación de energía hidroeléctrica en un período en algún sitio de reserva, depende de variables como la capacidad de planta instalada, del flujo a través de las turbinas, la media de almacenamiento, la eficiencia de la planta, entre otras. El uso de algoritmos de programación lineal hacen posible la solución de modelos para determinar las capacidades de producción de energía hidroeléctrica considerando variables como las señaladas. Las relaciones no lineales encontradas entre las variables pueden ser reemplazadas por aproximaciones lineales.



**e.1) SINTESIS DE MODELOS. [21].**

Varios modelos como los anteriores pueden ser combinados dentro de uno solo o dentro de un modelo único de planeación determinístico, estático, multipropósito, multisitio y multiobjetivo.

La función objetivo de tal modelo será maximizar los beneficios netos derivados de los beneficios que se reciben de cada proyecto en cada sitio, debido a una asignación esperada, menos las pérdidas y los costos.

Las restricciones se obtienen de cada una de las restricciones particulares de los modelos de cada proyecto en cada sitio.

Este modelo sintetizado puede ser resuelto por los algoritmos de programación lineal.

**f.1) PLANEACION DE LA EXPANSION DE SISTEMAS DE AGUA. [11,22,23].**

Considerando una situación en la cual  $n$  proyectos pueden ser construidos durante el período de planeación. El problema es determinar cuál de los proyectos se va a hacer y en qué orden. Para solucionar este problema va a ser necesario formularlo y resolverlo por medio de la programación entera.

Sin embargo si tomamos en cuenta el incremento de la demanda

como una función continua de tiempo, lo que afectaría a los proyectos que van ser construidos tiempo después, se va a requerir el uso de la programación lineal para poder resolver el problema.

#### **IV-2. GENERACION DE FLUJOS SINTETICOS.**

A continuación se presentarán técnicas para la generación de corrientes y otros procesos estocásticos usados en estudios de simulación. Se hablará de algunos modelos que permitan reproducir corrientes estáticas, esto es, flujos con la misma varianza, media, autocorrelación, etc. que los observados en series históricas [24,25].

##### **a.2) GENERACION DE SECUENCIAS DE LLUVIAS PROMEDIO POR AREA.**

Mediante el uso de la simulación Montecarlo es posible generar lluvias acumuladas en cuencas a intervalos de tiempo cortos [26].

##### **b.2) GENERACION DE SECUENCIAS DE FLUJOS SINTETICOS.**

Mediante el empleo de la simulación Montecarlo es posible

obtener secuencias de flujos de corrientes en un determinado intervalo de tiempo. El modelo que se usa es univariado, esto es, que sólo permite conocer los flujos en una temporada y un sitio determinado [26].

**c.2) MODELO DE AUTORREGRESION SIMPLE. [21].**

Un modelo simple de corrientes anuales es el modelo autorregresivo Markov. Los flujos anuales históricos son vistos como un valor particular de un proceso estacionario estocástico. Una suposición común es que los flujos anuales son un resultado del proceso Markov, también se asume que están normalmente distribuidos.

**d.2) REPRODUCCION DE LA DISTRIBUCION MARGINAL. [27].**

Estos modelos se aplican a flujos que no tienen una distribución normal, debido a la no existencia de flujos negativos. En general la distribución de estos está sesgada positivamente.

Las distribuciones frecuentemente usadas para el modelo es la lognormal, gamma o Pearson Type III.

**e.2) MODELOS DE MOVIMIENTO-AUTORREGRESIVO PROMEDIO (ARMA).**

[6,28,29].

Los modelos autorregresivos Markov no siempre pueden reproducir la secuencia de flujos observados, para ello se aplican modelos de tiempo de series autorregresivos más flexibles como los ARMA [30].

También existen otros modelos como el basado en la ley de Hurts [31,32] que parece ser más atractivo para la generación de periodos críticos sintéticos [33]. Este es mucho más difícil de implementarse y requiere mucho más tiempo de computadora, puesto que involucra la generación de gran número de procesos [8].

**f.2) MODELOS MULTISITIOS. [34,25].**

Cuando se requiere generar escurrimientos para cuencas sujetas a condiciones similares de clima, éstos pueden ser generados independientemente, puesto que es imposible hacer correlaciones en serie y correlaciones cruzadas. El modelo multisitio desarrollada por Matalas [35] podría utilizarse en este caso.

### **IV-3. MODELACION ESTOCASTICA PARA LA PLANEACION DE CUENCAS DE RIOS.**

A pesar que la simulación nos permite estimar futuros cambios de algún plan particular en un sistema hidráulico, no provee de medidas efectivas para la selección entre todos los planes, tanto sus diseños como en políticas de operaciones que maximizen el desarrollo del sistema. Para esto es apropiado examinar el uso de modelos de optimización.

#### **a.3) OPERACION DE UNA RESERVA.**

Tomando en cuenta el comportamiento probabilísticos de variables tales como volumen inicial, flujo de entrada y volumen final en un período, es posible desarrollar modelos estocásticos que encuentre la probabilidad conjunta óptima, esto es, para cada volumen inicial y para cada flujo de entrada deberá haber un volumen final que sea el óptimo. Una vez determinada esta probabilidad será posible establecer políticas de extracción óptimas. Uno de estos modelos fue propuesto por Thomas y Watermeyer [36] y otros [37], éste puede ser resuelto por programación dinámica. Existen otros modelos que no resuelven el problema de la probabilidad conjunta óptima pero identifican políticas de operación óptimas usando la programación dinámica.

**b.3) DISEÑO Y OPERACION DE UNA RESERVA. [38,39,40].**

Los modelos estocásticos de programación lineal es posible emplearlos en problemas que involucren variables cuyo comportamiento sea incierto, para decidir entre diferentes alternativas de diseño y políticas de operación. Tales variables pueden ser capacidad de almacenamiento, reservas para almacenamiento y/o extracciones y asignación del agua requerida.

**c.3) MODELOS PARA LA PLANEACION EN CUENCAS MULTI-SITIOS. [41,21].**

El diseño de modelos de programación lineal estocástica son apropiados para analizar el sistema de cuencas con varias reservas relativamente pequeñas. Se asume que el mismo volumen final está asociado con los valores del volumen inicial y los flujos de entrada de cada reserva, los cuales se comportan estocásticamente.

**IV-4. PLANEACION Y OPERACION DE LA IRRIGACION.**

La planeación y operación de la irrigación puede ser examinada en gran detalle considerando recursos o variables de entrada tales como tierra, semillas, fertilizantes, maquinaria y trabajo, lo

que servirá para resolver problemas como: cuáles siembras deben cubrirse y en qué sitios dentro de un área de irrigación, la cantidad de cosecha producida y en caso de que la cantidad de cosecha afecte el precio de venta, a qué precio deberán ser vendidas.

**a.4) MODELO DE PLANEACION DE IRRIGACION. [42,43].**

Considerando un distrito de irrigación que contenga varios tipos de tierra en varias regiones o áreas, se podrá decidir qué deberá sembrarse en cada una de ellas de tal manera que se maximicen los beneficios. La formulación de estos modelos se podrá hacer mediante programación lineal.

**b.4) MODELO PARA LA OPERACION DE LA IRRIGACION. [44,21].**

Para cada cultivo que es sembrado en alguna subárea del distrito de irrigación, es posible determinar las políticas de asignación de agua que junto con las condiciones existentes de humedad de la tierra y el potencial de crecimiento de la planta maximicen los beneficios económicos. La definición de esta política de asignación de agua involucrará el desarrollo de un modelo de programación dinámica estocástica discreta.

#### **IV-5. PREDICCIÓN Y SIMULACION DE LA CALIDAD DEL AGUA.**

En la formulación y adopción de planes o políticas de manejo de la calidad del agua, se requiere tomar en cuenta factores como desarrollo regional, costos económicos e impactos ecológicos; por lo que es necesario de manera simultánea desarrollar y aplicar una serie de técnicas de modelación matemática para predecir los impactos de las alternativas en el control de la contaminación del agua.

##### **a.5) MODELOS DE ESTADO ESTABLE PARA SISTEMAS DE RIOS Y ESTEROS.**

Cuando se requiere encontrar la concentración de nutrientes en sistemas que tienen un volumen más o menos constante a través del año, es posible desarrollar modelos mediante la aplicación de un balance de masa [46].

##### **b.5) MODELACION DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LAGOS Y RESERVAS.**

Cuando se tienen sistemas donde no se cumplen las características arriba señaladas y su estado depende del impacto de variables no estables sobre sus características químicas, físicas y biológicas; es posible determinar las concentraciones de nutrientes en un tiempo  $t$  [45,47] mediante el uso de modelos



dinámicos tal como a continuación se muestra:

$$C(t) = C_0 e^{-t(Q/V+K)}$$

donde:

$Q$  = Descarga.

$V$  = Volumen.

$C_0$  = Concentración inicial.

$K$  = Coeficiente de sedimentación.

$C(t)$  = Concentración de nutrientes en un tiempo  $t$ .

#### c.5) MODELOS URBANOS. [48].

Al conocer los valores de cantidad y calidad de los desechos urbanos arrojados en una ciudad diariamente, es posible determinar los efectos de tales contaminantes en las plantas de tratamiento lo que servirá para su funcionamiento óptimo. Estos valores se pueden obtener mediante la aplicación de modelos.

d.5) MODELOS AGRICOLAS. [49,50].

1. MODELOS DE DESHECHOS: Estos modelos son utilizados para predecir los desechos (pesticidas, nutrientes, sedimentos) de un terreno cultivado durante un día de lluvia.....

$$Q_{ijt} = \frac{(R_t - 0.2S_{ijt})^2}{R_t + 0.8S_{ijt}} \quad \text{si } R_t \geq 0.2S_{ijt}$$

$$Q_{ijt} = 0 \quad \text{de otra forma}$$

donde:

$R_t$  = Cantidad de lluvia (cm) en un día t.

$Q_{ijk}$  = Cantidad de desechos (cm) que se generan de un cultivo j en un suelo i durante un tiempo t.

$S_{ijt}$  = Parámetro de detención, el cual es función de la condición del suelo y de lluvias anteriores.

2. MODELOS DE EROSION: Estos modelos predicen la erosión (por inferencia de las pérdidas de sedimentos) de áreas cosechadas, la mayoría están basados en la ecuación universal de pérdida de suelos [51]. Esta ecuación es de la forma:

$$X_{ij} = E(K_i LS_i CF_j P_i)$$

donde:

$K_i$  = Factor de desgaste del suelo.

$E$  = Índice de erosión por precipitaciones.

$CF_j$  = Factor de encubrimiento para el cultivo  $j$ .

$P_i$  = Factor práctico de soporte (nivelación, terraplén, etc.)

$LS_i$  = Factor determinado por la pendiente y la longitud del suelo  $i$

$X_{ij}$  = Pérdida promedio anual de suelo  $i$  con un cultivo  $j$  (tons/ha).

3. MODELOS DE CONTAMINANTES EN DESHECHOS AGRICOLAS. Estos modelos son utilizados para estimar la pérdida de materias contaminantes lo que incrementa los desechos y la erosión del suelo [52].

Por ejemplo:

$$L_{ijt} = 10^{-3} e_i C_i^s X_{ijt} A_{ij}$$

donde:

$A_{i,j}$  = Area del terreno cultivado (ha).

$X_{ijt}$  = Cantidad de suelo perdido (tons/ha) en un tiempo  $t$ .

$C_i^s$  = Concentración de contaminantes (mg/kg) en el suelo.

$L_{ijt}$  = Cantidad de contaminantes perdidos en un suelo  $i$  erosionado.

#### IV-6. MODELACION PARA EL MANEJO DE LA CALIDAD DEL AGUA.

La

planeación para la calidad del agua involucra la identificación y evaluación del manejo de alternativas para satisfacer varios objetivos económicos y de calidad del agua. Los objetivos económicos son frecuentemente expresados en términos de costo eficiencia (minimización del costo) y de una equitativa distribución del costo a las personas que deberán pagar por su uso. Los objetivos de calidad son usualmente expresados en la

forma de estándares de calidad en los cuerpos receptores de agua. La eficiencia de algún plan debe ser medido en términos de como este plan contribuye al cumplimiento de los objetivos al examinar alternativas que reduzcan los costos y los daños asociados con la contaminación del agua.

**a.6) ALTERNATIVAS PARA EL CONTROL DE LA CALIDAD DEL AGUA.**

Es posible emplear modelos que ayuden en el diseño de instalaciones para el tratamiento de aguas y en el diseño del proceso de tratamiento [53,54,55]. Tales modelos pueden ser usados para definir los costos de tratamientos de agua.

Para concluir con este capítulo, a continuación se mostrará la tabla 4.1, a manera de resumen, de los problemas a los que se puede enfrentar toda institución que maneje el recurso agua y las técnicas que aquí se sugieren para su solución. Es importante aclarar que hay casos en este capítulo donde no se hace mención de alguna técnica en particular, por lo que éstos no se tomaron en cuenta a la hora de resumir.

IV-7. TABLA 4.1

PROBLEMA	TECNICA
* Estimación de caudales	* Modelación determinística
* Estimación de la capacidad de almacenamiento en un sitio de reserva	* Modelación determinística * Modelación dinámica-determinística
* Alternativas para el control de inundaciones	* Modelación determinística * Modelos de P.L. Entera
* Producción de energía eléctrica	* Modelos de P.L. determinística
* Planeación de la expansión de sistemas de agua	* Modelos de P.L. determinística
* Generación de secuencias de lluvias	* Simulación Montecarlo
* Generación de secuencias de flujos de corrientes	* Simulación Montecarlo * Modelo Autorregresivo Markov * Reproducción de la distribución marginal * Modelo de movimiento-autorregresivo promedio
* Operación de una reserva	* Modelos estocásticos de programación dinámica

PROBLEMA	TECNICA
* Diseño y operación de una reserva	* Modelos estocásticos de programación lineal
* Planeación de cuencas multi-sitios	* Modelos de programación lineal estocástica
* Planeación de la irrigación	* Modelos de programación lineal
* Operación de la irrigación	* Modelos de programación dinámica estocástica discreta
* Concentración de nutrientes	* Modelación mediante la aplicación de balance de masa * Modelación dinámica
* Predicción de desechos	* Modelación estática-determinística
* Estimación de la pérdida de materias contaminantes	* Modelación estática-determinística
* Manejo de la calidad del agua	* Modelos de optimización