

# IMPORTANCIA DE LA GENERACIÓN DE MUESTRAS SINTÉTICAS EN EL ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE POLÍTICAS DE OPERACIÓN DE PRESAS

Ramón Domínguez Mora<sup>1</sup>, Carlos Cruickshank Villanueva<sup>1</sup> y Maritza Liliana Arganis Juárez<sup>2</sup>

## Resumen:

Se presentan los resultados obtenidos al simular la operación de un sistema de presas de generación hidroeléctrica ubicadas en el río Grijalva, con distintas políticas de operación. Con objeto de comparar el efecto de distintas políticas en situaciones de escurrimientos extremos, se generaron registros sintéticos de escurrimientos mensuales para un periodo de 1000 años, utilizando el método de Svanidze modificado (Svanidze, 1980), (Domínguez, et al., 2001). Los resultados permiten observar diferencias significativas en la frecuencia y magnitud de los volúmenes que será necesario derramar, así como en las situaciones de déficit; diferencias que no se manifiestan claramente cuando se simula el comportamiento del sistema utilizando solamente el registro histórico

**Palabras clave:** Simulación, series sintéticas, método de Svanidze modificado, programación dinámica estocástica.

## INTRODUCCIÓN

Al estudiar las políticas de operación del sistema de presas en cascada del Río Grijalva con el empleo de la técnica de optimización conocida como programación dinámica estocástica (Domínguez y Mendoza., 2000), se plantearon dos problemas:

El primero fue que al presentar a los operadores de los embalses los resultados de una política que maximiza la energía generada y cuida reducir al máximo posible los derrames, los operadores plantearon que dicha política les parecía adecuada en lo general, pero que sería conveniente poder garantizar una cierta generación mínima en los meses de estiaje y procurar concentrar más la generación en las horas de máxima demanda del sistema nacional.

Por otra parte, debido a que el principal problema del método de programación dinámica estocástica es que el número de operaciones necesarias crece más que geoméricamente con el número de estados,

no se consideró conveniente agregar a la gran complejidad del análisis estocástico de dos presas en cascada, la derivada de considerar la autocorrelación y la correlación cruzada de las series históricas de volúmenes de ingreso.

Se determinó entonces una nueva política que toma en cuenta los planteamientos de los operadores y de manera adicional se planteó un procedimiento de ajuste a la operación que intenta tomar en cuenta la correlación de los volúmenes de ingreso.

Para estudiar las consecuencias de esos cambios se simuló la operación del sistema para el periodo 1959-2001, con los resultados que se muestran en la Tabla 1, en el cual se denomina política 2 a la política obtenida antes de considerar los planteamientos de los operadores y política 7 a la obtenida después de considerarlos. Para cada una de ellas se realizaron las simulaciones sin utilizar el procedimiento de ajuste que considera la correlación (sin correl, en la Tabla 1) y considerando dicho ajuste (con correl, en la Tabla 1).

<sup>1</sup>Investigador. rdm@pumas.iingen.unam.mx, ccv@pumas.iingen.unam.mx

<sup>2</sup>Dra. Estudiante de Doctorado y becaria.

Instituto de Ingeniería, UNAM. Ciudad Universitaria, Col. Copilco, Del. Coyoacán. Tel. 66223322

Artículo recibido el 3 de octubre de 2003, recibido en forma revisada el 26 de noviembre de 2004 y aceptado para su publicación el 14 de diciembre de 2004. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

Tabla 1. Resultados de la simulación. Registro histórico 1959-2001

Política	Energía generada GWh/quincena		Energía generada Total 10 <sup>3</sup> GWh	Almacenamiento mínimo (Mm <sup>3</sup> )		Derrame (Mm <sup>3</sup> )	
	La Angostura	Malpaso		La Angostura	Malpaso	La Angostura	Malpaso
2 no correl	303,88	223,94	519,38	5827,83	5063,13	500.2 <sup>(1)</sup>	67.01 <sup>(1)</sup>
2 correl	303,43	224,56	519,54	5995,57	5167,01	0	0
7 no correl	302,26	222,87	516,73	1781,66	5090,93	34.51 <sup>(1)</sup>	0
7 correl	301,81	224,06	517,46	2915,05	5302,85	0	7.2 <sup>(1)</sup>

El derrame se presenta en la segunda quincena de octubre de 1999

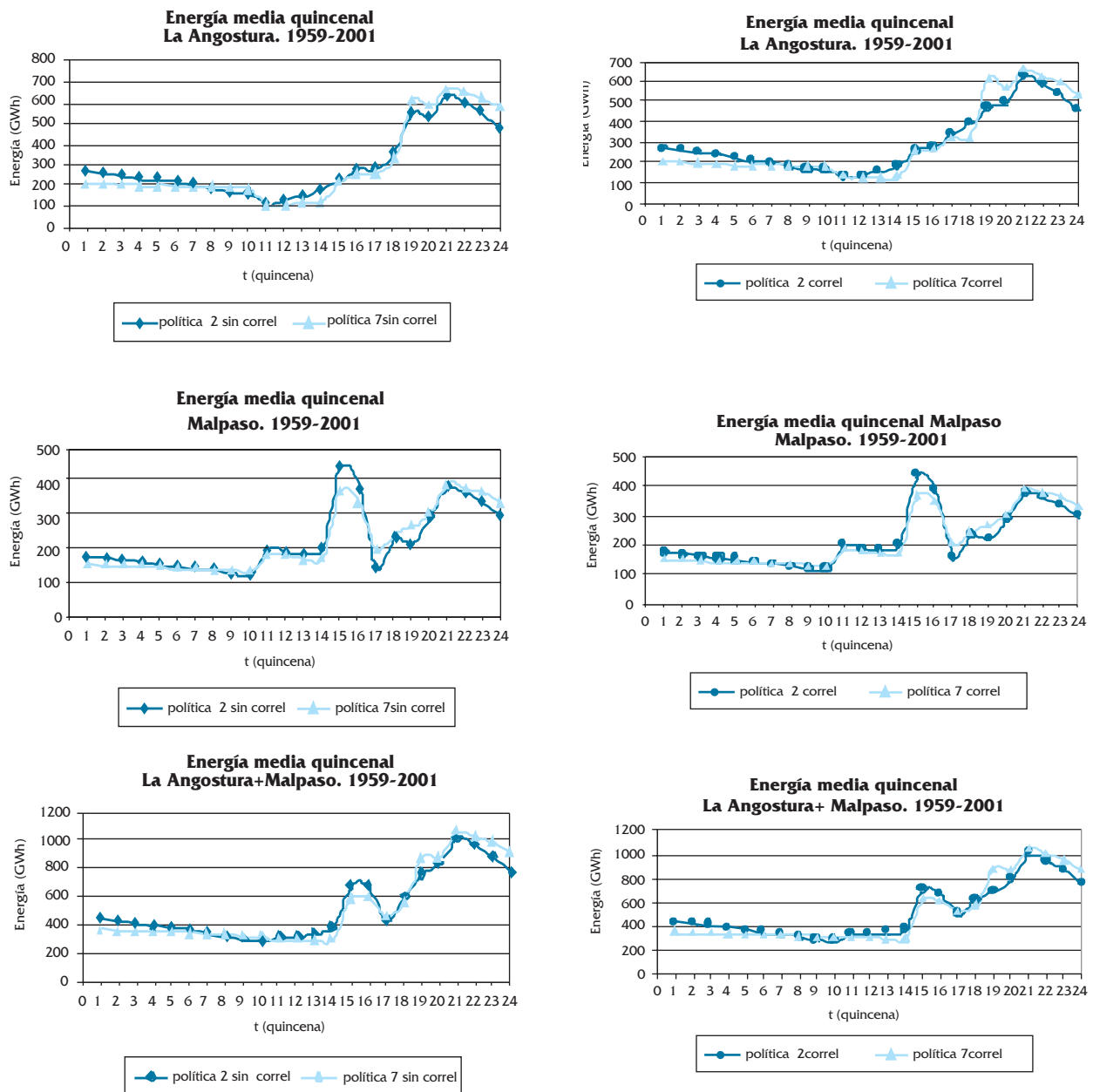


Figura 1.a) Energía media quincenal en cada presa y en conjunto. Registro histórico, sin considerar la Correlación.

Figura 1.b) Energía media quincenal en cada presa y en conjunto. Registro histórico, considerando la correlación.

# IMPORTANCIA DE LA GENERACIÓN DE MUESTRAS SINTÉTICAS EN EL ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE POLÍTICAS DE OPERACIÓN DE PRESAS

Los resultados mostrados en la Tabla 1 permiten ver que las restricciones adicionales planteadas por los operadores del sistema conducen a una ligera disminución de la energía generada y a una disminución significativa del volumen de almacenamiento mínimo en la presa La Angostura, que puede ponerla en riesgo de no poder surtir la demanda (es decir, en déficit).

Respecto al procedimiento propuesto para tomar en cuenta la correlación, solamente se observa que produce una muy ligera mejoría en la generación total y un incremento de los niveles mínimos de almacenamiento (es decir una disminución del riesgo de déficit).

Con las políticas de operación 2 y 7, sin y con correlación; se construyeron gráficas que resumen los resultados obtenidos en la energía y en las elevaciones medias quincenales, para el caso del registro histórico. (Figuras 1 y 2).

En cuanto a las situaciones extremas, es decir, de derrame o de déficit, los resultados obtenidos al

simular el funcionamiento con los ingresos históricos no aportan prácticamente ningún elemento de juicio que permita diferenciar los efectos de las distintas políticas.

Por lo anterior, se decidió estudiar qué sucedería si se simula la operación del sistema con series largas de volúmenes de ingreso generados sintéticamente, con el fin de identificar condiciones más desfavorables que las históricas. Los resultados correspondientes son el objetivo de este artículo.

## METODOLOGÍA

El análisis se realizó para el sistema hidroeléctrico del río Grijalva, formado por las presas La Angostura, Chicoasén, Malpaso y Peñitas; se consideró un sistema equivalente formado por las presas de mayor capacidad de regulación que son La Angostura y Malpaso, tomando en cuenta las aportaciones por cuenca propia y la carga dada por las presas Chicoasén y Peñitas.

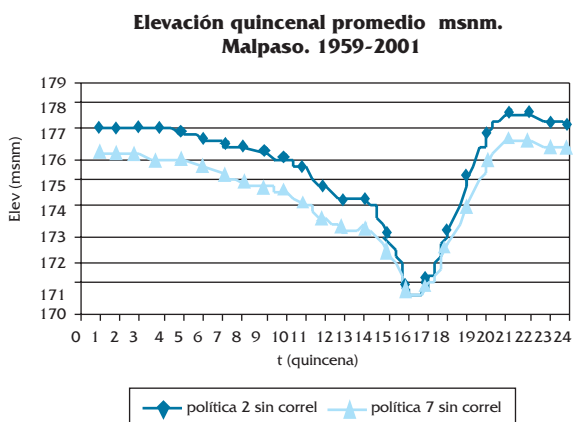
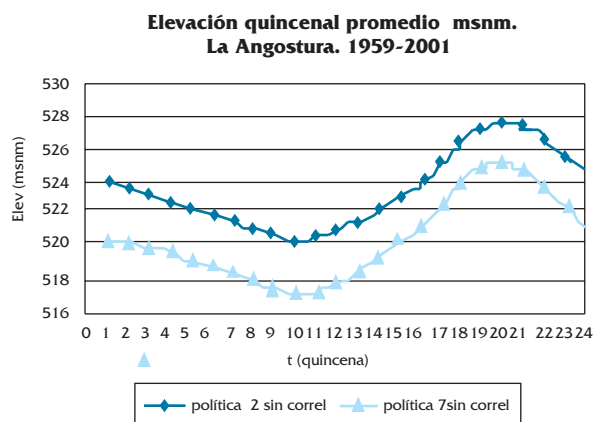


Figura 2. a) Elevación media quincenal en cada presa. Registro histórico. Sin correlación.

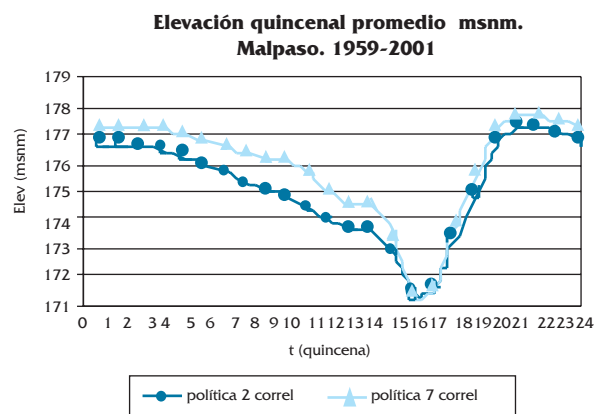
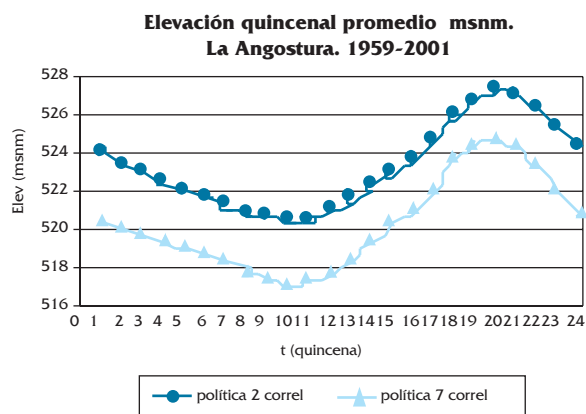


Figura 2. b) Elevación media quincenal en cada presa. Registro histórico. Con correlación.

La función objetivo por maximizar, vía programación dinámica estocástica, es el valor esperado de la energía generada por el sistema de presas menos los castigos asignados para situaciones de derrame o de déficit en cada una de las presas, es decir:

$$FO = \text{Máx } E(G_{Ang} + G_{Malp} - C_1 DERR_{Ang} - C_2 DERR_{Malp} - C_3 DEF_{Ang} - C_4 DEF_{Malp}) \quad (1)$$

donde  $G_{ang}$  es la energía generada en La Angostura tomando en cuenta la carga que proporciona Chicoasén,  $G_{malp}$  la generada por Malpaso con la carga adicional de Peñitas,  $C_1, C_2, C_3$  y  $C_4$  son constantes de penalización,  $DERR_{Ang}$  y  $DERR_{Malp}$  los volúmenes derramados en cada presa,  $DEF_{Ang}$  y  $DEF_{Malp}$  los volúmenes de déficit en cada presa y  $E(.)$  el operador valor esperado.

Al tomar en cuenta el carácter aleatorio de los ingresos, definiéndolos por medio de sus funciones de densidad de probabilidad,  $f_n(x)$  y al considerar que el sistema consta de dos vasos cuyo funcionamiento es dependiente, la política óptima de extracciones se obtiene utilizando las siguientes ecuaciones recursivas (Domínguez y Mendoza, 2000):

$$B_n^{K_1, K_2}(i_1, i_2) = \sum_{j_1=1}^{NS_1} \sum_{j_2=1}^{NS_2} q_{n, K_1}(i_1, j_1) q_{n, K_2}(i_2, j_2) \left\{ \left[ b_{n, K_1}(i_1, j_1) + b_{n, K_1, K_2}(i_1, j_1, i_2, j_2) \right] + B_{n+1}^*(j_1, j_2) \right\} \quad (2)$$

donde  $B_n^{K_1, K_2}(i_1, i_2)$  es el beneficio esperado en la etapa  $n$ , dadas las políticas de operación  $K_1, K_2$ , correspondientes a los vasos 1 y 2, tomando en cuenta los estados iniciales  $(i_1, i_2)$ .  $q_{n, K_1}(i_1, j_1)$  es la probabilidad en cada presa, de pasar del estado  $i$  al  $j$ , durante la etapa  $n$ , dada la extracción  $K$ ; se le conoce como probabilidad de transición. Tomando en cuenta la ecuación de continuidad  $j_1 = i_1 + x_1 - k_1$ ; dicha probabilidad depende sólo de la etapa  $n$  y del ingreso  $x_1 = j_1 - i_1 + k_1$ , es decir:

$$q_{n, K_1}(i_1, j_1) = f_n(x_1)$$

$b_{n, K_1}(i_1, j_1)$  es el beneficio en la etapa  $n$  dada la política de operación  $K_1$  correspondiente al vaso uno para pasar del estado  $i$  al  $j$ .

$b_{n, K_1, K_2}(i_1, j_1, i_2, j_2)$  es el beneficio en la etapa  $n$  dadas las políticas de operación  $K_1$  y  $K_2$  correspondientes a los vasos uno y dos para pasar del estado  $i$  al  $j$ .

$B_{n+1}^*(j_1, j_2)$  es el beneficio esperado óptimo de la etapa  $n+1$ , correspondiente a los estados finales de los vasos 1 y 2; es el máximo de los beneficios en dicha etapa, es decir que, en la etapa  $n$ :

$$B_n^*(i_1, i_2) = \max_k \left[ B_n^{K_1, K_2}(i_1, i_2) \right] \text{ y } K_{n,i}^*(i_1, i_2) \text{ son las extracciones correspondientes al máximo beneficio; es decir, las extracciones para las que } B_n^{K_1, K_2}(i_1, i_2) = B_n^*(i_1, i_2).$$

Para la determinación del beneficio esperado máximo, en un horizonte de planeación de  $N$  etapas, debe definirse la condición inicial del sistema y aplicar un algoritmo con el que se logre la convergencia a una política óptima de extracciones, para cada etapa  $m$  en que se divida el año y cada estado  $i$ .

El algoritmo utilizado por Domínguez y Mendoza (2000), consistió en reorganizar la ecuación (2) de la manera siguiente:

$$B_n^{K_1, K_2} = \phi_{n, K_1, K_2}(i_1, i_2) + \sum_{j_1=1}^{NS_1} \sum_{j_2=1}^{NS_2} q_{n, K_1}(i_1, j_1) q_{n, K_2}(i_2, j_2) B_{n+1}^*(j_1, j_2) \quad (3)$$

donde:

$$\phi_{n, K_1, K_2}(i_1, i_2) = \sum_{j_1=1}^{NS_1} q_{n, K_1}(i_1, j_1) b_{n, K_1}(i_1, j_1) + \sum_{j_2=1}^{NS_2} q_{n, K_2}(i_2, j_2) b_{n, K_1, K_2}(i_1, j_1, i_2, j_2) \quad (4)$$

es el valor esperado del beneficio inmediato en la etapa  $n$ , dadas las condiciones iniciales  $i_1, i_2$  y las extracciones  $K_1, K_2$ . Debido a que estos valores dependen de la época del año, para evitar repetir cálculos se obtienen sólo para las  $m$  etapas en que se divide éste, usando estos valores constantes en los demás años de cálculo.

Utilizando el algoritmo recursivo dado por la ecuación (3), se hicieron numerosas pruebas con distintos coeficientes de penalización por déficit y derrame hasta que se obtuvieron buenos resultados en comparación con los correspondientes a la operación histórica; a la política obtenida se le denominó política 2, sin correlación (Tabla 1).

Para la generación de las muestras sintéticas se utilizó el método de Svanidze modificado que se describe a continuación.

### Método de generación sintética de Svanidze modificado

Este método permite obtener registros sintéticos de longitud mayor que el histórico; los datos que se requieren son los volúmenes de ingreso en los distintos periodos en que se divide el año

## IMPORTANCIA DE LA GENERACIÓN DE MUESTRAS SINTÉTICAS EN EL ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE POLÍTICAS DE OPERACIÓN DE PRESAS

(en este caso el tratamiento fue mensual) para cada presa analizada. A partir de esos datos se calcula el volumen total anual para cada presa y se obtiene el porcentaje que corresponde a cada mes, con respecto al total anual; adicionalmente, se determina la suma de los totales anuales de las dos presas y el porcentaje que le corresponde a cada una. Posteriormente se hace el análisis estadístico a los totales anuales (de la suma de las dos presas) y se determina la función de distribución a la que mejor se ajustan dichos datos.

La simulación se realiza mediante un doble procedimiento: los volúmenes anuales de la suma de los ingresos a las dos presas se obtienen aleatoriamente, de acuerdo con su distribución de probabilidades, y dichos volúmenes se reparten entre las dos presas primero y en los meses del año después, conforme a los porcentajes de un año del registro histórico escogido mediante una selección aleatoria con reemplazo.

El procedimiento anterior produce un registro que preserva las correlaciones cruzadas y las autocorrelaciones, excepto para la que liga el último y el primer mes del año. Para minimizar este problema, se optó por usar años hidrológicos (de mayo a abril) considerando la natural escasa correlación al pasar del estiaje a la época de avenidas.

Con este procedimiento se generó una muestra sintética de 1000 años de registro así como 10 muestras sintéticas de 100 años de registro.

### Modificación de parámetros

Los operadores del sistema consideraron que las políticas halladas eran buenas, pero plantearon la conveniencia de garantizar la entrega de una energía mínima en la época de estiaje, así como la de generar de manera de que se pudieran hacer acomodos en el pico de la demanda diaria. Como los programas originales consideraban que la extracción podría variar desde una unidad de volumen hasta un valor máximo dado por la capacidad de las turbinas, para cumplir con el primer requerimiento de los operadores se hicieron las adecuaciones para que la extracción pudiera tomar valores desde un mínimo preseleccionado (no necesariamente igual a una unidad de volumen) hasta el máximo posible.

Para cumplir con el segundo requerimiento, se optó por dar distintos valores a la energía, en función de la posibilidad de colocarla en las horas de mayor demanda, como se muestra en la Figura 3,

en la que en el eje horizontal se representa la energía generada como proporción de la máxima posible, que correspondería (la máxima posible) a una generación durante las 24 horas del día, y en el eje vertical el beneficio correspondiente.

Las pendientes de la gráfica representan los cambios en el valor asignado por unidad de energía; decrecen conforme la energía quincenal aumenta porque disminuye la posibilidad de colocarla en las horas de máxima demanda. Pueden modificarse para tomar en cuenta a qué grado es deseable generar sólo en las horas de máxima demanda, pero sin exagerar porque con ello se reduce la energía total generada a largo plazo y aumentarían las probabilidades de déficit y derrame.

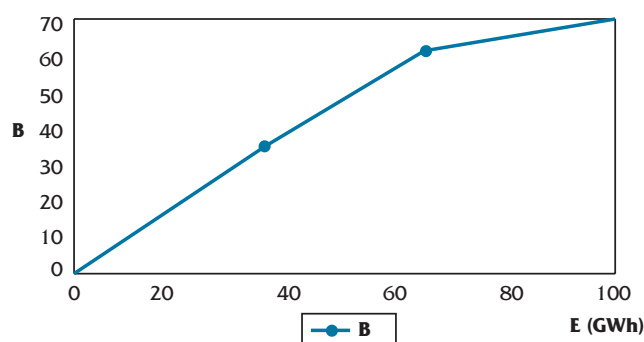


Figura 3 Beneficio contra energía

Al incorporar estas dos adecuaciones al algoritmo de programación dinámica se obtuvo la política 7, sin correlación (Tabla 1).

### Autocorrelación

Al encontrar que era alta la autocorrelación entre los volúmenes de ingreso, se decidió buscar un procedimiento para tomarla en cuenta; para ello, se obtuvieron ecuaciones de regresión entre el mes  $j+1$  y el mes  $j$  (Figura 4), además de hacer una clasificación de los ingresos en chicos y grandes, respecto a su media (Tabla 2), (Arganis, 2004).

Se identificó el volumen del mes  $j+1$  dado que el volumen del mes  $j$  fue grande así como el volumen del mes  $j+1$  dado que el anterior fue chico. A dichos volúmenes se les calculó la probabilidad de no excedencia con lo que se obtuvieron las probabilidades condicionales, como se muestra en la Figura 5.

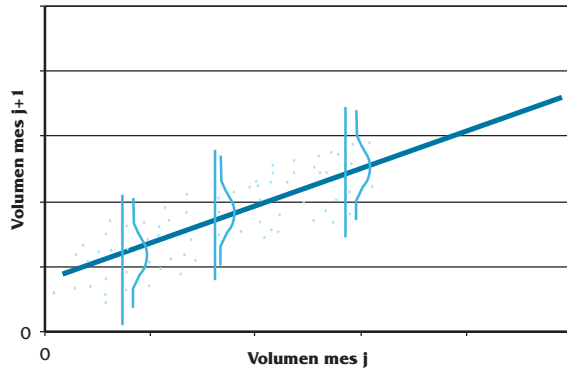


Figura 4 Interpretación de la autocorrelación

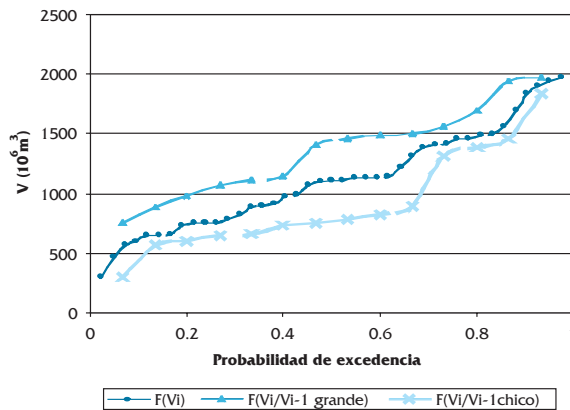


Figura 5 Probabilidad y probabilidad condicional.

Los cálculos anteriores muestran que la correlación se manifiesta de dos maneras, las cuales se resumen enseguida.

Por una parte, la interpretación tradicional de la correlación entre dos variables,  $x, y$ , considera que la función de distribución de probabilidades de la variable dependiente ( $y$ ) tiene una media dada por la ecuación de regresión, alrededor de la cual se manifiesta una cierta dispersión (Figura 4).

Por otra parte, la correlación provoca que las distribuciones condicionales de probabilidad de excedencia muestren un corrimiento respecto a las distribuciones no condicionales, este efecto se aprecia en la Figura 5.

Considerando esta interpretación, se hicieron ensayos de simulación proponiendo que la extracción programada en cada etapa fuera igual que la obtenida a partir del proceso de optimización (que no toma en cuenta la correlación) pero añadiendo una extracción adicional DELVOL igual al producto de la pendiente de la recta de regresión con el mes inmediato anterior ( $j-1$ ) por la diferencia entre el volumen real escurrido dicho mes menos la media correspondiente, ver ecuación (5):

$$DELVOL(presa, nmes) = PEND(presa, nmes-2)^* (INGHQ(presa, año, nmes-2) - VIMED(presa, nmes-2)) \quad (5)$$

Donde:

$PEND$  pendiente de la regresión lineal entre el volumen del mes  $j+1$  y el mes  $j$

Tabla 2 Clasificación de los volúmenes de ingreso por mes

La Angostura						
Volumen de ingreso por etapa $10^6 m^3$						
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Grandes $\geq$	344,71	233,52	217,13	205,6	278,2	847,1
Chicos $\leq$	284,5	199,3	177,3	157,19	215,51	683,2
	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Grandes $\geq$	1313	1643,6	2851,32	2040,3	781,8	482,91
Chicos $\leq$	891,85	1160,3	1936,9	1607,5	613,67	388,41
Malpaso						
Volumen de ingreso por etapa $10^6 m^3$						
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Grandes $\geq$	460,79	346,33	271,1	239,1	241,76	616,58
Chicos $\leq$	318,78	262,8	176,7	137,7	166	420,36
	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Grandes $\geq$	875,3	910,06	1869,36	1365,98	679,8	543,1
Chicos $\leq$	569,8	656,7	1080,5	921,6	505,3	412,3



# IMPORTANCIA DE LA GENERACIÓN DE MUESTRAS SINTÉTICAS EN EL ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE POLÍTICAS DE OPERACIÓN DE PRESAS

*INGHQ* volumen de ingreso quincenal en millones de m<sup>3</sup>

*PRESA* contador que toma el valor 1 si es La Angostura, 2 si es Malpaso

*nmes*=1,2,...24 (quincenas)

*VIMED* volumen de ingreso medio quincenal (aproximado como el medio mensual entre dos), en millones de m<sup>3</sup>

*DELVOL* incremento en el volumen, que tendrá signo positivo o negativo según que el ingreso sea mayor o menor que el valor medio.

Por lo anterior, el volumen por extraer, resulta:

$$GEXTQ_{presa}(nmes) = GEXTQ_{presa}^*(nmes) + DELVOL(presa, nmes) \quad (6)$$

Donde

*GEXTQ*\* volumen de extracción resultado de la política óptima obtenida con programación dinámica estocástica

*GEXTQ* volumen de extracción que toma en cuenta la correlación existente entre los volúmenes de ingreso.

Se verificó que el volumen dado por la ecuación (6) no fuera mayor que el máximo turbinable ni menor que el mínimo permisible; si esto sucede, se pone el máximo o el mínimo, según el caso.

## RESULTADOS

### Simulación de políticas seleccionadas

La selección de las políticas de operación se hizo con base en el resumen de resultados de las simulaciones realizadas con varias de ellas, usando el registro histórico, sin y con autocorrelación.

Finalmente, las políticas de operación que se seleccionaron fueron las correspondientes al ensayo 2, que es la mejor antes de considerar las restricciones sugeridas por los operadores de CFE, y la del ensayo 7, que toma en cuenta los requerimientos del organismo operador (CFE) respecto a permitirle hacer acomodos en el pico de la demanda diaria y asegurar una energía mínima entregada por el sistema (Arganis, 2004). En ambos casos las simulaciones se realizaron con y sin el incremento de volumen *DELVOL* que toma en cuenta la autocorrelación.

Con el método de Svanidze modificado se generaron series mensuales de 1000 años de escurrimientos (años hidrológicos, de mayo a abril) en las cuencas de las presas La Angostura y Malpaso.

Para poder comparar los resultados históricos, con los sintéticos, se realizó la simulación del funcionamiento de vaso con los datos históricos y con los de la muestra sintética; se usaron las dos políticas seleccionadas y las mismas consideraciones iniciales, sin tomar en cuenta la autocorrelación y tomándola en cuenta.

Tabla 3. Resumen de la simulación de la política del ensayo 2 sin correlación para el periodo de registro y 1000 años sintéticos

Política	Pendiente en ambas presas		Energía generada GWh/quincena		Almacenamiento mínimo (Mm <sup>3</sup> )		Derrame (Mm <sup>3</sup> )		Elevación media mínima m	
	1-2	2-3	La Angostura	Malpaso	La Angostura	Malpaso	La Angostura	Malpaso	La Angostura	Malpaso
2 <sub>1959-2001</sub>	1	1	303,88	223,94	5827,83	5063,13	500.2 <sup>(1)</sup>	67.01 <sup>(1)</sup>	520,45	170,85
2 <sub>sint1000</sub>	1	1	305,33	224,24	4281,97	4825,27	34694.18 <sup>(2)</sup>	17550.48 <sup>(3)</sup>	520,58	171

(1) El derrame se presenta en la 2aQ de octubre de 1999

(2) El derrame total se presentó en 76 quincenas, en 40 ocasiones fue en la 2aQ de octubre

(3) El derrame total se presentó en 40 quincenas, en 17 ocasiones fue en la 2aQ de octubre

Nota: la elevación media mínima se obtiene como el mínimo de los 24 valores medios quincenales

Tabla 4. Resumen de la simulación de la política del ensayo 2 con correlación para el periodo de registro y 1000 años sintéticos

Política	Pendiente en ambas presas		Energía generada GWh/quincena		Almacenamiento mínimo (Mm <sup>3</sup> )		Derrame (Mm <sup>3</sup> )		Elevación media mínima m	
	1-2	2-3	La Angostura	Malpaso	La Angostura	Malpaso	La Angostura	Malpaso	La Angostura	Malpaso
2 <sub>1959-2001</sub>	1	1	303,43	224,56	5995,57	5167,01	0	0	520,34	171,37
2 <sub>sint1000</sub>	1	1	304,91	224,86	4689,56	5055,84	5610.5 <sup>(1)</sup>	16145.53 <sup>(2)</sup>	520,99	171,61

(1) El derrame total se presentó en 15 quincenas, en 12 ocasiones fue en la 2aQ de octubre

(2) El derrame total se presentó en 51 quincenas, en 16 ocasiones fue en la 2aQ de octubre

Nota: la elevación media mínima se obtiene como el mínimo de los 24 valores medios quincenales

Tabla 5. Resumen de la simulación de la política del ensayo 7 sin correlación para el periodo de registro y 1000 años sintéticos

Política	Pendiente en ambas presas		Energía generada GWh/quincena		Almacenamiento mínimo (Mm³)		Derrame (Mm³)		Elevación media mínima m	
	1-2	2-3	La Angostura	Malpaso	La Angostura	Malpaso	La Angostura	Malpaso	La Angostura	Malpaso
7 <sub>1999-2001</sub>	0,8	0,7	302,26	222,87	1781,66	5090,93	34.51 <sup>(1)</sup>	0	517	170,83
7 <sub>simt1000</sub>	0,8	0,7	302,55	222,84	0 <sup>(2)</sup>	3841,19	20405.98 <sup>(3)</sup>	7846.64 <sup>(4)</sup>	517,07	170,97

- (1) El derrame se presenta en la 2aQ de octubre de 1999
- (2) Se presenta un déficit de  $75.41 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  en la segunda quincena de mayo del año 773
- (3) El derrame se presentó en 52 quincenas, en 34 ocasiones en la 2aQ de octubre
- (4) El derrame se presentó en 22 quincenas, en 17 ocasiones en la 2aQ de octubre

Nota: la elevación media mínima se obtiene como el mínimo de los 24 valores medios quincenales

Tabla 6. Resumen de la simulación de la política del ensayo 7 con correlación para el periodo de registro y 1000 años sintéticos

Política	Pendiente en ambas presas		Energía generada GWh/quincena		Almacenamiento mínimo (Mm³)		Derrame (Mm³)		Elevación media mínima m	
	1-2	2-3	La Angostura	Malpaso	La Angostura	Malpaso	La Angostura	Malpaso	La Angostura	Malpaso
7 <sub>1999-2001</sub>	0,8	0,7	301,81	224,06	2915,05	5302,85	0	7.2 <sup>(1)</sup>	517,05	171,42
7 <sub>simt1000</sub>	0,8	0,7	302,06	223,98	951,7	4585,69	796.57 <sup>(2)</sup>	9467.47 <sup>(3)</sup>	517,08	171,72

- (1) El derrame se presenta en la 2aQ de octubre de 1999
- (2) El derrame se presentó en 4 quincenas, en 4 ocasiones en la 2aQ de octubre
- (3) El derrame se presentó en 48 quincenas, en 13 ocasiones en la 2aQ de octubre

Nota: la elevación media mínima se obtiene como el mínimo de los 24 valores medios quincenales

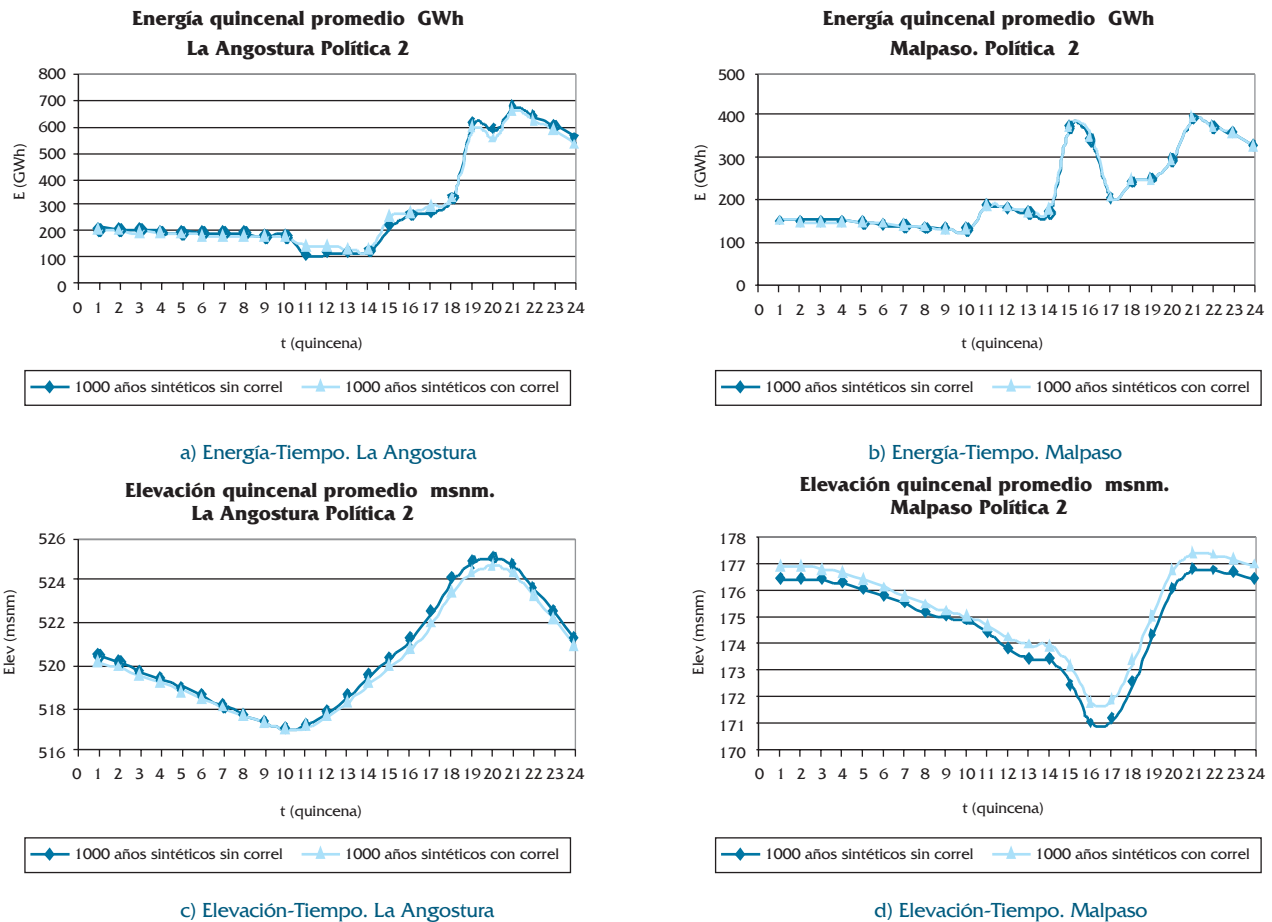


Figura 6. Curvas energía y elevación quincenal promedio contra tiempo quincenal. Política 2, 1000 años sintéticos



## IMPORTANCIA DE LA GENERACIÓN DE MUESTRAS SINTÉTICAS EN EL ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE POLÍTICAS DE OPERACIÓN DE PRESAS

En las tablas 3 a 6 se observa que la energía generada y la elevación media mínima son muy similares en el periodo histórico y en el sintético, lo que permite confirmar que el procedimiento de generación sintética funciona adecuadamente.

Adicionalmente, se construyeron gráficas de energía media contra tiempo y de elevaciones medias contra tiempo de los ensayos con y sin correlación (la Figura 6 ejemplifica al ensayo 2, con el registro sintético).

### Análisis de los derrames y del déficit

Con objeto de analizar lo que ocurre en situaciones críticas se elaboró la Tabla 7 que resume los resultados de las dos políticas estudiadas sin y con correlación, para los 1000 años de registro generados.

En la presa La Angostura, de acuerdo con la Tabla 7, con la política 2 los derrames son 6.2 veces mayores cuando no se considera la correlación que cuando sí se considera; en el caso de la política 7, los derrames son 25.6 veces mayores cuando no se considera la correlación que cuando sí se toma en cuenta.

En el caso de la presa Malpaso, con la política 2 los derrames son 9% mayores si no se considera la correlación, pero con la política 7 los derrames son 17% menores cuando no se considera la correlación. Lo anterior indica que en la presa Malpaso no se observan efectos tan notorios al considerar la correlación.

Para profundizar el análisis se trabajó con la política 7, que toma en cuenta los requerimientos de los operadores de CFE. Se generaron 10 muestras sintéticas de 100 años de registro (años hidrológicos) usando la política 7 sin correlación y con correlación; para cada presa se obtuvieron los valores del derrame total (Tablas 8 y 9) así como del déficit, el cual fue nulo en todos los casos.

En las Tablas 8 y 9 se observa que, para el caso de La Angostura, al considerar la correlación de los volúmenes de escurrimiento, el derrame total resulta casi 6 veces menor que cuando no se considera; en contraparte, el derrame en Malpaso aumenta ligeramente (cerca de un 2.8%) al considerar la correlación.

En las Tablas 10 y 11 se indica el número de quincenas con derrame y el número de derrames que ocurrieron en la segunda quincena de octubre, que corresponde al fin de la temporada de lluvias, así como en otras quincenas antes y después de octubre. Esta diferenciación permite ver que un porcentaje importante de los derrames ocurriría al final de la temporada de lluvias, de tal forma que, con el apoyo de un buen sistema de pronóstico a corto plazo, en la práctica esos derrames podrían evitarse utilizando excepcionalmente el almacenamiento destinado al control de crecientes.

En las Tablas 10 y 11 se puede observar que, en el caso de La Angostura, si no se utiliza el procedimiento para tomar en cuenta la autocorrelación, se tendrían en promedio 5.8 derrames en un lapso de 100 años, de los cuales 2.2 podrían evitarse.

Tabla 7 Resumen de la simulación de las políticas 2 y 7 en 1000 años sintéticos

Política	Pendiente en ambas presas		Energía generada GWh/quincena		Almacenamiento mínimo (Mm <sup>3</sup> )		Derrame (Mm <sup>3</sup> )		Elevación media mínima m	
	1-2	2-3	La Angostura	Malpaso	La Angostura	Malpaso	La Angostura	Malpaso	La Angostura	Malpaso
2 <sub>no correl</sub>	1	1	305,33	224,24	4281,97	4825,27	34694.18 <sup>(1)</sup>	17550.48 <sup>(2)</sup>	520,58	171
2 <sub>correl</sub>	1	1	304,91	224,86	4689,56	5055,84	5610.5 <sup>(3)</sup>	16145.53 <sup>(4)</sup>	520,99	171,61
7 <sub>no correl</sub>	0,8	0,7	302,55	222,84	0 <sup>(5)</sup>	3841,19	20405.98 <sup>(6)</sup>	7846.64 <sup>(7)</sup>	517,07	170,97
7 <sub>correl</sub>	0,8	0,7	302,06	223,98	951,7	4585,69	796.57 <sup>(8)</sup>	9467.47 <sup>(9)</sup>	517,08	171,72

(1) El derrame total se presentó en 76 quincenas, en 40 ocasiones fue en la 2aQ de octubre

(2) El derrame total se presentó en 40 quincenas, en 17 ocasiones en la 2aQ de octubre

(3) El derrame total se presentó en 15 quincenas, en 12 ocasiones fue en la 2aQ de octubre

(4) El derrame total se presentó en 51 quincenas, en 16 ocasiones fue en la 2aQ de octubre

(5) Se presenta un déficit de 75.41 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> en la segunda quincena de mayo del año 773

(6) El derrame se presentó en 52 quincenas, en 34 ocasiones fue en la 2aQ de octubre

(7) El derrame se presentó en 22 quincenas, en 17 ocasiones fue en la 2aQ de octubre

(8) El derrame se presentó en 4 quincenas, en 4 ocasiones fue en la 2aQ de octubre

(9) El derrame se presentó en 48 quincenas, en 13 ocasiones en la 2aQ de octubre

Tabla 8. Valor del derrame. Simulación conjunta sin y con correlación con la política del ensayo 7. La Angostura

Simulación. La Angostura		
Serie	Derrame total sin correl	Derrame total con correl
	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
Registro histórico 1959-2001	115	0
Muestra sintética 1	3038,52	0
Muestra sintética 2	1172,49	0
Muestra sintética 3	998,61	0
Muestra sintética 4	1631,69	0
Muestra sintética 5	3516,35	261,14
Muestra sintética 6	3934,77	845,19
Muestra sintética 7	0	0
Muestra sintética 8	1532,32	0
Muestra sintética 9	1622,06	0
Muestra sintética 10	12165,14	3987,02
Total (sintéticas)	29611,95	5093,35
Promedio (sintéticas)	2961,195	509,335

Tabla 9. Valor del derrame. Simulación conjunta sin y con correlación con la política del ensayo 7. Malpaso

Simulación. La Angostura		
Serie	Derrame total sin correl	Derrame total con correl
	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
Registro histórico 1959-2001	0	7.2
Muestra sintética 1	2497,25	2031,4
Muestra sintética 2	116,23	1158,58
Muestra sintética 3	39,15	1224,32
Muestra sintética 4	0	0
Muestra sintética 5	2154,72	1797,25
Muestra sintética 6	3986,34	3778,89
Muestra sintética 7	698,62	906,73
Muestra sintética 8	772,91	1633,16
Muestra sintética 9	1169,38	186,08
Muestra sintética 10	7958,52	7210,72
Total (sintéticas)	19393,12	19927,13
Promedio (sintéticas)	1939,312	1992,713

Tabla 10. Análisis del derrame. Simulación conjunta sin y con correlación con la política del ensayo 7. La Angostura

Simulación sin correlación. La Angostura					
Serie	Quincenas con derrame	Derrames			
		En la 2aQ de oct	Entre la 1aQ de nov y la 2aQ de feb	Entre la 1aQ de mar y la 2aQ de may	Entre la 1aQ de jun y la 1aQ de oct
Registro histórico 1959-2001	1	1	0	0	0
Muestra sintética 1	8	3	0	0	5
Muestra sintética 2	5	2	0	0	3
Muestra sintética 3	3	1	0	0	2
Muestra sintética 4	2	1	0	0	1
Muestra sintética 5	9	4	0	0	5
Muestra sintética 6	6	1	0	0	5
Muestra sintética 7	0	0	0	0	0
Muestra sintética 8	5	3	0	0	2
Muestra sintética 9	3	1	0	0	2
Muestra sintética 10	17	6	0	0	11
Total (sintéticas)	58	22	0	0	36
Promedio (sintéticas)	5,8	2,2	0	0	3,6

## IMPORTANCIA DE LA GENERACIÓN DE MUESTRAS SINTÉTICAS EN EL ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE POLÍTICAS DE OPERACIÓN DE PRESAS

<b>Simulación con correlación. La Angostura</b>					
Serie	Quincenas con derrame	Derrames			
		En la 2aQ de oct	Entre la 1aQ de nov y la 2aQ de feb	Entre la 1aQ de mar y la 2aQ de may	Entre la 1aQ de jun y la 1aQ de oct
Registro histórico 1959-2001	0	0	0	0	0
Muestra sintética 1	0	0	0	0	0
Muestra sintética 2	0	0	0	0	0
Muestra sintética 3	0	0	0	0	0
Muestra sintética 4	0	0	0	0	0
Muestra sintética 5	1	1	0	0	0
Muestra sintética 6	2	1	0	0	1
Muestra sintética 7	0	0	0	0	0
Muestra sintética 8	0	0	0	0	0
Muestra sintética 9	0	0	0	0	0
Muestra sintética 10	7	2	0	0	5
<b>Total (sintéticas)</b>	<b>10</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>6</b>
<b>Promedio (sintéticas)</b>	<b>1</b>	<b>0,4</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0,6</b>

Tabla 11. Análisis del derrame. Simulación conjunta sin y con correlación con la política del ensayo 7. La Angostura.

<b>Simulación sin correlación. La Angostura</b>					
Serie	Quincenas con derrame	Derrames			
		En la 2aQ de oct	Entre la 1aQ de nov y la 2aQ de feb	Entre la 1aQ de mar y la 2aQ de may	Entre la 1aQ de jun y la 1aQ de oct
Registro histórico 1959-2001	0	0	0	0	0
Muestra sintética 1	9	1	0	1	7
Muestra sintética 2	1	1	0	0	0
Muestra sintética 3	1	1	0	0	0
Muestra sintética 4	0	0	0	0	0
Muestra sintética 5	3	2	0	0	1
Muestra sintética 6	6	1	2	0	3
Muestra sintética 7	5	1	4	0	0
Muestra sintética 8	4	1	3	0	0
Muestra sintética 9	2	1	0	0	1
Muestra sintética 10	14	5	1	0	10
<b>Total (sintéticas)</b>	<b>45</b>	<b>14</b>	<b>10</b>	<b>1</b>	<b>22</b>
<b>Promedio (sintéticas)</b>	<b>4,5</b>	<b>1,4</b>	<b>1</b>	<b>0,1</b>	<b>2,2</b>
<b>Simulación con correlación. La Angostura</b>					
Serie	Quincenas con derrame	Derrames			
		En la 2aQ de oct	Entre la 1aQ de nov y la 2aQ de feb	Entre la 1aQ de mar y la 2aQ de may	Entre la 1aQ de jun y la 1aQ de oct
Registro histórico 1959-2001	1	1	0	0	0
Muestra sintética 1	11	0	1	1	9
Muestra sintética 2	4	1	1	0	2
Muestra sintética 3	4	0	0	0	4
Muestra sintética 4	0	0	0	0	0
Muestra sintética 5	9	3	0	0	6
Muestra sintética 6	10	1	5	0	4
Muestra sintética 7	8	1	7	0	0
Muestra sintética 8	5	0	4	0	1
Muestra sintética 9	1	1	0	0	0
Muestra sintética 10	14	2	4	0	8
<b>Total (sintéticas)</b>	<b>66</b>	<b>9</b>	<b>22</b>	<b>1</b>	<b>34</b>
<b>Promedio (sintéticas)</b>	<b>6,6</b>	<b>0,9</b>	<b>2,2</b>	<b>0,1</b>	<b>3,4</b>

Si a la política de operación 7 se le añaden las extracciones DELVOL con las que se considera la autocorrelación, el promedio de derrames cada 100 años se reduce drásticamente a 1.0, de los que 0.4 tendrían la posibilidad de ser almacenados.

En el caso de Malpaso, al añadir las extracciones DELVOL, el número promedio de derrames cada 100 años se incrementa de 4.5 a 6.6, de los cuales, en ambos casos, un poco menos de la mitad tendrían la posibilidad de evitarse.

Es interesante hacer notar la riqueza de la información que proporcionan las simulaciones realizadas con los registros sintéticos, en comparación con la que se obtiene si sólo se hace la simulación con el histórico.

## CONCLUSIONES

Se analizaron distintas políticas de operación del sistema de presas ubicadas en el río Grijalva, para la generación hidroeléctrica, obtenidas utilizando programación dinámica estocástica. La simulación del comportamiento del sistema suponiendo volúmenes de ingreso a las cuencas iguales a los del registro histórico, permite diferenciar las consecuencias relacionadas con los valores medios; esto es, la generación media en cada quincena, el régimen promedio de los almacenamientos en las presas, etc., pero no da información suficiente para diferenciar el comportamiento del sistema en condiciones extremas.

Las políticas analizadas fueron la denominada política 2, que maximiza una función igual al valor esperado de la energía generada a largo plazo por el sistema menos castigos asignados heurísticamente a las situaciones de déficit o derrame, y la política 7 que considera restricciones adicionales a las propias del sistema físico, planteadas por el personal del organismo operador. En ambos casos se analizó también la posibilidad de introducir un ajuste en las políticas de operación para tomar en cuenta la autocorrelación entre los escurrimientos mensuales.

En la Tabla 1 se muestra que los requerimientos del personal del organismo operador, en el sentido de garantizar una generación mínima en la época de estiaje y de procurar concentrar la generación en las horas de máxima demanda, hacen que la energía media generada se reduzca

ligeramente (del orden de un 2.5%) y que el almacenamiento mínimo disminuya drásticamente y, por lo tanto, aumente el riesgo de déficit.

Análogamente, la simulación con el registro histórico muestra que al utilizar el procedimiento propuesto para tomar en cuenta la autocorrelación se obtiene una mejoría en cuanto a la generación promedio total y a los almacenamientos mínimos alcanzados.

Sin embargo, en los aspectos relacionados con el comportamiento del sistema en condiciones de escurrimientos extremos (es decir, respecto a las situaciones de derrame o de déficit) al simular con el registro histórico no se obtiene información que permita diferenciar las consecuencias de adaptar distintas políticas.

Se utilizó entonces el método de Svanidze modificado para generar series de escurrimientos de hasta 1000 años con las mismas características estadísticas que el registro histórico.

La validez del método utilizado para generar registros sintéticos se pudo comprobar al observar que, en relación con la energía promedio generada en cada quincena y con los niveles promedio del agua almacenada en las presas, el comportamiento simulado resultó muy semejante al correspondiente al registro histórico y, por lo tanto, al comparar las distintas políticas de operación se obtienen las mismas conclusiones.

En relación con las condiciones extremas de déficit y, sobre todo, de derrame, la simulación con el registro sintético permitió diferenciar claramente las consecuencias correspondientes a las distintas políticas analizadas.

Así, respecto al déficit, se mostró que si se toman en cuenta los requerimientos de los operadores respecto a garantizar una generación mínima en la época de estiaje y concentrar la generación en las horas pico y no se considera la correlación, las presas se vacían en un lapso de 1000 años. En cambio, si se utiliza el procedimiento propuesto para considerar la correlación, las presas no se vacían aunque se siga la política 7 para tomar en cuenta los requerimientos de los operadores.

Respecto a los derrames, la simulación de 1000 años continuos permitió mostrar que los derrames derivados de utilizar la política 7 son del orden de la mitad de los que se obtienen con la política 2,

y que el procedimiento propuesto para tomar en cuenta la autocorrelación logra que los derrames de la presa La Angostura se reduzcan a la sexta parte.

Con las 10 muestras sintéticas, de 100 años cada una, se encontró que, para la política 7, al considerar la autocorrelación, además de que se reduce drásticamente el volumen total derramado, se reduce también de 9 a 3 el número de simulaciones en las que se presenta algún derrame (es decir que la probabilidad de derramar al menos una vez en un periodo de 100 años se reduce de 9/10 a 3/10).

Adicionalmente, en las Tablas 9 y 10 se observa que cerca de la mitad de los derrames se presentan en la segunda quincena de octubre (que corresponde al fin de la temporada de lluvias) o, en el caso de Malpaso, entre la primera quincena de noviembre y la segunda de febrero, de tal forma que utilizando un sistema de pronóstico a corto plazo, podría evitarse la mayoría de esos derrames.

En resumen, se encontró que la generación de registros sintéticos constituye una herramienta muy importante para estudiar el comportamiento de sistemas complejos en condiciones extremas que, justamente por ello, aparecen muy pocas veces en los registros históricos y que al utilizar el procedimiento propuesto para tomar en cuenta la autocorrelación en los volúmenes de entrada se obtiene un comportamiento muy diferente al de no considerarla, en general mejor y desde luego más acorde con la realidad.

### REFERENCIAS

- Arganis, J.M.L. *Operación óptima de un sistema de presas en cascada para generación hidroeléctrica, tomando en cuenta condiciones reales de operación y el uso de muestras sintéticas para el pronóstico*, tesis doctoral, Posgrado UNAM, Facultad de Ingeniería UNAM, 2004.
- Domínguez M. R, y Mendoza R.R., “Análisis del efecto de la autocorrelación en la determinación de políticas de operación óptima de un sistema de presas”, XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Córdoba, Argentina, pág. 519 a 527, Tomo III, octubre 2000.
- Domínguez M., R., Mendoza R.,R., “Funcionamiento de las Presa Angostura, Chicoasén, Malpaso y Peñitas sobre el Río Grijalva”, elaborado para la CNA por el Instituto de Ingeniería, UNAM. México, 2000.

- Domínguez M, R., Fuentes M. G., Arganis J. M. L. *Procedimiento Para Generar Muestras Sintéticas de Series Periódicas Mensuales a través del Método de Svanidze Modificado Aplicado a los Datos de las Presas La Angostura y Malpaso*. Series Instituto de Ingeniería C1-19 . Agosto de 2001.
- Domínguez M.R., R.R Mendoza. Y M.L Arganis J. *Revisión de las Políticas de Operación Quincenal de las presas Angostura y Malpaso, en el río Grijalva*. Instituto de Ingeniería. Proyecto elaborado para CFE., 2001.
- Labadie, J. W., “*Reservoir System Optimization Models*”. Colorado State University, Water Resources Update, University Council of Water Resources, 108. Summer, 1997.
- Labadie, J. W., “*Computer-Aided Water Management and Control*”, Notas de clase. USA, 2000.
- Ko, S.K., Fontane, D.G, Labadie, J.W. “*Multiobjective Optimization of Reservoir System Operation*”. Water Resources Bulletin. AWRA., Vol. 28, No. 1 February, 1992.
- Svanidze G.G., *Mathematical Modeling of Hidrologic Series*. Water Resources Publications. USA, 1980.

