



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Revisión y actualización de las
políticas de operación del sistema
de presas del río Grijalva.**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Luis Daniel Padilla Morales

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Maritza Liliana Arganis Juárez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/019/18

Señor
LUIS DANIEL PADILLA MORALES
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora DRA. MARITZA LILIANA ARGANIS JUÁREZ, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"REVISIÓN Y ACTUALIZACIÓN DE LAS POLÍTICAS DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE PRESAS DEL RÍO GRIJALVA"

- I. INTRODUCCIÓN
- II. ANTECEDENTES
- III. SITIO DE ESTUDIO
- IV. METODOLOGÍA
- V. APLICACIÓN Y RESULTADOS
- VI. CONCLUSIONES
- VII. ANEXOS

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 22 de febrero del 2018.
EL PRESIDENTE

M.I. GERMÁN LÓPEZ RINCÓN

GLR/MTH*gar.

HUMBERTO MARENGO MORALES

Rodrigo T. Sepúlveda H.

MARITZA ARGANIS JUÁREZ

Revisión de documentos

Maritza Arganis Juárez

Agradecimientos.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por abrirme sus puertas, por darme un espacio dentro de la comunidad y por las tantas oportunidades que me ha brindado.

A la Facultad de ingeniería, por prepararme como profesionista.

A la Dr. Maritza Liliana Arganis Juárez, por su apoyo, su tiempo y su paciencia.

Dedicatorias.

A mi papa, por haber sido mi primer maestro.

A mi mamá y mi abuelita, que siempre me apoyaron.

A mi hermana, quien espero logre continuar con sus sueños.

Contenido

	Pág.
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Importancia del conjunto Grijalva	1
1.2 Planteamiento del problema	2
1.2 Objetivos	2
1.4 Estructura de la Tesis	3
1.5 Referencias	4
Capítulo 2. Antecedentes	5
2.1 Estudios previos en el extranjero	5
2.2 Estudios realizados en México	6
2.3 Referencias	7
Capítulo 3. Sitio de estudio	9
3.1 Ubicación	9
3.2 Breve historia del conjunto Grijalva	11
3.3 Descripción de las presas	14
3.3.1 Presa “La Angostura”	15
3.3.2 Presa “Chicoasén”	17
3.3.3 Presa “Malpaso”	19
3.3.4 Presa “Peñitas”	21
3.4 Referencias	23
Capítulo 4. Metodología.	25
4.1 Métodos de optimización	25
4.1.1 Programación dinámica (estocástica)	26
4.2 Programación dinámica estocástica aplicada a la operación de un embalse	28
4.2.1 Programación dinámica estocástica aplicada a un conjunto de 2 presas	32
4.3 Simulación del funcionamiento de un vaso	35
4.3.1 Simulación del funcionamiento del conjunto Grijalva	37
4.4 Software	39
4.4.1 Descripción de los archivos	41
4.4.1.1 Cguiaest.txt	41
4.4.1.2 Datos.dat	42
4.4.1.3 ProbXX	44
4.4.1.4 FiteXX	45
4.4.1.5 Datosgen.dat	45
4.4.1.6 Arpolvs	46
4.4.1.7 Meevs	47
4.4.1.8 CONDISIM.txt	48
4.4.1.9 DatosGQ.dat	48
4.4.1.10 Volpre1Q y Volpre2Q	50
4.4.1.11 SIQPRE1 y SIQPRE2	51
4.5 Referencias	53

	Pág.
Capítulo 5. Aplicación y resultados	54
5.1 Descripción de los datos	54
5.1.1 Datos quincenales (Actualización)	57
5.1.2 Curvas guía	62
5.1.3 Penalizaciones	64
5.1.4 Coeficientes para el DELVOL.	65
5.2 Simulación del sistema (Congreso Nacional de Hidráulica)	66
5.2.1 Política optima	72
5.2.2 Optimización de los beneficios	75
5.3 Referencias.	79
Capítulo 6. Conclusiones	80
Anexos	81
A: Tabla de ingresos quincenales actualizados (2007 a 2013)	81
B: Tabla histórica de ingresos quincenales	86
Tabla para la presa La Angostura	86
Tabla para la presa Malpaso	88
C: Curvas Guía.	90
D: Matrices Estado-Extracción	92
E: Curvas Almacenamiento-Extracción	95
Referencias Generales	101

Lista de figuras.

Pág.

Figura 3.1 Ubicación de las cuencas del río Grijalva y Usumacinta	9
Figura 3.2 Comportamiento hidrológico de las subregiones	9
Figura 3.3 Hidrografía de Chiapas	10
Figura 3.4 Perfil del deslave de la ladera de San Juan de Grijalva	13
Figura 3.5 Canal excavado a cielo abierto	13
Figura 3.6 Complejo hidroeléctrico Grijalva	15
Figura 3.7 Presa Dr. Belisario Domínguez	15
Figura 3.8 Planta esquemática de la presa “La Angostura”	16
Figura 3.9 Presa Ing. Manuel Moreno Torres	17
Figura 3.10 Planta esquemática de la presa “Chicoasén”	18
Figura 3.11 Presa Nezahualcóyotl	19
Figura 3.12 Planta esquemática de la presa “Malpaso”	20
Figura 3.13 Presa Peñitas	21
Figura 3.14 Planta esquemática de la presa “Peñitas”	22
Figura 4.1 Proceso de la programación dinámica	26
Figura 4.2 Etapa de un modelo determinístico y uno estocástico	26
Figura 4.3 Programación dinámica estocástica	27
Figura 4.4 Discretización de la capacidad útil del vaso	29
Figura 4.5 Dirección de la programación dinámica estocástica	29
Figura 4.6 Condiciones por evitar en una presa	30
Figura 4.7 Entradas por cuenca propia	35
Figura 4.8 Relación de programas y datos	41
Figura 5.1 Comparación de volúmenes ingresados por cuenta propia, 2007 a 2010 (Volpre 1)	60
Figura 5.2 Diferencias entre registros pasados y actuales de los volúmenes ingresados por cuenta propia, Volpre1: 2007 a 2010	60
Figura 5.3 Comparación de volúmenes ingresados por cuenta propia, 2007 a 2010 (Volpre 2)	61
Figura 5.4 Diferencias entre registros pasados y actuales de los volúmenes ingresados por cuenta propia, Volpre2: 2007 a 2010	61
Figura 5.5 Diferencias entre energía promedio generada, La Angostura	70
Figura 5.6 Diferencias entre energía promedio generada, Malpaso	70
Figura 5.7 Diferencias entre derrames para la presa La Angostura	71
Figura 5.8 Diferencias entre derrames para la presa Malpaso	71
Figura 5.9 Derrames totales de cada política	73
Figura 5.10 Energía promedio generada total de cada política	74
Figura 5.11 Derrames totales de cada combinación de coeficientes	77
Figura 5.12 Energía promedio generada de cada combinación de coeficientes	78

Lista de tablas

Pág.

Tabla 3.1 Presas del sistema Grijalva con capacidad instalada y generación media anual	14
Tabla 3.2 Niveles de operación y características de generación, presa La Angostura	17
Tabla 3.3 Niveles de operación y características de generación, presa Chicoasén	19
Tabla 3.4 Niveles de operación y características de generación, presa Malpaso	21
Tabla 3.5 Niveles de operación y características de generación, presa Peñitas	23
Tabla 4.1 Variables presentes en la ecuación de continuidad	28
Tabla 4.2 Consideraciones al simular	38
Tabla 5.1 Reporte hidrológico diario, ejemplo de la presa La Angostura	54
Tabla 5.2 Reporte hidrológico mensual, ejemplo de la presa Peñitas	55
Tabla 5.3 Reporte Hidrológico histórico, ejemplo de la presa La Angostura	56
Tabla 5.4 Ingresos diarios anuales, extracto 2012	57
Tabla 5.5 Ingresos quincenales históricos, extracto	58
Tabla 5.6 Series de ingresos: Volpre 1 y Volpre 2, extracto	59
Tabla 5.7 Valores definidos para las curvas guía de cada presa	63
Tabla 5.8 Valores definidos para penalización	64
Tabla 5.9 Valores definidos para penalización (continuación)	64
Tabla 5.10 Resultados obtenidos para la presa La Angostura (Congreso, 2014)	66
Tabla 5.11 Resultados obtenidos para la presa Malpaso (Congreso, 2014)	66
Tabla 5.12 Resumen de los resultados (Congreso 2014)	67
Tabla 5.13 Resumen de los resultados, ordenados por Derrames (Congreso 2014)	67
Tabla 5.14 Resultados obtenidos para la presa La Angostura (2017)	68
Tabla 5.15 Resultados obtenidos para la presa Malpaso (2017)	68
Tabla 5.16 Resumen de los resultados (Simulación actual)	69
Tabla 5.17 Resumen de los resultados, ordenados por Derrames (Simulación actual)	69
Tabla 5.18 Resumen de los resultados, con los respectivos índices asociados	72
Tabla 5.19 Resumen de los resultados ordenados según su índice	73
Tabla 5.20 Resultados de la simulación, coeficientes 0.75 1.5	75
Tabla 5.21 Resultados de la simulación, coeficientes 0.74 1.4	75
Tabla 5.22 Resultados de la simulación, coeficientes 0.74 1.5	76
Tabla 5.23 Resultados de la simulación, coeficientes 0.75 1.4	76
Tabla 5.24 Resultados de la simulación, coeficientes 0.76 1.5	76
Tabla 5.25 Resultados de la simulación, coeficientes 0.75 1.6	76
Tabla 5.26 Resultados de la simulación, coeficientes 0.76 1.6	77
Tabla 5.27 Resultados de cada simulación, ordenados según el índice	77

Capítulo 1 Introducción.

1.1 Importancia del conjunto Grijalva

Las presas son estructuras que funcionan como barreras artificiales, se construyen sobre las corrientes de los ríos con el fin de desviar o embalsar el agua para su posterior aprovechamiento.

Las antiguas civilizaciones construyeron las primeras presas ante la escasez de recursos hídricos que había en los lugares donde se asentaban, pero con el avance de la ingeniería y el desarrollo de los métodos empleados también se han podido satisfacer otras necesidades que hoy en día son vitales.

Actualmente las presas pueden cubrir la demanda de agua que requiere no sólo el consumo humano sino también la agricultura y la ganadería; adicionalmente muchas de las presas producen otros beneficios, el desnivel de agua creado sirve para generar energía eléctrica, mientras que el embalse puede controlar avenidas y proteger poblaciones aguas abajo ante posibles inundaciones.

El conjunto de presas del río Grijalva resuelve una de los problemas más importantes de la zona: el exceso de agua.

La zona de la cuenca del río Grijalva es famosa por tener el mayor afluente de toda la república mexicana; la ciudad de Villahermosa en Tabasco y Juan de Grijalva en Chiapas han sufrido inundaciones y desastres hidráulicos numerosas veces, la construcción del conjunto Grijalva ayudó a controlar las avenidas y mitigar algunas de las inundaciones, sin embargo por efecto de otros factores los desastres no se han hecho esperar. La presa Angel Albino Corzo (Peñitas) a pesar de ser la última en construirse es imprescindible para las ciudades aguas abajo, debido a que funge como el principal regulador de la cuenca baja: una zona altamente lluviosa; de manera alterna las presas Belisario Domínguez (La Angostura) y Nezahualcóyotl (Malpaso) controlan los mayores embalses de la cuenca alta y del país, su operación debe equilibrar la generación de energía eléctrica y la seguridad de las ciudades evitando derrames y controlando las avenidas de los ríos.

La antigua Secretaria de Recursos Hídricos (SRH) proyectó al sistema Grijalva como el mayor complejo hidroeléctrico de la nación y actualmente el 40% de la energía hidroeléctrica usada en el país se genera gracias a las presas del río Grijalva; la central hidroeléctrica Manuel Moreno Torres (Chicoasén) destaca al ser la mayor generadora de electricidad del sistema.

Si bien las presas tienen más de 30 años de haber sido construidas, la operación del complejo continúa de manera eficiente, posicionando a las presas al mismo nivel que embalses construidas actualmente; no cabe duda de que el conjunto Grijalva es un parteaguas de la ingeniería mexicana y un ejemplo del potencial humano.

1.2 Planteamiento del problema

La operación de las presas del río Grijalva representa uno de los mayores retos de la ingeniería moderna; dos de las presas tienen los mayores embalses del país por lo que su falla o un derrame por una mala operación ocasionaría daños sin precedentes a las poblaciones aguas abajo, sin embargo y al mismo tiempo, se reconoce que el conjunto ostenta el primer lugar en generación de energía eléctrica del país, por lo que un déficit de agua ocasionado nuevamente por una mala operación conduciría a enormes pérdidas económicas.

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) es la actual operadora de las presas del conjunto Grijalva, el organismo sigue las políticas de operación que la Comisión Nacional de Agua (CONAGUA) proponga como la mejor en el momento, esto significa que se utilizará aquella que genere la mayor cantidad de energía con el menor número de derrames o déficit.

Este análisis inicia con la reproducción de las políticas de operación presentadas en el artículo del Instituto de Ingeniería para el Congreso Nacional de Hidráulica en su edición XXIII y continúa con nuevos ensayos que permitan identificar políticas de operación óptimas al utilizar registros hidrológicos con la mayor actualización posible.

1.3 Objetivos

Objetivo general:

- Encontrar una nueva política de operación para el conjunto de presas del río Grijalva: La Angostura, Malpaso y Chicoasén.

Objetivos particulares:

- Reproducir las políticas de operación del artículo presentado por el Instituto de Ingeniería para el XXIII Congreso Nacional de Hidráulica, 2014.
- Actualizar los volúmenes de entrada a las presas, mediante los reportes hidrológicos que se encuentren disponibles.
- Encontrar la nueva política de operación, variando los coeficientes que añaden o restan volúmenes de ingreso a las cuencas, con el fin de considerar la correlación que existe entre los volúmenes de entrada de una quincena a la otra, durante la simulación del funcionamiento de los vasos de las presas con el software SIM2PCM.
- Maximizar la generación eléctrica del conjunto Grijalva manteniendo los niveles de seguridad para prevenir inundaciones.

1.4 Estructura de la tesis

El presente trabajo se desarrolla en 6 capítulos, cada uno incluye sus propias referencias consultadas.

Capítulo 1: En el primer capítulo se describe la importancia del conjunto Grijalva tanto para el país como para la región de Chiapas y Tabasco, se plantea la problemática que se pretende resolver y los objetivos que cubre este trabajo.

Capítulo 2: El segundo capítulo hace una breve recapitulación de los estudios publicados en torno a las políticas de operación, presentando un panorama mundial y posteriormente un enfoque nacional dando prioridad al sistema Grijalva.

Capítulo 3: En este rubro se realiza la descripción de las cuatro presas que integran al conjunto Grijalva, se añade la ubicación de cada una de ellas y esquemas que ayudan en la descripción.

También se expone la historia del conjunto desde su proyección y enfatizando los mayores catástrofes que se han suscitado en la región.

Capítulo 4: El capítulo cuatro comienza con una descripción de los métodos de optimización y continúa con la explicación de la Programación Dinámica Estocástica (PDE).

Posteriormente se describe la forma en la que se modela un embalse utilizando la PDE y el principio que se sigue para modelar 2 presas (La Angostura y Malpaso-Chicoasen) con el mismo método.

En el capítulo también se añade la descripción del software utilizado y los archivos de datos que se utilizan para realizar las simulaciones.

Capítulo 5: En el capítulo 5 se explican los datos que se utilizaron para efectuar las simulaciones, después se exponen los resultados que se obtuvieron al reproducir los ensayos del 2014 (Derrames, energía promedio generada y almacenamiento inicial mínimo) y finalmente se muestran las mejores políticas y los cambios que se aplicaron para aumentar los beneficios totales de dichas políticas.

Capítulo 6: El último capítulo corresponde a las conclusiones sobre los resultados obtenidos.

Al final del trabajo se presenta la recopilación de todas las referencias bibliográficas consultadas así como tablas de información que se utilizaron o que se generaron durante la elaboración del texto.

1.5 Referencias

- Alegría Díaz, Arallely. 2010 *Política de operación optima del sistema de presas del rio Grijalva. Efectos de la curva guía* (Tesis de Licenciatura)
- Contreras Cruz, Claudia. 1999. “Operación óptima de un sistema de presas en cascada. Aplicación al sistema del río Grijalva” (Tesis de maestría, UNAM)
- Hincapié López, Carolina. 2016 “Actualización de las avenidas de diseño y de las políticas de operación del sistema de presas del río Santiago” (Tesis)
- Marengo Mogollón, Humberto; 2010 “Estado del Arte y Prospectiva de la Ingeniería en México y el Mundo”, *capitulo 10 “Estado actual y futuro de las presas en México y el mundo”*, Academia de Ingeniería, México con el patrocinio de CONACYT.
- Organismo regulador de seguridad de presas de argentina www.orsep.gob.ar

Capítulo 2 Antecedentes.

2.1 Estudios previos en el extranjero.

La bibliografía relativa a los métodos de optimización es extensa; los primeros avances versan en el cálculo diferencial e integral y el posterior desarrollo de teorías matemáticas afines, no es sino con la segunda guerra mundial que la aplicación de los métodos hacia problemas prácticos empezó a tomar relevancia.

La programación dinámica desarrollada por los matemáticos G. B. Dantzig y Richard Bellman, así como el avance simultáneo de las computadoras sentaron las bases para la optimización de múltiples tareas físicas, sin embargo la aplicación de métodos al funcionamiento de embalses aún tardaría algunos años.

En 1971, William S. Butcher de la Universidad de Austin, Texas publicaría: “Stochastic Dynamic Programming for Optimum Operation”, demostrando que se puede obtener una política de operación en términos del estado del embalse mediante el método de la programación dinámica estocástica; utilizando la misma técnica otros investigadores publicarían sus propios resultados en torno al manejo de recursos hidráulicos, como Yakowitz S. J. en 1982 con su edición “Dynamic programming applications in water resources”.

Entre los estudios más sobresalientes con aplicaciones en embalses reales están:

- La investigación de Fredrick G.A. de 1992, quien revisó los métodos de optimización utilizados sobre el cauce del río Colorado, con el fin de crear un modelo propio que incluya políticas de operación. “A study of optimization of reservoir operations of the Colorado river”.
- El estudio de 2003 dirigido por Barros, Mario T. L., en el que se desarrolla un modelo de optimización aplicado al funcionamiento del sistema hidroeléctrico de Brasil. “Optimization of large-scale Hydropower system operations”.
- El trabajo de Uhr Markus publicado en 2006, quien encontró políticas óptimas en función de costos mínimos de producción, mezclando métodos de aproximación y de descomposición jerarquizada. “Optimal operation of a hydroelectric power system subject to stochastic inflows and load”.
- La investigación de Horqqe, F. S. de 2011, en el que mostró una metodología para determinar los niveles de operación óptimos de una presa, y la altura apropiada del embalse. “Aplicación de los modelos estocásticos en el dimensionamiento de presas”.

En el ámbito de sistemas de presas resalta el trabajo de Revelle Charles en 1999, quien planteó modelos determinísticos para la operación y diseño de sistemas de embalses en paralelo, mediante su investigación “Optimizing reservoir resources”; por su parte Turgeon A. Ribeiro, trabajó con sistemas de presas en serie que le permitían publicar en 1998: “Determining the maximum daily storage of several reservoirs in series subject to annual flood”.

La optimización de embalses y su funcionamiento no es una tarea exclusiva de la programación dinámica, muchos investigadores alrededor del mundo han utilizado métodos alternos que los han conducido a resultados eficaces y satisfactorios, algunos de estos investigadores son:

- Ferhat T. Ürkman, quien en 1991 publicó el artículo “Optimization of large scale hydroelectric generating systems”, donde modeló un sistema interconectado con el método: agregación-optimización-desagregación.
- Ailing Li, quien utilizó la teoría de descomposición-coordinación, sobre dos embalses interconectados en el río amarillo de China, los resultados se publicarían en 2004 en: “A study on the large-scale system descomposition-coordination methos used in optimal operation of a hydroelectric”.
- Abolghasemi R. H., aplicó la programación lineal en un modelo propio que retrataba el sistema de cinco plantas en Kootenay de Columbia Británica. En 2008 divulgó sus conclusiones en “Optimization of the Kootenay River hydroelectric system with a linear programming model”.

2.2 Estudios realizados en México.

En México se tiene una amplia trayectoria en la realización de estudios relativos a la optimización del funcionamiento de embalses; en el año de 1985, Raúl Larios, planteo un modelo de programación dinámica para optimizar la operación de presas.

En la década de los 90´s sobresalen los estudios de Rebolledo S. de la Facultad de Ingeniería, analizando la operación de un sistema hidroeléctrico en paralelo en 1990 con su tesis: “Operación optima de un sistema hidráulico formado dos presas en paralelo”, también se puede mencionar a Avilés H. R., estudiando la operación de un sistema de presas en línea, cuyos resultados se publicarían en 1994 con el título: “Optimización en línea de presas hidroeléctricas”.

Hacia 2003, Sánchez C. y Wagner G., publicarían “Determinación de reglas de operación para dos embalses, utilizando algoritmo genético”, un año después ambos investigadores utilizarían un modelo numérico simulador-optimizador para plantear reglas de operación óptimas para sistemas superficiales, el trabajo se publicaría para el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua; En el 2015, Huerta Loera S. F., escribiría su tesis doctoral “Políticas de operación a largo plazo de un sistema de presas de propósito múltiple”, donde analizaría y plantearía políticas a largo y a corto plazo, manteniendo niveles óptimos ante la ocurrencia de algún evento e incorporando una estimación de riesgos por inundaciones aguas abajo.

Concretamente la operación de las presas del río Grijalva ha sido estudiada por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, en 1993 el grupo de trabajo encabezado por el doctor Ramón Domínguez del Instituto de Ingeniería de la UNAM, publicó el informe para la CFE: “Operación integral del sistema hidroeléctrico del río Grijalva” donde plantearían el problema de determinar políticas de operación mensuales que procuren evitar derrames y déficit.

Dada la importancia del sistema de presas Grijalva, se han realizado otros trabajos que se complementan y perfeccionan con los años, a continuación se presenta un breve compendio de los estudios y publicaciones realizadas en orden cronológico:

- Domínguez et al (1998), estudio elaborado para CNA que complementa el informe de 1993 para la CFE, definiendo políticas de extracción en función del almacenamiento final del mes anterior.
- Contreras C.C. (1999), tesis de maestría que describe el procedimiento para obtener políticas de operación para las presas de manera individual y en conjunto, mediante la implementación de herramientas de computo.
- Domínguez et al (2000), informe realizado para la CFE que revisa el funcionamiento y la operación de las presas, redefiniendo las avenidas de diseño e incluyendo las lluvias intensas ocurridas un año antes.
- Arganis J. M. (2004), tesis doctoral que analiza la operación óptima del sistema de presas considerando condiciones reales y el uso de muestras sintéticas para una simulación a largo plazo.
- Domínguez et al (2006), informe para la CFE donde se ajustan las avenidas de diseño y los parámetros después de las lluvias intensas de 2005, para definir políticas de operación quincenales del conjunto turbina-vertedor.
- Arganis et al (2009), estudio, escrito para la CFE de la cuenca alta del río Grijalva para determinar nuevas políticas de operación introduciendo el concepto de curvas guía.
- Alegría, A. (2010), tesis de maestría que propone nuevas políticas de operación tras considerar los efectos de curvas guía.
- Mendoza et al (2012), artículo elaborado para el XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, que muestra la influencia de las curvas guía y la variación de coeficientes de penalización en la determinación de políticas.
- Mendoza et al (2014), artículo presentado en el XXIII Congreso Nacional de Hidráulica, que aborda el efecto de la correlación de volúmenes de ingreso a la cuenca, durante la obtención de políticas de operación.

2.3 Referencias

- Ailing Li. 2004 “A study on the large-scale system decomposition-coordinating method used in optimal operation of a hydroelectric system” (Water International, Vol. 29 No. 2, pp. 228-231, China)
- Alegría Díaz, Arallely. 2010 *Política de operación óptima del sistema de presas del río Grijalva. Efectos de la curva guía* (Tesis de Licenciatura)

- Arganis Juárez, Maritza Lilitana. 2004. “Operación óptima de un sistema de presas en cascada para generación hidroeléctrica tomando en cuenta condiciones reales de operación y uso de muestras sintéticas para pronóstico” (Tesis de doctorado, UNAM)
- Arganis Juárez Maritza Lilitana. 2009. “Estudio integral de la cuenca alta del río Grijalva. Manejo óptimo de las presas” (Informe final elaborado para CFE por el Instituto de Ingeniería, UNAM)
- Aviles H. R. 1994, “Optimización en línea de presas hidroeléctricas” (tesis de licenciatura, UNAM)
- Contreras Cruz, Claudia. 1999. “Operación óptima de un sistema de presas en cascada. Aplicación al sistema del río Grijalva” (Tesis de maestría, UNAM)
- Domínguez, Ramón; Mendoza, Rosalva; Alvarado C. A. y Márquez L. E., 1993 “Operación integral del sistema hidroeléctrico del río Grijalva” (elaborado para CFE por el instituto de ingeniería, UNAM)
- Domínguez, Ramón; Mendoza, Rosalva; Contreras, Claudia. 1998. “Estudio hidrológico de la segunda etapa del análisis integral de la zona baja del río Grijalva”. (Informe preliminar elaborado para CNA por el Instituto de Ingeniería, UNAM).
- Domínguez, Ramón; Maritza, Arganis; Carriosa, E., et al. 2006 “Determinación de las avenidas de diseño y ajuste de los parámetros del modelo de optimización de las políticas de operación del sistema de presas del río Grijalva” (Elaborado para CFE por el Instituto de Ingeniería, UNAM)
- E. Sánchez C., y Wagner G. 2004 “Modelo numérico para la operación óptima de un hidrosistema de aguas superficiales” (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Morelos, México)
- Huerta Loera, Sadoth Fabián. 2015 “Políticas de operación a largo plazo de un sistema de presas de propósito múltiple” (Tesis)
- Larios Malanche, Raúl. 1997 “Modelo de Programación Dinámica Estocástica para optimizar la operación de presas” (Tesis de licenciatura, UNAM)
- R. Rebolledo S., 1990, “Operación óptima de un Sistema hidráulico formado por dos presas en paralelo” (Tesis de maestría, UNAM)

Capítulo 3 Sitio de estudio.

3.1 Ubicación

La Región Hidrológica número treinta (RH30) Grijalva-Usumacinta, ubicada sobre los estados de Tabasco, Chiapas y algunas porciones de Campeche, tiene un total de 91,345 km². En la región se ubican las 2 cuencas más importantes de la república mexicana en términos de su caudal hidráulico: La cuenca del río Grijalva y la cuenca del río Usumacinta, ambas se dividen a su vez en 6 subregiones (Figura 3.1), de las cuales Alto Grijalva, Medio Grijalva y Bajo Grijalva pertenecen a la cuenca del río Grijalva mientras que las subregiones río Lacatúm, río Usumacinta y Laguna de Términos son parte de la cuenca del río Usumacinta; el comportamiento de las corrientes dentro de las subregiones se aprecia en la Figura 3.2.



Figura 3.1. Ubicación de las cuencas del río Grijalva y Usumacinta (DOF 2009)

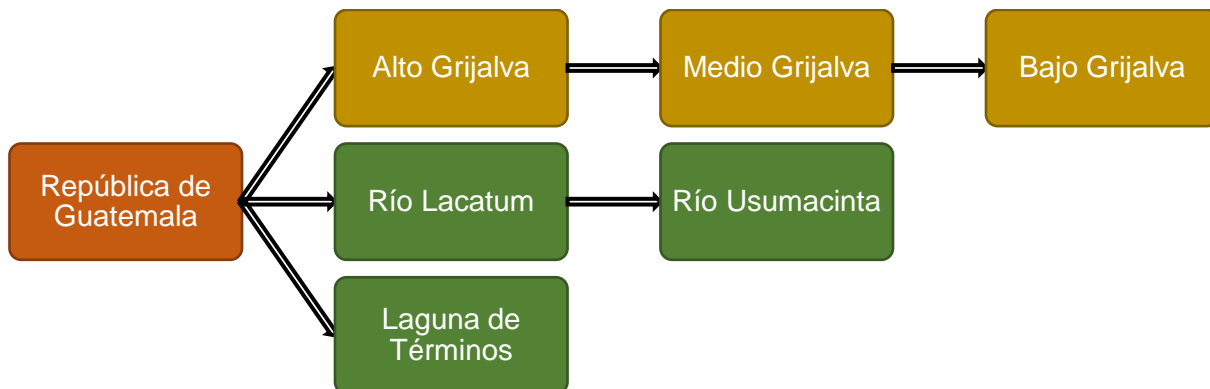


Figura 3.2. Comportamiento hidrológico de las subregiones. En color amarillo se encuentra la cuenca del Río Grijalva y en verde la cuenca del Río Usumacinta

3.2 Breve historia del conjunto Grijalva

Durante el México independiente de Porfirio Díaz todas las obras hidráulicas fueron construidas por empresas particulares y extranjeras, pero con el inicio de la revolución en 1910 y el consolidamiento de la nueva administración hacia años posteriores, se promulgaron nuevas leyes encauzadas al uso y aprovechamiento del agua por parte del gobierno nacional.

El primer organismo que empezó un estudio de los recursos hidráulicos fue el departamento de Irrigación de la Secretaría de Agricultura y Fomento en 1917; años después en 1926, la tarea de tomar las primeras mediciones hidráulicas recaería en la recién fundada: Comisión Nacional de Irrigación; en 1937 dicha Comisión sería la encargada de instalar las primeras estaciones hidrométricas sobre los afluentes de Chiapas y Tabasco.

A finales de 1946, con los cambios políticos en México y con nuevos enfoques en la administración hidráulica, se creó la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH), un organismo centralizado que se encargaría del manejo del agua en sus diferentes facetas. Uno de los primeros retos que tuvo la Secretaria fue examinar el río Grijalva desde su nacimiento hasta su desembocadura, con el objetivo de ubicar los sitios con mayor potencial para la construcción de presas generadoras de electricidad.

Una vez que se ubicaron los mejores sitios para la construcción de las presas se instauró la Comisión de Grijalva en agosto de 1955, el organismo tuvo todas las facultades para la planeación, diseño y construcción de todas las obras requeridas para el desarrollo integral de la cuenca Grijalva, lo que incluye obras de defensa, de aprovechamiento para riego y de generación de energía, vías de comunicación y de transporte así como las obras procedentes de la reubicación de poblados.

Bajo las condiciones anteriores, la presa “Nezahualcóyotl” (Malpaso) se convirtió en la primera hidroeléctrica dentro del conjunto del río Grijalva, su construcción inició en 1959 y terminó 5 años después en 1964, mientras que el primer llenado sucedió el 30 de mayo de 1966 inundando el poblado de Quechula, famoso por la iglesia del poblado que es considerada un ejemplo de la arquitectura colonial.

La siguiente hidroeléctrica que se construyó fue la presa “Dr. Belisario Domínguez” (La Angostura), los trabajos comenzaron en 1969 y concluyeron en los primeros meses de 1974, año en el que se realizó el llenado de la cuenca, cubriendo miles de hectáreas agrícolas.

En diciembre de 1974, iniciaron los preparativos para la construcción de la presa “Ing. Manuel Moreno Torres” (Chicoasén), mientras que el primer llenado sucedió en mayo de 1980 cubriendo el poblado de Osumacinta. Cabe destacar que por efectos legales la Secretaría de Recursos Hidráulicos pasó a formar parte de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos en 1977, sin embargo la Comisión del Grijalva no sufrió ningún cambio que afectara los trabajos de construcción.

La última presa en ser construida fue “Angel Albino Corzo” (Peñitas), su construcción inició en 1979 y terminó en junio de 1987, ese mismo año se disolvería integralmente la Comisión de Grijalva.

A pesar de ser el último embalse en recibir agua, Peñitas es el más importante regulador y control de avenidas debido a que su cuenca pertenece a una de las zonas más lluviosas.

Con el fin de establecer la operación de las presas, la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos realizó reuniones periódicas con la CFE desde 1983, años después se creó la primera comisión para la operación de las presas que en 1994 se convertiría en el Comité Técnico de Operación de Obras Hidráulicas (CTOOH).

Sin embargo, aún con el comité monitoreando y manejando las presas, se han presentado situaciones extraordinarias en el cauce del río Grijalva; en 1995 debido a la incidencia de los ciclones Opal y Roxanne se produjo una inundación por la creciente de los ríos Carrizal y Samaria, después en 1999 se presentó otra inundación esta vez debido a la combinación del frente frío número 4 y la depresión tropical 11, en ninguno de los eventos anteriores fue necesario operar los vertedores de las presas, ya que sólo se registraron niveles superiores al NAMO, sin embargo los eventos suscitados dieron pie a la construcción de infraestructura de protección como: muros perimetrales en la ciudad de Villahermosa y márgenes de los ríos.

En el año 2007 con la presencia del fenómeno de “El Niño” y el impacto del ciclón tropical Bárbara, la temporada de lluvias se adelantó a junio prevaleciendo en un régimen intenso hasta octubre, la situación empeoró cuando además se presentaron 2 frentes fríos y la ocurrencia del ciclón tropical Noel; ante la crecida en los niveles de los ríos se decidió cerrar la extracción de la presa Malpaso el 23 de octubre; La Angostura haría lo propio el 29 del mismo mes; aun sin aportaciones hídricas por parte de Alto Grijalva, el 27 de octubre se presentó la mayor inundación de la región hasta el momento y la catástrofe se acentuó porque Peñitas se vio obligada a incrementar su extracción de 550 m³/s a 2000 m³/s.

La situación del 2007 empeoró cuando el 4 de noviembre ocurrió el deslizamiento de una de las laderas de San Juan de Grijalva, 16 km aguas arriba de la desembocadura de la presa Peñitas y 54 km aguas debajo de la presa Malpaso. El deslizamiento generó un tapón natural de 80 m. de alto, 300 m. de ancho y 800 m. de largo, que cubrían completamente el cauce del río Grijalva con aproximadamente 48 Mm³ de tierra y roca. En la Figura 3.4 se muestra el perfil de los embalses Peñitas y Malpaso, indicando la ubicación del tapón y las características hidráulicas que existieron en los sitios aislados.

El deslizamiento afectó principalmente al poblado de San Juan de Grijalva, cubriendo parte de la población e inundando la parte del poblado restante con una ola de casi 50 m. que se produjo por el derrumbamiento. El 18 de diciembre con sólo 38 días de trabajo, el río Grijalva fue reconectado mediante un canal excavado a cielo abierto. (Figura 3.5).

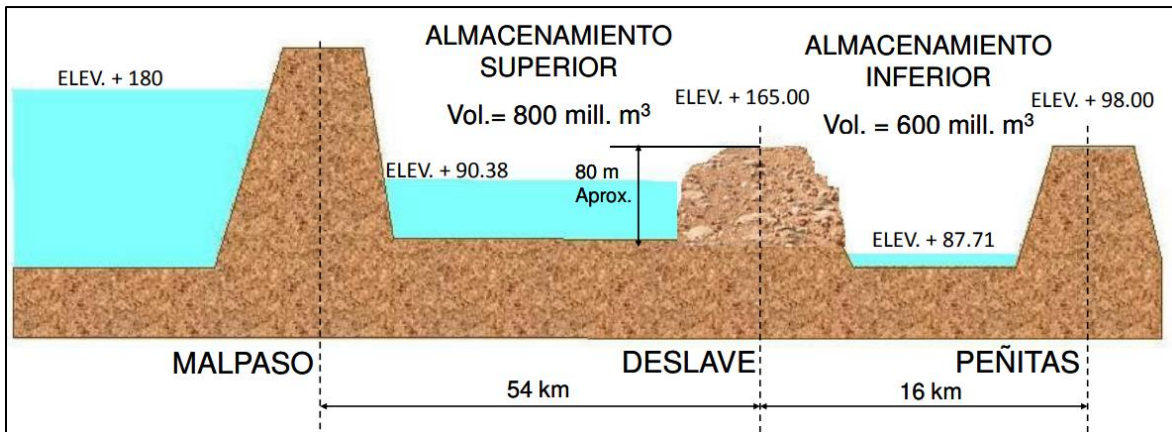


Figura 3.4. Perfil del deslave de la ladera de San Juan de Grijalva
(Dr. Humberto Marengo Mogollón, presentación agosto 2011)



Figura 3.5. Canal excavado a cielo abierto
(Dr. Humberto Marengo Mogollón, presentación agosto 2011)

Los eventos vividos en 2007, obligaron a replantear el esquema de operación de las presas privilegiando la extracción en lugar de la generación como se hacía en años anteriores y dando mayor importancia a la gestión de crecientes.

El último evento extraordinario tuvo cabida en 2010 cuando por efecto de los ciclones tropicales Karl y Mathew, se presentó la mayor creciente registrada, lo que provocó que la presa La Angostura usara sus vertedores por primera vez; los hechos provocaron que la presa Malpaso funcionara en función de las extracciones del embalse Peñitas, aún con ello se registraron daños mayores.

3.3 Descripción de las presas

Las presas La Angostura, Chicoasén, Malpaso y Peñitas forman el sistema hidroeléctrico más importante del país; con su formación en cascada alcanzan una capacidad total de 4800 MW generando hasta 19,344 GWH lo que representa hasta el 44% de la energía total del país.

En la Tabla 3.1, se menciona la capacidad instalada de cada presa así como su aportación eléctrica en términos de porcentaje y de GWH.

Tabla 3.1. Presas del sistema Grijalva con capacidad instalada y generación media anual. INEGI (2014)

Nombre de la Presa	Capacidad Instalada (MW)	Generación media anual (GWH)	Porcentaje de capacidad hidroeléctrica del país (%)
Belisario Domínguez (La Angostura)	900	3,991	9.08%
Manuel Moreno Torres (Chicoasén)	2,400	8,080	18.37%
Nezahualcóyotl (Malpaso)	1,080	5,052	11.50%
Angel Albino Corzo (Peñitas)	420	2,221	5.05%
Total	4,800	19,344	44%

La presa Manuel Moreno Torres (Chicoasén) además de aportar la mayor cantidad de energía eléctrica a la red nacional, se yergue como la más alta del país y la séptima a nivel mundial, con 262 m. de altura.

En el sistema de presas Grijalva también destacan los embalses de Belisario Domínguez y Nezahualcóyotl debido a que ostentan, respectivamente, el primer y segundo lugar en cuanto a la capacidad de almacenamiento de agua a nivel nacional, los cuales llegan a los 19736 Mm³ (algunos prefieren escribir hm³) para La Angostura y a los 14058 Mm³ para la presa Malpaso.

A continuación se describe cada una de las presas que integra el complejo Grijalva; en la Figura 3.6 se esquematiza el arreglo en cascada de las hidroeléctricas, asimismo se muestran las elevaciones al NAMO de cada uno de los embalses.

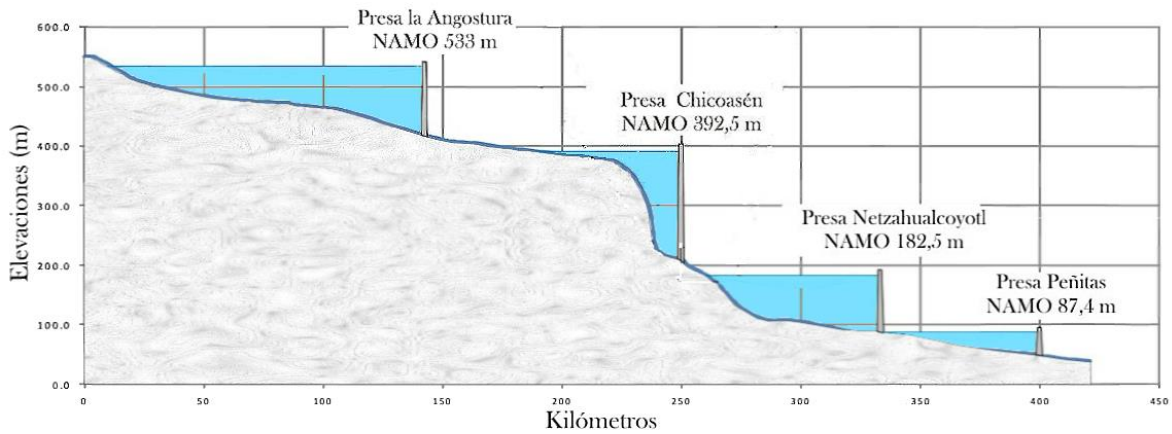


Figura 3.6. Complejo Hidroeléctrico Grijalva (MIA Chicoasén II, 2011)
Datos de capacidad total (DOF)

3.3.1 Presa “La Angostura”

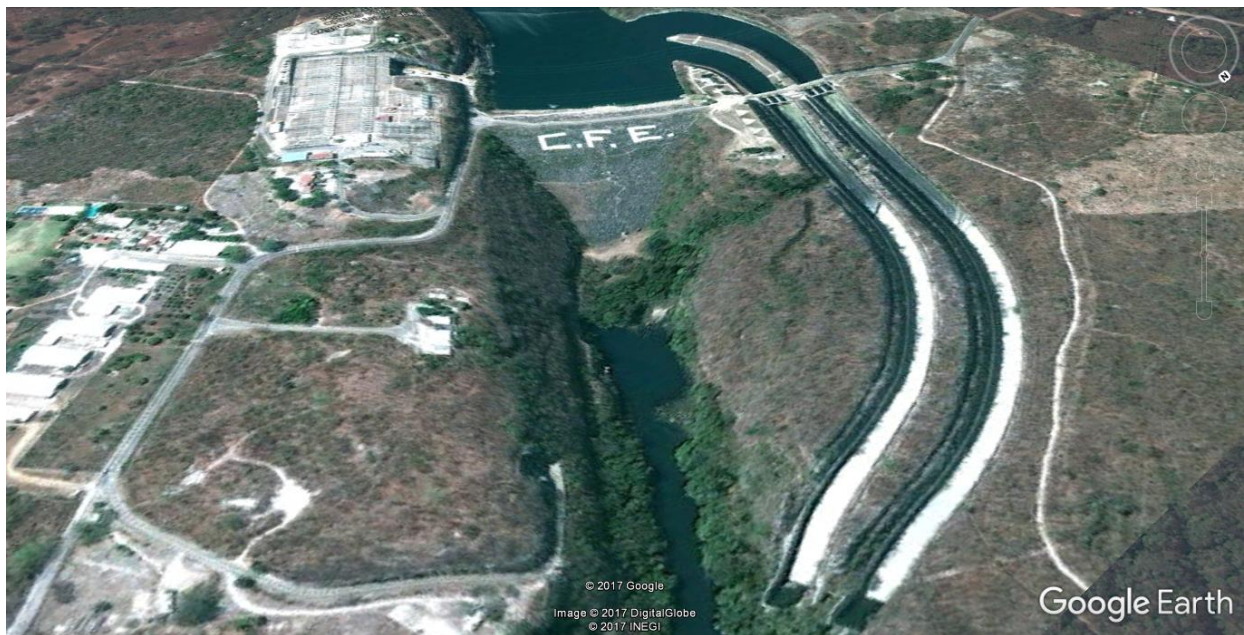


Figura 3.7. Presa Dr. Belisario Domínguez (Google Earth)

La presa Belisario Domínguez, comúnmente llamada “La Angostura” se encuentra en el municipio Venustiano Carranza, exactamente entre los meridianos 91°30’ y 94°30’ latitud Oeste y los paralelos 14°30’ y 19°24’ latitud Norte; su ubicación sobre la depresión central del estado le confiere una capacidad total de almacenamiento de 19,736 millones de metros cúbicos y un área total de 18,099 km².

El aprovechamiento se desplanta sobre los 420 msnm, por lo que es el primer vaso del complejo Grijalva que recibe agua de los afluentes. En la Figura 3.7 se observa una vista en planta de la hidroeléctrica.

La Figura 3.8 muestra un esquema de la planta de la presa, los números dentro de los paréntesis hacen referencia a la misma figura.

La angostura tiene una cortina (4) construida en tierra y enrocamiento con un pequeño núcleo central de arcilla compactada, tiene una altura de 146.7 m y una longitud total de 323.5 m. perpendiculares al eje del río. La corona tiene un ancho de 10 m y una elevación de 543 msnm.

A la izquierda de la corona se encuentra la obra de excedencias (1) compuesto por dos canales revestidos de concreto y con una longitud próxima a los 800 m que terminan en un salto de esquí, cada uno tiene un ancho total de 25 m y 3 compuertas radiales que permiten controlar un gasto total de hasta 6900 m³/s.

En el lado contrario a la cortina, se localiza la obra toma (3) integrado por túneles de concreto que están protegidos con estructuras de rejillas y que dirigen el agua hacia las lumbreras con compuertas rodantes (5), ahí el flujo es controlado para después pasar por túneles de acero de 6.5 m de diámetro, que conducen el gasto a presión hasta la casa de máquinas subterránea (6). La energía generada se regula en la subestación (7).

Debajo de la cortina se ubican las obras de desvío (2): dos túneles revestidos de concreto de 13 m. de diámetro ubicados en ambas márgenes del lecho principal (8).

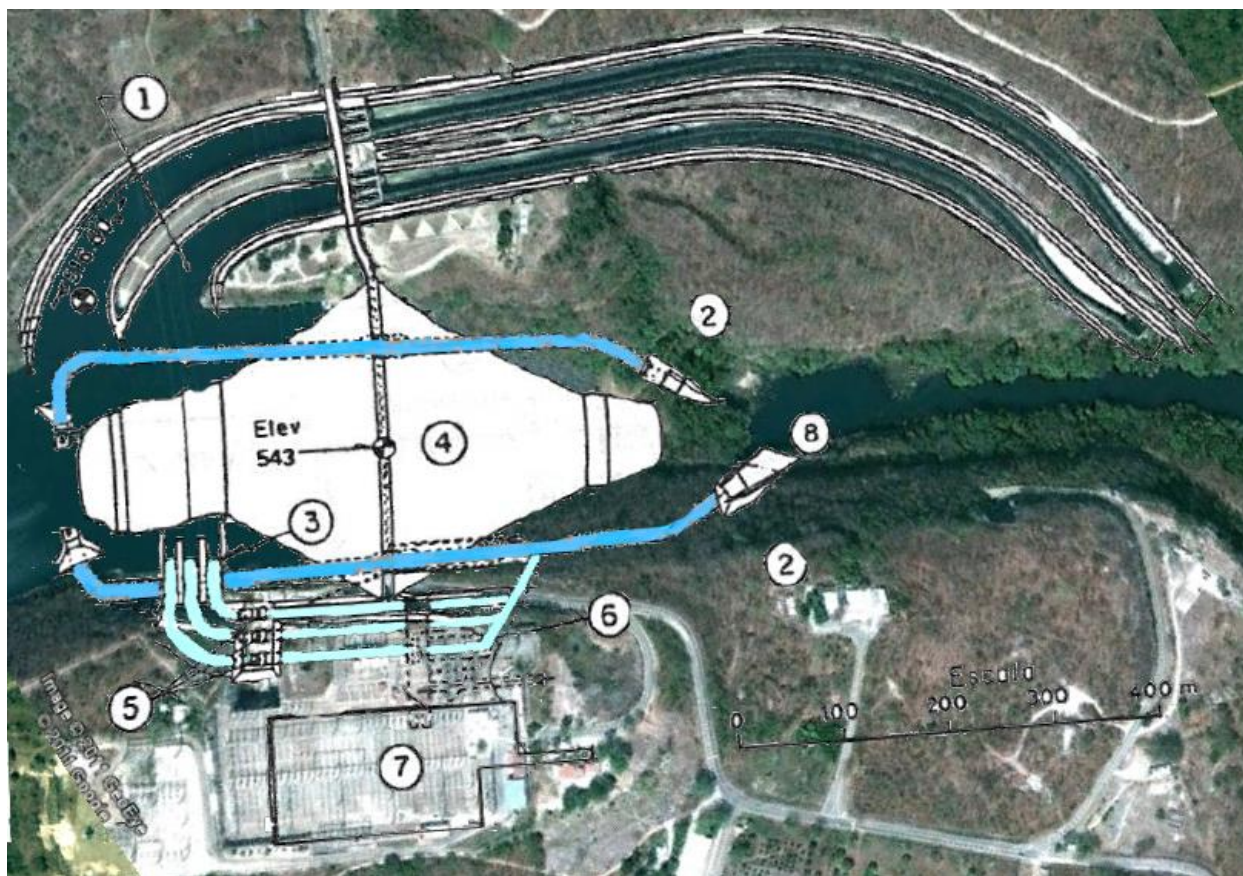


Figura 3.8. Planta esquemática de la presa "La Angostura"
(plano proyectado sobre imagen satelital)

Otras características de la hidroeléctrica Belisario Domínguez se indican en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Niveles de operación y características de generación, Presa Angostura

Niveles de operación y características de la casa de máquinas			
NAME	539.5 msnm	Número de turbinas	5 tipo Francis
NAMO	533 msnm	Capacidad de turbinas	180 MW c/u
NAMINO	500 msnm	Capacidad total	900 MW
		Generación media anual	3667 GWh

La cortina se diseñó para que la casa de máquinas contara con una carga bruta de diseño de 94 m con un máximo volumen mensual turbinable de $3074.76 \times 10^6 \text{ m}^3$.

3.3.2 Presa “Chicoasén”



Figura 3.9. Presa Ing. Manuel Moreno Torres (Google Earth)

La presa Manuel Moreno Torres se localiza en el municipio Chicoasén, de ahí el nombre con el que comúnmente se le conoce (Figura 3.9). Su ubicación corresponde a las proximidades de las coordenadas $16^{\circ}56'$ latitud Norte y $96^{\circ}06'$ longitud Oeste; esa posición preferente con la que goza el embalse en términos hidrológicos y topográficos le confiere la más alta capacidad para generar energía de todo el complejo Grijalva, ello con apenas 1443 millones de m^3 de almacenamiento total.

El embalse se yergue en los 200 msnm, aproximadamente 104 km aguas abajo de la Presa La Angostura convirtiéndose en la segunda cuenca aprovechable sobre el Río Grijalva y abarcando un área total de $7,194 \text{ km}^2$.

La planta de la presa Chicoasén se muestra en la Figura 3.10, los paréntesis que prosiguen hacen referencia a la misma figura.

El embalse cuenta con una cortina (1) en el centro del complejo, construida de tierra y protegida con un enrocamiento compactado, en el interior existe un núcleo de arena arcillosa con alto contenido de grava. La obra se eleva hasta los 402 msnm, alcanzando la máxima altura del país en cuanto a presas de materiales compactados con 262 m en la parte más alta; la cortina tiene un ancho de 15 m y una longitud de 548 m.

Al margen izquierdo de la presa se sitúan 3 vertedores que forman la obra de excedencias (2). Cada vertedor es capaz de desaguar hasta 15,000 m³/s controlables mediante 3 compuertas radiales, los gastos son conducidos a través de túneles excavados de 15 m de diámetro y cerca de 900 m de longitud, que terminan en cubetas de lanzamiento.

En el extremo opuesto de la cortina se ubican 8 estructuras de toma (3), independientes entre sí y protegidos por rejillas de acero que conducen el agua hacia la casa de máquinas (4), allí se encuentran las galerías de transformaciones (5) y de oscilaciones (6); al final los flujos son evacuado por conductos (7) de acero.

En ese mismo lado de la presa se encuentran los túneles de las obras de desvío (8) cuyos diámetros alcanzan los 13 m. Las ataguías utilizadas en la construcción del embalse se fusionaron a la cortina.

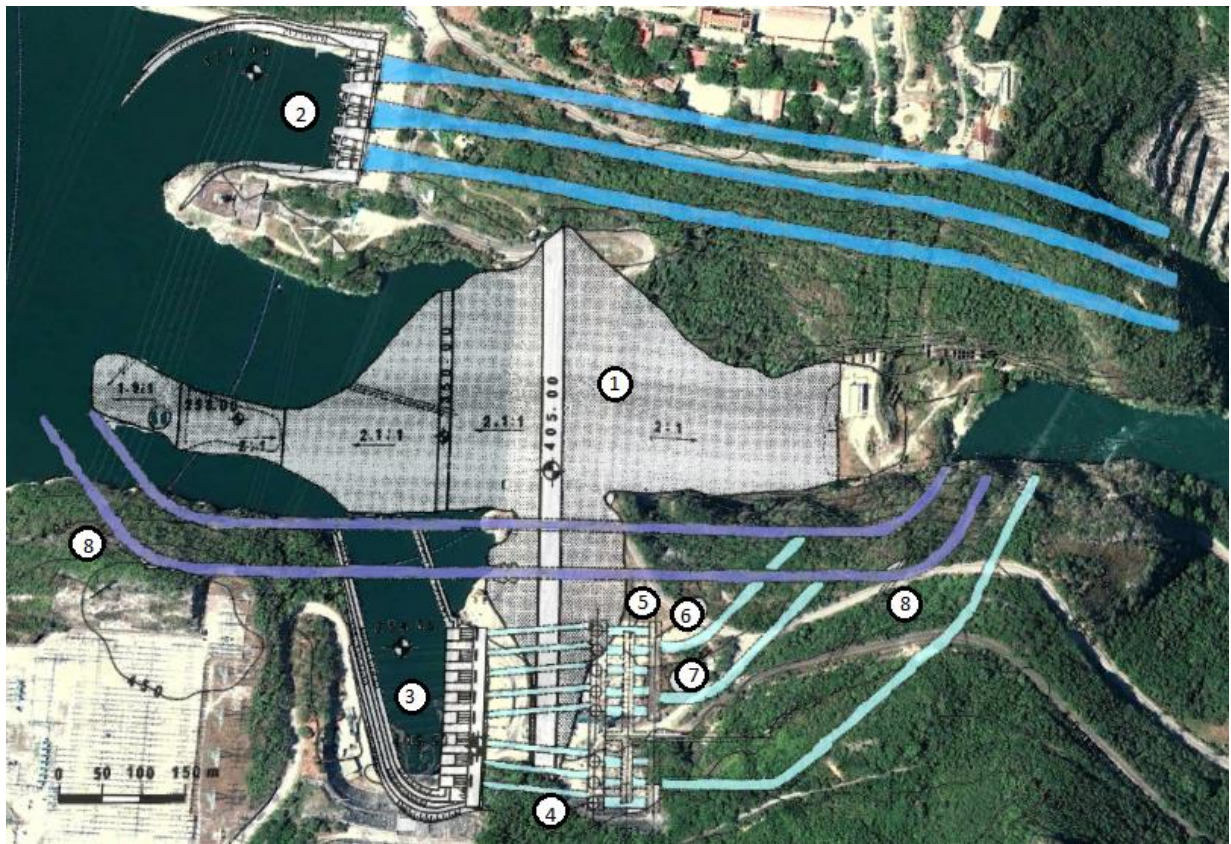


Figura 3.10. Planta esquemática de la presa “Chicoasén” (plano proyectado sobre imagen satelital)

Otras características del complejo hidroeléctrico Manuel Moreno Torres se proporciona en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Niveles de operación y características de generación, Presa Chicoasén

Niveles de operación y características de la casa de máquinas			
NAME	395msnm	Número de turbinas	8 tipo Francis
NAMO	388 msnm	Capacidad de turbinas	300 MW c/u
NAMINO	380 msnm	Capacidad total	2400 MW
		Generación media anual	7653 GWh

La casa de máquinas está dividida en 2 secciones, la primera cuenta con un grupo de 5 turbinas y la segunda con un grupo de solo 3; el primer conjunto deriva los gastos aprovechados hacia los túneles de la obra de desvío, mientras que el segundo conjunto lo hace directamente al cauce del río Grijalva.

3.3.3 Presa “Malpaso”



Figura 3.11. Presa Nezahualcóyotl (Google Earth)

La presa Nezahualcóyotl se construyó sobre los raudales de Malpaso razón por la cual los lugareños del lugar la apodaron con ese nombre. Es el tercer aprovechamiento sobre el Río Grijalva ya que se encuentra a 81 km de la Presa Chicoasén en las coordenadas 17°11´ latitud Norte y 93°36´ longitud Oeste.

En la Figura 3.11 se muestra el aprovechamiento Malpaso, la cual se desplanta cerca de los 60 msnm, logrando una capacidad total de almacenamiento de 14,058 millones de m³, capacidad solo superada por la presa La Angostura a nivel nacional.

Por otro lado la cuenca tiene un área total de 9,403 km².

El primer aprovechamiento en construirse sobre el Río Grijalva fue la presa Malpaso, en la Figura 3.12 se muestra una vista en planta cuya descripción versa en los siguientes paréntesis. El embalse cuenta con una altura máxima de 138 metros; su cortina (1) está hecha de tierra compactada, enrocamiento nativo y un núcleo central de arcilla impermeable. La corona se eleva hasta los 192 msnm, tiene un ancho de 10 m y una longitud de 478 m perpendiculares al cauce del Río.

La obra de excedencias (2) se halla en el margen izquierdo de la presa, está conformado por un canal abierto diseñado para regular un gasto de 3500 m³/s, por medio de 3 compuertas radiales de 15 m de ancho cada uno; a un costado se encuentra el canal de emergencias (3), usado para incrementar la capacidad máxima hasta los 10,650 m³/s controlables por medio de 4 compuertas radiales. Ambos canales terminan en un salto de esquí.

La obra toma (4) se ubica en el lado derecho de la cortina, está formada por seis túneles de 7 m de diámetro, cada una es independiente, tiene rejillas de protección y compuertas que regulan el flujo que llega hacia la casa de máquinas (5). Los gastos finales son conducidos por tuberías de acero (6) que desembocan en 3 de los 5 túneles de la obra de desvió (7) existentes, cada uno con 14 m de diámetro.

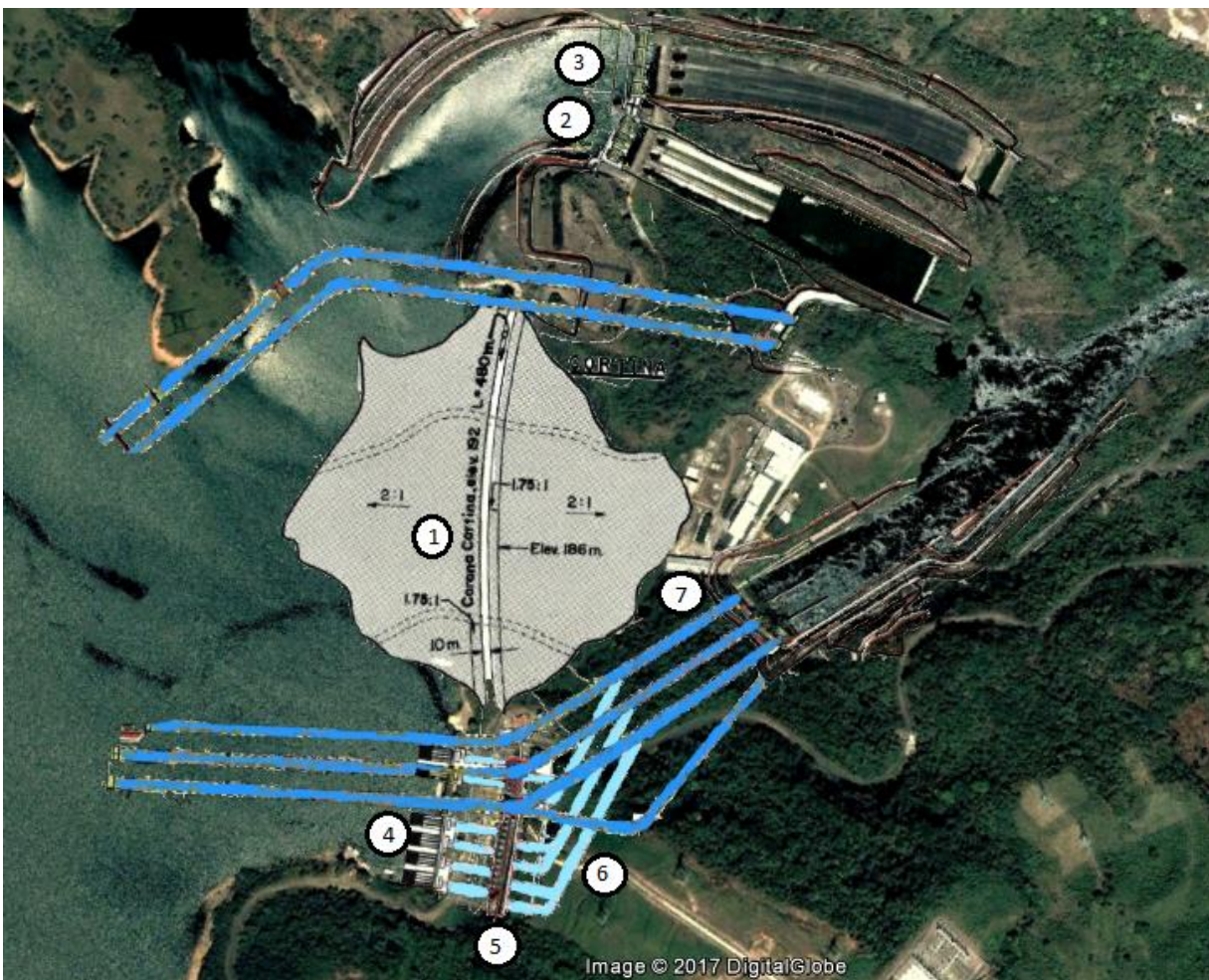


Figura 3.12. Planta esquemática de la presa “Malpaso” (plano proyectado sobre imagen satelital)

Otras características del complejo hidroeléctrico Nezahualcóyotl se describen en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Niveles de operación y características de generación, Presa Malpaso

Niveles de operación y características de la casa de máquinas			
NAME	188 msnm	Número de turbinas	6 tipo Francis
NAMO	182.5 msnm	Capacidad de turbinas	180 MW c/u
NAMINO	144 msnm	Capacidad total	1080 MW
		Generación media anual	4929 GWh

La casa de máquinas es subterránea y se construyó en 2 etapas, en la primera se instalaron 4 turbinas y en la segunda se implementaron 2 más, permitiendo turbinar un volumen mensual de 3732.5 millones de m³.

3.3.4 Presa “Peñitas”



Figura 3.13. Presa Peñitas (Google Earth)

La presa General Angel Albino Corzo, llamada coloquialmente como “Peñitas” fue la última en ser construida sobre el Río Grijalva. Se ubica en el municipio de Ostuacán, en los límites de Chiapas frontera con Tabasco, exactamente en las inmediaciones de las coordenadas 17°26’ latitud Norte y 93°27’ latitud Oeste (Figura 3.13).

El embalse tiene una capacidad máxima de almacenamiento de 1,485 millones de metros cúbicos y se encuentra a 72 km aguas abajo de la Presa Malpaso, abarcado una cuenca cuya área total es de 1,402 km².

Peñitas es la última obra del complejo Grijalva en recibir aportaciones, en la Figura 3.14 se muestra un esquema de la planta de la presa, los números dentro de los paréntesis hacen referencia a la misma figura.

La cortina de la Presa Peñitas (1) fue construida con materiales compactables aprovechando una formación geológica que dividía al río en dos, cuenta con un núcleo de arcilla y un enrocamiento como escudo. La obra tiene una longitud de 560 metros medidos en la corona, misma que tiene un ancho de solo 8 m y una elevación de 98 msnm en el punto más alto, alcanzando una altura máxima de 53 m.

A la derecha de la cortina se encuentra la obra de excedencias (2), conformada por un vertedor revestido de concreto cuya longitud llega a los 116 m, a su lado existe un segundo canal que es idéntico en diseño y que funge como canal de emergencias (3), trabajando simultáneamente pueden desalojar un gasto de diseño de hasta 18,700 m³/s. El las dos obras el gasto se controla con 4 compuertas radiales de 14.5 m de ancho.

En el margen izquierdo se localiza un canal con 4 tomas independientes protegidas mediante rejillas semicirculares que funciona como obra toma (4); desde ahí el gasto pasa a presión por 8 conductos de acero hacia la casa de máquinas (5). La energía generada se regula en la subestación (6), mientras que el gasto aprovechado regresa al canal de la obra toma.



Figura 3.14. Planta esquemática de la presa “Peñitas” (plano proyectado sobre imagen satelital)

Otras características del complejo hidroeléctrico General Angel Albino Corzo aparecen en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Niveles de operación y características de generación, Presa Peñitas

Niveles de operación y características de la casa de máquinas			
NAME	93.5 msnm	Número de turbinas	4 tipo Kaplan
NAMO	87.4 msnm	Capacidad de turbinas	105 MW c/u
NAMINO	85.0 msnm	Capacidad total	420 MW
		Generación media anual	2137 GWh

La casa de máquinas es la única de tipo exterior del complejo Grijalva y tiene la capacidad de turbinar un volumen mensual promedio de 3860 millones de m³.

3.4 Referencias

- *Acuerdo por el que se da a conocer que ha quedado debidamente extinguida y liquidada la Comisión del Grijalva.*
http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4711717&fecha=24/12/1987
- *Acuerdo por el que se da a conocer los estudios técnicos de aguas nacionales superficiales de las subregiones hidrológicas alto Grijalva, medio Grijalva y bajo Grijalva de la región hidrológica No. 30 Grijalva-Usumacinta, 2009 “Diario Oficial Federal”*
http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5141106&fecha=29/04/2010
- *Acuerdo que crea la comisión del río Grijalva, dependiente de la Secretaría de Recursos Hidráulicos.*
http://www.dof.gob.mx/nota_to_imagen_fs.php?cod_diario=191016&pagina=5&seccion=1 revisado el 14 de julio de 2017
- *Alegría Díaz, Arallely. 2010 Política de operación optima del sistema de presas del río Grijalva. Efectos de la curva guía (Tesis de Licenciatura)*
- *Chiapas, U.d. (2011). Manifiesto de Impacto Ambiental Chicoasén II. Tuxtla Gutiérrez, Chipas.*
- *“Comportamiento de Presas construidas en México (1974-1984)” México D.F., Comisión Federal de Electricidad 1985*

- Domínguez Mora, Ramón. de Luna Cruz, Faustino, et al. *Análisis de las inundaciones en la planicie tabasqueña en el periodo 1995 -2010*, Tecnología y ciencias del agua, vol. V, núm. 3, mayo-junio de 2014, pp. 5-32
- Hinojosa Corona, Alejandro., Rodríguez Moreno, Víctor Manuel., “El deslizamiento de ladera de noviembre 2007 y generación de una presa natural en el río Grijalva, Chiapas, México.” Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Vol. 63, núm. 1. Pp. 15 38
- <https://www.gob.mx/mexico-con-agua/articulos/agua-de-calidad-para-todos> revisado el 14 de julio de 2017
- http://www.antroglob.org/obara/apuntes/AHA_Presas.html#mozToclD809385 revisado el 14 de julio de 2017
- López Gonzales, Luis; 1970 “*Planeación para el desarrollo integral de la cuenca del río Grijalva*” (Tesis de Licenciatura, UNAM”
- Marengo Mogollón, Humberto agosto 2011, *Deslizamiento de Tierra y Roca que Obstruyó el Río Grijalva y su solución con túneles* (Presentación)
https://www.imta.gob.mx/potamologia/images/stories/ponencias_tercer_seminario/seminario/humberto_marengo/riesgos_caido.pdf
- Plan estatal de Desarrollo, Chiapas 2013-2018.
- *Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía en el consejo de la cuenca de los ríos Grijalva y Usumacinta*, 2004, Comisión Nacional del Agua.
- Ramírez Salazar, Luis Eusebio. 2011 *Actualización de las avenidas de diseño de las presas del Río Grijalva* (Tesis)
- Rubio, G.H., Triana, R. C., 2006 *Gestión Integrada de crecientes caso de estudio México: Río Grijalva* [abstract] Programa Asociado de Gestión de Crecientes.

Capítulo 4. Metodología

4.1 Métodos de optimización

Los problemas de optimización, de manera general, buscan maximizar o minimizar los valores resultantes de funciones reales que retratan ciertos sistemas o procesos, para conseguirlo se han creado y aplicado diferentes métodos y técnicas, que aportan rapidez y eficacia.

Los primeros avances en optimización son tratados en el cálculo diferencial e integral, cuyos campos fueron estudiados por numerosos matemáticos a lo largo de la historia, sin embargo fue George. B. Dantzig, el precursor directo de la optimización de funciones lineales aplicando para tal efecto la programación lineal.

Más tarde, el matemático Richard Bellman y G. B. Dantzig, desarrollarían la programación dinámica, conocida en aquel entonces como programación lineal estocástica. Bellman publicaría sus resultados en el primer libro sobre el tema: el “Dynamic Programming” en 1957.

“La programación dinámica está asociada a situaciones de evolución de un sistema a lo largo de varias etapas, de ahí el nombre de dinámica” (Arallely, 2010, p. 31), así pues el método resuelve una serie de problemas sucesivos cuyos resultados afectan secuencias futuras.

De acuerdo a la forma en la que el sistema evoluciona a lo largo del tiempo se pueden establecer 2 grandes vertientes de la programación dinámica:

- La programación dinámica determinística, que se aplica a procesos cuyos cambios a través del tiempo se conocen con certeza.
- La programación dinámica estocástica, aplicable a sistemas que evolucionan de acuerdo a leyes de probabilidad conocidas.

Con el desarrollo de nuevas tecnologías, la programación dinámica ha logrado actualizarse y vencer las barreras del tiempo, estableciéndose como uno de los métodos de optimización más efectivos.

Actualmente existen métodos más recientes que permiten encontrar valores óptimos de problemas que no habían podido ser resueltos con las técnicas tradicionales, ejemplos de estos métodos son:

- La optimización global
- Los algoritmos genéticos
- Redes neuronales

4.1.1 Programación dinámica (estocástica).

La teoría sobre la cual se basa la programación dinámica se conoce como principio de optimalidad, el cual establece que en un sistema completamente óptimo cada una de sus partes también es óptima, en palabras de Bellman:

“En una secuencia de decisiones óptima, toda subsecuencia ha de ser también óptima”

La programación dinámica resuelve problemas a lo largo del tiempo, separándolos en etapas; en cada etapa se toma una decisión que permite avanzar y trazar una trayectoria óptima desde un origen hasta un destino. La Figura 4.1, muestra el proceso de la programación dinámica: es decir el paso de un estado (X_n) en la etapa “n” a otro estado (X_{n+1}) en la siguiente etapa “n+1”, después de tomar la decisión D_n .

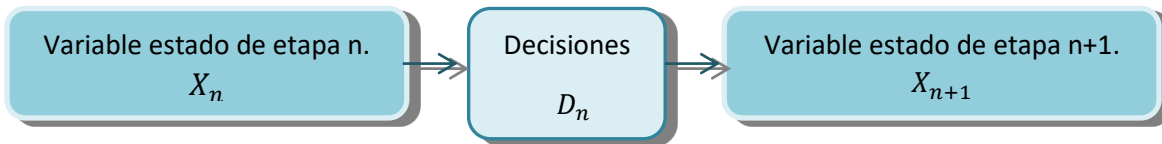


Figura 4.1. Proceso de la programación dinámica

Donde:

D_n = la decisión tomada en la etapa n y que define la etapa n+1;

X_n, X_{n+1} = son los estados en las etapas n y n+1, respectivamente.

En el caso de modelos determinísticos se conoce perfectamente cuál será el resultado de tomar una decisión con la información proporcionada sin embargo en los modelos estocásticos se tienen variables aleatorias por lo que no existe una certeza del resultado. En la Figura 4.2, se observan las diferencias entre un modelo determinístico y un modelo estocástico.

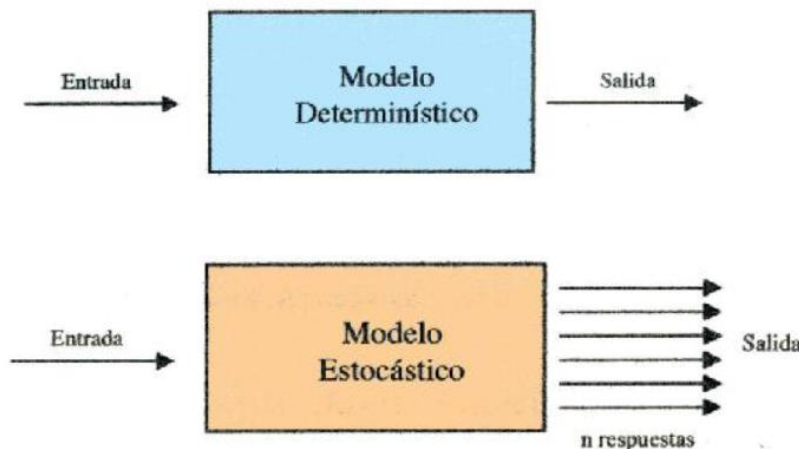


Figura 4.2. Etapa de un modelo determinístico y un estocástico (Francisco Peña, 2010)

En los modelos estocásticos se involucran funciones de probabilidad para representar aquellos valores aleatorios que no se conocen, por lo que el estado final al que se llega después de tomar una decisión solo se pueden expresar en términos de un beneficio esperado. Por este motivo el proceso de cálculo se realiza hacia atrás en el tiempo.

La primera suposición que se hace en los modelos estocásticos es que en el largo plazo, el beneficio esperado final en todos los estados posibles es cero. La Figura 4.3 representa el sentido de cálculo de los modelos estocásticos.

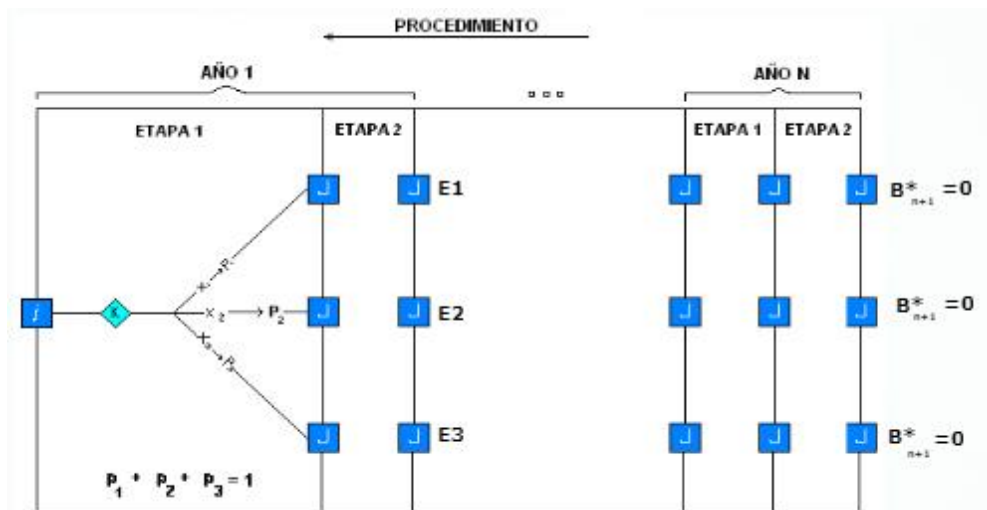


Figura 4.3. Programación dinámica estocástica.
(Notas Dr. Ramón Domínguez, Edición propia)

Donde:

E_1, E_2, E_3 = los posibles estados que existen en cada etapa;

P_1, P_2, P_3 = las probabilidades de ocurrencia de cada estado final, dado el estado inicial y la decisión "k";

B^*_{n+1} = Beneficio esperado en cada estado final.

4.2 Programación dinámica estocástica aplicada a la operación de un embalse

La programación dinámica estocástica aplicada a la operación de presas, permite conocer el funcionamiento óptimo de los embalses, esto implica saber el volumen de agua que debe extraerse para maximizar los beneficios sin que se produzca ningún derrame o déficit de agua durante alguna etapa.

La simulación del vaso implica forzosamente aplicar la ecuación de continuidad (Ecuación e1), dado que esta última rige el funcionamiento de las presas

$$S_j = S_i + VI_j - VS_j \quad (e1)$$

Las variables presentes en la ecuación de continuidad se explican en la Tabla 4.1 así como su participación dentro de la programación dinámica.

Tabla 4.1. variables presentes en la ecuación de continuidad

Variable	Representación física (L ³)	En la Programación Dinámica
S _i	Almacenamiento inicial	Estado al inicio de la etapa
S _j	Almacenamiento final	Estado al final de la etapa
VI _j	Volumen de ingreso que depende de la época del año	Variable aleatoria, representada por una función probabilística
VS _j	Volumen de egreso	Variable de control, define la condición inicial.

Al aplicar la programación dinámica a la simulación del vaso, se divide el volumen útil de la presa en N intervalos ΔV , con lo que las variables que participan en la ecuación de continuidad pueden expresarse de forma discreta en términos de ΔV , esto hace posible que la relación resultante se pueda expresar como:

$$j = i + x - k \quad (e2)$$

Donde:

i = volumen almacenado al inicio de la etapa;

j = volumen almacenado al final de la etapa;

x = volumen ingresado durante la etapa;

k = volumen extraído durante la etapa.

Todas las variables son enteros expresados por unidad de volumen ΔV .

La ecuación de continuidad en su forma discreta se ejemplifica en la Figura 4.4, donde el estado “i” pasa al estado “j” después de haber recibido el ingreso de volumen “x” y haber sufrido la extracción del volumen “k”.

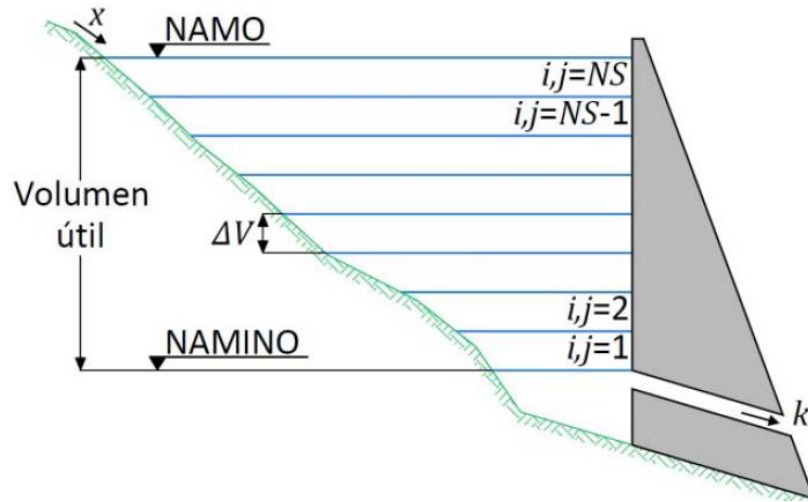


Figura 4.4. Discretización de la capacidad útil del vaso (Hincapié 2016)

Debido a que no se conocen los estados finales “j” por qué los ingresos “x” están dados por una función de probabilidad en base a la época del año, el beneficio de una hidroeléctrica se determina de manera inversa; esto es: desde la etapa N hacia la etapa 1. (Figura 4.5).

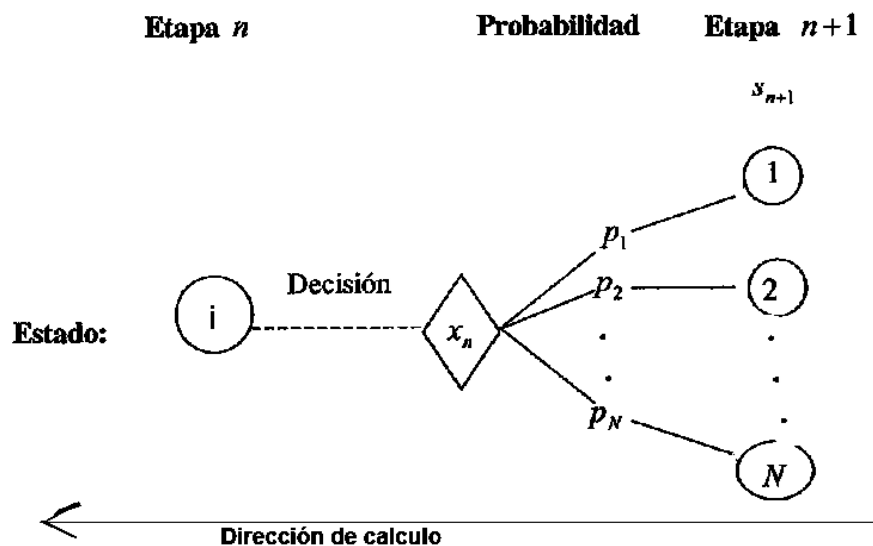


Figura 4.5. Dirección de la programación dinámica estocástica (Contreras, 1999, edición propia)

“Al tratarse de una presa hidroeléctrica, el objetivo principal es la generación de energía; sin embargo cada vez que se presenta un derrame o un déficit se aplican castigos”. (Alegría, 2010, p. 45); si se considera que los volúmenes de ingreso son valores probabilísticos, los estados de derrame o déficit se convierten en el resultado de un mal manejo de los volúmenes extraídos, a continuación se explican los 2 estados. La Figura 4.6, muestra las condiciones que se quieren evitar.

- Derrame: cuando la extracción es poca pero los ingresos de volúmenes son mayores a los estimados, entonces el nivel de agua puede sobrepasar el NAMO (Nivel de Aguas Máximas Ordinarias).
- Déficit: cuando la extracción es demasiada pero los ingresos de volúmenes son menores a los estimados, entonces el nivel de agua puede ser menor que el NAMINO (Nivel de Aguas Mínimo de Operación).

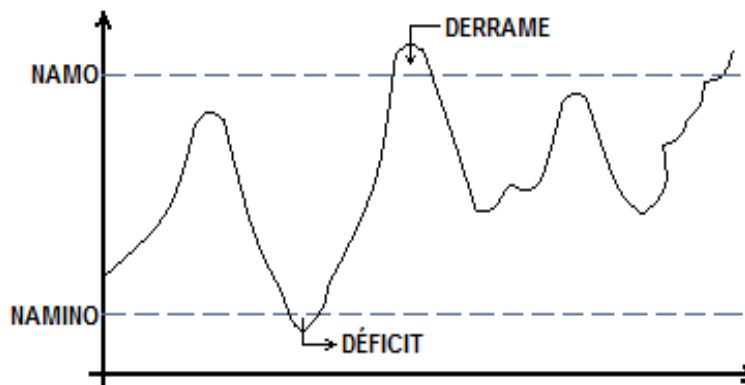


Figura 4.6. Condiciones por evitar en una presa (Alegría, 2010)

Finalmente función objetivo a maximizar considerando la energía generada, y las penalizaciones por derrame o déficit, se reduce a la ecuación e3, que permite comparar los resultados de diferentes políticas.

$$b_k = \sum_{i=1}^n EG(i,j) - \sum Cder(derrame) - \sum Cdef(deficit) - Ccguia \quad (e3)$$

Donde:

b_k = Beneficio esperado dada la política de extracción “k”;

$EG(i,j)$ = Energía generada al pasar de un estado “i” a un estado “j”;

$\sum Cder(derrame)$ = Producto del derrame por su coeficiente de penalización;

$\sum Cdef(deficit)$ = Producto del déficit por su coeficiente de penalización;

$Ccguia$ = Coeficiente de penalización por rebase de curva guía.

Para obtener el beneficio total de la presa, se utiliza la ecuación recursiva e4 que calcula el beneficio asociado a una política de extracción “k” multiplicado por la probabilidad de ocurrencia del ingreso “x”, en cada estado y hasta el estado N.

Al realizar los cálculos de manera regresiva se logran optimizar todos beneficios.

$$B_n^k(i) = \sum P_n^k(i, j) [b_n^k(i, j) + B_{n+1}^*(j)] \quad (e4)$$

Donde:

$B_n^k(i)$ = Beneficio total, en función de la extracción “k” y del estado inicial “i”;

$P_n^k(i, j)$ = Probabilidades de tener un ingreso “x”, tal que con la extracción “k” se pase del estado “i” al estado “j”; tomando en cuenta la ecuación de continuidad:
 $x = j - i + k$;

$b_n^k(i, j)$ = Beneficio que se obtiene en la etapa n, al pasar de un estado “i” al “j”;

$B_{n+1}^*(j)$ = Beneficio esperado optimo hasta la etapa n+1, en función del estado “j”.

Para facilitar el cálculo y evitar operaciones innecesarias con el método de la programación dinámica estocástica, se divide la ecuación del cálculo de beneficio total en dos partes:

1. La primera parte calcula el beneficio de cada etapa en función al ingreso “x”, cuyas probabilidades de ocurrencia se repiten año con año por lo que el cálculo se realiza solo para las “m” etapas en las que se divide un año.

$$\phi_n^k(i) = \sum P_n^k(i, j) b_n^k(i, j) \quad (e5)$$

Donde:

$\phi_n^k(i)$ = Beneficio esperado inmediato en la etapa n, dada la política de extracción “k” y la condición inicial “i”

2. La segunda parte calcula el beneficio acumulado en función de “k”. El procedimiento inicia en el último estado (N) y avanza de manera regresiva hacia el estado N-1; el cálculo se hace de manera recursiva y durante todos los años hasta que los beneficios asociados a “i” se repitan anualmente, de esta manera se puede seleccionar la extracción óptima $k^*(i)$.

$$B_n^k(i) = \phi_n^k(i) + \sum P_n^k(i, j) B_{n+1}^k(j) \quad (e6)$$

4.2.1 Programación dinámica estocástica aplicada a un conjunto de 2 presas.

Al aplicar la programación dinámica a un conjunto de dos presas cuyo beneficio depende de la generación de electricidad, se modifica la función objetivo que se pretende maximizar, considerando la cantidad de energía generada por ambos embalses, así como sus respectivas penalizaciones por derrame o déficit. La ecuación resultante (e7), permite comparar el conjunto de políticas de extracción que se aplica a los dos embalses.

$$FO = \sum EG1(i, j) + \sum EG2(i, j) - \sum C_1 der(derrame_1) - \sum C_2 der(derrame_2) - \sum C_1 def(deficit_1) - \sum C_2 def(deficit_2) - C_1 cguia - C_2 cguia \quad (e7)$$

Donde:

FO = Función Objetivo que se pretende maximizar, permite comparar políticas;

$EG1(i, j)$ = Energía generada por la presa 1 (GWh) al pasar de un estado "i" a un estado "j";

$EG2(i, j)$ = Energía generada por la presa 2 (GWh) al pasar de un estado "i" a un estado "j";

$\sum C_1 der(derrame_1)$ = Producto del derrame de la presa 1 por el coeficiente de penalización para dicha presa;

$\sum C_2 der(derrame_2)$ = Producto del derrame de la presa 2 por el coeficiente de penalización para dicha presa;

$\sum C_1 def(deficit_1)$ = Producto del déficit de la presa 1 por el coeficiente de penalización para esa presa;

$\sum C_2 def(deficit_2)$ = Producto del déficit de la presa 2 por el coeficiente de penalización para esa presa;

$C_1 cguia$ = Coeficiente de penalización por rebase de curva guía para la presa 1;

$C_2 cguia$ = Coeficiente de penalización por rebase de curva guía para la presa 2.

Para obtener el beneficio total de la presa por la generación de energía se utiliza la ecuación recursiva (e8), que calcula el beneficio de los embalses asociado a un par de políticas de extracción "k₁, k₂", multiplicado por la probabilidad de ocurrencia de los ingresos "x₁, x₂", en cada estado y hasta el estado N.

$$B_n^{k_1 k_2}(i_1, i_2) = \sum P_n^{k_1}(i_1, j_1) \sum P_n^{k_2}(i_2, j_2) [\{b_n^{k_1}(i_1, j_1) + b_n^{k_1, k_2}(i_1, j_1, i_2, j_2)\} + B_{n+1}^*(j_1, j_2)] \quad (e8)$$

Donde:

$B_n^{k_1 k_2}(i_1, i_2)$ = Beneficio total, en función de las extracciones “ k_1 , k_2 ” y de los estados iniciales “ i_1 , i_2 ”;

$P_n^{k_1}(i_1, j_1)$ = Probabilidades de tener un ingreso “ x_1 ”, tal que con la extracción “ k_1 ” se pase del estado “ i_1 ” al estado “ j_1 ”; tomando en cuenta la ecuación de continuidad: $x = j - i + k$;

$P_n^{k_2}(i_2, j_2)$ = Probabilidades de tener un ingreso “ x_2 ”, tal que con la extracción “ k_2 ” se pase del estado “ i_2 ” al estado “ j_2 ”; la ecuación de continuidad que debe cumplirse se explica más adelante;

$b_n^{k_1}(i_1, j_1)$ = Beneficio que se obtiene de la presa 1 en la etapa n , al pasar de un estado “ i_1 ” a un estado “ j_1 ” utilizando la política de extracción “ k_1 ”;

$b_n^{k_1, k_2}(i_1, j_1, i_2, j_2)$ = Beneficio que se obtiene de la presa 2 en la etapa n , al pasar de los estados “ i_1 , i_2 ” a “ j_1 , j_2 ” aplicando las políticas “ k_1 , k_2 ”;

$B_{n+1}^*(j_1, j_2)$ = Beneficio esperado optimo hasta la etapa $n+1$, en función de los estados finales: “ j_1 , j_2 ”.

La ecuación recursiva (e8) debe satisfacer la de continuidad para cada embalse, las cuales considerando el apartado 4.1.1 son:

- Para la presa 1:

$$j_1 = i_1 + x_1 - k_1 \quad (\text{Ver: e2})$$

- Para la presa 2:

$$j_2 = i_2 + x_2 - k_2 \quad (\text{Ver: e2})$$

Donde:

- Si se presenta un derrame en la presa 1:

$$x_2 = x_2^* + (k_1 + \text{derrame}_1)$$

- Si se presenta un déficit en la presa 1:

$$x_2 = x_2^* + (k_1 + \text{deficit}_1)$$

- Si no se presenta derrame o déficit en la presa 1:

$$x_2 = x_2^* + k_1$$

Siendo:

x_2^* = el ingreso por cuenca propia a la presa 2.

Para facilitar el cálculo y evitar operaciones innecesarias con el método de la programación dinámica estocástica, se divide la ecuación del cálculo de beneficio total en dos partes:

1. La primera parte calcula el beneficio de cada etapa en función a los ingresos “ x_1, x_2 ”, cuyas probabilidades de ocurrencia se repiten año con año por lo que el cálculo se realiza solo para las “ m ” etapas en las que se divide un año.

$$\phi_n^{k_1 k_2}(i_1, i_2) = \sum P_n^{k_1}(i_1, j_1) b_n^{k_1}(i_1, j_1) + \sum P_n^{k_2}(i_2, j_2) b_n^{k_1, k_2}(i_1, j_1, i_2, j_2)$$

(e9)

Donde:

$\phi_n^{k_1 k_2}(i_1, i_2)$ = Beneficio esperado inmediato en la etapa n , dada las políticas de extracción “ k_1, k_2 ” y las condiciones iniciales en los embalses “ i_1, i_2 ”

2. La segunda parte calcula el beneficio acumulado en función de “ k_1, k_2 ”. El procedimiento inicia en el último estado (N) y avanza de manera regresiva hacia el estado $N-1$; el cálculo se hace de manera recursiva y durante todos los años hasta que los beneficios asociados a “ i_1, i_2 ” se repitan anualmente, de esta manera se puede seleccionar la extracción óptima $k^*(i_1, i_2)$.

$$B_n^{k_1 k_2}(i_1, i_2) = \phi_n^{k_1 k_2}(i_1, i_2) + \sum P_n^{k_1}(i_1, j_1) \sum P_n^{k_2}(i_2, j_2) B_{n+1}^*(j_1, j_2)$$

(e10)

4.3 Simulación del funcionamiento de un vaso

“La ecuación fundamental para la simulación de vasos es la de continuidad, que expresada en un intervalo de tiempo Δt dado es:” (Aparicio, 1992, p. 79)

$$\Delta V = x - k \quad (\text{e11})$$

Donde:

x = volumen ingresado a la presa en el intervalo de tiempo Δt ;

k = volumen extraído de la presa en el intervalo de tiempo Δt ;

ΔV = cambio de volumen almacenado durante un intervalo de tiempo.

El volumen que ingresa a un vaso tiene distintos orígenes; puede provenir de los escurrimientos por cuenca propia (Figura 4.1), de posibles transferencias desde otras cuencas o bien de precipitaciones sobre la cuenca.

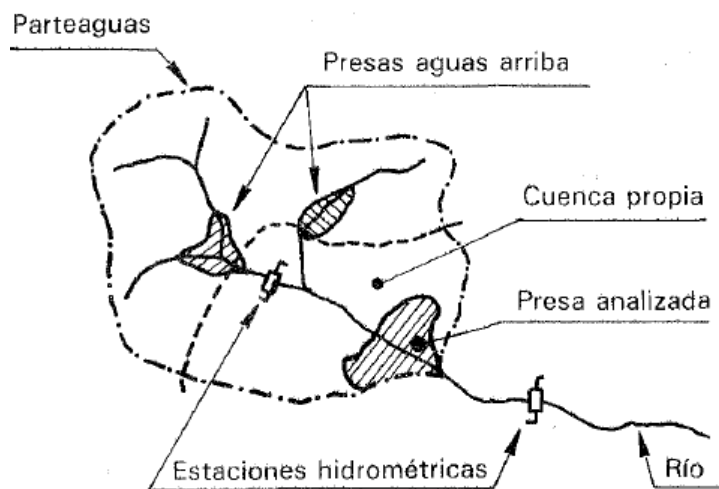


Figura 4.7 Entradas por cuenca propia (Aparicio, 1992)

Las entradas a un vaso se pueden expresar con la ecuación:

$$x = E_{cp} + E_t + E_{ll} \quad (\text{e12})$$

Donde:

E_{cp} = entradas por cuenca propia;

E_t = entradas por transferencia de otras cuencas;

E_{ll} = entradas por lluvia sobre la cuenca.

Para determinar los ingresos a la cuenca, se utilizan diferentes métodos según el tipo de entrada que se considere; en el caso de los escurrimientos por cuenca propia, los datos provienen de las estaciones hidrométricas en la zona de estudio, ocurre lo mismo para los volúmenes transferidos desde otras cuencas; mientras que para conocer los valores de la lluvia se utilizan pluviómetros.

Los volúmenes que salen de un vaso se pueden dividir a su vez en: volúmenes extraídos por la operación normal del embalse, volúmenes evaporados, los infiltrados en el vaso y los derramados por vertedor. La ecuación e8 retrata las salidas del vaso.

$$k = S_n + S_{ev} + S_i + S_{de} \quad (e13)$$

Donde:

S_n = salidas por operación normal;

S_{ev} = salidas por evaporación;

S_i = salidas por infiltración;

S_{de} = salidas por derrames.

Los volúmenes que se extraen por la operación normal del embalse dependen del tipo de aprovechamiento de que se trate, ya sea riego, agua potable, generación eléctrica, etc. y la cantidad que se extraiga obedece a la política de operación que se utilice, cosa similar pasa con los volúmenes derramados por vertedor; mientras que los volúmenes infiltrados generalmente se consideran despreciables ya que medir los valores es una tarea que depende de estudios geológicos detallados, por otra parte los volúmenes evaporados se conocen a través de evaporímetros.

Al sustituir las funciones que participan en el funcionamiento de un embalse en la ecuación original e1, se obtiene:

$$j = i + (E_{cp} + E_t + E_{ll}) - (S_n + S_{ev} + S_{de}) \quad (e14)$$

Donde:

j = estado final de la presa, tal que: $\Delta V = j - i$;

i = estado inicial de la presa.

4.3.1 Simulación del funcionamiento del conjunto Grijalva

La simulación del conjunto Grijalva compuesto por 4 presas en serie: La Angostura, Chicoasén, Malpaso y Peñitas, requiere de una serie de consideraciones que es importante tomar en cuenta.

El primer embalse sobre el cauce del río Grijalva es la presa La Angostura, misma que se puede simular como un embalse aislado, cuya única entrada de volumen es la que se da por cuenca propia; mientras que para las salidas se consideran los volúmenes derramados por vertedor y aquellos extraídos por la operación normal a través de la obra toma. La ecuación que ejemplifica la situación es:

$$j = i + E_{cp} - (S_n + S_{de}) \quad (e15)$$

Para las siguientes presas y debido a que los embalses se encuentran contruidos en serie, se considerara que todas las salidas por toma y vertedor de un vaso se convierten en volúmenes ingresados a la presa que se encuentra aguas abajo

$$(S_n + S_{de})_{LA} = E_{t_{CH}} \quad (e16.1)$$

$$(S_n + S_{de})_{CH} = E_{t_{MP}} \quad (e16.2)$$

$$(S_n + S_{de})_{MP} = E_{t_{PÑ}} \quad (e16.3)$$

Donde

$(S_n + S_{de})_{LA}$ = Salidas consideradas para la presa La Angostura;

$(S_n + S_{de})_{CH}$ = Salidas consideradas para la presa Chicoasén;

$(S_n + S_{de})_{MP}$ = Salidas consideradas para la presa Malpaso;

$E_{t_{CH}}$ = Entradas por transferencia de la presa Chicoasén;

$E_{t_{MP}}$ = Entradas por transferencia de la presa Malpaso;

$E_{t_{PÑ}}$ = Entradas por transferencia de la presa Peñitas.

Las ecuaciones que retratan el funcionamiento de las presas Chicoasén, Malpaso y Peñitas respectivamente, después de añadir los volúmenes de entrada transferidos desde las presas aguas arriba son:

$$j = i + E_{cp} + (S_n + S_{de})_{LA} - (S_n + S_{de}) \quad (e17.1)$$

$$j = i + E_{cp} + (S_n + S_{de})_{CH} - (S_n + S_{de}) \quad (e17.2)$$

$$j = i + E_{cp} + (S_n + S_{de})_{MP} - (S_n + S_{de}) \quad (e17.3)$$

Las ecuaciones (e16) y (e17) retratan el funcionamiento de las presas que integran el conjunto Grijalva sin embargo el sistema se puede simplificar si se toma en cuenta la capacidad de regulación de los embalses. *“El intervalo de tiempo Δt que se use en la simulación depende del tamaño del embalse; generalmente se toma Δt =un mes, (...) pero en vasos de muy poca capacidad de regulación, el intervalo de simulación puede reducirse a uno o varios días.”* (Aparicio, 1992, pp. 79).

Para la simulación de los embalses La Angostura y Malpaso se pueden utilizar lapsos de tiempos quincenales o mensuales, pero las presas Chicoasén y Peñitas al operar normalmente tienen tiempos de regulación mucho más cortos, lo anterior lejos de ser un problema permite modelar a las presas mediante un sistema equivalente con solo 2 embalses:

1. El embalse La Angostura.
2. El embalse Malpaso.

Al simular con 2 presas se considera que las presas Chicoasén y Peñitas no participan por su escasa capacidad de regulación, ya que sus volúmenes de entradas son prácticamente igual a sus salidas, entonces los volúmenes de Chicoasén se asocian a los de la presa Malpaso mientras que los volúmenes de Peñitas no interfieren en ningún momento.

En el sistema equivalente conformado por 2 presas, la carga hidráulica de Chicoasén se suma a la carga de La Angostura mientras que el desnivel de Peñitas se añade al vaso de Malpaso, para efectos de la energía generada. Es importante considerar los desniveles debido a que el beneficio directo del conjunto Grijalva depende de la generación de energía eléctrica.

La Tabla 4.2 resume las consideraciones que se hacen para la simulación:

Tabla 4.2. Consideraciones al simular.

Características hidráulicas	La Angostura	Malpaso
Volumen ingresado	Entradas por cuenca propia	Entradas por cuenca propia y por transferencia de la presa Chicoasén y La Angostura.
Volumen egresado	Volumen por operación normal y por vertedor	Volumen por operación normal y por vertedor
Carga hidráulica	Carga de La Angostura más carga de Chicoasén	Carga del embalse Malpaso más carga de Peñitas

4.4 Software

El Instituto de Ingeniería de la UNAM, desarrolló programas de cómputo aplicables a la programación dinámica durante la época de los 90 (Domínguez et al 1993), desde ese momento se han ido perfeccionando a través de los años con el fin de hacerlos más generales y mejor estructurados.

La simulación actual utiliza 3 programas de cómputo escritos en lenguaje Fortran:

1. El primer programa conocido con el nombre de CAFIT2P, calcula los beneficios esperados máximos (\emptyset , fis), el resultado se escribe en archivos binarios que puedan ser interpretados por los siguientes programas.
2. El segundo programa cuyo nombre es OPDIN2VS, obtiene las políticas óptimas para un sistema de 2 presas que operan en cascada.
3. El tercer programa tiene por nombre SIMULM2P y se encarga de simular el funcionamiento conjunto de 2 presas que operan en cascada.

El algoritmo que sigue CAFIT2P para el cálculo de las "fis" ($\emptyset_n^{k_1 k_2}(i_1, i_2)$) es el siguiente para cada etapa y estado inicial " i_1, i_2 ":

1. Selecciona una política de extracción " k_1, k_2 ".
2. Calcula el estado final de cada presa en cada etapa con la ecuación de continuidad: $j = i + x - k$, tomando las consideraciones apropiadas para la presa dos, descritas anteriormente.
3. En caso de que en un estado final " j_i " se presente un derrame ($j_i > n$) entonces se considerara: $j_i = n$, de la misma manera si se presenta un déficit ($j_i < 1$) entonces se considerara: $j_i = 1$, siendo " n " el máximo estado y " 1 " el estado mínimo de cada embalse.
4. Calcula el beneficio de cada ingreso (x_1, x_2) utilizando la ecuación e.8.
5. El beneficio esperado de la etapa " n " ($\emptyset_n^{k_1 k_2}(i_1, i_2)$) se obtiene como el resultado del beneficio de cada ingreso (x_1, x_2) por su probabilidad de ocurrencia. Ecuación e.9

Se deduce que el número de valores de \emptyset (fis) está dado por el número de etapas (N), estados (m) y extracciones (k), lo que se traduce como: $\emptyset = N * m * k$

Una vez conocidas las fis, se hace el cálculo de los beneficios acumulados $B_n^{k_1 k_2}(i_1, i_2)$ por cada estado inicial " i_1, i_2 " y política de operación " k_1, k_2 ", utilizando para ello el segundo programa: OPDIN2VS, cuyo algoritmo es el siguiente:

1. Se iguala a cero el beneficio al final de las últimas etapas, es decir: $B_{n+1}^*(j_1, j_2)=0$, con esto y de acuerdo a la ecuación e10 se obliga a que los valores de f_i de la última etapa sean los máximos beneficios para la etapa N, esto se representa como:

$$B_n^{k_1 k_2}(i_1, i_2) = \phi_n^{k_1 k_2}(i_1, i_2)$$

2. Puesto que los estados iniciales “ i_1, i_2 ” de la etapa N son los mismos estados “ j_1, j_2 ” de la etapa N-1; se puede asociar $B_n^{k_1 k_2}(i_1, i_2) = \phi_n^{k_1 k_2}(i_1, i_2)$ de la etapa N, a cada estado final “ j_1, j_2 ” de la etapa anterior. Calculando el estado “ j_1, j_2 ” con la ecuación de continuidad en base a los ingresos y la política de extracción empleada (paso 2 y 3 del cálculo de las fis).
3. Los beneficios esperados de las etapas N-1 son el resultado de los beneficios máximos correspondientes multiplicados por la probabilidad de ocurrencia de un ingreso “ x_1, x_2 ” asociados.
4. Los beneficios acumulados de las etapas N-1, son la suma de los beneficios esperados calculados un paso antes, más el beneficio (f_i) asociado al estado “ i_1, i_2 ” de las etapas N-1 y a las políticas de extracción “ k_1, k_2 ”
5. Una vez que se tengan todos los beneficios acumulados se seleccionan los máximos beneficios por cada estado inicial “ i_1, i_2 ”.
6. El mínimo valor de los máximos beneficios, se resta de cada una de las cifras seleccionadas anteriormente, para no manejar números muy grandes.

El proceso continúa en la etapa N-2 y retrocede año con año, empezando desde el paso uno del cálculo de beneficios acumulados y utilizando los beneficios máximos calculados al final de la etapa N-1 para dicho paso.

El proceso se realiza hasta que los beneficios acumulados se repitan, lo que indica que se encontró la política de operación óptima.

Una vez que se conocen las políticas óptimas para cada embalse, se utiliza el tercer programa SIMULM2P para simular el funcionamiento de las presas en cascada, siguiendo el algoritmo:

1. Se calcula el volumen extraído de cada presa, utilizando las políticas de extracción calculadas “ k_1, k_2 ” del programa OPDIN2VS en términos de volumen.
2. Se calculan los almacenamientos finales “ j_1, j_2 ”, usando la ecuación de continuidad con los volúmenes extraídos “ k_1, k_2 ” y los ingresos quincenales históricos registrados.

3. Con ayuda de las curvas de elevaciones-áreas, se comprueba que ninguno de los valores excedan los máximos establecidos en las curvas guía.
4. El proceso continua para cada quincena, calculando en cada uno:
 - Los almacenamientos
 - Los volúmenes derramados
 - Los volúmenes de déficit
 - Los volúmenes extraídos
 - La energía promedio generada.

4.4.1 Descripción de los archivos.

Los programas de cómputo utilizan datos para alimentarse y poder generar resultados. La Figura 4.8, muestra la forma en la que interactúan los archivos con los programas, en color anaranjado se encuentran los archivos de datos y en color rojo los archivos de resultados.

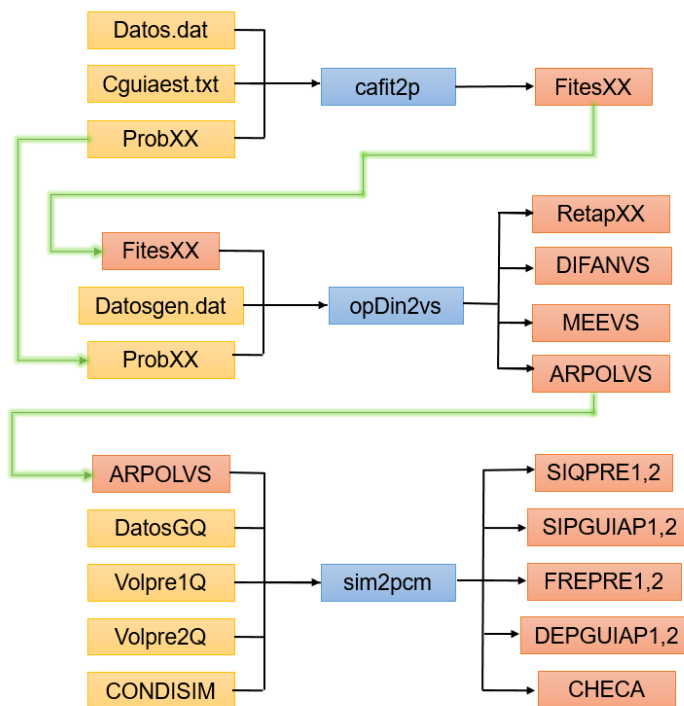


Figura 4.8. Relación de programas y datos. (Edición propia)

4.4.1.1 Cguiaest.txt

El archivo en formato .txt contiene cuatro líneas de texto; las primeras dos expresan los valores de los estados límite de las curvas guía altas para ambas presas, mientras que en las dos restantes se escriben los valores de los estados límite para las curvas guía bajas.

Todos los valores se expresan en formato entero y en términos de estados (como resultado de la discretización un estado equivale a 600 Mm³). Ejemplo:

28 28 27 27 26 22
25 23 18 15 14 15
17 17 17 16 16 17
14 14 11 10 11 14

4.4.1.2 Datos.dat

El archivo contiene 14 registros, que en conjunto expresan información general de las dos presas.

- En la primera línea se deben escribir cinco datos: el número de presas que en este caso es 2; el número de etapas consideradas: 6; el intervalo de discretización de volumen fijado en 600.0 (es decir: 600 x 10⁶ m³); el factor de ajuste igual a 0.1 y el factor de escala que es 1.
- En la segunda línea se expresa el número de meses (o quincenas) que integra cada etapa, al considerar 6 etapas se debe escribir 6 valores: 2, 1, 1, 1, 2, 5, mismos que representan los meses de “junio, julio”, “agosto”, “septiembre”, “octubre”, “noviembre, diciembre” y “enero, febrero, marzo, abril y mayo”.

Los siguientes registros se deben escribir para cada presa.

- El número de estados de la presa: 22 para La Angostura y 16 para Malpaso, que resultaron de discretizar la capacidad útil de cada presa.
- Los coeficientes de penalización por derrame, se escriben 6 valores que corresponden a las 6 etapas consideradas. Los valores asignados se presentan más adelante.
- Los coeficientes de penalización por déficit, se escribe un valor por cada etapa contemplada. Los valores se muestran posteriormente.
- Los coeficientes de penalización por superar la curva guía, se escriben primero los 6 valores para la curva guía alta y en el renglón siguiente los 6 de la curva guía baja, uno por cada etapa. Los valores se muestran más adelante.
- El factor de afectación del límite inferior y superior para la energía pico, para ambas presas los valores son: 0.4 y 0.7

- La diferencia entre el nivel del NAMINO y el nivel medio de desfogue, se tiene un valor de 269.5 (m) para el embalse de La Angostura y 93.9 (m) para Malpaso
- La extracción mensual máxima igual a 2384.5 (m³/s) para la primera presa y 3110.4 (m³/s) para el segundo embalse.
- El valor de la eficiencia: 0.01 para ambas presas.
- Un coeficiente que define el tipo de ecuación que se utiliza para ajustar los valores de la curva de elevaciones-volúmenes; al utilizar un valor igual a 1, declaramos que se utilizara una ecuación de tipo potencial: $y = ax^b$
- Los coeficientes “a” y “b” de la ecuación de ajuste anterior, siendo los valores: a=0.0214, b=0.7763 para la primer presa y a=0.0107, b=0.8982 para la segunda.
- El número de tramos en los que se divide la pendiente en la curva de generación de energía, se admiten 2 cambios como máximo.
- La pendiente de cada tramo, ambos embalses tienen valores: 0.8 y 0.7

Ejemplo del archivo Datos.dat.

```
2 6 600.0 0.1 1
2 1 1 1 2 5
22
10000.0 10000.0 10000.0 10000.0 10000.0 10000.0
100.0 100.0 100.0 100.0 100.0 100.0
10000.0 10000.0 10000.0 10000.0 10000.0 10000.0
10000.0 10000.0 10000.0 10000.0 10000.0 10000.0
0.4 0.7
269.5
2384.64
0.01
1
0.0214 0.7763
2
```

0.8 0.7

16

10000.0 10000.0 10000.0 10000.0 10000.0 10000.0

100.0 100.0 100.0 100.0 100.0 100.0

10000.0 10000.0 10000.0 10000.0 10000.0 10000.0

10000.0 10000.0 10000.0 10000.0 10000.0 10000.0

0.4 0.7

93.9

3110.4

0.01

1

0.0107 0.8982

2

0.8 0.7

4.4.1.3 ProbXX

Se realiza un archivo para cada una de las etapas y se diferencian entre sí por su terminación en el nombre, por ejemplo para la primera etapa el archivo se llama PROB01; se entiende que la regla aplica para los demás archivos según la etapa.

Estos archivos contienen dos registros, en el primero de ellos se escribe el número de probabilidades de ingreso de la presa "i", así como la extracción mínima y máxima del mismo embalse. En el segundo registro se escriben las probabilidades asociadas a los ingresos que tiene cada presa en números reales. Ejemplo:

5 4 1 7 2 10

0.089 0.578 0.222 0.089 0.022

0.089 0.644 0.245 0.022

4.4.1.4 FiteXX

Los archivos fite se generan después de ejecutar el programa CAFIT2P y la cantidad de archivos es igual al número de etapas definidas, su extensión es larga por lo que aquí solo se muestra un extracto.

Estos archivos muestran los beneficios máximos esperados, pero para entenderlos mejor se recomienda consultar los manuales publicados por el Instituto de Ingeniería.

A continuación se muestra una parte del archivo Fite01.

-19999.230000	-19999.980000	-20007.270000	-20017.040000
-20027.040000	-20037.050000	-20047.050000	-20057.040000
-20067.050000			
-19999.710000	-19999.630000	-20000.970000	-20008.480000
-20018.280000	-20028.280000	-20038.280000	-20048.280000
-20058.280000			
-20006.230000	-20006.150000	-20007.190000	-20012.530000
-20021.500000	-20031.430000	-20041.430000	-20051.430000
-20061.430000			
-20015.080000	-20015.000000	-20016.030000	-20021.280000
-20029.530000	-20039.180000	-20049.150000	-20059.150000
-20069.150000			
-20024.850000	-20024.770000	-20025.800000	-20031.050000
-20039.280000	-20048.790000	-20058.710000	-20068.700000
-20078.700000			
-20034.850000	-20034.770000	-20035.800000	-20041.050000
-20049.280000	-20058.790000	-20068.710000	-20078.700000

4.4.1.5 Datosgen.dat

El archivo contiene información general que utiliza el programa OPDIN2VS.

La primera línea debe indicar el número de presas que participan (2), seguido por el número de estados que tiene cada embalse (22 y 16, respectivamente), luego se escribe el número de iteraciones que se realizarán (50 como mínimo). En el mismo renglón se pone el número de etapas que se usan en la simulación (6), el intervalo de discretización del volumen útil (600) y la tolerancia para evitar brincos en las políticas (al menos 10^{-5}). Al final del registro también se escribe la extracción mensual máxima de cada presa.

Los siguientes registros se realizan para cada etapa:

- Primero se indica el número de etapa y los meses que se incluyen en cada etapa mediante una cadena alfanumérica.
- En el segunda línea se indica el número de meses que integra la etapa y el número que identifica a los meses (1 a 12).

El ejemplo del archivo Datosgen.dat incluye datos reales utilizados para la simulación.

2, 22, 16, 100, 6, 600, 1E-007, 2384.64, 3110.4
"ETAPA", "1:", "NOV-DIC"
2, 11, 12
"ETAPA", "2:", "OCT"
1, 10
"ETAPA", "3:", "SEP"
1, 9
"ETAPA", "4:", "AGO"
1, 8
"ETAPA", "5:", "JUN-JUL"
2, 6, 7
"ETAPA", "6:", "ENE-FEB-MAR-ABR-MAY"
5, 1, 2, 3, 4, 5

4.4.1.6 Arpolvs

El archivo contiene las políticas de operación óptimas, mostrando la extracción que debe realizarse para cada combinación de estados iniciales de las presas, empezando con el mes de enero y finalizando en diciembre. Todos los valores se expresan en unidades de volumen.

El ejemplo muestra solo un extracto del archivo generado.

600.000000	600.000000	480.000000	600.000000
600.000000	1200.000000	480.000000	600.000000
600.000000	1800.000000	480.000000	600.000000
600.000000	2400.000000	480.000000	600.000000
600.000000	3000.000000	480.000000	600.000000
600.000000	3600.000000	480.000000	600.000000

600.000000	4200.000000	480.000000	600.000000
600.000000	4800.000000	480.000000	600.000000
600.000000	5400.000000	480.000000	600.000000
600.000000	6000.000000	480.000000	600.000000
600.000000	6600.000000	600.000000	600.000000
600.000000	7200.000000	480.000000	600.000000
600.000000	7800.000000	480.000000	600.000000
600.000000	8400.000000	480.000000	600.000000
600.000000	9000.000000	480.000000	600.000000
600.000000	9600.000000	480.000000	600.000000

4.4.1.7 Meevs

Este archivo contiene todas las matrices de estados-extracciones para cada una de las etapas y es una forma diferente de mostrar las políticas de operación.

El ejemplo que se muestra pertenece a la etapa 1 “Noviembre y Diciembre”.

"ETAPA", "1:", "NOV-DIC"																
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
1	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0502	0402	0202	0102	0102	0103	0104	
2	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0602	0502	0302	0202	0102	0102	0103	0104
3	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0602	0402	0302	0202	0102	0102	0103	0104
4	0202	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0702	0502	0402	0302	0202	0102	0102	0103	0104
5	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0602	0502	0402	0302	0202	0102	0102	0103	0104
6	0302	0102	0102	0102	0102	0102	0702	0602	0502	0402	0302	0202	0102	0102	0103	0104
7	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0702	0602	0502	0402	0302	0202	0102	0102	0103	0104
8	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0702	0602	0502	0402	0302	0202	0102	0102	0103	0104
9	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0702	0602	0502	0402	0302	0202	0102	0102	0103	0104
10	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0702	0602	0502	0402	0302	0202	0102	0102	0103	0104
11	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0502	0402	0302	0202	0102	0102	0103	0104
12	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0402	0302	0202	0102	0102	0103	0104
13	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0402	0302	0202	0102	0102	0103	0104
14	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0402	0302	0202	0102	0102	0103	0104
15	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0502	0402	0302	0202	0102	0102	0103	0104
16	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0502	0402	0302	0202	0102	0102	0103	0104
17	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0602	0502	0402	0302	0202	0202	0102	0103	0104
18	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0702	0602	0502	0402	0302	0302	0202	0102	0103	0104
19	0202	0202	0202	0202	0202	0202	0702	0602	0502	0402	0402	0302	0202	0203	0204	0205
20	0302	0302	0302	0302	0302	0702	0702	0602	0502	0502	0402	0302	0303	0304	0305	0306
21	0402	0402	0402	0402	0402	0702	0702	0602	0602	0502	0402	0403	0404	0405	0406	0407
22	0502	0502	0502	0502	0702	0702	0702	0702	0602	0502	0503	0504	0505	0506	0507	0508

4.4.1.8 CONDISIM.txt

El archivo tiene un solo renglón con 4 valores, que se utilizan para que el programa SIM2PCM pueda elegir entre una simulación mensual y una quincenal, además fija parámetros de tiempo que son necesarios.

El primer valor indica que tipo de simulación se realizara, si el número es igual a 1 se hará en forma mensual, por otro lado si es igual a 0 se hará quincenalmente; el siguiente valor debe ser igual a 1 para que la simulación se haga en orden cronológico. Los 2 restantes valores indican el inicio y el fin de la simulación, por regla si el inicio es 1 el fin será 12.

El siguiente ejemplo muestra los valores utilizados en la simulación.

0, 1, 1, 12

4.4.1.9 DatosGQ.dat

El archivo contiene varios registros que le permiten al programa simular las condiciones reales de los embalses.

- El primer renglón es alfanumérico y muestra el nombre de la simulación
- Las siguientes dos líneas muestran los nombres de las presas participantes
- El cuarto registro se trata de un número que indica el total de años a simular (55, de 1959 al 2013), seguido por el valor que indica el año en que se inicia la simulación (1)
- El siguiente renglón indica el número de estados para cada presa (22 y 16)
- Posteriormente se indican los almacenamientos iniciales, las capacidades muertas y los volúmenes útiles para cada presa: para el primer embalse los valores son 10000, 0.0, 13200.0, para la segunda presa son 7500, 0.0, 9600.0
- En el séptimo renglón se escriben los volúmenes mínimos para cada embalse: 1.0e20 para ambos embalses.
- La octava línea muestra las elevaciones al NAMINO (500.0 y 144.0, respectivamente).
- El noveno registro indica los volúmenes máximos turbinados para cada presa: 2400.0 para el primer embalse y 3000.0 para el segundo.
- El siguiente renglón pertenece a los niveles de desfogue (421.5 y 84.5)

- Posteriormente se indican las diferencias entre el NAMINO y el nivel medio de desfogue para cada embalse: 191.0 y 34.4 respectivamente.
- Después aparecen los coeficientes para el **DeIVol** para ambas presas. (0.75 para La Angostura y 1.5 para Malpaso). Los coeficientes se explican posteriormente.
- El treceavo renglón también numérico muestra el número de puntos para las respectivas curvas elevaciones-capacidades-áreas (10 y 12).

Luego para cada presa se escriben:

- 3 registros en donde se escriben por renglón: las elevaciones (msnm), las áreas (km²) y las capacidades de las presas (Mm³)
- 2 registros que muestran las láminas de evaporación mensual promedio para ambas presas en renglones separados.
- 2 registros donde se escriben los volúmenes promedios quincenales en 2 renglones y una serie de pendientes también en 2 renglones.
- 2 registros en donde se colocan los volúmenes mínimos y máximos quincenales (2 renglones por registro)
- 1 registro con los datos quincenales de la curva guía, escritos en 2 renglones.

Para entender mejor el archivo se recomienda consultar el manual del Instituto de Ingeniería. A continuación se muestra como debe lucir el archivo DatosGQ.dat.

Revisión y actualización de las políticas de operación del sistema de presas del río Grijalva

SIMULACION DEL SISTEMA HIDROELECTRICO DEL RIO GRIJALVA

LA ANGOSTURA

MALPASO

55 1

22 16

10000 0.0 13200.0 7500.0 0.0 9600.0

1.0E20 1.0E20

500.0 144.0

2400.0 3000.0

421.50 84.50

191.0 34.40

0.75 1.5

10 12

500.0 505.0 510.0 515.0 519.0 520.0 525.0 530.0 533.0 539.5

150.0 250.0 254.0 357.0 410.0 414.0 470.0 529.0 594.0 735.3

0.0 1269.6 2539.2 4324.2 5978.9 6392.5 8744.1 11387.3 13200.0 17356.9

144.0 145.0 150.0 155.0 160.0 165.0 170.0 175.0 180.0 182.5 185.0 188.0

163.0 173.0 191.0 211.0 226.0 242.0 257.0 271.0 284.0 291.0 298.0 306.4

0.0 163.2 1124.2 2170.0 3299.8 4509.2 5793.9 7149.7 8571.4 9600.0 10063.4 11000.59

89.41 109.71 156.84 160.70 131.97 98.15 105.14 101.94 86.41 76.64 74.93 82.51

49.66 62.52 112.96 115.87 120.95 91.72 81.72 76.98 72.80 73.75 62.21 48.97

148.37 148.37 101.69 101.69 93.13 93.13 88.89 88.89 131.07 131.07 411.72 411.72

551.43 551.43 719.66 719.66 1149.17 1149.17 961.54 961.54 366.24 366.24 206.58 206.58

0.544 0.544 0.7667 0.7667 0.6048 0.6048 0.5431 0.5431 1.6428 1.6428 0.5993 0.5993

0.8144 0.8144 1.0032 1.0032 0.4027 0.4027 0.166 0.166 0.3559 0.3559 0.3558 0.3558

192.18 192.18 152.55 152.55 105.67 105.67 91.77 91.77 104.29 104.29 258.74 258.74

362.58 362.58 436.67 436.67 717.74 717.74 572.98 572.98 304.22 304.22 235.70 235.70

0.1788 0.1788 0.4385 0.4385 0.7439 0.7439 0.3825 0.3825 0.7413 0.7413 0.6135 0.6135

0.5748 0.5748 0.6406 0.6406 0.2626 0.2626 0.2805 0.2805 0.1494 0.1494 0.2842 0.2842

240 240 240 240 240 240 240 240 240 150 150

150 150 300 300 300 300 300 300 150 150 150 150

1140 1140 1140 1140 1140 1140 1140 1140 1140 1050 1050

1050 1050 1200 1200 1200 1200 1200 1200 1050 1050 1050 1050

300 300 300 300 300 300 300 300 300 300 300

300 300 600 600 600 600 600 600 300 300 300 300

1500 1500 1500 1500 1500 1500 1500 1500 1500 1500 1500

1500 1500 1500 1500 1500 1500 1500 1500 1500 1500 1500

16757 16757 16757 16543 15950 15375 14800 14225 13650 13075 12500 12500 15674 15755 15827 15919 16073 16217 16382 16592 16757 16757 16757

14049 13621 13098 12789 11993 11070 10563 9801 9273 8744 8509 8509 8509 8876 9140 10118 10964 12576 13764 14891 15424 15211 14731

10401 10401 10401 10401 10401 10401 10401 10401 10401 10401 10401 10160 9870 9525 9280 9709 9779 9906 10053 10170 10401 10401 10401

8765 8717 9308 9383 9171 9275 9139 8962 8674 8267 7661 7434 7096 6879 6472 6201 6362 6878 7878 8568 8598 8628 8658 8688

4.4.1.10 Vopre1Q y Vopre2Q

Estos archivos muestran los registros históricos de ingreso a cada cuenca, por lo que es necesario crear vopre1Q y vopre2Q; la letra “Q” indica que los valores serán quincenales, en caso de que sean mensuales se deberá denotar con una “M”.

En los archivos se debe escribir una línea por cada año simulado; el renglón comenzara con un número que indique el año, seguido por **24** valores que pertenecen a los ingresos quincenales.

A continuación se muestra un extracto del archivo vopre1Q que muestra 37 registros (renglones) pero solo se observan 10 de los 24 datos de ingreso para la primer cuenca.

Revisión y actualización de las políticas de operación del sistema de presas del río Grijalva

1	180.9	165.7	132.8	100.7	108.1	106.8	91	103.6	98.6	116.9
2	160.2	144.4	115.1	96.1	90.4	86.9	77.1	83.4	85.4	135.9
3	200.4	187.4	163	122	124.3	120.3	118.6	93.7	113.1	110.8
4	180.3	160.4	130.3	96.9	99.8	98.6	99.7	103.6	96.2	105.2
5	156	143.3	118.3	90.2	94.1	90.8	81.3	75.9	85.5	90.4
6	168.5	147.3	113	93.9	88.4	85	74.2	70.1	77	102.5
7	156.9	147.5	117.2	93.7	97.3	90.4	76.6	73.2	78.9	94.9
8	186.4	175	147.4	114.3	120	112.7	123.5	120.3	135	139.3
9	181.3	172.9	140.8	105.8	107.8	103.6	97.6	102.5	78.6	90.7
10	133.5	126.6	103.3	85	81.1	79.7	72.8	65.4	77	173.2
11	160.4	142	113.6	85.7	88	85.9	82.1	76.5	72.6	147.5
12	220.1	202.4	166.9	126.1	127.7	120.2	101.1	92.5	96.9	116.6
13	213	187.8	151.3	118.2	125.2	117.8	108.1	91.5	96.1	121.3
14	176.9	167.8	139.9	114	107.9	105.2	92.9	92.4	119.8	137.2
15	117.2	110.5	92.9	72.3	75.1	71.6	66.6	63	60.4	85.8
16	216.5	216.5	142	142	134	134	105.7	105.7	128.5	128.5
17	80.5	80.5	54.5	54.5	45	45	29	29	65	65
18	167	167	133.5	133.5	134	134	126.5	126.5	154.5	154.5
19	148.5	148.8	106.6	54.2	82	76.8	107.9	112.9	114.8	184.1
20	209.2	183.2	79.7	88.8	101.7	98.9	76.7	62.3	201	277.4
21	242.3	190.5	131	107.4	111.7	70.7	93.3	115.9	137	203.7
22	191.6	156.5	139.3	122.2	109.8	109.8	171.4	131.4	141.6	181.8
23	173.2	139.5	100.6	97.4	125.7	136.7	194	173.4	117.9	143.1
24	90.1	159.5	150.7	112.5	125	104.2	120.7	94.2	119.8	421.4
25	134.3	150.2	143.2	152.1	137	155.1	97.1	122.6	82.9	118.3
26	129	129.9	114.5	81.2	141.1	102.1	67.3	140.3	211	445
27	168.7	147	123.8	115.4	128.5	126.6	79.3	116.7	150.9	223
28	174.3	162.3	105.6	83.4	99	69.2	78.2	177.7	92.4	279.9
29	102.3	159.5	104.2	48.4	59.1	31.1	36.2	90.3	160.3	176.2
30	86.1	112.1	112.9	107.6	40.5	56.7	70.5	128.6	100	101.5
31	123.7	100.9	85	119.1	106	74.5	118.8	86.8	110.6	154.8
32	184.9	174	120.5	112.6	114.8	79.7	86.7	125.2	129.2	149
33	255.7	115	121.1	76.4	98	96.8	96.2	48	94.7	125.4
34	118.5	84.4	110	72.3	69.7	98	74	81.7	18.8	100.1
35	130.4	132.9	53.8	78.6	69.4	90.6	68.9	57.9	86.8	116.4
36	100.2	110.7	114	62.8	144.1	92.6	64.5	68.2	86.2	124.8
37	82.3	61.9	44.8	53	60.5	81.1	88.5	111.2	139	157.6

4.4.1.11 SIQPRE1 y SIQPRE2

Estos archivos se generan para cada una de las presas y contienen los resultados detallados de las simulaciones.

En primer lugar se tiene un resumen quincenal por cada uno de los años, donde se muestran: los almacenamientos quincenales, el volumen de ingreso, los volúmenes evaporados y los volúmenes extraídos; también aparecen los volúmenes derramados, el déficit que se tuvo y la energía generada.

Posteriormente aparece un resumen anual, donde al final se pueden observar los volúmenes totales derramados, el almacenamiento mínimo registrado y la energía promedio generada en los años de análisis.

Revisión y actualización de las políticas de operación del sistema de presas del río Grijalva

A continuación se muestra el resumen quincenal para el primer año y un extracto del resumen anual.

***** SIMULACION DEL SISTEMA HIDROELECTRICO DEL RIO GRIJALVA *****

PRESA: LA ANGOSTURA

QUINCENA	ALM.INICIAL MILL M^3	INGRESO MILL M^3	VOL EVAP MILL M^3	EXT POL MILL M^3	EXT MODIF MILL M^3	EXT TOTAL MILL M^3	DERRAME MILL M^3	DEFICIT MILL M^3	ENERGÍA (GWH)	
					1					
1Q ENE	10000.00	180.90	22.35	240.00	240.00	240.00	.00	.00	174.70	
2Q ENE	9918.55	165.70	22.27	240.00	253.27	253.27	.00	.00	184.24	
1Q FEB	9808.71	132.80	27.17	240.00	247.07	247.07	.00	.00	179.59	
2Q FEB	9667.27	100.70	26.97	240.00	257.89	257.89	.00	.00	187.26	
1Q MAR	9483.11	108.10	38.25	240.00	240.00	240.00	.00	.00	174.07	
2Q MAR	9312.96	106.80	37.95	240.00	246.79	246.79	.00	.00	178.80	
1Q ABR	9135.02	91.00	38.55	240.00	246.20	246.20	.00	.00	178.16	
2Q ABR	8941.28	103.60	38.21	240.00	240.86	240.86	.00	.00	174.09	
1Q MAY	8765.80	98.60	31.12	240.00	245.99	245.99	.00	.00	177.58	
2Q MAY	8587.29	116.90	30.86	240.00	240.00	240.00	.00	.00	173.05	
1Q JUN	8433.34	181.30	22.81	150.00	150.00	150.00	.00	.00	108.10	
2Q JUN	8441.83	513.80	23.01	150.00	150.00	150.00	.00	.00	108.23	
1Q JUL	8782.62	285.80	24.92	150.00	195.88	195.88	.00	.00	141.54	
2Q JUL	8847.61	367.10	25.04	150.00	150.00	150.00	.00	.00	108.48	
1Q AGO	9039.67	512.20	24.58	300.00	300.00	300.00	.00	.00	217.22	
2Q AGO	9227.28	553.00	24.82	300.00	300.00	300.00	.00	.00	217.51	
1Q SEP	9455.46	381.20	21.18	300.00	300.00	300.00	.00	.00	217.71	
2Q SEP	9515.49	496.60	21.29	300.00	300.00	300.00	.00	.00	217.87	
1Q OCT	9690.80	750.00	19.14	911.77	714.68	714.68	.00	.00	519.35	
2Q OCT	9706.98	1198.10	19.35	697.64	671.31	671.31	.00	.00	488.65	
1Q NOV	10214.43	488.00	19.04	150.00	179.45	179.45	.00	.00	130.96	
2Q NOV	10503.93	323.10	19.22	150.00	182.50	182.50	.00	.00	133.35	
1Q DIC	10625.32	261.00	21.24	150.00	150.00	150.00	.00	.00	109.68	
2Q DIC	10715.07	213.40	21.30	150.00	164.52	164.52	.00	.00	120.34	

***** RESUMEN ANUAL *****

AÑO	DERRAME MILL M^3	DEFICIT MILL M^3	ING HIST MILL M^3	EXT TOTAL MILL M^3	ALMAC PRO MILL M^3	ELEV PRO (MSNM)	ENER TOT/ (GWH)
1	.00	.00	7729.70	6366.4	9481.77	526.40	4620.53
2	.00	.00	12803.50	11249.0	10610.48	528.53	8243.98
3	.00	.00	8578.70	8480.4	10524.68	528.37	6197.10
4	.00	.00	11346.10	10244.5	10742.70	528.78	7511.68
5	.00	.00	9745.60	9072.0	10786.15	528.86	6650.77
6	.00	.00	9977.20	9692.2	10716.57	528.73	7095.81
7	.00	.00	10528.90	9548.7	10620.35	528.55	6992.12
8	.00	.00	11614.40	10784.1	10923.15	529.12	7906.93
9	.00	.00	6651.10	7046.0	10292.63	527.93	5141.90
10	.00	.00	8555.70	7412.5	10036.91	527.45	5402.27
11	388.62	.00	15040.30	13444.4	11017.24	529.30	9605.27
12	.00	.00	13046.10	12554.3	11223.68	529.69	9221.51
13	.00	.00	10380.90	10204.3	10869.41	529.02	7480.31
14	.00	.00	6838.40	7738.7	10271.50	527.89	5646.54
15	.00	.00	12215.80	9463.3	9839.45	527.07	6916.78
16	.00	.00	6095.40	8317.7	10216.61	527.79	6066.95
17	.00	.00	7993.00	5815.1	8344.05	524.15	4186.89
18	.00	.00	8011.00	7708.0	10015.59	527.41	5613.75
19	.00	.00	6829.60	6633.5	9513.57	526.46	4818.92
20	.00	.00	10029.90	8329.3	9770.92	526.94	6068.53
21	.00	.00	11689.30	10491.1	10733.41	528.76	7692.97
22	.00	.00	9692.90	9219.9	10796.62	528.88	6758.02
23	90.40	.00	14664.00	13410.0	11160.81	529.57	9789.03
24	.00	.00	10462.60	10353.9	10801.97	528.89	7585.44
25	.00	.00	9516.30	9251.1	10499.23	528.32	6769.18
26	.00	.00	14582.60	13316.3	10862.67	529.01	9768.11
27	.00	.00	9943.80	9964.1	10600.99	528.51	7291.72
28	.00	.00	7208.40	7742.3	9982.30	527.34	5638.72
29	.00	.00	7547.30	6882.1	9154.29	525.78	4990.22
30	.00	.00	11716.30	9573.3	9823.06	527.04	6988.99
53	608.28	.00	13844.60	12952.8	11023.69	529.31	9073.96
54	.00	.00	8398.30	8939.5	10526.15	528.37	6538.32
55	.00	.00	13324.10	11127.7	10563.73	528.44	8164.40
TOTAL	5290.01	.00					

ALMACENAMIENTO INICIAL MÍNIMO REGISTRADO: 6890.64 MILL M^3

ENERGÍA PROMEDIO GENERADA EN LOS 55 AÑOS: 281.69 GWH

4.5 Referencias

- Alegría Díaz, Arallely. 2010 *Política de operación optima del sistema de presas del rio Grijalva. Efectos de la curva guía* (Tesis de Licenciatura)
- Aparicio Mijares, Francisco J. 1992, “*Fundamentos de hidrología de superficie*” Editorial Limusa, México
- Contreras Cruz, Claudia. 1999. “*Operación optima de un sistema de presas en cascada. Aplicación al sistema del río Grijalva*” (Tesis)
- Domínguez, Ramón, Notas de su clase sobre Programación Dinámica
- Domínguez, Ramón; Mendoza, Rosalva; Contreras, Claudia. 1998. “*Estudio hidrológico de la segunda etapa del análisis integral de la zona baja del río Grijalva*”. (Informe preliminar elaborado para CNA por el Instituto de Ingeniería, UNAM).
- Hincapié López, Carolina. 2016 “*Actualización de las avenidas de diseño y de las políticas de operación del sistema de presas del río Santiago*” (Tesis)
- Mendoza, Rosalva. 2009. “Manual del programa 1, 2 y 3 de optimización vía programación dinámica estocástica dos presas en serie” (Instituto de Ingeniería)
- Mendoza, Rosalva. 2017. “*Manual de los programas de cómputo: CAFIT2P.FOR, OPDIN2VS.FOR, y SIM2PCM.FOR: inclusión de penalizaciones variables por etapa para eventos de derrame, déficit y superar límites de curvas guía para un sistema de 2 presas en cascada. Caso de estudio y aplicación al sistema hidroeléctrico del río Grijalva*”
- Peña Delgado Francisco, 2010. “Simulación histórica y sintética de políticas de operación optima de un sistema de presas en cascada en el río Santiago, Nayarit México” (Tesis)
- Presentación de programación dinámica, seminario de Idalia Flores, Facultad de Ingeniería.
http://www.ingenieria.unam.mx/sistemas/PDF/Avisos/Seminarios/SeminarioV/Sesion6_IdaliaFlores_20abr15.pdf

Capítulo 5 Aplicación y resultados.

5.1 Descripción de datos

Los datos que se utilizaron se extrajeron de los reportes del funcionamiento hidrológico de los vasos de las centrales hidroeléctricas, elaborados por el Departamento Regional de Hidrometría y facilitados por el Doctor Sadoth Fabián Huerta Loera como parte de las relaciones que existen entre la CFE y el Instituto de Ingeniería de la UNAM.



Todos los documentos muestran las aportaciones y las extracciones de cada embalse, los valores se expresan en unidades de volúmenes (millones de m³) y en unidades de gasto (m³/s).

En total se ocuparon 3 tipos de registros:

- Reportes hidrológicos diarios

Los reportes hidrológicos diarios registran los ingresos y los egresos de agua a las presas cada hora, al final del día se calculan las cantidades diarias totales. Ejemplos de estos reportes se ilustran en la Tabla 5.1

Tabla 5.1 Reporte hidrológico diario, ejemplo de la Presa Angostura, 6 de enero de 2015 (CFE)


  SUBDIRECCIÓN DE GENERACIÓN GERENCIA REGIONAL DE PRODUCCIÓN SURESTE SUBGERENCIA REGIONAL DE GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA GRIJALVA DEPARTAMENTO REGIONAL DE HIDROMETRÍA														
														FECHA: 6 de Enero de 2015
FUNCIONAMIENTO DE VASO DE LA C.H. BELISARIO DOMINGUEZ (ANGOSTURA)														
HORA	Elev. vaso (m.s.n.m)	Almacenamiento (mill. m3)		Aportaciones		EXTRACCIONES						Generacion M W H	No. Unidades Operando	Aportación Promedio C/6 Hrs
		Actual	Difer.	Gasto (m3/s.)	Volumen (mill. m3)	Turbinas		Vertedor		Total				
						Q(m3/s.)	V(mill.m3)	Q(m3/s.)	V(mill.m3)	Q(m3/s.)	V(mill.m3)			
1	531.59	12331.90	0.00	354.92	1.28	354.92	1.28			354.92	1.28	347.201	2	
2	531.59	12331.90	0.00	66.08	0.24	66.08	0.24			66.08	0.24	64.643	2	
3	531.59	12331.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.000	0	
4	531.59	12331.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.000	0	70.17
5	531.59	12331.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.000	0	
6	531.59	12331.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.000	0	
7	531.59	12331.90	0.00	114.05	0.41	114.05	0.41			114.05	0.41	111.565	1	
8	531.59	12331.90	0.00	233.64	0.84	233.64	0.84			233.64	0.84	228.559	2	
9	531.59	12331.90	0.00	349.72	1.26	349.72	1.26			349.72	1.26	342.115	2	
10	531.59	12331.90	0.00	363.63	1.31	363.63	1.31			363.63	1.31	355.721	2	64.33
11	531.59	12331.90	0.00	441.76	1.59	441.76	1.59			441.76	1.59	432.149	3	
12	531.58	12325.96	-5.94	-1116.80	-4.02	533.57	1.92			533.57	1.92	521.918	3	
13	531.58	12325.96	0.00	542.31	1.95	542.31	1.95			542.31	1.95	530.464	3	
14	531.58	12325.96	0.00	531.76	1.91	531.76	1.91			531.76	1.91	520.145	3	
15	531.58	12325.96	0.00	537.01	1.93	537.01	1.93			537.01	1.93	525.278	3	
16	531.58	12325.96	0.00	508.67	1.83	508.67	1.83			508.67	1.83	497.557	3	526.50
17	531.58	12325.96	0.00	535.97	1.93	535.97	1.93			535.97	1.93	524.262	3	
18	531.58	12325.96	0.00	503.29	1.81	503.29	1.81			503.29	1.81	492.294	3	
19	531.57	12320.02	-5.94	-1122.24	-4.04	528.13	1.90			528.13	1.90	516.547	3	
20	531.57	12320.02	0.00	499.44	1.80	499.44	1.80			499.44	1.80	488.484	3	
21	531.57	12320.02	0.00	506.31	1.82	506.31	1.82			506.31	1.82	495.204	3	
22	531.57	12320.02	0.00	493.48	1.78	493.48	1.78			493.48	1.78	482.660	3	-66.73
23	531.57	12320.02	0.00	505.17	1.82	505.17	1.82			505.17	1.82	494.092	3	
24	531.56	12314.08	-5.94	-1294.52	-4.66	355.85	1.28			355.85	1.28	348.017	3	
TOTALES				160.07	13.83	354.28	30.61			354.28	30.61	8318.88		

- Reportes hidrológicos mensuales

Los reportes hidrológicos mensuales (Tabla 5.2) recopilan los volúmenes de agua ganados por cuenca propia así como los volúmenes perdidos en turbinas y vertedores durante todos los días del mes correspondiente.

Además de manera similar a los reportes diarios, se incluyen otras cifras que corresponden a la generación de energía, evaporación, área del embalse, etc.

Tabla 5.2. Reporte hidrológico mensual, ejemplo de la Presa Peñitas, abril 2007 (CFE)



 SUBDIRECCION DE GENERACION GERENCIA DE INGENIERIA CIVIL DEPARTAMENTO DE HIDROMETEOROLOGIA DIVISION HIDROMETRICA SURESTE FUNCIONAMIENTO DEL VASO													
PRESA: PEÑITAS, CHIS.										FECHA: ABRIL DE 2007			
DÍA	ELEV. DEL VASO A LAS 6:00 HS DEL DÍA EN (m.a.s.n.m.)	VOLUMEN UTIL. (10 ⁶ m ³)	AREA DEL EMBALSE (Km ²)	EXTRACCIONES			EVAPORACION VOL. (10 ⁶ m ³)	AFORTACION		CONS. ESP. m ³ /KWh	GENERACION BRUTA (MWh)	EVAPORACION EN mm	GASTO MEDIO DIARIO c.p. m ³ /s
				TURBINAS VOL. (10 ⁶ m ³)	VERTEDOR VOL. (10 ⁶ m ³)	TOTAL VOL. (10 ⁶ m ³)		C. PROPIA (10 ⁶ m ³)	C. TOTAL (10 ⁶ m ³)				
1	85.98	53.12	55.90	23.29		23.29	0.1233	0.96	24.49	11.812	1971	3.15	11.1
2	86.00	54.20	55.93	51.83		51.83	0.1233	-2.33	47.62	11.805	4390	3.15	-27.0
3	85.92	49.86	55.81	56.30		56.30	0.1387	5.07	66.19	11.834	4757	3.55	58.6
4	86.10	59.62	56.09	56.95		56.95	0.2175	13.57	66.92	11.769	4839	5.54	157.1
5	86.28	69.38	56.37	24.97		24.97	0.1626	-4.92	16.46	11.706	2133	4.12	-56.9
6	86.12	60.70	56.12	33.44		33.44	0.0813	57.82	63.87	11.762	2843	2.07	669.2
7	86.68	91.06	56.99	49.32		49.32	0.1484	-47.30	-11.24	11.567	4264	3.72	-547.5
8	85.56	30.35	55.25	21.92		21.92	0.1764	0.89	29.68	11.965	1832	4.56	10.3
9	85.70	37.94	55.47	50.30		50.30	0.2174	2.66	61.35	11.913	4222	5.60	30.8
10	85.90	48.78	55.78	58.70		58.70	0.1956	3.18	64.32	11.841	4958	5.01	36.8
11	86.00	54.20	55.93	56.46		56.46	0.2991	17.19	86.03	11.805	4783	7.64	198.9
12	86.54	83.47	56.77	54.87		54.87	0.3259	-8.37	63.87	11.615	4724	8.20	-96.8
13	86.70	92.14	57.02	55.46		55.46	0.2894	-3.81	51.41	11.560	4798	7.25	-44.1
14	86.62	87.80	56.89	57.44		57.44	0.2682	-7.36	32.77	11.587	4957	6.74	-85.2
15	86.16	62.87	56.18	30.28		30.28	0.2651	5.09	17.54	11.748	2578	6.74	58.9
16	85.92	49.86	55.81	49.46		49.46	0.2430	-2.52	36.69	11.834	4179	6.22	-29.1
17	85.68	36.86	55.43	52.46		52.46	0.1824	8.78	70.53	11.921	4401	4.70	101.6
18	86.01	54.74	55.95	54.76		54.76	0.2009	0.05	65.26	11.801	4640	5.13	0.6
19	86.20	65.04	56.24	55.09		55.09	0.2457	-2.82	44.50	11.734	4695	6.24	-32.6
20	86.00	54.20	55.93	55.52		55.52	0.1946	5.13	60.05	11.805	4703	4.97	59.4
21	86.08	58.54	56.05	54.72		54.72	0.1956	-3.25	37.57	11.777	4646	4.99	-37.6
22	85.76	41.19	55.56	30.37		30.37	0.1941	8.94	42.49	11.892	2554	4.99	103.5
23	85.98	53.12	55.90	50.11		50.11	0.1956	0.49	67.65	11.812	4242	5.00	5.6
24	86.30	70.46	56.40	55.50		55.50	0.2302	-1.93	47.06	11.699	4744	5.83	-22.3
25	86.14	61.79	56.15	60.77		60.77	0.2539	-2.77	50.19	11.755	5170	6.46	-32.0
26	85.94	50.95	55.84	58.69		58.69	0.2873	-3.96	48.14	11.827	4962	7.35	-45.9
27	85.74	40.11	55.53	60.03		60.03	0.2608	9.15	57.04	11.899	5045	6.71	105.9
28	85.68	36.86	55.43	53.79		53.79	0.2004	6.29	52.90	11.921	4512	5.17	72.8
29	85.66	35.77	55.40	22.54		22.54	0.2005	0.00	49.84	11.928	1890	5.17	0.0
30	86.16	62.87	56.18	51.20		51.20	0.1424	-1.71	45.92	11.748	4358	3.62	-19.8
TOTALES				1446.52	0.00	1446.52	6.26	52.202	1457.113		122790		

- Reportes hidrológicos históricos

Los reportes históricos muestran solo los escurrimientos netos mensuales de agua para cada embalse, todos los valores se registran en orden cronológico y se expresan en unidades de volumen (millones de m³).

La Tabla 5.3 ilustra un reporte hidrológico, donde se presentan las sumas de escurrimientos anuales y un valor de ingreso medio para cada mes.

Tabla 5.3. Reporte hidrológico histórico, ejemplo de la Presa Angostura (CFE, extracto)

  SUBDIRECCIÓN DE GENERACIÓN REGISTRO HISTÓRICO DE ESCURRIMIENTOS EN ORDEN CRONOLÓGICO Presa Angostura, C. H. Belisario Domínguez, Chis. MILLONES DE METROS CÚBICOS													
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1971	417.80	284.80	245.10	209.90	233.70	408.70	617.30	1851.30	2178.50	2274.80	797.30	484.90	10004.10
1972	357.30	260.00	225.30	193.00	267.00	816.10	922.10	1111.70	1080.00	891.60	505.10	355.50	6984.70
1973	264.90	194.80	178.50	155.70	172.40	635.10	778.80	2689.00	2676.40	3080.80	1084.00	658.70	12526.90
1974	433.00	284.00	268.00	211.30	257.00	445.00	730.00	483.00	1412.00	1007.00	338.00	247.00	6095.30
1975	161.00	109.00	90.00	58.00	130.00	319.00	540.00	958.00	2144.00	2081.00	961.00	442.00	7993.00
1976	334.00	267.00	288.00	253.00	309.00	1050.00	1500.00	633.00	1016.00	1333.00	558.00	490.00	8011.00
1977	168.20	170.10	282.90	93.10	330.50	683.30	529.50	1101.00	1505.30	798.40	454.30	410.90	6507.50
1978	261.30	206.80	205.30	213.00	491.70	719.30	1423.40	1389.30	2570.60	1574.80	581.30	408.80	10025.60
1979	304.40	223.70	290.50	291.80	349.30	835.10	1225.30	1579.80	3595.40	1670.00	695.20	466.80	11527.40
1980	472.40	278.00	274.10	303.30	323.20	578.90	740.00	1256.30	2842.30	1849.30	582.80	403.20	9901.80
1981	313.00	198.00	232.40	241.20	292.40	1410.20	2097.90	2387.80	3198.00	2813.80	909.20	577.10	14671.00
1982	249.70	263.00	229.30	214.60	541.10	1484.50	980.80	944.10	2074.70	2361.80	681.20	434.30	10438.90
1983	285.90	294.70	292.00	219.70	201.30	713.30	1138.50	1329.50	2928.50	1078.70	629.90	407.20	9517.20
1984	258.70	195.60	243.40	188.60	634.90	1564.40	1966.40	2559.30	3972.00	1902.00	632.20	477.00	14594.50
1985	323.30	239.20	254.80	175.50	373.70	794.70	1137.80	2025.70	2006.40	1434.20	775.20	333.30	9873.60
1986	336.80	189.00	188.60	243.50	344.50	822.00	1073.80	1154.10	1225.70	792.00	430.40	293.80	7074.20
1987	254.40	180.50	90.30	95.10	277.70	631.30	1313.00	1280.30	1898.20	884.20	325.30	239.90	7470.20
1988	177.00	218.10	97.30	199.10	201.70	925.90	1412.00	2684.70	2859.70	1905.30	632.30	305.30	11518.40
1989	218.30	204.20	180.60	205.70	265.30	818.00	692.50	1643.60	3058.90	2988.70	771.30	327.30	11374.40
1990	283.40	149.60	194.60	211.90	278.10	679.60	1107.20	724.40	1838.00	1191.30	567.80	455.20	7681.10
1991	367.00	197.60	195.70	144.40	220.20	683.20	656.10	543.40	1115.00	1559.80	488.80	412.40	6583.40
1992	203.00	184.00	168.00	156.00	190.00	799.00	916.00	1243.00	1941.00	1391.00	552.30	309.40	8052.70
1993	267.10	132.80	160.10	127.80	144.80	712.70	1133.00	1678.60	2360.90	1671.80	703.00	341.20	9431.60
1994	210.80	138.80	223.50	132.50	214.40	407.20	310.00	815.80	994.00	1088.20	326.10	108.80	4950.10
1995	144.30	105.80	138.30	173.40	296.90	1202.40	1462.50	2253.70	4012.80	1603.80	698.80	401.00	12493.50
1996	277.50	256.60	304.20	153.80	412.80	1391.50	1565.00	2039.40	1974.80	1986.70	679.80	295.50	11337.40
1997	288.50	222.80	229.20	175.40	277.00	610.90	901.30	640.50	2332.80	2124.10	731.20	488.30	9022.00
1998	288.80	223.10	176.80	145.30	136.80	405.20	823.30	1230.70	3097.70	1903.80	1442.80	458.10	10332.20
1999	284.90	221.00	221.70	173.90	256.40	1184.30	1501.50	1762.00	3842.10	3893.80	1174.80	649.50	15165.90
2000	385.00	300.40	223.90	287.60	520.90	1912.10	753.50	1554.00	2852.40	1682.90	584.90	368.20	11405.80
2001	201.90	211.40	173.30	126.90	291.80	382.00	598.10	1091.70	1762.80	1771.10	533.40	258.90	7403.30
2002	247.50	146.80	148.40	222.30	253.90	588.70	604.90	579.80	1398.70	1741.30	540.00	317.60	6789.90
2003	267.40	87.90	213.30	190.50	201.30	741.10	771.00	1042.50	2130.80	1713.58	696.70	380.40	8436.26
2004	268.00	166.30	100.20	154.00	267.80	832.40	782.20	656.30	1469.80	1871.00	480.30	238.40	7244.70
2005	197.20	149.80	171.80	85.70	142.30	1319.74	2080.57	1179.20	2364.02	4882.56	600.72	372.07	13345.68
2006	268.14	165.83	99.30	134.95	315.29	1709.94	1638.85	1266.86	1933.74	1873.63	717.01	437.01	10560.55
2007	256.82	214.05	119.67	139.70	216.17	531.76	556.99	1420.25	2178.63	2242.81	819.29	358.31	9054.25
2008	249.12	187.47	196.07	71.21	197.40	1329.73	2531.02	2153.04	2780.40	2380.45	679.73	379.36	13135.00
2009	268.94	216.24	189.47	126.90	286.49	686.38	639.34	801.43	1242.73	765.87	1013.50	380.09	6627.38
2010	219.82	140.01	111.03	149.74	447.74	1053.72	2528.33	4922.94	4825.83	2231.19	608.96	377.06	17614.37
2011	325.66	139.34	213.97	105.40	160.05	640.78	1727.96	2155.23	3451.28	3887.54	828.26	409.25	13844.72
2012	322.31	217.62	185.19	119.02	337.50	674.43	674.64	1485.97	2006.78	1714.16	438.46	254.05	8430.13
2013	211.93	153.92	118.65	92.52	174.38	992.69	1651.80	1722.28	3384.44	2665.63	1339.60	703.11	13210.94
MEDIA	301.55	216.53	205.73	181.27	274.77	844.40	1197.87	1477.90	2342.73	1981.19	758.98	431.74	10214.65

5.1.1 Datos quincenales (actualización)

La actualización de la información comienza obteniendo: los ingresos de agua por cuenca propia, para cada embalse de manera quincenal; usando para tal efecto los datos extraídos de los reportes hidrométricos de la CFE.

En el procedimiento empleado para los primeros años de análisis, desde 2007 y hasta el año 2012, participaron exclusivamente **registros hidrológicos mensuales**; de aquellos documentos se copiaron los datos de ingreso por cuenca propia día a día en una tabla anual ordenada por meses (ejemplo en la Tabla 5.4).

Posterior al 2012, se ocuparon **reportes hidrológicos diarios** de cada embalse para completar aquellos periodos en los que no se tenían reportes mensuales completos; los valores se transcriben en la misma tabla anual.

Tabla 5.4. Ingresos diarios anuales, extracto 2012 (Datos obtenidos de la CFE)

	ANGOSTURA				CHICOASEN				MALPASO			
	Q (m3/s)		Vol (106m3)		Q (m3/s)		Vol (106m3)		Q (m3/s)		Vol (106m3)	
ENERO												
día												
1	124.712	10.775			62.375	5.389			185.824	16.055		
2	93.669	8.093			33.290	2.876			159.099	13.746		
3	150.317	12.987			15.820	1.367			543.076	46.922		
4	175.257	15.142			30.109	2.601			277.427	23.970		
5	160.064	13.829			83.589	7.222			198.429	17.144		
6	62.199	5.374			54.568	4.715			165.159	14.270		
7	42.812	3.699			93.937	8.116			181.270	15.662		
8	147.264	12.724			32.759	2.830			92.687	8.008		
9	68.230	5.895			36.527	3.156			3.249	0.281		
10	226.156	19.540			134.426	11.614			137.523	11.882		
11	122.849	10.614			-47.442	-4.099			145.824	12.599		
12	152.856	13.207			104.754	9.051			173.825	15.018		
13	71.852	6.208			-10.536	-0.910			295.676	25.546		
14	104.428	9.023			109.330	9.446			408.429	35.288		
15	83.317	7.199	suma	promedio	109.330	9.446	suma	promedio	408.429	35.288	suma	promedio
16	114.288	9.874	154.3087515	10.2872501	134.173	11.593	74.96739078	4.997826052	171.804	14.844	271.2355396	18.08236931
17	76.610	6.619			-49.500	-4.277			46.107	3.984		
18	80.350	6.942			-19.252	-1.663			177.377	15.325		
19	71.681	6.193			99.783	8.621			128.746	11.124		
20	92.869	8.024			38.284	3.308			212.172	18.332		
21	26.701	2.307			53.122	4.590			208.295	17.997		
22	89.583	7.740			69.116	5.972			20.316	1.755		
23	94.830	8.193			54.489	4.708			114.273	9.873		
24	123.043	10.631			18.359	1.586			-11.381	-0.983		
25	105.444	9.110			46.460	4.014			71.386	6.168		
26	136.678	11.809			36.588	3.161			218.086	18.843		
27	73.512	6.351			87.111	7.526			16.182	1.398		
28	118.814	10.266			36.444	3.149			130.357	11.263		
29	81.257	7.021			5.816	0.502			208.027	17.974		
30	102.377	8.845			102.948	8.895			155.661	13.449		
31	556.468	48.079	suma	promedio	26.382	2.279	suma	promedio	5.365	0.464	suma	promedio
			168.0053467	10.50033417	-16.746	-1.447	50.9244105	3.182775656	148.879	12.863	159.8270012	9.989187574
FEBRERO												
día												
1	104.3113604	9.012501539			80.870	6.987			47.975	4.145		
2	81.766	7.065			37.536	3.243			117.488	10.151		
3	-86.292	-7.456			139.787	12.078			87.567	7.566		
4	99.758	8.619			94.431	8.159			90.770	7.843		
5	29.107	2.515			110.475	9.545			52.980	4.577		
6	29.620	2.559			-57.239	-4.945			52.137	4.505		
7	-2.118	-0.183			28.423	2.456			123.060	10.632		
8	106.827	9.230			64.451	5.569			131.858	11.393		
9	17.723	1.531			61.413	5.306			66.494	5.745		
10	254.274	21.969			46.141	3.987			225.216	19.459		
11	96.087	8.302			74.858	6.468			150.026	12.962		
12	81.744	7.063			22.774	1.968			99.035	8.557		
13	62.775	5.424	suma	promedio	41.871	3.618	suma	promedio	261.864	22.625	suma	promedio

Una vez que los datos están ordenados, se suman los gastos registrados cada quincena de tal manera que se tengan solo 2 valores de ingreso por mes, las cantidades se copian en una nueva tabla que muestra valores de ingreso quincenal para cada presa. Tabla 5.5.

Debido a la falta de información, la tabla de ingresos quincenales se completó con los datos de los **reportes hidrológicos históricos**, que muestran valores de volúmenes ingresados por cuenca propia desde el año 1952; para estos casos, los gastos de entrada reportados se dividen entre 2 y los números resultantes se asignan a las quincenas del mes correspondiente.

Tabla 5.5. Ingresos quincenales históricos, extracto (Datos obtenidos de la CFE)

			Angostura	Chicoasen	Malpaso
			vol[106m3]	vol[106m3]	vol[106m3]
2007		quin1	138.256275	47.980504	418.786438
2007	enero	quin2	118.360492	22.464637	190.818294
2007		quin3	112.353144	34.6364523	166.484623
2007	febrero	quin4	101.693255	14.1853	88.2458718
2007		quin5	59.001173	19.4789181	97.9231291
2007	marzo	quin6	60.6720544	35.8487726	63.7705673
2007		quin7	59.362493	22.9924829	35.8407445
2007	abril	quin8	80.3332788	20.6867768	48.1012665
2007		quin9	73.2649983	27.3812749	27.9542275
2007	mayo	quin10	142.900572	29.3973705	33.3772841
2007		quin11	254.034583	23.8019688	-16.1743105
2007	junio	quin12	277.724376	77.9729171	66.7565392
2007		quin13	176.317042	44.0573962	73.366623
2007	julio	quin14	380.675416	93.7580263	148.890612
2007		quin15	549.703981	74.6682942	187.056924
2007	agosto	quin16	870.547107	200.11115	382.551549
2007		quin17	1058.93206	287.722722	394.880628
2007	septiembre	quin18	1119.69913	154.157039	187.099569
2007		quin19	895.662476	102.290026	528.737206
2007	octubre	quin20	1347.14401	318.383192	1352.94317
2007		quin21	512.180474	132.55565	558.181428
2007	noviembre	quin22	307.105279	71.2658986	178.39606
2007		quin23	210.962243	47.8736546	93.1567296
2007	diciembre	quin24	147.350704	46.8698506	57.7134516
2008		quin1	126.891167	30.5123577	193.845716
2008	enero	quin2	122.233024	30.3214944	106.730537
2008		quin3	109.554289	30.9942178	62.6109723
2008	febrero	quin4	77.9152081	22.7534187	68.2484015
2008		quin5	49.4694111	20.0042622	44.3942769
2008	marzo	quin6	146.604365	6.95003995	46.8776352
2008		quin7	35.3698831	19.0307898	69.4914957
2008	abril	quin8	35.8385898	28.390301	55.1670207

Cuando el registro de datos quincenales se completó, se sumaron los volúmenes de ingreso por cuenca de la presa Chicoasén a los volúmenes propios de la presa Malpaso, esto debido a las consideraciones que se tomaron al simular el funcionamiento de los vasos de las presas.

Al final la actualización de datos contemplo 2 series de datos, que incluyen información procesada desde 2007 hasta 2013:

- Volpre1, que corresponde a los ingresos quincenales de la presa Belisario Domínguez (La Angostura).
- Volpre2, que corresponde a los gastos quincenales de los embalses Manuel Moreno Torres (Chicoasén) y Nezahualcóyotl (Malpaso).

Las series de datos actualizados se pueden consultar en el anexo A: “Tabla de ingresos quincenales actualizados (2007 a 2013)”. La Tabla 5.6 muestra una fracción de los volúmenes ingresados por cuenca propia.

Tabla 5.6. Series de ingresos: Volpre1 y Volpre2, extracto.

VOLPRE1	VOLPRE2
vol(106m3)	vol(106m3)
138.256275	466.766942
118.360492	213.282931
112.353144	201.121076
101.693255	102.431172
59.001173	117.402047
60.6720544	99.6193399
59.362493	58.8332274
80.3332788	68.7880433
73.2649983	55.3355024
142.900572	62.7746546
254.034583	7.62765823
277.724376	144.729456
176.317042	117.424019
380.675416	242.648638
549.703981	261.725218
870.547107	582.662698
1058.93206	682.60335
1119.69913	341.256608
895.662476	631.027232
1347.14401	1671.32637
512.180474	690.737078
307.105279	249.661958
210.962243	141.030384
147.350704	104.583302
126.891167	224.358073
122.233024	137.052031
109.554289	93.6051901
77.9152081	91.0018203

Para realizar una correcta simulación de los vasos y llegar a los resultados requeridos, fue necesario anexar series de volúmenes ingresados por cuenca propia (Volpre1 y Volpre2), provenientes de investigaciones pasadas, que muestran información desde 1959 hasta 2010.

Para validar los registros de las investigaciones previas, se hace una comparación de los volúmenes reportados en el pasado contra los volúmenes recopilados recientemente, en las Figuras 5.1 a 5.4, se muestran dichas comparaciones.

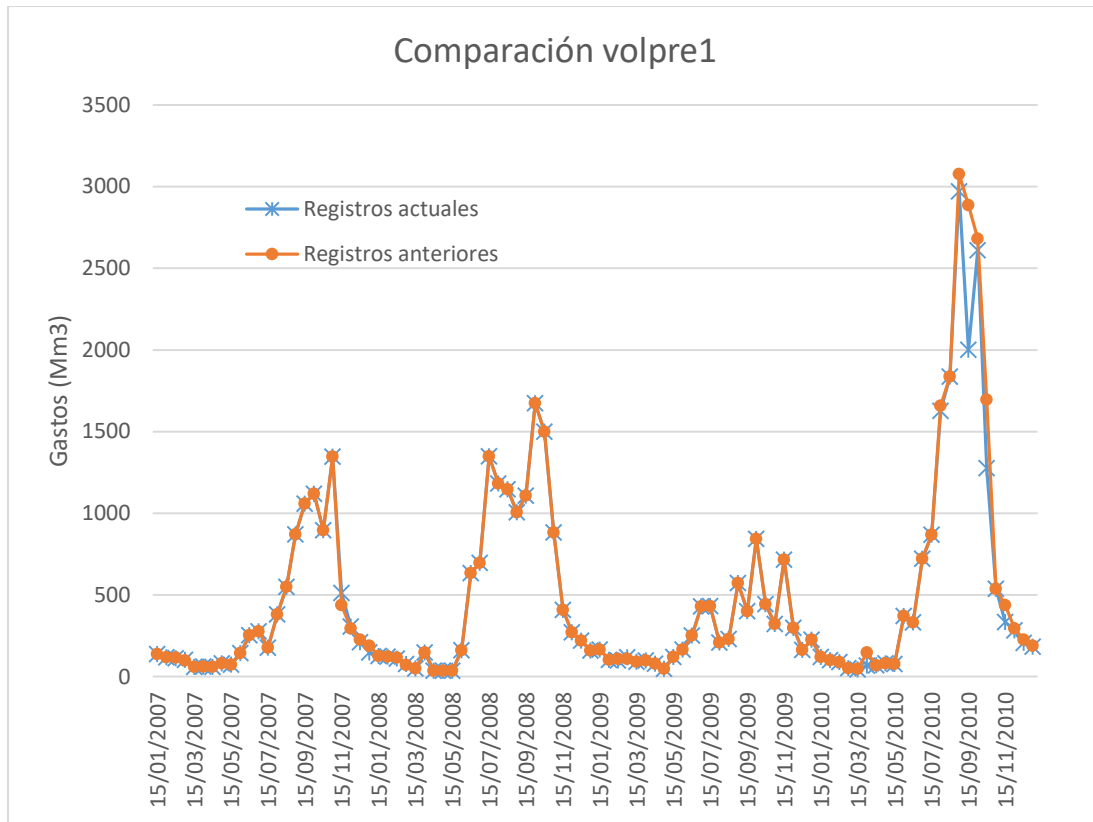


Figura 5.1. Comparación de volúmenes ingresados por cuenca propia, 2007 a 2010
Registros de estudios anteriores y actualizados

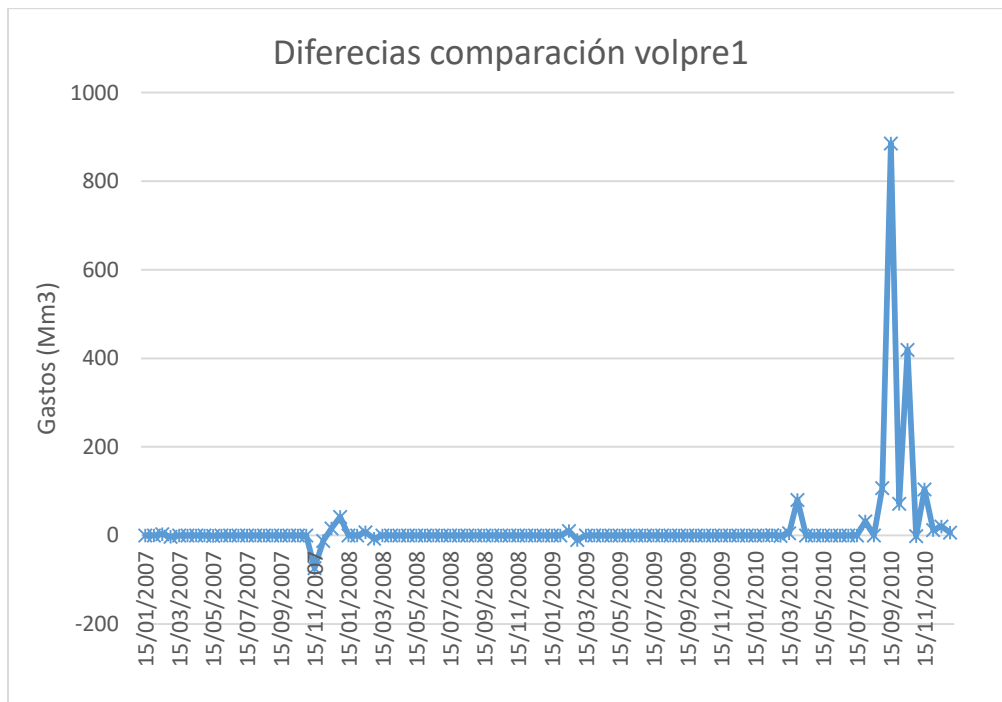


Figura 5.2. Diferencias entre los registros pasados y actuales de los volúmenes ingresados por cuenca propia,
Volpre1: 2007 a 2010

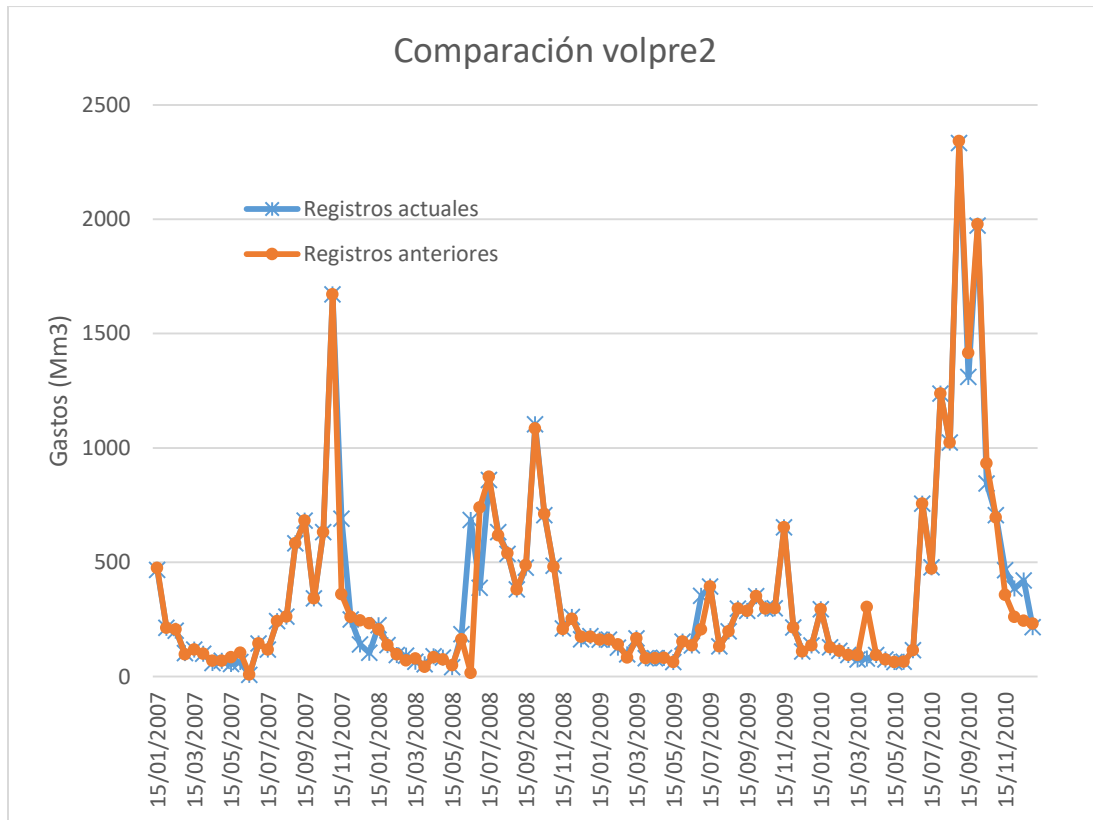


Figura 5.3 Comparación de volúmenes ingresados por cuenca propia, 2007 a 2010
Registros de estudios anteriores y actualizados

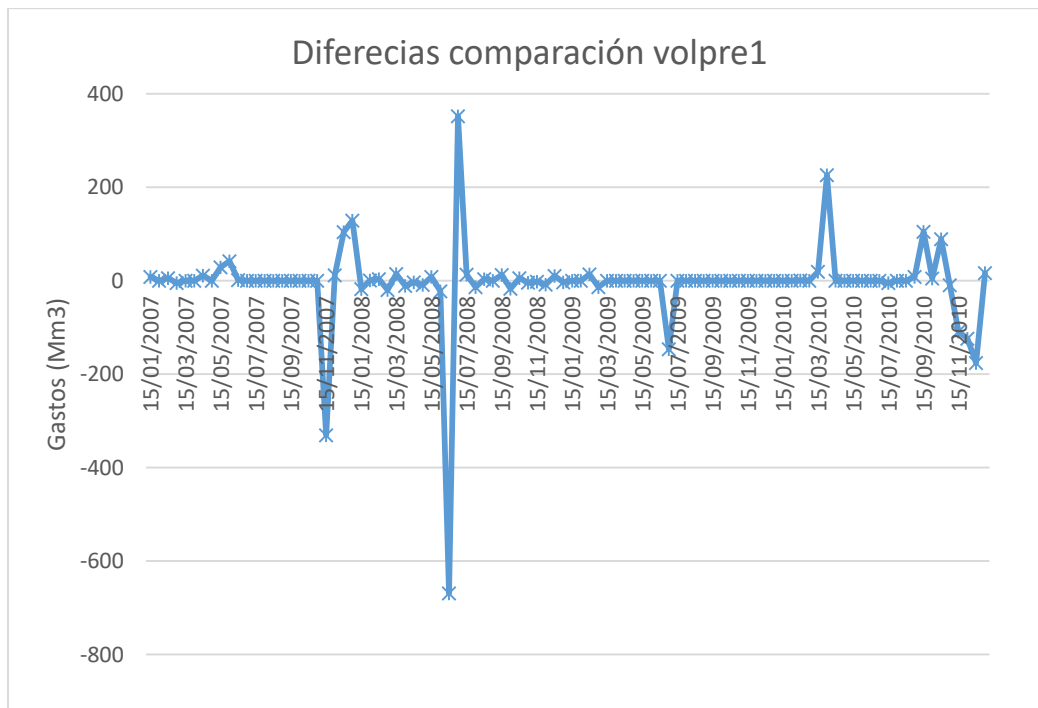


Figura 5.4. Diferencias entre los registros pasados y actuales de los volúmenes ingresados por cuenca propia, Volpre2: 2007 a 2010

Las gráficas de las diferencias entre los registros pasados y actuales de los volúmenes ingresados por cuenca propia, muestran las principales desigualdades entre los registros.

Para la serie Volpre1 la mayor diferencia entre registros fue de 885 millones de m³, seguido por un volumen de 419 millones de m³, cuyas fechas corresponden a la primera quincena de agosto del 2010 y a la primera quincena de septiembre del mismo año respectivamente; mientras que para la serie Volpre2, la mayor diferencia se encuentra en la primera quincena de junio de 2008 con un volumen de 669 millones de m³ y en la primera quincena de noviembre de 2007 con un volumen de 330 millones de m³. Todas las diferencias se revisaron minuciosamente a partir de los registros actuales sin encontrar ninguna anomalía.

A pesar de que existen diferencias de gran magnitud en ambas series de registros, se han considerado como casos aislados, resultado de utilizar volúmenes de ingreso mensuales divididos entre dos, debido a la falta de información que en un momento se reportó. Para realizar las simulaciones, se utilizaron los datos recabados en investigaciones pasadas para los años 1959 al 2007 y de las recopilaciones actuales para los años 2007 al 2013; el conjunto de volúmenes ingresados se muestra en el anexo B: “Tabla historia de ingresos quincenales”.

5.1.2 Curvas guía

Las curvas guía muestran valores que indican niveles de almacenamiento que no deben ser rebasados por seguridad de zonas aguas abajo o bien niveles mínimos que se deben tener para asegurar la mayor generación de energía eléctrica posible.

El Comité Técnico de Operación de Obras Hidráulicas es el encargado de establecer las curvas guía, por un lado fija los valores que la CONAGUA pide no deben ser excedidos y por otro lado indica los niveles que la CFE solicita como mínimos para operar, el comité técnico evalúa las propuestas y selecciona aquellas curvas que en el momento deban regir.

Para realizar las simulaciones se tomaron las curvas guía utilizadas en los ensayos de Mendoza et al (2012), donde se optó por definir varias curvas para evaluar su influencia en las políticas de operación y en los resultados que se generan durante la simulación. La Tabla 5.7 muestra los valores de las curvas guía utilizados para cada ensaye, mientras que su representación gráfica se puede visualizar en el anexo C: “Curvas guía”; en ambos casos los valores se expresan en términos de estados (cada estado equivale a 600 Mm³).

La curva guía alta (CGA) muestra los niveles máximos, cuyos valores son de interés para CONAGUA; mientras que la curva guía baja (CGB) indica los almacenamientos mínimos, valores de interés para la CFE.

Tabla 5.7. Valores definidos para las curvas guía de cada presa (Mendoza et al, 2012)

Etapa	a				b			
	Curva Guía Alta		Curva Guía Baja		Curva Guía Alta		Curva Guía Baja	
	La Angostura	Malpaso	La Angostura	Malpaso	La Angostura	Malpaso	La Angostura	Malpaso
ene-may	22	17	15	14	16	16	14	12
jun-jul	26	16	14	11	20	15	12	10
ago	27	16	15	10	21	15	12	9
sep	27	17	18	11	21	16	13	8
oct	28	17	23	14	22	16	17	10
nov-dic	28	17	25	14	22	16	24	13
Etapa	c				d			
	Curva Guía Alta		Curva Guía Baja		Curva Guía Alta		Curva Guía Baja	
	La Angostura	Malpaso	La Angostura	Malpaso	La Angostura	Malpaso	La Angostura	Malpaso
ene-may	16	16	14	12	16	16	12	10
jun-jul	20	15	12	10	20	15	10	8
ago	21	15	12	9	21	15	10	7
sep	21	16	13	8	21	16	11	6
oct	22	16	17	10	22	16	15	8
nov-dic	22	16	24	13	22	16	22	11
Etapa	e				f			
	Curva Guía Alta		Curva Guía Baja		Curva Guía Alta		Curva Guía Baja	
	La Angostura	Malpaso	La Angostura	Malpaso	La Angostura	Malpaso	La Angostura	Malpaso
ene-may	16	16	12	10	16	16	10	8
jun-jul	20	15	10	8	20	15	8	6
ago	21	15	10	7	21	15	8	5
sep	21	16	11	6	21	16	9	4
oct	22	16	15	8	22	16	13	6
nov-dic	22	16	18	11	22	16	16	9
Etapa	g				h			
	Curva Guía Alta		Curva Guía Baja		Curva Guía Alta		Curva Guía Baja	
	La Angostura	Malpaso	La Angostura	Malpaso	La Angostura	Malpaso	La Angostura	Malpaso
ene-may	15	15	7	5	15	13	9	5
jun-jul	19	14	5	3	15	14	6	3
ago	20	14	5	2	19	14	7	4
sep	20	15	6	1	20	15	10	5
oct	21	15	10	3	21	15	14	6
nov-dic	21	15	13	6	22	16	18	8
Etapa	i				j			
	Curva Guía Alta		Curva Guía Baja		Curva Guía Alta		Curva Guía Baja	
	La Angostura	Malpaso	La Angostura	Malpaso	La Angostura	Malpaso	La Angostura	Malpaso
ene-may	16	13	10	6	16	13	10	5
jun-jul	17	14	11	7	17	13	11	5
ago	19	15	12	8	19	14	12	5
sep	20	16	13	9	20	15	13	6
oct	21	17	15	10	21	16	15	7
nov-dic	22	18	19	11	22	17	19	8

5.1.3 Penalizaciones

La programación dinámica estocástica de acuerdo a la ecuación e.3, castiga los beneficios obtenidos cuando se presenten derrames, déficit o bien cuando se rebasa alguno de los valores de las curvas guía.

Los valores de penalización que se utilizaron provienen de los ensayos de Mendoza et al (2012). Las Tablas 5.8 y 5.9 se presentan los castigos aplicables a las presas de La Angostura y Malpaso para cada ensayo.

Tabla 5.8. Valores definidos para penalización (Mendoza et al, 2012)

Prueba	Penalización CGA		Penalización CGB	
	La Angostura	Malpaso	La Angostura	Malpaso
a	10000	10000	10000	10000
b	10000	10000	10000	10000
c	10000	10000	5000	5000
d	10000	10000	5000	5000
e	10000	10000	5000	5000
f	10000	10000	5000	5000
g	10000	10000	5000	5000
h	10000	10000	5000	5000
i	10000	10000	5000	5000
j	10000	10000	5000	5000

Tabla 5.9. Valores definidos para penalización (continuación, Mendoza et al, 2012)

Prueba	Penalización Derrame		Penalización Déficit	
	La Angostura	Malpaso	La Angostura	Malpaso
a	10000	100	10000	100
b	10	10	100	10
c	10	10	100	10
d	10	10	100	10
e	10	10	100	10
f	10	10	100	10
g	10	10	100	10
h	10	10	100	10
i	10	10	100	10
j	10	10	100	10

5.1.4 Coeficiente para el DELVOL

Los coeficientes que afectan el Delvol añaden o restan volúmenes a la política óptima utilizada, con el fin de considerar las correlaciones que existen entre los volúmenes ingresados que se presentan de una quincena a la otra.

Los valores aparecen en el doceavo registro del archivo DATOSGQ que utiliza el programa SIM2PCM y provienen de los ensayos de Mendoza et al (2012); en este trabajo se utilizaron los coeficientes: 0.75 para la presa La Angostura y 1.5 para la presa Malpaso.

SIMULACION DEL SISTEMA HIDROELECTRICO DEL RIO GRIJALVA

LA ANGOSTURA

MALPASO

55 1

22 16

10000 0.0 13200.0 7500.0 0.0 9600.0

1.0E20 1.0E20

500.0 144.0

2400.0 3000.0

421.50 84.50

191.0 34.40

0.75 1.5

10 12

500.0 505.0 510.0 515.0 519.0 520.0 525.0 530.0 533.0 539.5

150.0 250.0 254.0 357.0 410.0 414.0 470.0 529.0 594.0 735.3

0.0 1269.6 2539.2 4324.2 5978.9 6392.5 8744.1 11387.3 13200.0 17356.9

144.0 145.0 150.0 155.0 160.0 165.0 170.0 175.0 180.0 182.5 185.0 188.0

163.0 173.0 191.0 211.0 226.0 242.0 257.0 271.0 284.0 291.0 298.0 306.4

0.0 163.2 1124.2 2170.0 3299.8 4509.2 5793.9 7149.7 8571.4 9600.0 10063.4 11000.59

89.41 109.71 156.84 160.70 131.97 98.15 105.14 101.94 86.41 76.64 74.93 82.51

49.66 62.52 112.96 115.87 120.95 91.72 81.72 76.98 72.80 73.75 62.21 48.97

148.37 148.37 101.69 101.69 93.13 93.13 88.89 88.89 131.07 131.07 411.72 411.72

551.43 551.43 719.66 719.66 1149.17 1149.17 961.54 961.54 366.24 366.24 206.58 206.58

0.544 0.544 0.7667 0.7667 0.6048 0.6048 0.5431 0.5431 1.6428 1.6428 0.5993 0.5993

0.8144 0.8144 1.0032 1.0032 0.4027 0.4027 0.166 0.166 0.3559 0.3559 0.3558 0.3558

192.18 192.18 152.55 152.55 105.67 105.67 91.77 91.77 104.29 104.29 258.74 258.74

362.58 362.58 436.67 436.67 717.74 717.74 572.98 572.98 304.22 304.22 235.70 235.70

0.1788 0.1788 0.4385 0.4385 0.7439 0.7439 0.3825 0.3825 0.7413 0.7413 0.6135 0.6135

0.5748 0.5748 0.6406 0.6406 0.2626 0.2626 0.2805 0.2805 0.1494 0.1494 0.2842 0.2842

240 240 240 240 240 240 240 240 240 150 150

150 150 300 300 300 300 300 300 150 150 150 150

1140 1140 1140 1140 1140 1140 1140 1140 1140 1050 1050

1050 1050 1200 1200 1200 1200 1200 1200 1050 1050 1050 1050

300 300 300 300 300 300 300 300 300 300 300 300

300 300 600 600 600 600 600 600 300 300 300 300

1500 1500 1500 1500 1500 1500 1500 1500 1500 1500 1500 1500

1500 1500 1500 1500 1500 1500 1500 1500 1500 1500 1500 1500

16757 16757 16757 16543 15950 15375 14800 14225 13650 13075 12500 12500 15674 15755 15827 15919 16073 16217 16382 16592 16757 16757 16757 16757

14049 13621 13098 12789 11993 11070 10563 9801 9273 8744 8509 8509 8509 8509 8876 9140 10118 10964 12576 13764 14891 15424 15211 14731

10401 10401 10401 10401 10401 10401 10401 10401 10401 10401 10401 10401 10160 9870 9525 9280 9709 9779 9906 10053 10170 10401 10401 10401 10401

8765 8717 9308 9383 9171 9275 9139 8962 8674 8267 7661 7434 7096 6879 6472 6201 6362 6878 7878 8568 8598 8628 8658 8688

5.2 Simulación del sistema (Congreso Nacional de Hidráulica, 2014)

En el marco del XXIII Congreso Nacional de Hidráulica, celebrado en Puerto Vallarta, México en 2014, se simularon los diez ensayos definidos en “Mendoza et al, 2012”; para cada ensayo se monitorearon los valores de derrame, el almacenamiento inicial mínimo registrado y la energía promedio generada. Las Tablas 5.10 y 5.11, muestran el resumen de los datos publicados en el artículo del 2014, se resaltan los mínimos valores para los derrames y los máximos para energía promedio generada.

Tabla 5.10. Resultados obtenidos para la presa La Angostura (Congreso, 2014)

La angostura			
Ensaye	Derrame (Mm ³)	Almacenamiento inicial mínimo registrado (Mm ³)	Energía promedio generada (GWh/quincena)
a	6268.34	6870.90	278.94
b	2752.24	6255.15	279.90
c	2741.37	6135.26	279.90
d	8030.68	6465.56	276.05
e	2585.08	6160.26	279.89
f	1792.18	6025.03	280.23
g	445.44	4554.96	279.76
h	664.55	4605.39	279.73
i	1832.56	5697.77	279.70
j	1871.99	5726.73	279.68

Tabla 5.11. Resultados obtenidos para la presa Malpaso (Congreso, 2014)

Malpaso			
Ensaye	Derrame (Mm ³)	Almacenamiento inicial mínimo registrado (Mm ³)	Energía promedio generada (GWh/quincena)
a	19405.97	6346.42	210.09
b	9727.78	5856.01	209.99
c	9720.68	5886.00	210.04
d	6770.15	5046.82	206.11
e	6157.36	4824.74	206.01
f	4688.26	4362.14	204.49
g	1499.28	2197.30	193.55
h	3008.92	3538.74	197.89
i	7026.21	5140.18	206.35
j	4177.98	3562.70	198.78

En Tabla 5.12, se muestra un resumen de los derrames y la cantidad de energía promedio generada por ambas presas. Se observa que las políticas con mayor energía generada son de los ensayos “a”, “b” y “c”, manteniendo valores altos de derrames; mientras que las políticas con menor derrame son de los ensayos “g” y “h” que al mismo tiempo presentan los menores valores de energía generada.

Tabla 5.12. Resumen de los resultados (Congreso, 2014)

Ensayo	Derrame (Mm ³)	Energía promedio generada (GWh/quincena)
a	25674.31	489.03
b	12480.02	489.89
c	12462.05	489.94
d	14800.83	482.16
e	8742.44	485.90
f	6480.44	484.72
g	1944.72	473.31
h	3673.47	477.62
i	8858.77	486.05
j	6049.97	478.46

En tabla 5.13, se muestra el resumen de los derrames y energía promedio generada por ambas presas, pero con valores ordenados de mayor volumen derramado a menor volumen, coincidentemente los derrames también se encuentran ordenados.

Tabla 5.13. Resumen de los resultados, ordenados por Derrames (Congreso, 2014)

Ensayo	Derrame (Mm ³)	Energía promedio generada (GWh/quincena)
a	25674.31	489.03
d	14800.83	482.16
b	12480.02	489.89
c	12462.05	489.94
i	8858.77	486.05
e	8742.44	485.90
f	6480.44	484.72
j	6049.97	478.46
h	3673.47	477.62
g	1944.72	473.31

La reproducción de los resultados obtenidos en el 2014, incluyó una actualización de los volúmenes de ingresos históricos quincenales y la utilización de las últimas versiones de los programas CAFIT2P y SIM2PCM. En las Tablas 5.14 y 5.15, se muestran los resultados de las simulaciones actuales, resaltando los mínimos valores para los derrames y los máximos para la energía promedio generada.

Tabla 5.14. Resultados obtenidos para la presa La Angostura (2017)

La Angostura			
Ensaye	Derrame (Mm ³)	Almacenamiento inicial mínimo registrado (Mm3)	Energía promedio generada (GWh/quincena)
a	5290.01	6890.64	281.69
b	1244.19	6202.06	283.03
c	1243.48	6189.12	283.03
d	7947.01	6429.76	278.68
e	1049.44	6152.27	282.96
f	256.30	5952.22	283.26
g	0.00	4573.25	282.66
h	0.00	4585.79	282.42
i	294.41	5676.72	282.84
j	336.37	5704.39	282.81

Tabla 5.15. Resultados obtenidos para la presa Malpaso (2017)

Malpaso			
Ensaye	Derrame (Mm ³)	Almacenamiento inicial mínimo registrado (Mm3)	Energía promedio generada (GWh/quincena)
a	22488.47	6345.87	213.05
b	9814.05	5886.56	213.58
c	9813.49	5886.56	213.59
d	5799.97	5013.80	209.67
e	4720.96	4825.76	209.96
f	2882.35	4362.89	208.51
g	597.56	2197.25	197.55
h	2021.42	3502.88	201.79
i	6391.22	5140.93	210.07
j	2436.48	3504.76	202.74

En la Tabla 5.16, se muestra el resumen de los derrames y la cantidad de energía promedio generada por ambas presas en conjunto. Se observa que las políticas con mayor energía generada son de los ensayos “a”, “b” y “c”, manteniendo valores altos de derrames; mientras que las políticas con menor derrame son de los ensayos “g” y “h” que al mismo tiempo presentan los menores derrames.

Tabla 5.16. Resumen de los resultados. (Simulación actual)

Ensayo	Derrame (Mm ³)	Energía promedio generada (GWh/quincena)
a	27778.48	494.74
b	11058.24	496.61
c	11056.97	496.62
d	13746.98	488.35
e	5770.40	492.92
f	3138.65	491.77
g	597.56	480.21
h	2021.42	484.21
i	6685.63	492.91
j	2772.85	485.55

En la tabla 5.17, se muestra el resumen de los derrames y energía promedio generada por ambas presas en conjunto, pero con valores ordenados de mayor volumen derramado a menor volumen, coincidentemente la energía también se encuentra ordenada.

Tabla 5.17. Resumen de los resultados, ordenados por Derrames (simulación actual)

Ensayo	Derrame (Mm ³)	Energía promedio generada (GWh/quincena)
a	27778.48	494.74
d	13746.98	488.35
b	11058.24	496.61
c	11056.97	496.62
i	6685.63	492.91
e	5770.40	492.92
f	3138.65	491.77
j	2772.85	485.55
h	2021.42	484.21
g	597.56	480.21

La actualización de los volúmenes de ingresos quincenales provocó un aumento en la energía promedio generada, esto parece lógico: al incrementar los años de análisis, también lo hace el volumen ingresado a la cuenca, el volumen egresado por la obra toma y aunado a ello, la energía generada; sin embargo aun con este cambio la tendencia que se tenía en las simulaciones pasadas no se pierde, tal como lo muestran las Figuras 5.5 y 5.6.

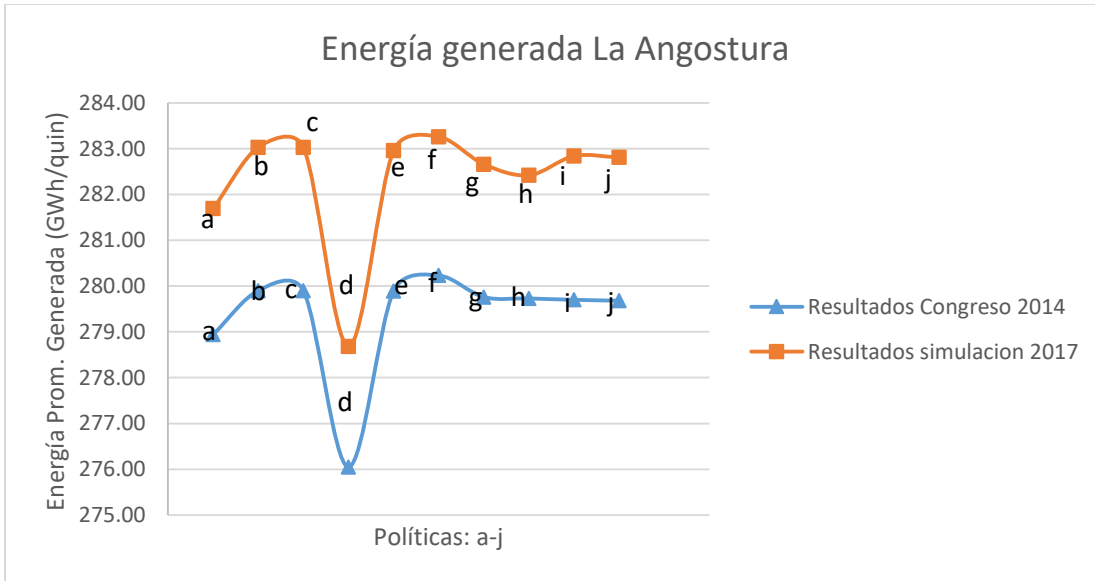


Figura 5.5. Diferencias entre energía promedio generada, La Angostura (Valores publicados en 2014 y obtenidos actualmente)

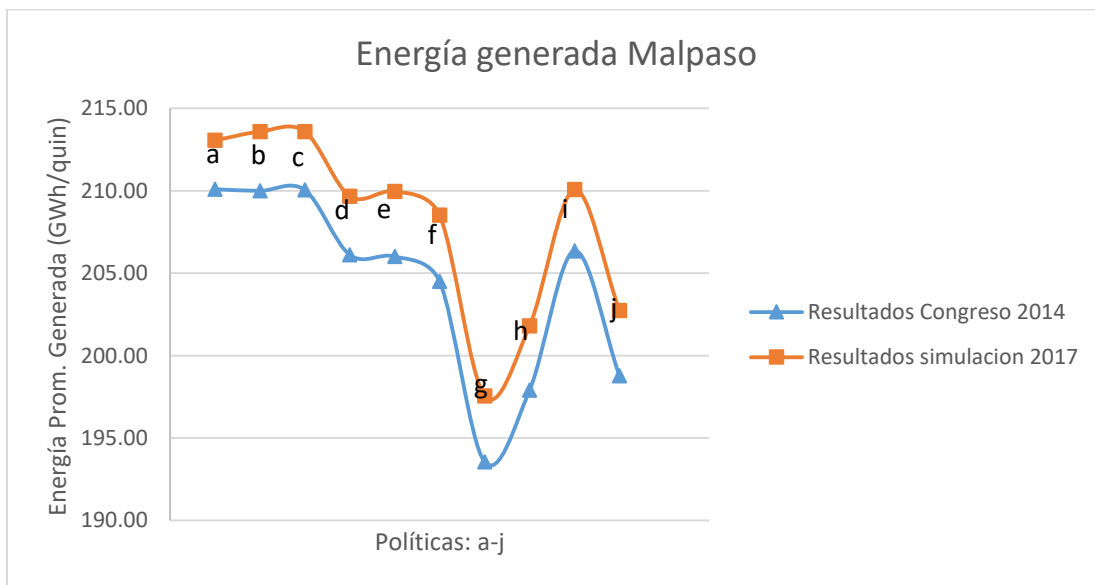


Figura 5.6. Diferencias entre energía promedio generada, Malpaso (Valores publicados en 2014 y obtenidos actualmente)

En las Figura 5.7 y 5.8, se puede notar que los derrames disminuyeron de manera general, pero conservando el régimen que se tenía en cada simulación.

El descenso en los derrames se puede deber a múltiples razones, entre las que destacan: la utilización de diferentes versiones de los programas (ajustes en los programas de optimización y de simulación), la actualización de los ingresos quincenales: ocupando valores más precisos y evitando en lo posible valores de ingresos mensuales divididos entre dos.

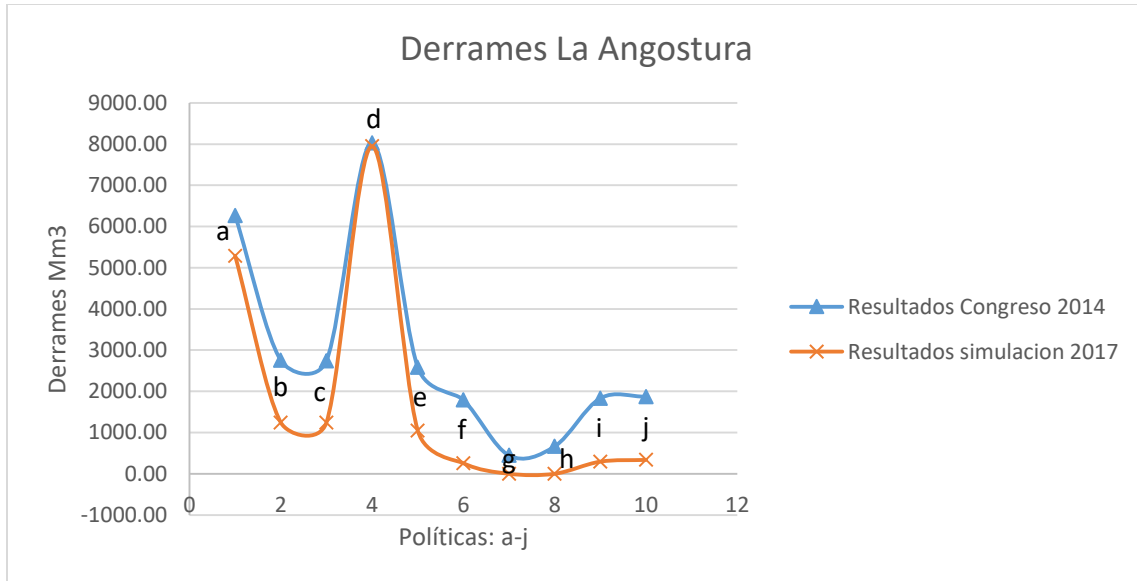


Figura 5.7. Diferencias entre derrames para la presa La Angostura (Valores publicados en 2014 y obtenidos actualmente)

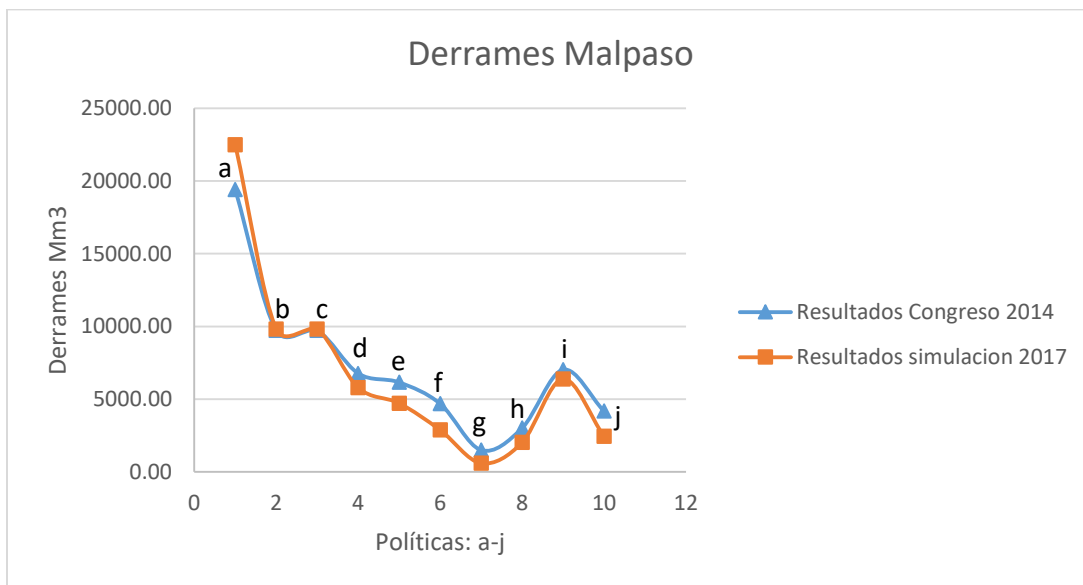


Figura 5.8. Diferencias entre derrames para la presa Malpaso (Valores publicados en 2014 y obtenidos actualmente)

5.2.1 Política óptima

Las diferencias en los archivos de datos utilizados para las simulaciones actuales son notables cuando se observan los resultados generados en cada una de ellas, pues los derrames y la energía promedio varía de un ensayo a otro.

Para elegir aquella simulación en la que se tenga la mejor política óptima, esto es: en la que se genere la mayor cantidad de energía con los menores derrames, se propuso introducir un “índice” que relacionara los volúmenes derramados (Mm^3) con la energía promedio generada (GWh/quincena).

El valor “índice”, se obtiene de dividir el Derrame total de cada ensaye (Derrame de La Angostura más derrame de Malpaso) entre la energía promedio por quincena correspondiente (Energía de La Angostura más la energía de Malpaso); en la Tabla 5.18, se muestra el resumen de los valores obtenidos y el “índice” de cada simulación.

Tabla 5.18. Resumen de los resultados, con los respectivos índices asociados.

ensaye	Derrame (Mm^3)	Almacenamiento inicial mínimo registrado (Mm^3)	energía promedio generada (GWh/quincena)	Índice (Mm^3/GWh)
a	27778.48	13236.51	494.74	56.15
b	11058.24	12088.62	496.61	22.27
c	11056.97	12075.68	496.62	22.26
d	13746.98	11443.56	488.35	28.15
e	5770.40	10978.03	492.92	11.71
f	3138.65	10315.11	491.77	6.38
g	597.56	6770.50	480.21	1.24
h	2021.42	8088.67	484.21	4.17
i	6685.63	10817.65	492.91	13.56
j	2772.85	9209.15	485.55	5.71

Un valor índice alto indica que para incrementar la generación de energía en GWh se requiere aumentar los almacenamientos mínimos, lo que conlleva a la presencia de derrames altos, por el contrario un valor índice bajo señala que por cada GWh se presentan derrames bajos; en primera instancia se podría decir que un valor índice bajo es más eficiente por tener menores derrames asociados a la energía generada, sin embargo se tiene la limitante de que los índices pequeños presentan una baja cantidad de energía generada, mientras que índices mayores presentan valores más altos de energía generada (GWh).

En la tabla 5.19, se muestra los resultados de los ensayos ordenados de mayor a menor de acuerdo al índice de cada simulación, mientras que los derrames se encuentran en orden descendente.

Tabla 5.19. Resumen de resultados ordenados según su índice.

ensaye	Derrame (Mm ³)	Almacenamiento inicial mínimo registrado (Mm ³)	energía promedio generada (GWh/quincena)	Índice (Mm ³ /GWh)
a	27778.48	13236.51	494.74	56.15
d	13746.98	11443.56	488.35	28.15
b	11058.24	12088.62	496.61	22.27
c	11056.97	12075.68	496.62	22.26
i	6685.63	10817.65	492.91	13.56
e	5770.40	10978.03	492.92	11.71
f	3138.65	10315.11	491.77	6.38
j	2772.85	9209.15	485.55	5.71
h	2021.42	8088.67	484.21	4.17
g	597.56	6770.50	480.21	1.24

En las Figuras 5.9 y 5.10, se muestran la comparación entre los derrames totales y la energía promedio generada para cada ensayo, los valores están ordenados de acuerdo al índice de cada política.

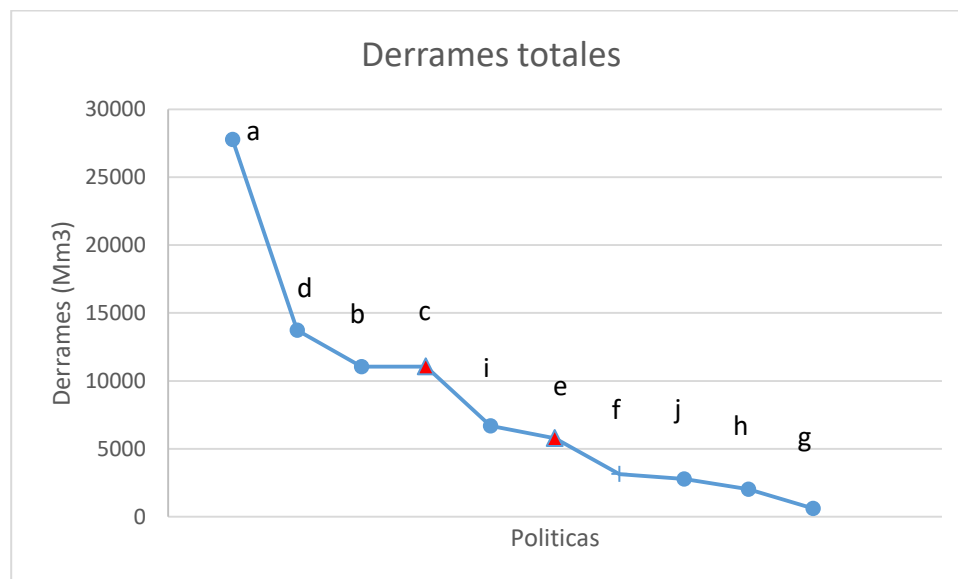


Figura 5.9. Derrames Totales de cada política (Valores obtenidos actualmente)

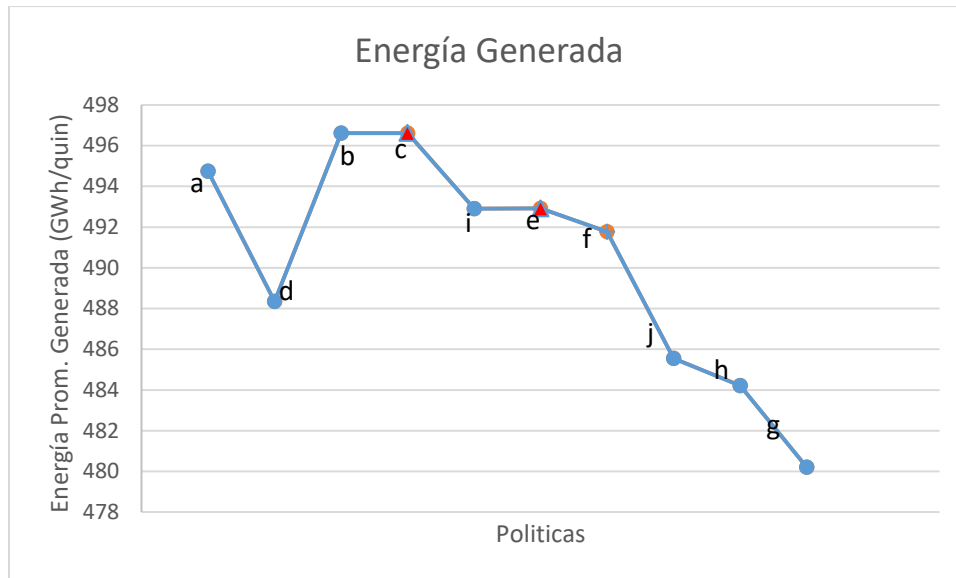


Figura 5.10. Energía Promedio Generada Total de cada política (Valores obtenidos actualmente)

El análisis de las políticas se realizó por partes, como a continuación se describe:

Al comparar las primeras 4 políticas (a, d, b, c) se observa que los mejores resultados son los del ensayo “c”, ya que generan la mayor cantidad de energía promedio quincenal con los menores derrames; esto mismo ocurre al comparar las políticas: “i” con “e”, resultando el ensayo “e” con menores derrames y la mayor cantidad de energía (GWh/quincenal).

Ahora bien, entre las políticas: “c” y “e”, el índice se reduce aproximadamente un 50%, debido a que los derrames se reducen en la misma proporción, aún cuando la energía promedio generada solo lo hace levemente (3.7 GWh/quincena); esto permite justificar que la política “e” sea mejor que la “c”.

Comparando los ensayos “e” con “f”, resulta que sacrificado poco más de 1 GWh/quincena se logran reducir más de 2500 Mm³ de derrames con la política “f”, por lo que se deduce que el ensayo “f” es más óptimo que “e” y por extensión, también lo es por sobre las demás políticas (a, b, c, d, e, i).

Finalmente se contrastó la política “f” con las restantes políticas: j, h, g, observando que la reducción en los derrames ya son menores (en la figura 5.19 se puede ver un ligero asentamiento), mientras que la energía generada disminuye en gran medida (en la figura 5.10 se notan pendientes grandes), por lo que se concluye que los resultados del ensayo “f” la convierten en la mejor política.

5.2.2 Optimización de los beneficios.

A partir de la mejor política justificada anteriormente (política f), se pretende aumentar el beneficio generado es decir: obtener una mayor cantidad de energía con menos derrames, para ello se aplicaran variaciones en los coeficientes que afectan al DELVOL para una o ambas presas (La Angostura y Malpaso).

Los coeficientes se encuentran en el doceavo registro (renglón) del archivo DATOSGQ que utiliza el programa SIM2PCM, las simulaciones para el Congreso Nacional de Hidráulica del 2014, utilizaban los valores 0.75 y 1.5, de la misma manera que las simulaciones actuales mostradas anteriormente lo hicieron.

Se proponen que uno o ambos coeficientes aumenten o disminuyan, según las combinaciones que se muestran a continuación:

- 0.74 1.4
- 0.74 1.5
- 0.75 1.4
- 0.76 1.5
- 0.75 1.6
- 0.76 1.6

En la Tabla 5.20, se muestra los resultados obtenidos con los coeficientes originales, propuestos para el XVIII Congreso Nacional de Hidráulica.

Tabla 5.20. Resultados de simulación, coeficientes 0.75 1.5

Ensayo "f"	Derrame (Mm ³)	Almacenamiento inicial mínimo registrado (Mm ³)	Energía promedio (GWh/quincena)
La Angostura	256.30	5952.22	283.26
Malpaso	2882.35	4362.89	208.51
Totales	3138.65	10315.11	491.77

En las Tablas 5.21 a 5.26, se muestran los resultados de las nuevas simulaciones de los vasos después de variar los coeficientes.

Tabla 5.21. Resultados de simulación, coeficientes 0.74 1.4

Ensayo "f"	Derrame (Mm ³)	Almacenamiento inicial mínimo registrado (Mm ³)	Energía promedio (GWh/quincena)
La Angostura	264.54	5941.20	283.25
Malpaso	2905.80	4350.87	208.53
Totales	3170.34	10292.07	491.78

Tabla 5.22. Resultados de simulación, coeficientes 0.74 1.5

Ensayo "f"	Derrame (Mm ³)	Almacenamiento inicial mínimo registrado (Mm ³)	Energía promedio (GWh/quincena)
La Angostura	264.48	5950.19	283.26
Malpaso	2881.86	4365.51	208.50
Totales	3146.34	10315.70	491.76

Tabla 5.23. Resultados de simulación, coeficientes 0.75 1.4

Ensayo "f"	Derrame (Mm ³)	Almacenamiento inicial mínimo registrado (Mm ³)	Energía promedio (GWh/quincena)
La Angostura	256.36	5943.19	283.26
Malpaso	2906.30	4348.19	208.53
Totales	3162.66	10291.38	491.79

Tabla 5.24. Resultados de simulación, coeficientes 0.76 1.5

Ensayo "f"	Derrame (Mm ³)	Almacenamiento inicial mínimo registrado (Mm ³)	Energía promedio (GWh/quincena)
La Angostura	248.13	5954.25	283.26
Malpaso	2882.85	4321.00	208.52
Totales	3130.98	10275.25	491.78

Tabla 5.25. Resultados de simulación, coeficientes 0.75 1.6

Ensayo "f"	Derrame (Mm ³)	Almacenamiento inicial mínimo registrado (Mm ³)	Energía promedio (GWh/quincena)
La Angostura	256.24	5961.44	283.26
Malpaso	2858.41	4374.23	208.49
Totales	3114.65	10335.67	491.75

Tabla 5.26. Resultados de simulación, coeficientes 0.76 1.6

Ensayo "f"	Derrame (Mm ³)	Almacenamiento inicial mínimo registrado (Mm ³)	Energía promedio (GWh/quincena)
La Angostura	248.06	5963.44	283.26
Malpaso	2858.90	4371.92	208.50
Totales	3106.96	10335.36	491.76

En la tabla 5.27, se resumen los resultados de los ensayos usando diferentes coeficientes que afectan al Delvol, pero ordenados acuerdo al índice de cada simulación.

Tabla 5.27. Resultados de cada simulación, ordenados por su Índice

Combinación:	Coeficientes Delvol	Derrames Totales (Mm ³)	Energía promedio (GWh/quincena)	Índice (Mm ³ /GWh)
1	0.74 1.4	3170.34	491.78	6.45
2	0.75 1.4	3162.66	491.79	6.43
3	0.74 1.5	3146.34	491.76	6.40
4	0.75 1.5	3138.65	491.77	6.38
5	0.76 1.5	3130.98	491.78	6.37
6	0.75 1.6	3114.65	491.75	6.33
7	0.76 1.6	3106.96	491.76	6.32

En las figuras 5.11 y 5.12, se muestran la comparación entre los derrames totales y la energía promedio generada en cada ensayo, se señala la combinación de coeficientes de acuerdo a la tabla anterior (5.27).

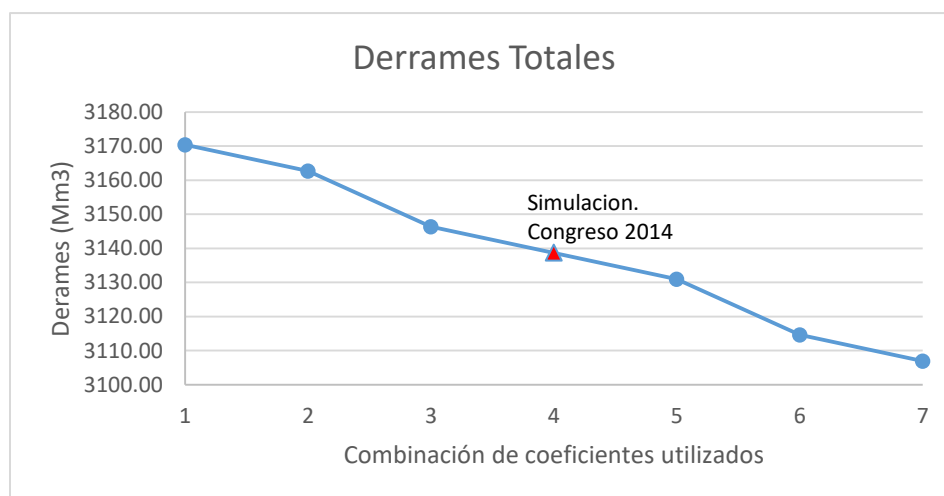


Figura 5.11. Derrames Totales de cada combinación de coeficientes (Valores obtenidos actualmente)

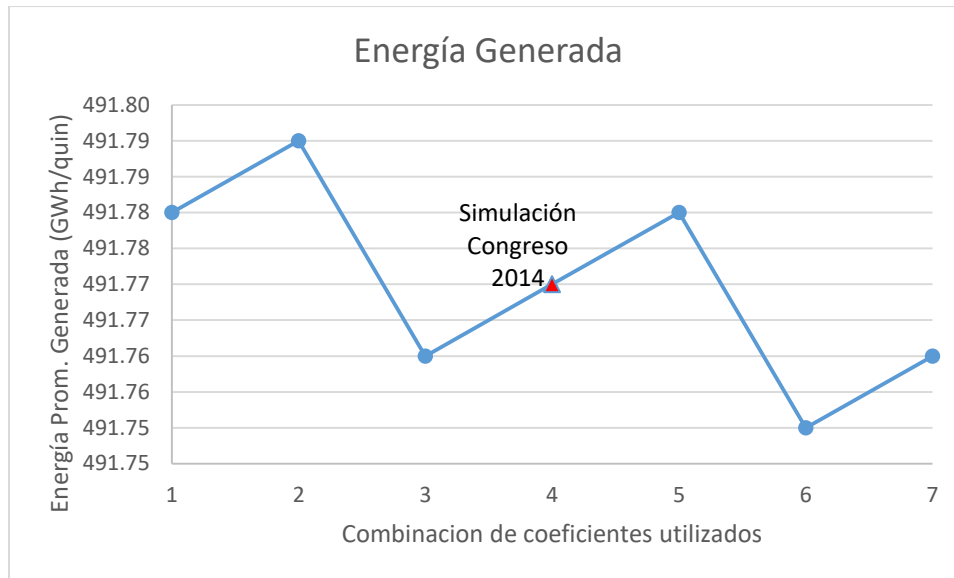


Figura 5.12. Energía Promedio Generada de cada combinación de coeficientes (Valores obtenidos actualmente)

El análisis realizado es similar al utilizado en la sección 5.2.1. y se explica a continuación:

Entre la combinación “2” y “1”; se observa que se genera mayor cantidad de energía a la quincena con menores derrames totales, si se utiliza la combinación “2”, cuyos coeficientes son: 0.75 y 1.4.

Al comparar las combinaciones “3”, “4” y “5”; resulta más eficiente la última (5) ya que se puede notar que se obtiene una mayor cantidad de energía con menores derrames, cabe destacar que la combinación “4” es la que se utilizó para las simulación del Congreso del 2014.

Comparado las últimas dos combinaciones (6 y 7), se tienen los mismos resultados, la combinación “7” resulta ser la mejor, teniendo menores derrames y una mayor cantidad de energía promedio generada.

Finalmente se compararon las combinaciones seleccionadas: 2, 5 y 7 resultando la combinación “7” como la mejor debido a que:

- Entre las combinaciones “2” y “7” basta con sacrificar 0.03 GWh/quincena para disminuir los derrames en 60 Mm³
- Entre las combinaciones “5” y “7” se logran disminuir 30 Mm³ derramados con apenas 0.01 GWh/quincena de diferencia.

5.3 Referencias

- Alegría Díaz, Arallely. 2010 *Política de operación optima del sistema de presas del rio Grijalva. Efectos de la curva guía* (Tesis de Licenciatura)
- Domínguez, Ramón; Mendoza, Rosalva; Contreras, Claudia. 1998. “*Estudio hidrológico de la segunda etapa del análisis integral de la zona baja del río Grijalva*”. (Informe preliminar).
- Mendoza, Rosalva. 2017. “*Manual de los programas de cómputo: CAFIT2P.FOR, OPDIN2VS.FOR, y SIM2PCM.FOR: inclusión de penalizaciones variables por etapa para eventos de derrame, déficit y superar límites de curvas guía para un sistema de 2 presas en cascada. Caso de estudio y aplicación al sistema hidroeléctrico del río Grijalva*”
- Mendoza et al, 2014. “*políticas de operación del sistema Hidroeléctrico del Río Grijalva considerando el efecto de la correlación de volúmenes de ingreso*”. (Artículo para el XXIII Congreso Nacional de Hidráulica)
- Mendoza et al, 2012. “*Influencia de curvas guía en las políticas de operación para el manejo de un sistema Hidroeléctrico*”. (Artículo para el XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica)
- Mendoza et al, “*Influencias de la variación por etapas de los coeficientes de penalización. Aplicación al sistema Hidroeléctrico del río Grijalva para obtener políticas de operación*” (Artículo para la III Jornada de Ingeniería del Agua, La protección contra riesgos hídricos)
- Peña Delgado Francisco, 2010. “*Simulación histórica y sintética de políticas de operación optima de un sistema de presas en cascada en el río Santiago, Nayarit México*” (Tesis)
- Reportes hidrológicos del Departamento Regional de Hidrometría, Comisión Federal de Electricidad.

6 Conclusiones.

La determinación de políticas de operación de un sistema de presas hidroeléctricas que opera en cascada es una tarea compleja; que en primera instancia involucra un problema de optimización para determinar las políticas, pero además, conlleva un análisis exhaustivo de los resultados de las simulaciones del funcionamiento conjunto, con el fin de entregar una solución que resulte de utilidad para los operadores de los embalses.

En este trabajo se identificaron las mejores políticas de operación para el sistema de presas del río Grijalva, esto es: aquellas políticas que produjeran la mayor cantidad de energía eléctrica con los menores derrames posibles, utilizando para tal fin la programación dinámica estocástica y partiendo de los estudios de optimización realizados por el Instituto de Ingeniería en el año 2014 para el XVIII Congreso Nacional de Hidráulica con la diferencia de que se usaron nuevos registros históricos actualizados al año 2013.

Sobre las primeras simulaciones de los resultados presentados en el artículo de Mendoza et al (2014) para el Congreso; el ensaye “d” mostro ser la política óptima más deficiente en contraste a las demás simulaciones, esto se sabe por qué se tiene un valor de energía promedio generada muy bajo pero un alto valor en los derrames; mientras que la política óptima con los mejores resultados durante la simulación conjunta de los embalses fueron los del ensaye “f”, tomando en cuenta el índice que establece la proporción entre los volúmenes totales derramados y la energía promedio generada, así como el análisis de las gráficas de los resultados de las simulaciones.

Con la política “f” y al realizar las modificaciones de los parámetros que afectan al Delvol (volumen que toma en cuenta la correlación entre los escurrimientos de una etapa a otra), para las simulaciones conjuntas realizadas con el registro histórico actualizado se concluyó que los valores de los coeficientes: 0.76 y 1.6, aplicados a las presas La Angostura y Malpaso respectivamente, lograron que los derrames generados disminuyeran considerablemente en comparación con los resultados obtenidos originalmente.

La política de operación más eficiente (ensaye “f” con los coeficientes para el DELVOL igual a 0.76 y 1.6) se muestran de forma matricial en el anexo D: “Matrices estado-extracción”; adicionalmente dicha política se muestra gráficamente en el anexo E: “Curvas de Almacenamiento-Extracción”, mostrando la extracción que debe realizarse en la presa Malpaso dadas las condiciones de almacenamiento inicial que se tengan por cuenta propia y por cuenca de la presa La Angostura.

Anexos.

A: Ingresos quincenales actualizados (2007 a 2013)

En esta tabla solo se muestran los ingresos por cuenca propia que se actualizaron en este trabajo y que corresponden a los años 2007 a 2013.

*Se somborean los valores obtenidos de ingresos mensuales divididos entre dos

Tabla A.1 Ingresos quincenales actualizados (2007 a 2013)

Año	Mes	Quincena	Angostura	Chicoasén	Malpaso	Peñitas
			Volumen (10 ⁶ m ³)	Volumen (10 ⁶ m ³)	Volumen (10 ⁶ m ³)	Volumen (10 ⁶ m ³)
2007	enero	quin1	138.256	47.981	418.786	553.572
2007		quin2	118.360	22.465	190.818	166.150
2007	febrero	quin3	112.353	34.636	166.485	159.742
2007		quin4	101.693	14.185	88.246	89.305
2007	marzo	quin5	59.001	19.479	97.923	85.446
2007		quin6	60.672	35.849	63.771	44.770
2007	abril	quin7	59.362	22.992	35.841	32.324
2007		quin8	80.333	20.687	48.101	19.879
2007	mayo	quin9	73.265	27.381	27.954	15.015
2007		quin10	142.901	29.397	33.377	38.157
2007	junio	quin11	254.035	23.802	-16.174	97.029
2007		quin12	277.724	77.973	66.757	20.419
2007	julio	quin13	176.317	44.057	73.367	42.628
2007		quin14	380.675	93.758	148.891	35.877
2007	agosto	quin15	549.704	74.668	187.057	97.145
2007		quin16	870.547	200.111	382.552	216.320
2007	septiembre	quin17	1058.932	287.723	394.881	208.214
2007		quin18	1119.699	154.157	187.100	111.627
2007	octubre	quin19	895.662	102.290	528.737	373.046
2007		quin20	1347.144	318.383	1352.943	882.738
2007	noviembre	quin21	512.180	132.556	558.181	249.208
2007		quin22	307.105	71.266	178.396	78.101
2007	diciembre	quin23	210.962	47.874	93.157	-326.016
2007		quin24	147.351	46.870	57.713	-22.715
2008	enero	quin1	126.891	30.512	193.846	220.847
2008		quin2	122.233	30.321	106.731	227.792
2008	febrero	quin3	109.554	30.994	62.611	524.578
2008		quin4	77.915	22.753	68.248	116.857
2008	marzo	quin5	49.469	20.004	44.394	251.844
2008		quin6	146.604	6.950	46.878	15.797

Tabla A.1 Ingresos quincenales actualizados (2007 a 2013) (Continuación)

Año	Mes	Quincena	Angostura	Chicoasén	Malpaso	Peñitas
			Volumen (10 ⁶ m ³)	Volumen (10 ⁶ m ³)	Volumen (10 ⁶ m ³)	Volumen (10 ⁶ m ³)
2008	abril	quin7	35.370	19.031	69.491	47.514
2008		quin8	35.839	28.390	55.167	69.369
2008	mayo	quin9	36.661	27.139	13.872	-35.586
2008		quin10	160.735	51.851	133.432	100.530
2008	junio	quin11	632.833	142.104	542.372	153.518
2008		quin12	696.895	162.306	225.736	28.616
2008	julio	quin13	1348.594	369.817	490.474	186.083
2008		quin14	1182.433	291.456	339.690	112.050
2008	agosto	quin15	1146.816	289.138	247.059	124.964
2008		quin16	1006.223	286.177	94.260	113.232
2008	septiembre	quin17	1107.115	269.602	205.975	145.131
2008		quin18	1673.284	239.641	863.316	709.332
2008	octubre	quin19	1498.589	208.011	498.320	225.685
2008		quin20	881.864	135.990	348.480	180.034
2008	noviembre	quin21	408.392	74.867	135.314	120.204
2008		quin22	271.333	79.293	181.564	56.452
2008	diciembre	quin23	219.586	49.880	113.448	47.706
2008		quin24	159.769	41.384	135.789	64.246
2009	enero	quin1	166.135	37.598	123.198	152.527
2009		quin2	102.801	42.824	118.598	116.726
2009	febrero	quin3	98.152	27.203	99.189	42.204
2009		quin4	118.090	35.475	61.271	37.603
2009	marzo	quin5	91.588	33.111	133.732	112.773
2009		quin6	97.880	20.281	59.514	21.825
2009	abril	quin7	79.537	28.315	52.451	55.422
2009		quin8	47.363	35.756	45.899	61.378
2009	mayo	quin9	120.458	30.153	33.170	28.685
2009		quin10	166.036	52.197	101.031	18.285
2009	junio	quin11	251.570	41.135	94.373	94.370
2009		quin12	429.524	132.122	220.946	135.150
2009	julio	quin13	430.825	138.025	255.084	89.520
2009		quin14	208.516	51.479	79.893	56.158
2009	agosto	quin15	229.508	69.905	128.201	116.277
2009		quin16	571.926	94.406	202.989	196.164
2009	septiembre	quin17	400.193	90.673	196.221	117.081
2009		quin18	842.534	65.185	286.403	167.278
2009	octubre	quin19	443.167	113.643	183.990	109.039
2009		quin20	322.698	78.516	220.610	199.174
2009	noviembre	quin21	716.051	96.252	555.676	603.264
2009		quin22	297.452	40.311	173.919	136.902

Tabla A.1 Ingresos quincenales actualizados (2007 a 2013) (Continuación)

Año	Mes	Quincena	Angostura	Chicoasén	Malpaso	Peñitas
			Volumen (10 ⁶ m ³)	Volumen (10 ⁶ m ³)	Volumen (10 ⁶ m ³)	Volumen (10 ⁶ m ³)
2009	diciembre	quin23	163.979	31.853	77.099	124.324
2009		quin24	226.110	46.931	89.255	109.197
2010	enero	quin1	119.738	28.860	265.806	262.711
2010		quin2	100.080	23.333	104.110	111.595
2010	febrero	quin3	88.203	23.448	88.260	86.482
2010		quin4	51.806	22.559	71.497	64.851
2010	marzo	quin5	43.020	9.587	65.082	21.267
2010		quin6	68.013	8.556	70.388	81.850
2010	abril	quin7	68.892	28.403	66.060	47.287
2010		quin8	80.844	18.638	55.724	48.399
2010	mayo	quin9	77.386	18.699	44.162	16.691
2010		quin10	370.357	14.378	49.797	11.708
2010	junio	quin11	331.186	41.321	73.994	10.773
2010		quin12	722.536	248.406	507.807	270.544
2010	julio	quin13	868.115	237.784	239.731	40.405
2010		quin14	1626.538	513.243	723.700	292.793
2010	agosto	quin15	1836.633	509.572	514.359	203.200
2010		quin16	2970.541	816.176	1517.852	432.423
2010	septiembre	quin17	2000.550	504.515	805.856	105.748
2010		quin18	2609.353	621.583	1351.059	345.328
2010	octubre	quin19	1275.206	271.832	572.085	-290.642
2010		quin20	537.827	178.034	527.343	77.088
2010	noviembre	quin21	333.784	121.261	344.471	104.479
2010		quin22	282.166	102.112	282.783	234.240
2010	diciembre	quin23	206.310	89.863	329.751	271.479
2010		quin24	182.547	75.335	140.423	124.573
2011	enero	quin1	170.234	19.067	228.882	171.093
2011		quin2	155.428	55.193	120.527	59.823
2011	febrero	quin3	53.431	69.294	155.221	251.339
2011		quin4	85.908	37.124	108.269	44.625
2011	marzo	quin5	97.831	44.442	265.965	327.632
2011		quin6	116.141	33.190	88.327	47.112
2011	abril	quin7	35.155	64.376	84.441	4.359
2011		quin8	70.243	30.461	40.356	11.277
2011	mayo	quin9	67.251	48.142	126.520	114.056
2011		quin10	92.794	41.648	41.956	-5.591
2011	junio	quin11	84.455	42.332	26.984	-1.711
2011		quin12	556.328	110.579	175.378	109.423
2011	julio	quin13	987.777	224.597	545.901	220.485
2011		quin14	740.185	252.833	497.964	170.212

Tabla A.1 Ingresos quincenales actualizados (2007 a 2013) (Continuación)

Año	Mes	Quincena	Angostura	Chicoasén	Malpaso	Peñitas
			Volumen (10 ⁶ m ³)	Volumen (10 ⁶ m ³)	Volumen (10 ⁶ m ³)	Volumen (10 ⁶ m ³)
2011	agosto	quin15	858.827	240.418	338.260	107.388
2011		quin16	1296.406	468.171	806.366	249.579
2011	septiembre	quin17	1405.883	372.065	573.237	142.418
2011		quin18	2045.401	682.684	1036.635	272.766
2011	octubre	quin19	2238.212	537.604	937.607	363.461
2011		quin20	1449.324	343.953	826.580	333.988
2011	noviembre	quin21	511.552	155.629	336.415	166.045
2011		quin22	316.706	110.666	231.060	119.873
2011	diciembre	quin23	260.637	82.114	178.821	106.169
2011		quin24	148.626	100.861	197.112	189.494
2012	enero	quin1	154.309	74.967	271.236	226.615
2012		quin2	118.360	50.924	159.827	75.479
2012	febrero	quin3	90.491	68.343	134.937	77.572
2012		quin4	127.131	42.152	136.686	99.260
2012	marzo	quin5	65.638	41.107	107.072	8.794
2012		quin6	119.549	31.227	122.318	-19.111
2012	abril	quin7	64.290	45.561	60.223	-4.581
2012		quin8	54.734	45.126	53.820	12.126
2012	mayo	quin9	61.429	35.336	85.733	8.277
2012		quin10	276.071	59.231	110.392	88.448
2012	junio	quin11	261.865	69.580	127.476	24.705
2012		quin12	412.565	142.665	241.097	36.091
2012	julio	quin13	359.312	126.600	181.195	38.727
2012		quin14	315.322	110.733	28.641	143.803
2012	agosto	quin15	518.230	343.362	463.529	293.844
2012		quin16	972.947	278.500	277.587	159.716
2012	septiembre	quin17	765.479	248.025	269.950	88.704
2012		quin18	1241.305	238.784	268.356	271.500
2012	octubre	quin19	1267.816	163.218	214.169	169.763
2012		quin20	459.186	109.077	79.516	77.210
2012	noviembre	quin21	257.131	55.561	67.698	41.571
2012		quin22	181.332	51.233	50.550	37.933
2012	diciembre	quin23	148.132	32.632	36.224	35.152
2012		quin24	105.913	46.870	230.554	265.337
2013	enero	quin1	94.242	16.278	172.306	312.026
2013		quin2	117.690	56.749	251.848	244.571
2013	febrero	quin3	86.231	24.282	128.146	114.100
2013		quin4	67.687	25.003	60.238	50.027
2013	marzo	quin5	59.190	217.730	280.750	492.020
2013		quin6	60.620	276.570	329.110	527.270

Tabla A.1 Ingresos quincenales actualizados (2007 a 2013) (Continuación)

Año	Mes	Quincena	Angostura	Chicoasén	Malpaso	Peñitas
			Volumen (10 ⁶ m ³)	Volumen (10 ⁶ m ³)	Volumen (10 ⁶ m ³)	Volumen (10 ⁶ m ³)
2013	abril	quin7*	46.258	18.850	36.526	38.646
2013		quin8*	46.258	18.850	36.526	38.646
2013	mayo	quin9*	87.191	46.868	36.944	56.435
2013		quin10*	87.191	46.868	36.944	56.435
2013	junio	quin11*	496.343	236.891	320.051	131.401
2013		quin12*	496.343	236.891	320.051	131.401
2013	julio	quin13*	825.901	261.607	288.895	128.806
2013		quin14*	825.901	261.607	288.895	128.806
2013	agosto	quin15	445.830	828.230	983.200	815.290
2013		quin16	1388.520	364.860	618.060	1026.670
2013	septiembre	quin17*	1692.218	515.512	857.235	217.205
2013		quin18*	1692.218	515.512	857.235	217.205
2013	octubre	quin19*	1332.814	261.714	420.188	231.879
2013		quin20*	1332.814	261.714	420.188	231.879
2013	noviembre	quin21*	669.798	128.177	561.635	505.217
2013		quin22*	669.798	128.177	561.635	505.217
2013	diciembre	quin23*	351.556	82.640	555.206	483.977
2013		quin24*	351.556	82.640	555.206	483.977

*Los valores sombreados fueron obtenidos de ingresos mensuales divididos entre dos

B: Ingresos quincenales históricos.

En esta tabla se muestran todos los ingresos quincenales utilizados para las simulaciones desde 1959 hasta 2013.

- Tabla para la presa La Angostura.

Muestra los valores entrada por cuenca propia al embalse de La Angostura (Valores en Mm³)

Tabla B.1. Ingresos quincenales históricos de la presa La Angostura (Mm³)

	quin1	quin2	quin3	quin4	quin5	quin6	quin7	quin8	quin9	quin10	quin11	quin12	quin13	quin14	quin15	quin16	quin17	quin18	quin19	quin20	quin21	quin22	quin23	quin24
1959	180.9	165.7	132.8	100.7	108.1	106.8	91	103.6	98.6	116.9	181.3	513.8	285.8	367.1	512.2	553	381.2	496.6	750	1198.1	488	323.1	261	213.4
1960	160.2	144.4	115.1	96.1	90.4	86.9	77.1	83.4	85.4	135.9	542	806	668.5	819.6	673.2	1102.8	1395.2	1570.9	1348.8	987.1	836.6	404	313.4	260.5
1961	200.4	187.4	163	122	124.3	120.3	118.6	93.7	113.1	110.8	286.5	463.6	413.5	573.9	325.3	670.6	674.6	594.8	753.3	495	1053	422.5	272.6	225.9
1962	180.3	160.4	130.3	96.9	99.8	98.6	99.7	103.6	96.2	105.2	251.4	595.7	786.9	351.4	473.4	1105.4	1246.5	2026	1389.2	752.4	484	293.4	224	195.4
1963	156	143.3	118.3	90.2	94.1	90.8	81.3	75.9	85.5	90.4	151.5	242.3	650.7	737.9	541.5	788.4	483.2	1948.8	1267	547.9	521.4	356.3	262.2	220.7
1964	168.5	147.3	113	93.9	88.4	85	74.2	70.1	77	102.5	301.5	462.5	708.9	1187.5	595	575	917.3	1224.8	1256.1	605	365.5	283.7	241.4	233.1
1965	156.9	147.5	117.2	93.7	97.3	90.4	76.6	73.2	78.9	94.9	191.2	578.4	712.6	393.7	802.2	824.1	534	1353.9	1355.2	1252.9	608.1	389.2	279.7	227.1
1966	186.4	175	147.4	114.3	120	112.7	123.5	120.3	135	139.3	183.1	743.3	909.6	782.2	644.4	687.3	1058.2	1240.2	1293.5	1197.8	633.4	378.8	276.1	212.6
1967	181.3	172.9	140.8	105.8	107.8	103.6	97.6	102.5	78.6	90.7	155.6	318.5	242.2	330.1	275.4	597.8	429.3	535.7	967.2	656.1	385	228.7	178.4	169.5
1968	133.5	126.6	103.3	85	81.1	79.7	72.8	65.4	77	173.2	255.4	602.2	694.7	422.1	260	317.4	706.9	1230	677.3	1209.2	456.6	282.3	243.6	200.4
1969	160.4	142	113.6	85.7	88	85.9	82.1	76.5	72.6	147.5	165.9	485.6	1017.2	438.6	1450.3	1733.6	2104.6	2104	1553.2	1127.2	708.5	463.4	356.9	277
1970	220.1	202.4	166.9	126.1	127.7	120.2	101.1	92.5	96.9	116.6	174.6	343.2	666.4	1171.5	1183.7	1047.3	1564.9	1409.3	1401.1	985.5	691.6	437.5	323.3	275.7
1971	213	187.8	151.3	118.2	125.2	117.8	108.1	91.5	96.1	121.3	200.2	212.4	221.9	429.4	837.2	1122.7	1453.8	829.6	1472.9	936.4	466.9	372.1	269.9	225.2
1972	176.9	167.8	139.9	114	107.9	105.2	92.9	92.4	119.8	137.2	337.6	528.8	238.5	653.3	566.7	561.4	533.5	537.8	482.7	379.7	257.7	208.1	152.7	145.9
1973	117.2	110.5	92.9	72.3	75.1	71.6	66.6	63	60.4	85.8	190.4	417.3	319.8	431.5	772.1	1656.6	1625.2	987.1	1587.4	1673.6	699	415.2	354.8	270.4
1974	216.5	216.5	142	142	134	134	105.7	105.7	128.5	128.5	222.5	222.5	365	365	231.5	231.5	706	706	503.5	503.5	169	169	123.5	123.5
1975	80.5	80.5	54.5	54.5	45	45	29	29	65	65	159.5	159.5	270	270	479	479	1072	1072	1040.5	1040.5	480.5	480.5	221	221
1976	167	167	133.5	133.5	134	134	126.5	126.5	154.5	154.5	525	525	750	750	316.5	316.5	508	508	666.5	666.5	279	279	245	245
1977	148.5	148.8	106.6	54.2	82	76.8	107.9	112.9	114.8	184.1	286.2	443.6	283.6	184.1	676.3	484	418.7	1178	505.2	340.5	348.8	177.4	140.7	225.9
1978	209.2	183.2	79.7	88.8	101.7	98.9	76.7	62.3	201	277.4	310.2	412.4	561.4	857.3	563	1021.5	1267.5	1078.9	923.5	676.1	342.9	206.8	189.4	240.1
1979	242.3	190.5	131	107.4	111.7	70.7	93.3	115.9	137	203.7	372.6	458	577.3	650.3	528	1052.8	1823.2	1805.3	1056.9	633	428	353.8	290.8	255.8
1980	191.6	156.5	139.3	122.2	109.8	109.8	171.4	131.4	141.6	181.8	204.7	367.2	210.1	572	755.6	642.4	898.1	1757.3	1317.1	531.2	333.6	250.5	206.2	191.5

Revisión y actualización de las políticas de operación del sistema de presas del río Grijalva

Tabla B.1. Ingresos quincenales históricos de la presa La Angostura (Mm3) (Continuación)

1981	173.2	139.5	100.6	97.4	125.7	136.7	194	173.4	117.9	143.1	285.7	1150.2	950.7	989.4	830.2	1558	1159.4	2038.4	1890.4	923.4	559.7	349.7	268	309.3
1982	90.1	159.5	150.7	112.5	125	104.2	120.7	94.2	119.8	421.4	503.9	967.3	369.9	611.9	412.4	548.7	600.2	1488.7	1625.9	719.9	427.2	253.9	219	215.6
1983	134.3	150.2	143.2	152.1	137	155.1	97.1	122.6	82.9	118.3	274.6	438.5	480.6	655.7	779.2	550.2	1758.2	1170.3	519.9	559.2	371.9	257.8	228.4	179
1984	129	129.9	114.5	81.2	141.1	102.1	67.3	140.3	211	445	697.1	814.9	850.4	1116.3	1370.8	1188.5	1876.5	2095.6	1308.1	593.9	358.3	274.1	265.1	211.6
1985	168.7	147	123.8	115.4	128.5	126.6	79.3	116.7	150.9	223	376.6	378.2	528.7	608.9	646	1384.1	689.8	1344.6	967.3	531.5	511.3	264.1	153.3	179.5
1986	174.3	162.3	105.6	83.4	99	69.2	78.2	177.7	92.4	279.9	377	499.8	723.6	350.1	342.9	811.7	805.1	420.6	475.1	317.1	272.8	197.1	156.1	137.4
1987	102.3	159.5	104.2	48.4	59.1	31.1	36.2	90.3	160.3	176.2	236.9	394	462.9	850.1	868.6	411.7	998.6	899.7	630.2	279.2	165.4	160.2	123.8	98.4
1988	86.1	112.1	112.9	107.6	40.5	56.7	70.5	128.6	100	101.5	257.9	668.1	730.2	681.9	1070.9	1514	1699.6	1159.1	1457.1	548.4	344.7	287.7	199.5	180.7
1989	123.7	100.9	85	119.1	106	74.5	118.8	86.8	110.6	154.8	204.8	636.2	326.7	430.9	477.4	1166.2	1061.1	1998	1899.6	1089.1	446	325.1	261	137.1
1990	184.9	174	120.5	112.6	114.8	79.7	86.7	125.2	129.2	149	263.4	488.8	609.6	497.7	377.3	423.6	860.5	978.6	719.5	471.9	247.4	320	307.8	229.8
1991	255.7	115	121.1	76.4	98	96.8	96.2	48	94.7	125.4	220.1	463.1	518	142.9	286.5	257	346.8	768.1	1025.7	533.9	274.7	152.7	249.4	162.8
1992	118.5	84.4	110	72.3	69.7	98	74	81.7	18.8	100.1	239.9	559.1	550	366.1	567.7	674.9	774.9	1230.4	970.6	426.9	322.4	227.9	159.7	149.7
1993	130.4	132.9	53.8	78.6	69.4	90.6	68.9	57.9	86.8	116.4	162.5	551.5	880.3	252.7	384.8	1292	1120.7	1240.2	1136	556	466.7	236.2	162.8	107.6
1994	100.2	110.7	114	62.8	144.1	92.6	64.5	68.2	86.2	124.8	217.4	173.4	146.3	162.6	376.7	439.1	293.6	700.6	773.4	372.7	197.3	128.9	67.5	49.7
1995	82.3	61.9	44.8	53	60.5	81.1	88.5	111.2	139	157.6	184.8	1022.8	565.4	897.1	970.8	1283.2	2134.6	1878.3	923.7	683.8	386.7	311.8	193.9	207.1
1996	112.9	164.8	94.6	106.3	85.5	122.4	65.9	87.9	123.9	288.8	623.9	850.3	833.3	732	913.3	1125.7	921.7	1048.5	1384.7	655.6	371.6	308.1	197.9	125.1
1997	148.3	140.2	128.3	99.2	127.4	77.5	69.2	106.3	54.6	196.4	255.1	280.1	605.6	295.9	302.7	337.9	1108.7	1224.2	1579.7	544.4	365.1	366	312.8	175.5
1998	171.7	117.1	106.3	116.6	99.4	77.4	99	46.1	66.3	70.2	100.2	304.8	257.2	566.5	459.8	770.9	2223.7	873.9	915.2	988.6	930.4	512.3	252.3	205.6
1999	157.9	127.3	120.9	100.2	113.2	108.6	86	87.7	130.8	125.7	357	827.3	868.3	633.3	745.2	1027.9	1551.9	2289.1	2213.6	1680.5	702.4	518	558.4	212.9
2000	163.7	126.3	123.8	70	47.6	52	46.1	84	14.6	422.6	1117.8	732.1	359.8	307.2	868.9	625	1236.2	1551.4	1083.8	535.4	310	205.8	156.9	153.8
2001	114.7	101.5	88.5	105.8	108.1	79	65.1	55.1	86.2	176.8	263.2	161.9	239.4	343.3	468	571.7	678.9	1039.6	813.1	753.9	290.7	190.2	96.2	118.6
2002	103.6	84.5	32.5	50	16.5	48.8	76.3	82.1	64.1	131.9	197.9	355.2	305.4	259.3	249.2	286.9	695.7	790.4	1314	402.6	288	209.7	151.1	122
2003	139.9	63.9	24.4	60.4	101.2	49.3	71.4	56.5	52.1	102	236.1	467.2	325	406.3	330.4	660.5	731.9	1334.7	1078.3	573.9	357.4	285.6	181.4	139.7
2004	113.2	95.6	62.1	43	26.8	25.7	29.7	36.1	26.1	186.7	520.1	251.1	246.2	440.9	318.9	259.4	613.6	795.5	1172	636.6	240.4	143.7	85.8	76.9
2005	187.6	48.7	39.6	29.1	31.8	29.8	28.7	3.9	36.3	65.7	135.9	1127.2	971.4	1071.7	395.8	1334.3	903.5	1384	4064.4	669.8	345.7	227.5	201.9	146.9
2006	148.5	119.7	79.3	86.5	42.7	56.6	76.6	58.4	79.2	236.1	835.4	874.5	479.7	1159.2	672.4	594.4	1113.8	819.9	1044.5	829.2	448.4	268.6	236.3	200.7
2007	138.3	118.4	112.4	101.7	59.0	60.7	59.4	80.3	73.3	142.9	254.0	277.7	176.3	380.7	549.7	870.5	1058.9	1119.7	895.7	1347.1	512.2	307.1	211.0	147.4
2008	126.9	122.2	109.6	77.9	49.5	146.6	35.4	35.8	36.7	160.7	632.8	696.9	1348.6	1182.4	1146.8	1006.2	1107.1	1673.3	1498.6	881.9	408.4	271.3	219.6	159.8
2009	166.1	102.8	98.2	118.1	91.6	97.9	79.5	47.4	120.5	166.0	251.6	429.5	430.8	208.5	229.5	571.9	400.2	842.5	443.2	322.7	716.1	297.5	164.0	226.1
2010	119.7	100.1	88.2	51.8	43.0	68.0	68.9	80.8	77.4	370.4	331.2	722.5	868.1	1626.5	1836.6	2970.5	2000.5	2609.4	1275.2	537.8	333.8	282.2	206.3	182.5
2011	170.2	155.4	53.4	85.9	97.8	116.1	35.2	70.2	67.3	92.8	84.5	556.3	987.8	740.2	858.8	1296.4	1405.9	2045.4	2238.2	1449.3	511.6	316.7	260.6	148.6
2012	154.3	118.4	90.5	127.1	65.6	119.5	64.3	54.7	61.4	276.1	261.9	412.6	359.3	315.3	518.2	972.9	765.5	1241.3	1267.8	459.2	257.1	181.3	148.1	105.9
2013	94.2	117.7	86.2	67.7	59.2	60.6	46.3	46.3	87.2	87.2	496.3	496.3	825.9	825.9	445.8	1388.5	1692.2	1692.2	1332.8	1332.8	669.8	669.8	351.6	351.6

- Tabla para la presa Malpaso

Muestra los valores entrada por cuenca propia al embalse de Malpaso más los ingresos por cuenca propia al embalse de Chicoasén (Valores en Mm³)

Tabla B.2. Ingresos quincenales históricos de la presa Malpaso (Mm3)

	quin1	quin2	quin3	quin4	quin5	quin6	quin7	quin8	quin9	quin10	quin11	quin12	quin13	quin14	quin15	quin16	quin17	quin18	quin19	quin20	quin21	quin22	quin23	quin24
1959	327.2	327.2	272.2	272.2	193.1	229	243.7	264.1	118.7	109.7	193.3	500.7	183.4	209.4	285	437.5	328.9	390.1	459.7	1257.1	563.2	627.5	252.3	235.9
1960	218.9	250.4	163.8	141.4	161.6	127.6	108.6	138	100.5	84.6	31.4	276.5	265.4	482.1	222	898.6	747.5	643.5	199.2	392.5	612.8	283.2	341	248.8
1961	400.4	299.2	223.2	154.5	232.8	135.3	119.3	121.2	164.4	94.7	48.3	317.5	247.5	306.4	399.6	362	431.4	229.8	623.2	682.1	980.9	304.9	170.8	201.9
1962	253.2	209.5	136.3	92.8	172.1	155.3	220.5	186.3	120.6	121.2	84.6	335.8	655.7	320.2	149.4	507.4	700.5	1466	977.8	505.2	374.8	219.7	175.7	155.3
1963	151.3	228.3	226.7	121.2	136.6	136.5	83.5	73.3	72.1	76.6	96.6	102.9	366.5	896.1	354.1	354.1	349.5	2367.6	1156.1	377.2	342	386.8	308.8	252.3
1964	348	243	184.5	141.9	126.3	134.2	142.8	89.1	76.5	121.9	196.8	469	513.2	966.2	437.6	423.9	806.1	663.8	845.1	302.4	141.1	222.3	512.7	306.8
1965	174	342.3	186.6	238.9	136.4	167.6	101.4	103.8	123.8	110.1	133.4	400.9	497.8	202.6	365	543	386	465.3	1168.3	1359.5	581.4	272.7	332.9	361.6
1966	282.6	247	254.4	197.4	207.5	207.8	218.5	232.8	229.8	241.3	156.9	602.6	743.3	483.8	469.3	525	1225.2	1731.2	1339.7	780	418.7	314.2	270.7	265.9
1967	275.4	253.8	216.6	160.9	162.3	153.6	142.7	155.8	121.3	136.1	113.4	244.9	189	193.7	150.8	441.4	312.1	395.7	947	563.2	342.8	290.7	240.5	217.2
1968	232.9	231.8	194	159.2	151.6	145.5	130.1	113.3	128	226.2	95	431.8	479.3	378.2	204.4	250.7	304.9	1264.7	540.6	1029.3	439	312.9	267.8	233.4
1969	251.6	221.1	167.6	134.9	138	134.3	128.6	116.3	110.9	176.5	60.3	131.2	451.3	275.2	669	804.1	1529.3	1601.4	866.4	360.8	365.3	349.7	314.1	306
1970	321	297.7	235	173.8	174	169.8	133.7	124.9	123.2	143.9	96.6	156.2	223.9	555.6	742.4	428.5	1799.9	1732.1	1216.9	517.3	406.3	265.6	253.5	266.9
1971	315.1	294.1	247.3	189.4	193.2	175.1	139.1	124.2	113.3	171.2	130.5	168	148.6	265.9	447.7	417.1	1339	341	936.3	676.8	379.6	308.5	259.1	214.5
1972	224.2	216	183.2	150.6	141	140.1	122.1	121.7	142	192.9	179.6	264	151.6	425.2	316.3	295.2	301.6	189.5	401.1	312.5	226.6	199.8	183.4	190
1973	175.4	163.2	136	103.8	103.9	102.7	98.4	91.1	90.6	116.6	123.1	243.7	256.7	235.5	529.8	1405.9	2109.9	608.8	1130.1	1194.6	537.5	344.7	302.1	250.7
1974	125.7	125.7	153.4	153.4	104	104	166.8	166.8	24.5	24.5	65.6	65.6	69.1	69.1	400	400	95.5	95.5	54.7	54.7	108	108	69.1	69.1
1975	165.5	165.5	101	101	82.5	82.5	74	74	100.5	100.5	124	124	159	159	253.5	253.5	603.5	603.5	632.5	632.5	200	200	77	77
1976	285.5	285.5	172	172	106	106	102.5	102.5	50.5	50.5	101	101	357	357	157	157	312.5	312.5	363.5	363.5	332	332	324.5	324.5
1977	87.9	102.4	163.3	107.2	122.3	90.4	59.1	61.3	65.9	7	39	148.3	122.9	180.4	452.2	287.8	170.8	399.5	381.3	134.7	488	155.6	186.7	351.4
1978	219.8	96.6	158	82.3	47.9	154.4	54.7	10.2	-20	18.2	154.3	238.5	329.8	755.1	229.9	324.1	456.4	647.6	463.2	458.4	337.1	140.5	333.9	204.7
1979	190	167.8	111.1	151.7	58.8	43.4	69.6	55.5	9.8	30.3	292.2	128.6	215.1	138.6	118	794.8	1134.2	1229.6	406.1	287.6	326.9	291.2	466.5	455.4
1980	49.9	172.1	280.4	121.6	217.5	105.1	62.9	48.2	-103.1	-190.8	-250.1	-72.6	-102.3	555.2	353.2	441.6	376.3	2134	742.7	413.3	336.8	343	227.9	205.5
1981	100.4	105	201.7	285.8	68.2	65.2	62.5	26.7	75.4	188.1	163.9	789.8	903	884	384.2	1261.3	569	959.4	847.8	444.3	392.8	178	105.5	148.7
1982	111.6	84.6	164.4	109.9	87.9	19.3	71.8	110.2	58.4	217.5	195.3	475.9	100.7	319.9	202.8	117.8	317.7	867.2	713.5	316.8	440.5	165.4	116.6	318.6
1983	348.5	68.9	97.2	60.3	59.7	71.8	-2.3	91.6	30	42.1	93.8	119.9	291.5	293.5	322.3	281.7	1151.1	1024.5	232.9	436	279	94.3	112.7	272.6
1984	142.4	267.1	181.6	90.1	86.2	133.2	79	66.7	142.7	269.7	436.9	501.4	619	458.9	793.6	424.5	1184.5	1128.9	498.1	166.6	110.9	136.6	262.8	164.2
1985	165.5	182.1	228.6	116.7	99.4	177.9	115.2	50.1	83.3	88.7	239	326.2	267.4	384.8	337.2	851.8	380.6	577.1	492.9	118.3	133.6	38.5	228.2	266.1

Revisión y actualización de las políticas de operación del sistema de presas del río Grijalva

Tabla B.2. Ingresos quincenales históricos de la presa Malpaso (Mm3)

1986	249.9	382.6	88.5	70.3	64.4	112.3	56.1	72.6	84.6	741.8	465.4	228.3	498	208.3	237.4	374.1	429.9	226.7	308.9	187.3	133.2	177.3	153.7	67.7
1987	26.5	30.9	51.5	2.6	81	12	50.7	-4	36.7	18	239.8	244.7	338.4	246.3	338.8	174.4	683.6	428.4	521.8	74.8	103	154.1	50.5	80.8
1988	234.2	112.6	184.5	125.7	80.1	75	67.4	70.3	76.6	89.4	58.1	488.4	497.9	390.9	566	765.2	1363.1	453.3	1340.7	349.7	207.9	379.6	333.6	203.8
1989	104.6	181.6	211.7	104.5	72.7	86	130.3	61.8	92.2	85.4	115.6	192	237.8	216.7	268	503.8	505.8	2363.7	1027.4	674.5	203.4	291.7	322.2	356.3
1990	178.4	164.3	146.1	108.3	130.9	140.2	167	59.2	118.4	107.3	206.5	346.4	456	318.8	233.3	251.7	465.5	362.9	368.5	328.3	318	362.4	697.1	241.9
1991	169.8	128.4	395.1	122.2	63	79.6	60.2	44.1	66.8	65.1	94.5	427	304.8	135.6	110.9	192.9	225.9	352.3	740.7	265.4	299.6	362.8	216.4	326.7
1992	210.2	299.3	146.6	125.2	98.8	80.9	76.3	37.6	40.5	78.1	199.4	526.8	469.4	405.9	370.2	426.4	391.9	688.6	558.3	280.2	195.4	231.2	177.6	123.6
1993	55.4	181.1	90.5	113.5	75.5	77.6	42.8	85.4	51	47	178.9	596.3	623	195.6	241.7	1125	703.9	607	625.7	578.5	413.8	203.2	162.4	174.2
1994	245.9	239.6	132.6	199.1	129.2	154.2	138.2	113.1	86.2	-697.8	147.4	136.7	258.7	180.9	172.4	337.5	197.5	279.1	362.8	168.5	102.9	62.3	67.3	80.2
1995	186.6	73	137.5	150.3	76.1	40.1	56	59.6	50.2	66.9	81.6	538	411.7	484.5	758	994.7	1133.6	742.1	968	430	274.8	197.7	263.9	208.6
1996	252.5	200.3	157.1	74.1	126.7	67.4	102.6	238.1	207.2	174.6	321.2	588.8	591.7	476.1	592.3	684.5	593	545.6	780.1	314.1	375.5	327.4	228	184.3
1997	94.9	156.6	119	119	101.9	54.1	89.1	66.8	124.7	111.9	198.7	219.8	414	155.8	124.2	194.8	331.9	310.1	821.9	519.4	296.3	380.3	255.5	133.2
1998	77.4	133.1	88.9	44.6	54	26.6	49.9	51.5	17.9	37.4	38.8	110.4	266.8	394.8	375.7	363.8	1500.6	674.1	671.4	928	1006.7	288.9	188.7	188.3
1999	224.7	124	186.1	197	84.9	100.2	77.3	161.8	83.1	131.2	128.2	444.6	793.7	367	308.4	590.3	1105.4	939.7	1652.4	856.2	494.1	270.1	200	224.1
2000	421	113.6	150.1	69.8	76.5	47.1	73.6	88.4	35.6	339.8	694.6	540.7	267.7	273.4	702.5	494.6	894.7	1421.2	1070.9	373.2	233.5	258	200.9	378
2001	218.4	108.2	246.3	273.4	77.4	79.1	100	100	78.2	145.3	246.9	129.4	162	225.4	233	439	554.9	954.7	623.4	604	526	156.2	173.8	365.9
2002	133.8	117.8	322.9	209.3	173.8	230	49.6	25.7	47.6	63.6	229.9	443.6	293.7	261.9	118.9	148.1	707.9	947.6	811.1	205.1	413.5	319.5	301.8	183.7
2003	178.9	146.6	130.1	37.2	59.5	49.1	57.5	4.2	34.9	171.9	188.8	618.7	366.6	381.7	253.7	507.3	753.8	1407.4	2057.9	589.7	508.7	585.2	302.9	290.8
2004	494.1	211.2	222.6	157.4	106.7	72.4	76.3	0.8	193.3	109.9	444.2	199.3	173.2	501.1	333.2	206.1	439.5	684.6	579.5	309.8	385.7	94.7	135.6	273.4
2005	53.4	78.6	53.9	41.2	38.4	17.1	-19.8	17	30.7	30.4	99.6	523.2	623.6	957.7	384.7	1302.1	622.4	412.5	1983.6	428.4	248.8	340.1	274.1	350.7
2006	199.9	372.4	200	178.5	113	124.1	128.7	82	113.5	125.5	406.7	411.8	273.3	552.5	432.1	251.2	595.2	443.7	534.7	402.5	341.4	214	356	186.5
2007	466.8	213.3	201.1	102.4	117.4	99.6	58.8	68.8	55.3	62.8	7.6	144.7	117.4	242.6	261.7	582.7	682.6	341.3	631.0	1671.3	690.7	249.7	141.0	104.6
2008	224.4	137.1	93.6	91.0	64.4	53.8	88.5	83.6	41.0	185.3	684.5	388.0	860.3	631.1	536.2	380.4	475.6	1103.0	706.3	484.5	210.2	260.9	163.3	177.2
2009	160.8	161.4	126.4	96.7	166.8	79.8	80.8	81.7	63.3	153.2	135.5	353.1	393.1	131.4	198.1	297.4	286.9	351.6	297.6	299.1	651.9	214.2	109.0	136.2
2010	294.7	127.4	111.7	94.1	74.7	78.9	94.5	74.4	62.9	64.2	115.3	756.2	477.5	1236.9	1023.9	2334.0	1310.4	1972.6	843.9	705.4	465.7	384.9	419.6	215.8
2011	247.9	175.7	224.5	145.4	310.4	121.5	148.8	70.8	174.7	83.6	69.3	286.0	770.5	750.8	578.7	1274.5	945.3	1719.3	1475.2	1170.5	492.0	341.7	260.9	298.0
2012	346.2	210.8	203.3	178.8	148.2	153.5	105.8	98.9	121.1	169.6	197.1	383.8	307.8	139.4	806.9	556.1	518.0	507.1	377.4	188.6	123.3	101.8	68.9	277.4
2013	188.6	308.6	152.4	85.2	498.5	605.7	55.4	55.4	83.8	83.8	556.9	556.9	550.5	550.5	1811.4	982.9	1372.7	1372.7	681.9	681.9	689.8	689.8	637.8	637.8

C: Curvas guía.

En estas graficas se muestran los valores de las curvas guía y su comparación con los niveles NAMO (22 para La Angostura y 16 para Malpaso) y NAMINO (0).

Los valores se expresan en términos de estados (600 Mm³) y únicamente se consideran volúmenes útiles, por lo cual el NAMINO tiene un valor de "0"

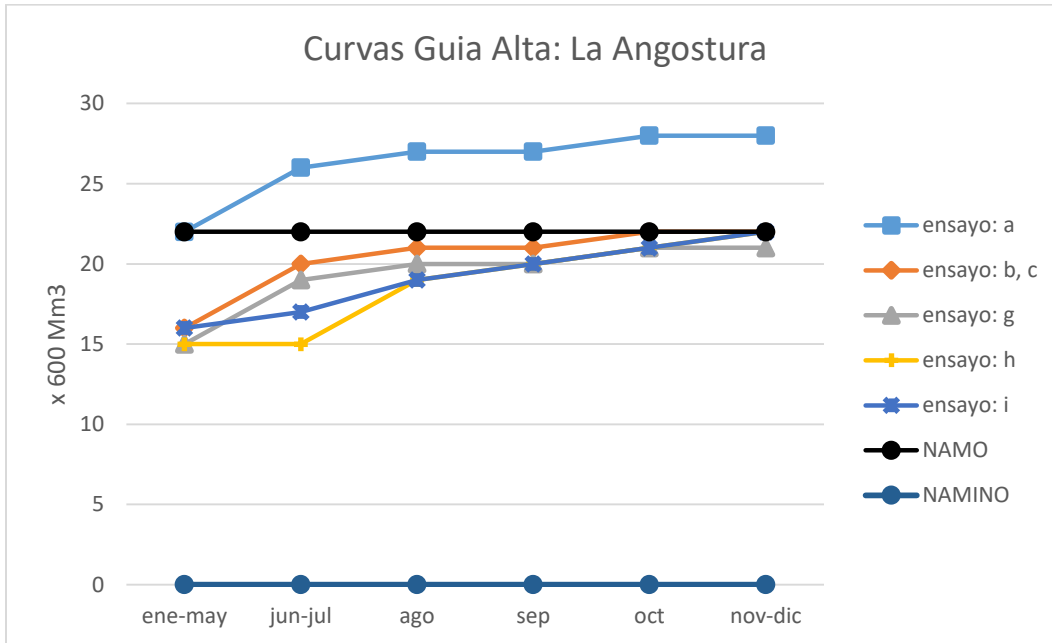


Figura C.1. Curva Guía Alta para la presa La Angostura.

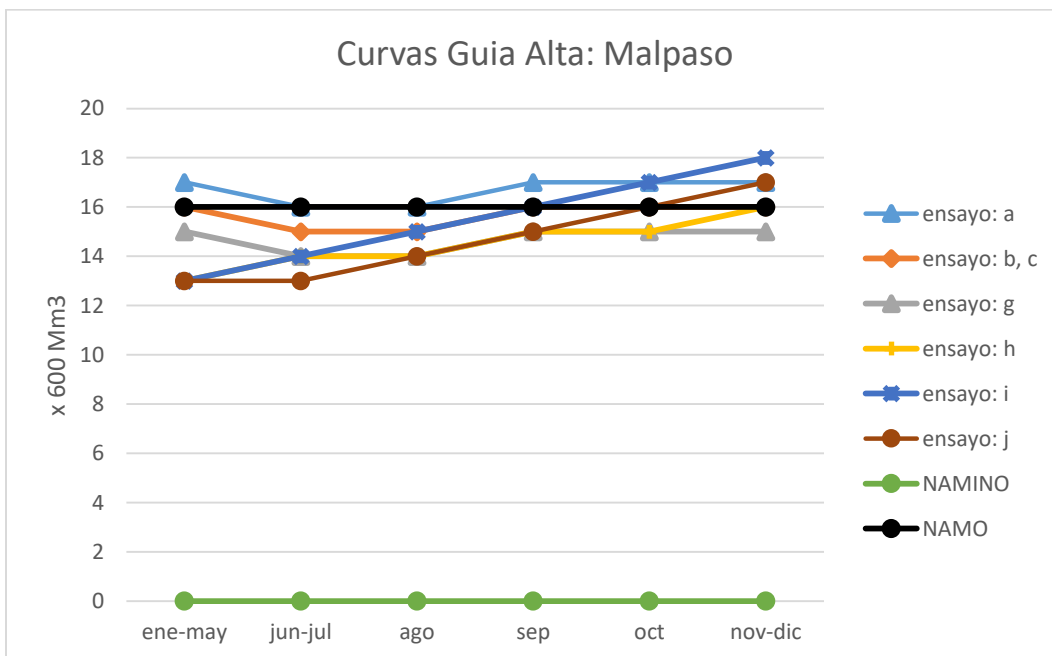


Figura C.2. Curva Guía Alta para la presa Malpaso.

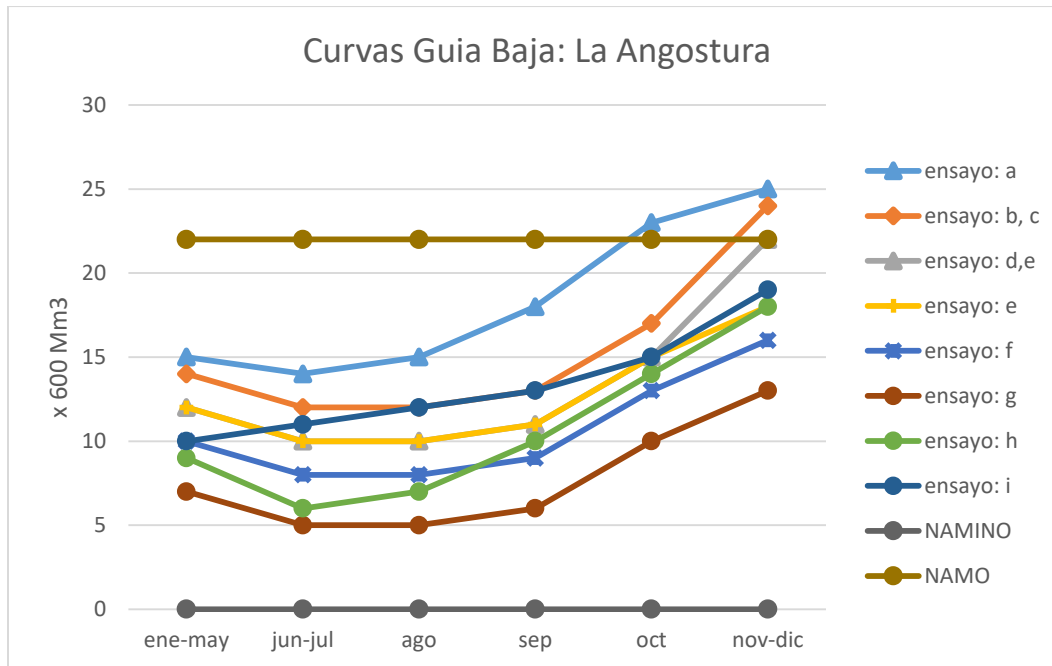


Figura C.3. Curva Guía Baja para la presa La Angostura.

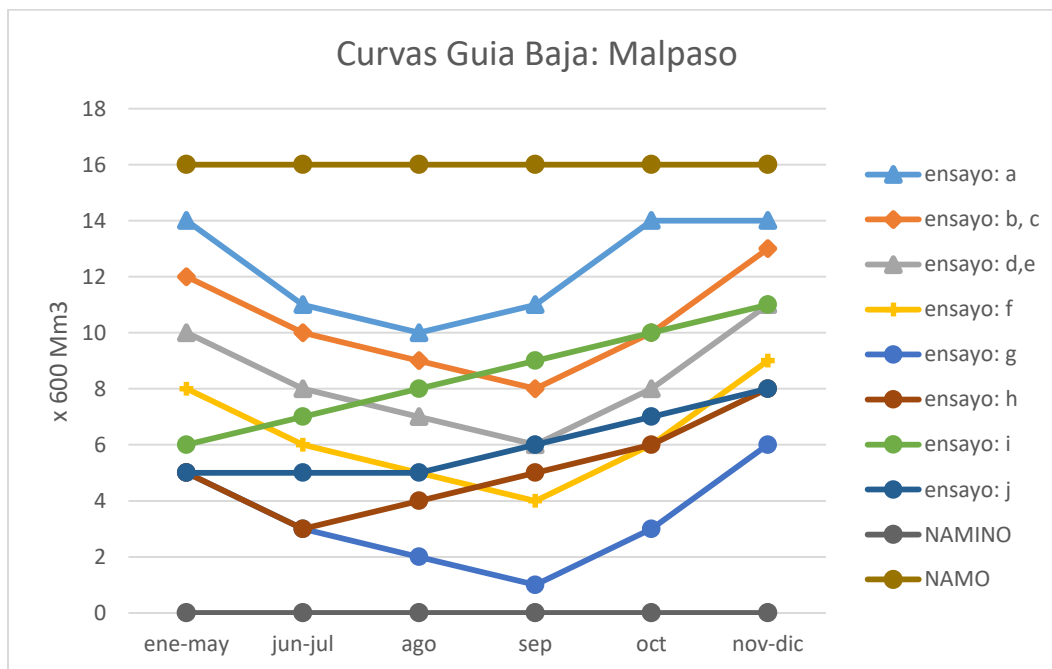


Figura C.4. Curva Guía Baja para la presa Malpaso.

D: Matrices estado-extracción

Las matrices que se muestran corresponden a las obtenidas en el ensayo “f” con la combinación de coeficientes que afectan al DELVOL igual a 0.76 y 1.6.

	"ETAPA", "1:", "NOV-DIC"															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0102	0102	0102	0102	0502	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0103	0104	0105
2	0102	0102	0102	0102	0402	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0103	0104	0105
3	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0103	0104	0105
4	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0103	0104	0105
5	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0103	0104	0105
6	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0103	0104	0105
7	0102	0102	0102	0102	0102	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0103	0104	0105
8	0102	0102	0102	0102	0102	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0103	0104	0105
9	0102	0102	0102	0102	0402	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0103	0104	0105
10	0102	0102	0102	0502	0402	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0103	0104	0105
11	0102	0102	0602	0502	0402	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0103	0104	0105
12	0102	0702	0602	0502	0402	0302	0202	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0103	0104	0105
13	0102	0702	0602	0502	0402	0302	0302	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0103	0104	0105
14	0102	0102	0102	0502	0402	0402	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0103	0104	0105
15	0102	0102	0102	0102	0502	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0103	0104	0105
16	0102	0102	0102	0102	0402	0302	0202	0202	0102	0102	0102	0103	0104	0104	0104	0108
17	0202	0202	0202	0502	0402	0302	0302	0202	0202	0202	0203	0204	0204	0204	0205	0208
18	0302	0302	0602	0502	0402	0302	0302	0302	0302	0303	0304	0304	0304	0305	0308	0308
19	0302	0702	0602	0502	0402	0402	0302	0302	0302	0303	0304	0304	0304	0305	0308	0308
20	0302	0702	0602	0602	0502	0402	0402	0402	0403	0404	0404	0304	0304	0408	0408	0408
21	0702	0702	0602	0602	0602	0602	0602	0602	0603	0604	0605	0608	0608	0608	0609	0610
22	0702	0702	0702	0602	0602	0602	0603	0604	0604	0604	0605	0608	0608	0608	0609	0610

Figura D.1. Matrices de estado-extracción, para la etapa 1: “Noviembre-Diciembre”.

	"ETAPA", "2:", "OCT"															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0102	0302	0302	0302	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0103	0104	0105	0105
2	0102	0302	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0103	0104	0105	0105
3	0102	0102	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0103	0104	0105	0105
4	0102	0302	0302	0202	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0103	0104	0105	0105
5	0102	0302	0302	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0103	0104	0105	0105
6	0302	0302	0302	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0103	0104	0105	0105
7	0302	0302	0302	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0103	0104	0105	0105
8	0302	0302	0302	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0103	0104	0105	0105
9	0302	0302	0302	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0103	0104	0105	0105
10	0102	0302	0302	0302	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0103	0104	0105	0105
11	0102	0102	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0103	0104	0105	0105
12	0102	0102	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0103	0104	0105	0105
13	0102	0302	0302	0202	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0103	0104	0105	0105
14	0102	0302	0302	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0104	0104	0105	0105
15	0302	0302	0302	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0103	0104	0105	0105
16	0302	0302	0302	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0104	0104	0105	0105
17	0302	0302	0302	0302	0302	0202	0202	0202	0202	0202	0204	0204	0205	0105	0105	0105
18	0302	0302	0302	0302	0302	0302	0302	0302	0302	0302	0304	0304	0305	0205	0105	0105
19	0302	0302	0302	0302	0302	0302	0302	0302	0302	0304	0304	0305	0205	0205	0105	0105
20	0302	0302	0302	0302	0302	0302	0302	0302	0302	0304	0304	0305	0305	0205	0205	0205
21	0302	0302	0302	0302	0302	0302	0302	0302	0304	0304	0305	0305	0305	0305	0305	0205
22	0302	0302	0302	0302	0302	0302	0304	0304	0304	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0305

Figura D.2. Matrices de estado-extracción para la etapa 2: “Octubre”.

		"ETAPA", "3:", "SEP"														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0302	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0104	0104	0105	0105	0105
2	0302	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0104	0104	0105	0105	0105
3	0302	0302	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0104	0104	0105	0105	0105
4	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0104	0104	0105	0105	0105
5	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0104	0104	0104	0105	0105	0105
6	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0103	0104	0104	0105	0105	0105
7	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0103	0104	0104	0105	0105	0105
8	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0104	0104	0105	0105	0105
9	0302	0202	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0104	0104	0105	0105	0105
10	0302	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0104	0104	0104	0105	0105	0105
11	0302	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0104	0104	0104	0105	0105	0105
12	0302	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0104	0104	0104	0105	0105	0105
13	0302	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0104	0104	0105	0105	0105	0105
14	0302	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0104	0104	0105	0105	0105	0105
15	0302	0302	0202	0202	0202	0202	0202	0202	0202	0204	0204	0205	0205	0205	0205	0205
16	0302	0302	0302	0302	0302	0302	0302	0302	0304	0304	0305	0305	0305	0305	0305	0305
17	0302	0302	0302	0302	0302	0302	0302	0304	0304	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0305
18	0302	0302	0302	0302	0302	0302	0304	0304	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0305
19	0302	0302	0302	0302	0302	0304	0304	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0305
20	0302	0302	0302	0302	0304	0304	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0305
21	0302	0302	0302	0304	0304	0304	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0305
22	0302	0302	0304	0304	0304	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0305

Figura D.3. Matrices de estado-extracción, para la etapa 3: "Septiembre".

		"ETAPA", "4:", "AGO"														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0302	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0104	0104	0105	0105	0105
2	0302	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0104	0104	0105	0105	0105
3	0302	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0104	0104	0105	0105	0105
4	0302	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0104	0104	0105	0105	0105
5	0102	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0104	0104	0105	0105	0105
6	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0104	0104	0105	0105	0105
7	0102	0102	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0104	0104	0105	0105	0105
8	0102	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0104	0104	0105	0105	0105
9	0302	0302	0202	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0104	0104	0105	0105	0105
10	0302	0302	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0104	0104	0105	0105	0105
11	0302	0302	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0104	0104	0104	0105	0105	0105
12	0302	0302	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0104	0104	0104	0105	0105	0105
13	0302	0302	0302	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0103	0104	0104	0105	0105	0105	0105
14	0302	0302	0302	0202	0202	0202	0202	0202	0203	0204	0204	0205	0205	0105	0105	0105
15	0302	0302	0302	0302	0302	0302	0302	0303	0304	0304	0305	0305	0205	0105	0105	0105
16	0302	0302	0302	0302	0302	0302	0302	0304	0304	0305	0305	0305	0205	0205	0205	0105
17	0302	0302	0302	0302	0302	0302	0304	0304	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0205	0105
18	0302	0302	0302	0302	0302	0304	0304	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0205
19	0302	0302	0302	0302	0304	0304	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0205
20	0302	0302	0302	0304	0304	0304	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0205
21	0302	0302	0303	0304	0304	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0305
22	0302	0302	0303	0304	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0305	0305

Figura D.4. Matrices de estado-extracción, para la presa 4: "Agosto".

		"ETAPA", "5:", "JUN-JUL"														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0102	0102	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0103	0104	0105	0106	0108	0108
2	0102	0102	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0103	0104	0104	0105	0106	0108	0108
3	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0103	0104	0105	0106	0108	0108
4	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0104	0104	0105	0106	0108	0108
5	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0103	0104	0105	0106	0108	0108
6	0102	0102	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0103	0104	0104	0105	0106	0108	0108
7	0102	0102	0202	0202	0102	0102	0102	0102	0102	0102	0103	0104	0105	0106	0108	0108
8	0202	0302	0302	0202	0202	0102	0102	0102	0102	0103	0104	0104	0105	0108	0108	0108
9	0402	0402	0302	0302	0202	0102	0102	0102	0103	0104	0104	0105	0106	0108	0108	0109
10	0502	0402	0402	0302	0202	0102	0102	0102	0103	0104	0105	0106	0107	0108	0109	0110
11	0502	0502	0402	0302	0202	0102	0102	0103	0104	0105	0106	0107	0108	0109	0110	0110
12	0602	0502	0402	0302	0202	0202	0203	0204	0205	0206	0207	0208	0209	0210	0210	0210
13	0602	0502	0402	0302	0302	0303	0304	0305	0306	0307	0308	0309	0310	0310	0310	0310
14	0602	0502	0402	0402	0403	0404	0405	0406	0407	0408	0409	0410	0410	0410	0410	0310
15	0602	0502	0502	0503	0504	0505	0506	0507	0508	0509	0510	0510	0510	0510	0410	0410
16	0602	0602	0603	0604	0605	0606	0607	0608	0609	0610	0610	0610	0610	0510	0510	0410
17	0702	0703	0704	0705	0706	0707	0708	0709	0710	0710	0710	0710	0610	0610	0510	0410
18	0702	0703	0704	0705	0706	0707	0708	0709	0710	0710	0710	0710	0710	0610	0510	0510
19	0702	0703	0704	0705	0706	0708	0708	0709	0710	0710	0710	0710	0710	0610	0610	0510
20	0703	0704	0704	0705	0706	0708	0708	0709	0710	0710	0710	0710	0710	0710	0610	0610
21	0703	0704	0705	0706	0707	0708	0709	0710	0710	0710	0710	0710	0710	0710	0710	0610
22	0703	0704	0705	0706	0707	0708	0709	0710	0710	0710	0710	0710	0710	0710	0710	0610

Figura D.5. Matrices de estado-extracción, para la etapa 5: "Junio-Julio".

		"ETAPA", "6:", "ENE-FEB-MAR-ABR-MAY"														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0406	0407	0408	0409
2	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0406	0407	0408	0409
3	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0406	0408	0408	0409
4	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0406	0407	0408	0409
5	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0406	0407	0408	0409
6	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0407	0408	0409	0410
7	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0406	0408	0409	0410
8	0405	0405	0405	0405	0505	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0406	0407	0408	0409
9	0405	0405	0405	0405	0505	0505	0405	0405	0405	0405	0405	0406	0407	0408	0409	0410
10	0405	0405	0405	0605	0605	0505	0405	0405	0405	0405	0407	0408	0408	0410	0410	0409
11	0405	0405	0405	0705	0605	0505	0405	0405	0405	0406	0407	0405	0406	0407	0408	0409
12	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0405	0406	0407	0408	0405	0406	0407	0408	0409
13	0405	0405	0405	0505	0505	0505	0505	0405	0406	0407	0408	0409	0410	0408	0409	0410
14	0505	0505	0605	0605	0605	0605	0505	0405	0405	0405	0406	0407	0408	0409	0410	0411
15	0605	0705	0705	0705	0705	0605	0505	0505	0505	0506	0507	0508	0509	0510	0511	0511
16	0805	0805	0805	0805	0705	0605	0605	0605	0606	0607	0608	0609	0610	0611	0611	0612
17	0905	0905	0905	0805	0705	0705	0705	0706	0707	0708	0709	0710	0711	0711	0712	0713
18	1005	1005	0905	0805	0805	0805	0806	0807	0808	0809	0810	0811	0811	0812	0813	0814
19	1105	1005	0905	0805	0805	0806	0807	0808	0809	0810	0811	0811	0812	0813	0814	0815
20	1105	1005	0905	0905	0906	0907	0908	0909	0910	0911	0911	0912	0913	0914	0915	1019
21	1105	1005	1005	1006	1007	1008	1009	1010	1011	1011	1012	1013	1014	1015	1119	1019
22	1105	1105	1106	1107	1108	1109	1110	1110	1111	1112	1113	1114	1115	1219	1119	1119

Figura D.6. Matrices de estado-extracción, para la etapa 6: "Enero-Febrero-Marzo-Abril-Mayo".

E: Curvas Almacenamiento-Extracción

Las curvas Almacenamiento-Extracción se muestran únicamente para dos condiciones de almacenamiento en la presa La Angostura:

- Con nivel bajo (almacenamiento en 600 hm³).
- Con nivel alto (almacenamiento en 13200 hm³).

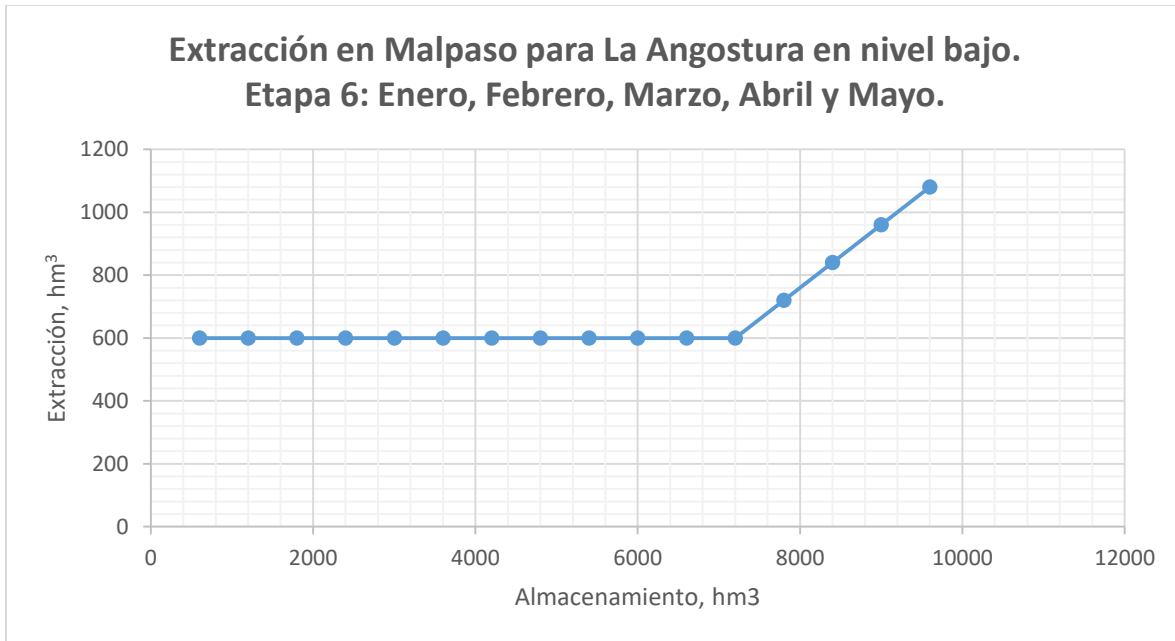


Figura E.1. Extracción en Malpaso, para La Angostura en nivel bajo. Etapa 6. (Extracción en La Angostura de: 480 hm³ en todos los casos).

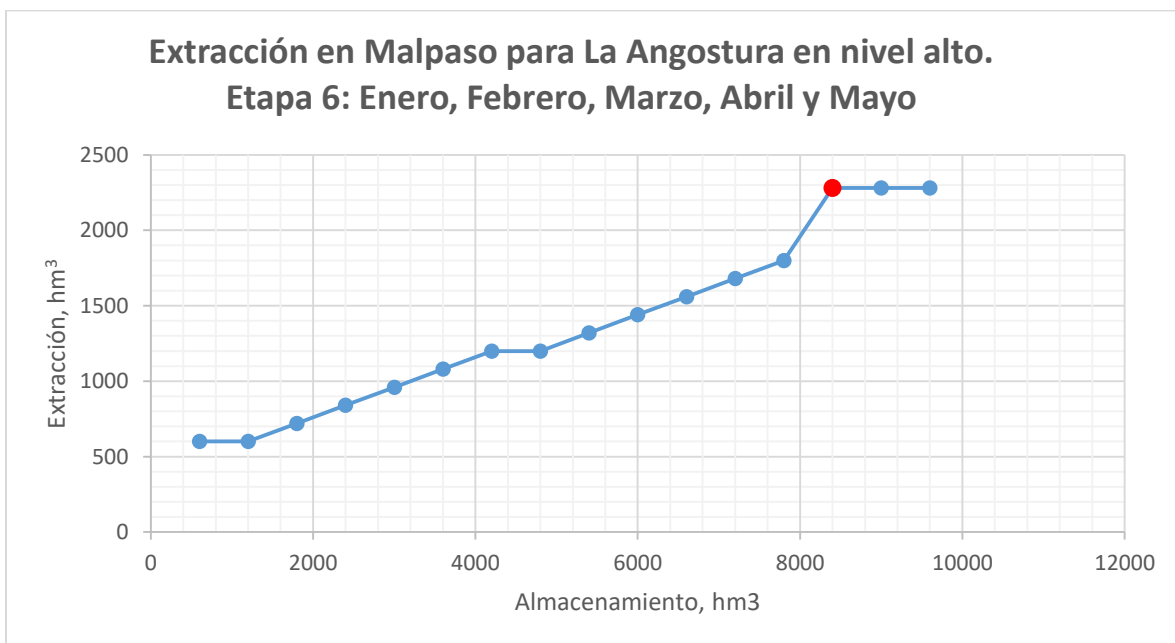


Figura E.2. Extracción en Malpaso para La Angostura en nivel alto. Etapa 6. (Extracción en La Angostura de: 1440 hm³ para un almacenamiento en Malpaso de 8400 hm³, en todos los casos restantes la extracción es de 1320 hm³).

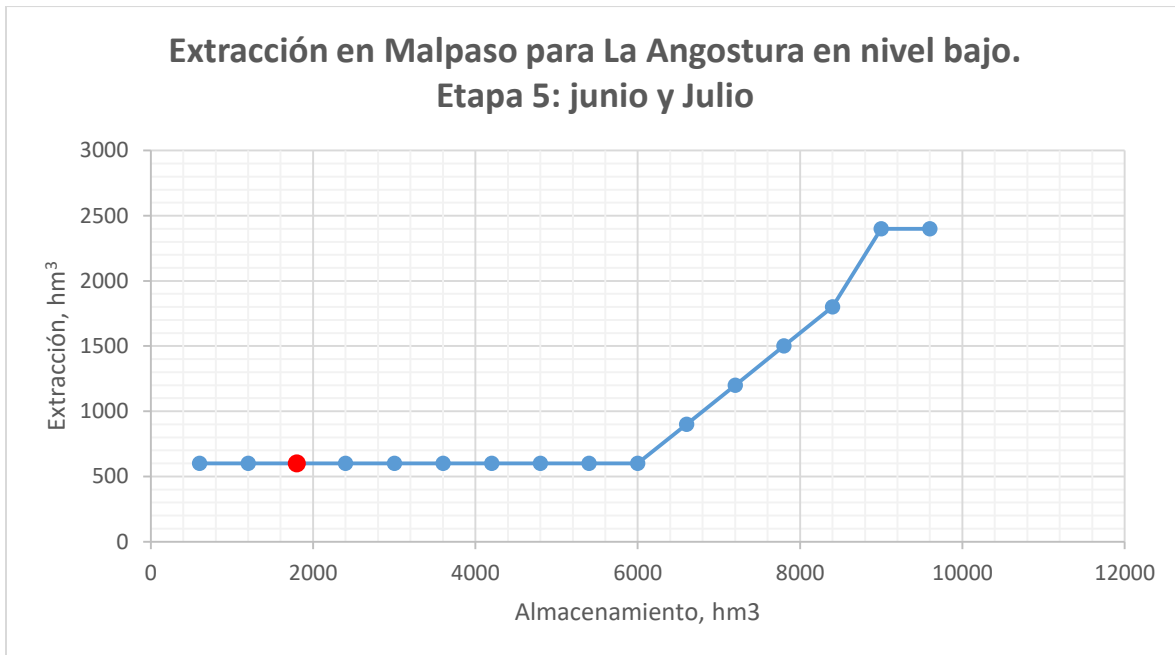


Figura E.3. Extracción en Malpaso, para La Angostura en nivel bajo. Etapa 5. (Extracción en La Angostura de: 600 hm³ para un almacenamiento en Malpaso de 1800 hm³; en todos los casos restantes la extracción es de 300 hm³).

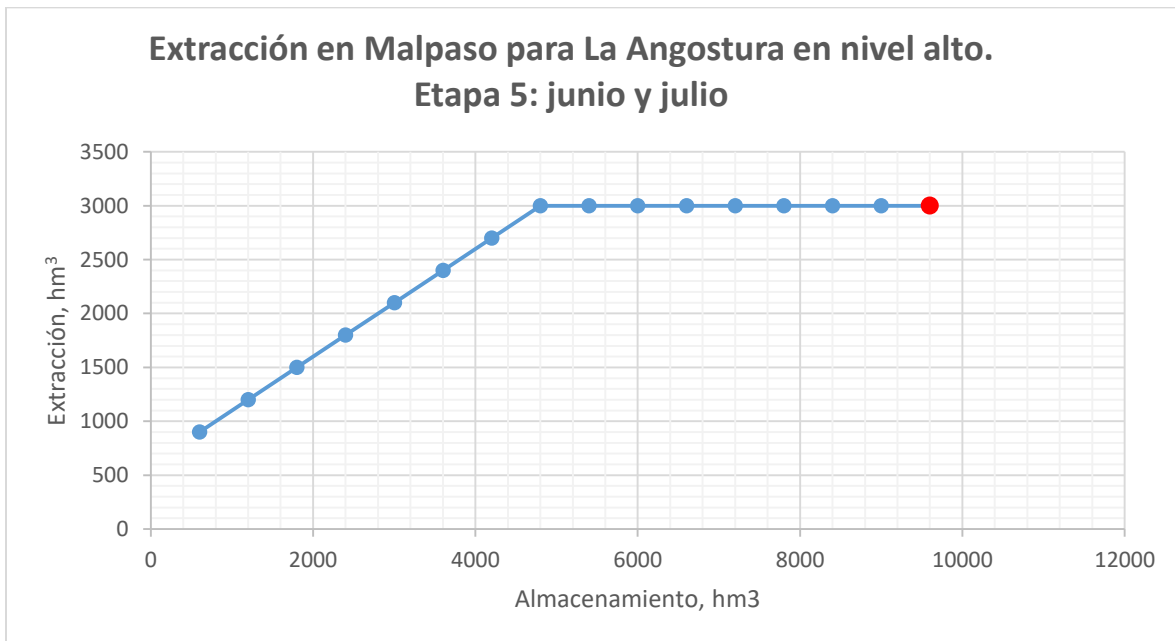


Figura E.4. Extracción en Malpaso para La Angostura en nivel alto. Etapa 5. (Extracción en La Angostura de: 1800 hm³ para un almacenamiento en Malpaso de 9600 hm³; en todos los casos restantes la extracción es de 2100 hm³).

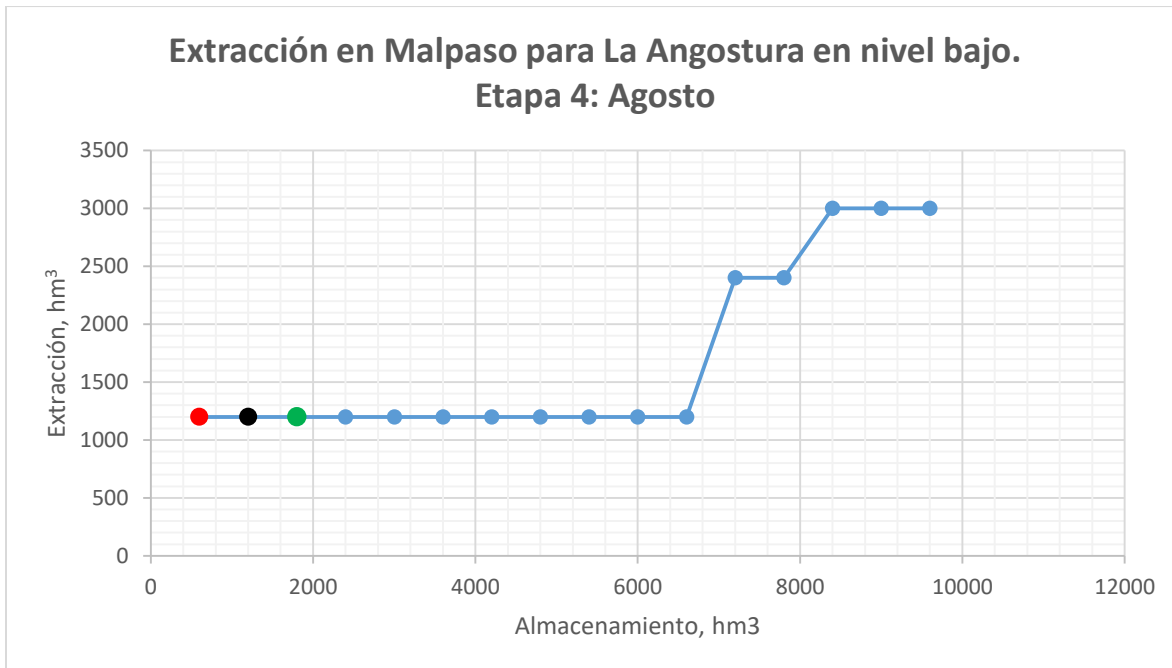


Figura E.5. Extracción en Malpaso, para La Angostura en nivel bajo. Etapa 4. (Extracción en La Angostura de: 2384.64 hm³ para un almacenamiento en Malpaso de 600 hm³; 1800 hm³ para un almacenamiento en Malpaso de 1200 hm³ y 1200 hm³ para un almacenamiento en Malpaso de 1800 hm³; en todos los casos restantes la extracción es de 600 hm³).

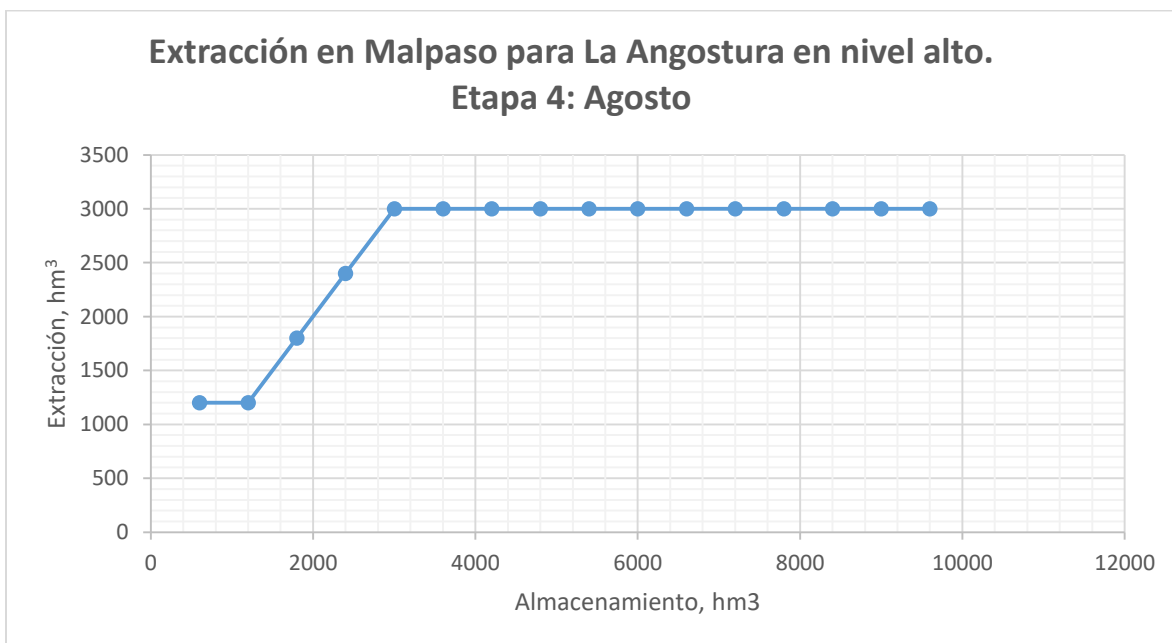


Figura E.6. Extracción en Malpaso para La Angostura en nivel alto. Etapa 4. (Extracción en La Angostura de: 2384.64 hm³ en todos los casos).

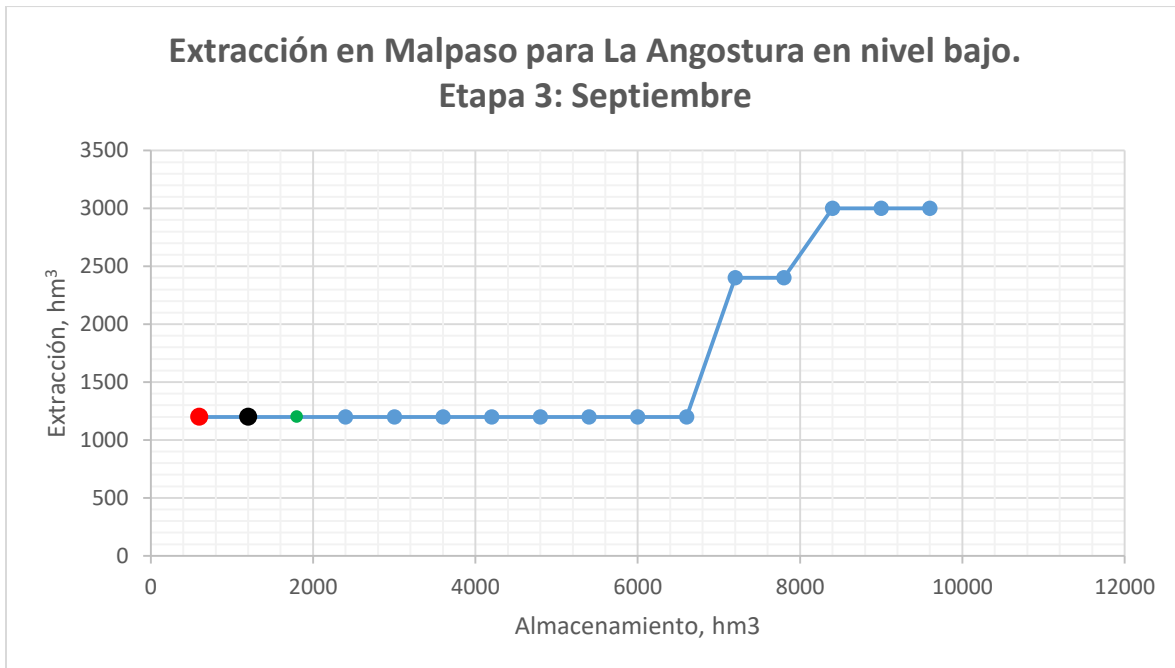


Figura E.7. Extracción en Malpaso, para La Angostura en nivel bajo. Etapa 3. (Extracción en La Angostura de: 2384.64 hm³ para un almacenamiento en Malpaso de 600 hm³; 1800 hm³ para un almacenamiento en Malpaso de 1200 hm³ y 1200 hm³ para un almacenamiento en Malpaso de 1800 hm³; en todos los casos restantes la extracción es de 600 hm³).

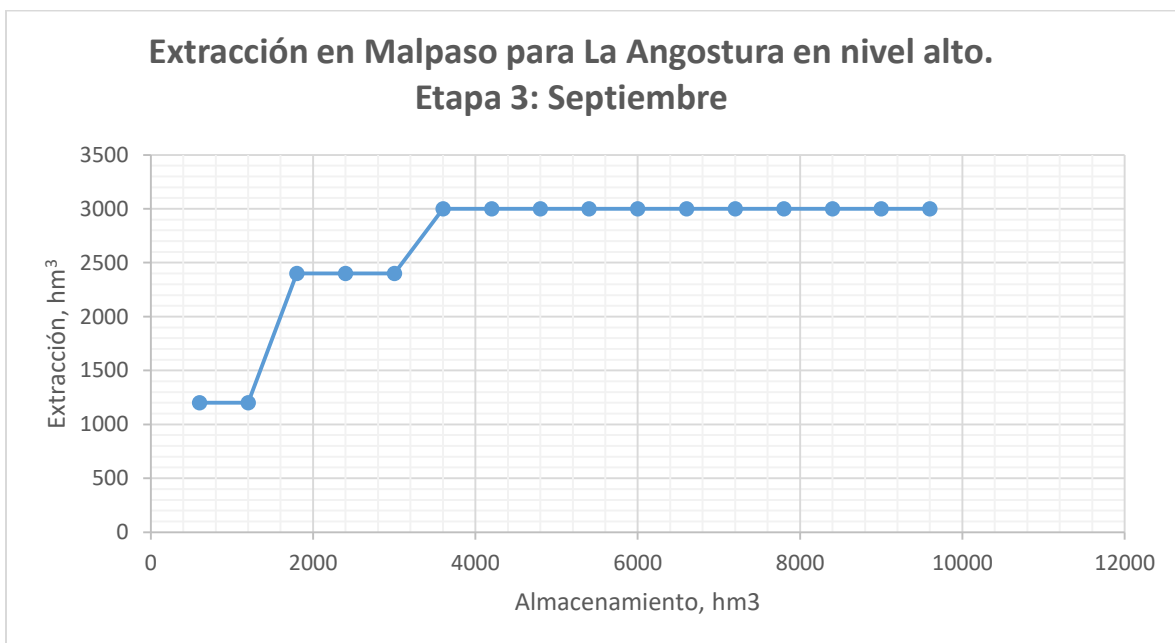


Figura E.8. Extracción en Malpaso para La Angostura en nivel alto. Etapa 3. (Extracción en La Angostura de: 2384.64 hm³ en todos los casos).

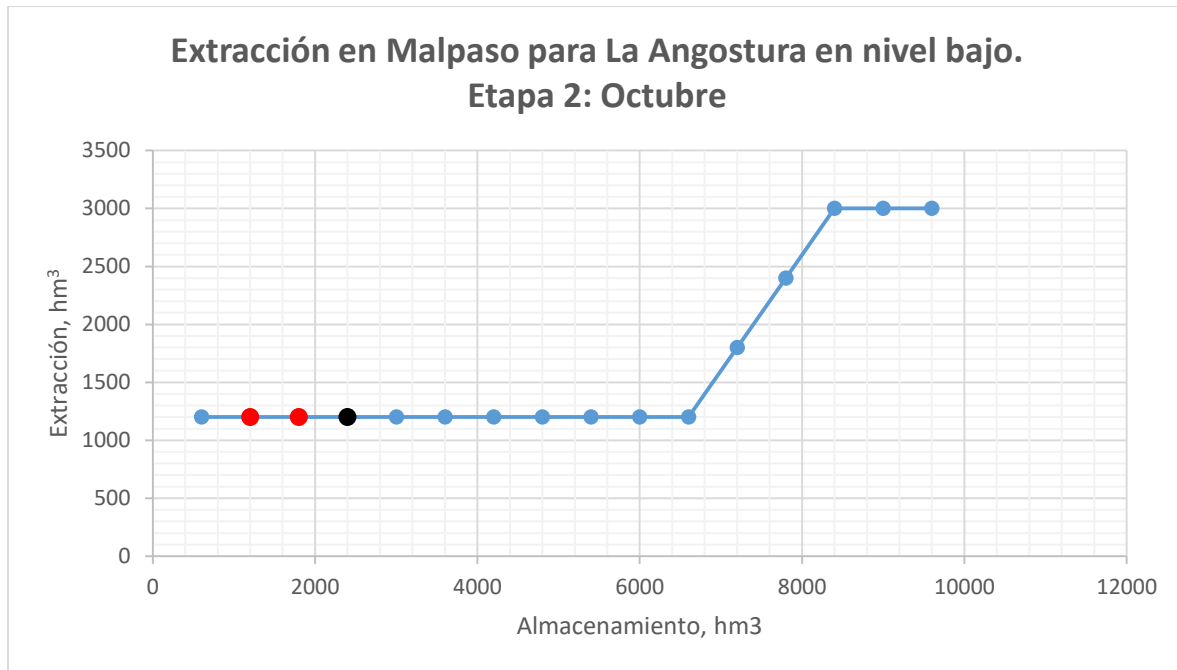


Figura E.9. Extracción en Malpaso, para La Angostura en nivel bajo. Etapa 2. (Extracción en La Angostura de: 2384.64 hm³ para un almacenamiento en Malpaso de 1200 hm³ o un almacenamiento en Malpaso de 1800 hm³ y 1800 hm³ para un almacenamiento en Malpaso de 2400 hm³; en todos los casos restantes la extracción es de 600 hm³).

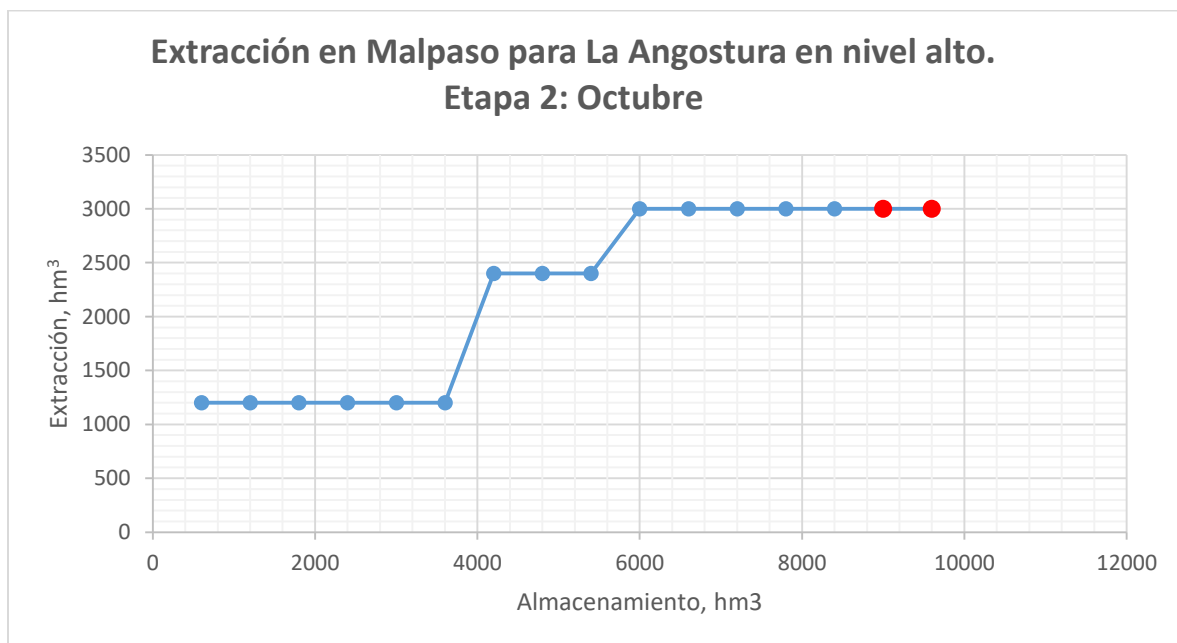


Figura E.10. Extracción en Malpaso para La Angostura en nivel alto. Etapa 2. (Extracción en La Angostura de: 1800 hm³ para un almacenamiento en Malpaso de 9000 hm³ o un almacenamiento en Malpaso de 9600 hm³, en todos los casos restantes la extracción es de 2384.64 hm³).

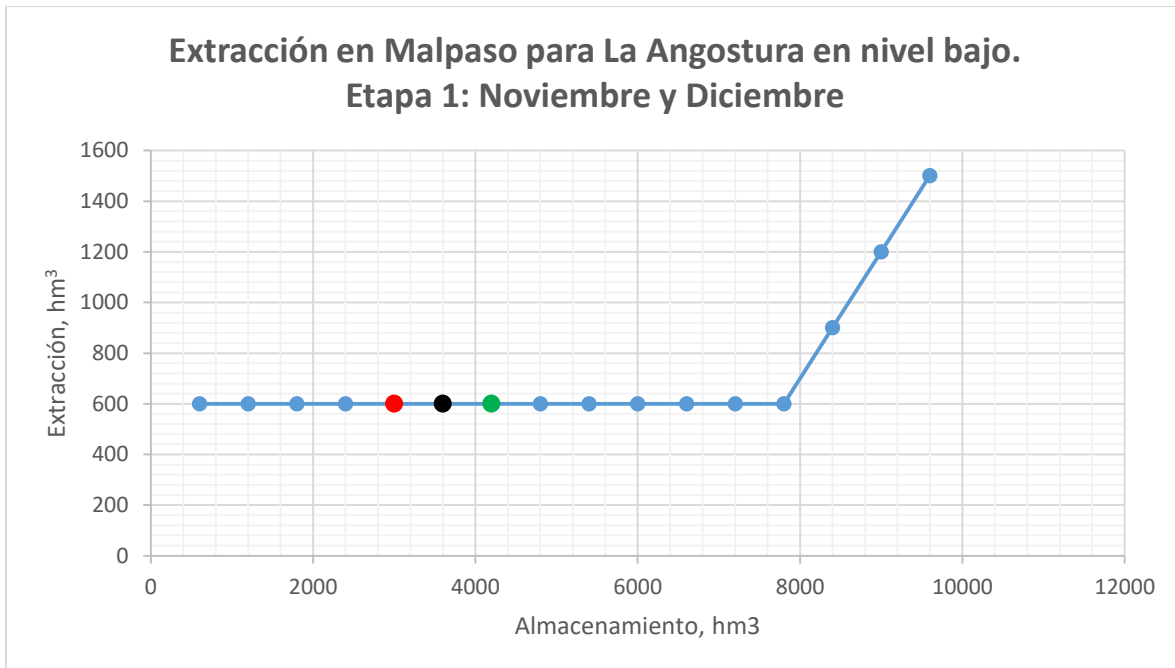


Figura E.11. Extracción en Malpaso, para La Angostura en nivel bajo. Etapa 1. (Extracción en La Angostura de: 1500 hm³ para un almacenamiento en Malpaso de 3000 hm³; 900 hm³ para un almacenamiento en Malpaso de 3600 hm³ y 600 hm³ para un almacenamiento en Malpaso de 4200 hm³; en todos los casos restantes la extracción es de 300 hm³).

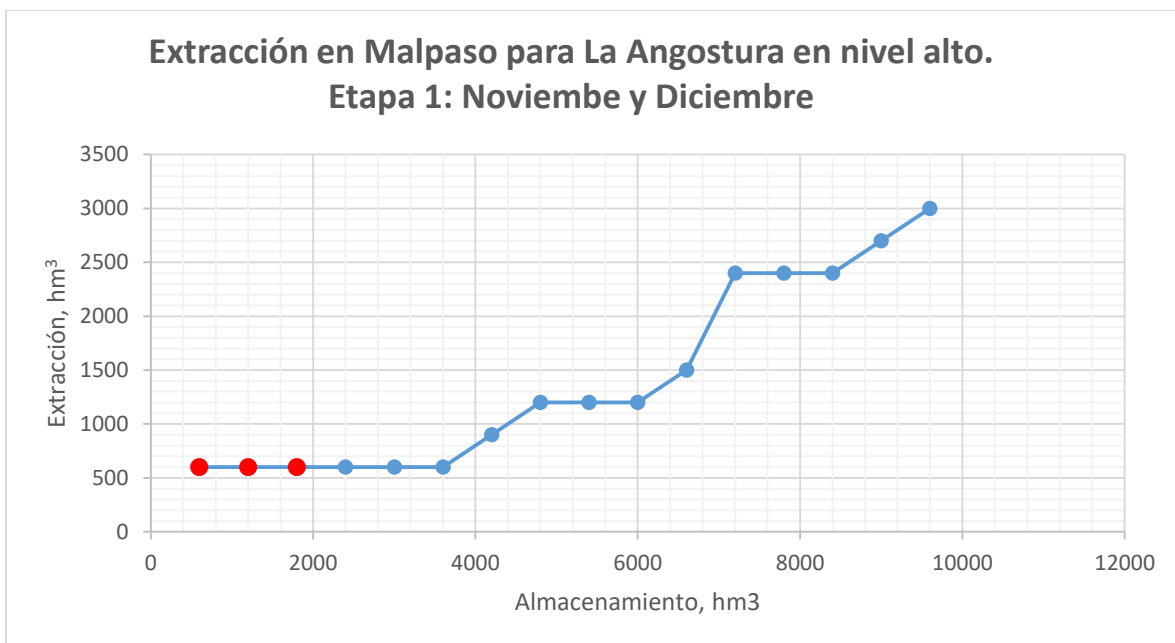


Figura E.12. Extracción en Malpaso para La Angostura en nivel alto. Etapa 1. (Extracción en La Angostura de: 2100 hm³ para un almacenamiento en Malpaso de 600 hm³, 1200 hm³ o un almacenamiento en Malpaso de 1800 hm³; en todos los casos restantes la extracción es de 1800 hm³).

Referencias Generales

- *Acuerdo por el que se da a conocer que ha quedado debidamente extinguida y liquidada la Comisión del Grijalva.*
http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4711717&fecha=24/12/1987
- *Acuerdo por el que se da a conocer los estudios técnicos de aguas nacionales superficiales de las subregiones hidrológicas alto Grijalva, medio Grijalva y bajo Grijalva de la región hidrológica No. 30 Grijalva-Usumacinta, 2009 “Diario Oficial Federal”*
http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5141106&fecha=29/04/2010
- *Acuerdo que crea la comisión del río Grijalva, dependiente de la Secretaría de Recursos Hidráulicos.*
http://www.dof.gob.mx/nota_to_imagen_fs.php?cod_diario=191016&pagina=5&seccion=1 revisado el 14 de julio de 2017
- Ailing Li. 2004 “A study on the large-scale system decomposition-coordinating method used in optimal operation of a hydroelectric system” (Water International, Vol. 29 No. 2, pp. 228-231, China)
- Alegría Díaz, Arallely. 2010 “*Política de operación optima del sistema de presas del río Grijalva. Efectos de la curva guía*” (Tesis de Licenciatura)
- Aparicio Mijares, Francisco J. 1992, “*Fundamentos de hidrología de superficie*” Editorial Limusa, México
- Arganis Juárez, Maritza Liliana. 2004. “Operación optima de un sistema de presas en cascada para generación hidroeléctrica tomando en cuenta condiciones reales de operación y uso de muestras sintéticas para pronostico” (Tesis de doctorado, UNAM)
- Arganis Juárez Maritza Liliana. 2009. “Estudio integral de la cuenca alta del río Grijalva. Manejo óptimo de las presas” (Informe final elaborado para CFE por el Instituto de Ingeniería, UNAM)
- Aviles H. R. 1994, “Optimización en línea de presas hidroeléctricas” (tesis de licenciatura, UNAM)
- Chiapas, U.d. (2011). Manifiesto de Impacto Ambiental Chicoasén II. Tuxtla Gutiérrez, Chipas
- Contreras Cruz, Claudia. 1999. “*Operación optima de un sistema de presas en cascada. Aplicación al sistema del río Grijalva*” (Tesis de maestría, UNAM)

- “*Comportamiento de Presas construidas en México (1974-1984)*” México D.F., Comisión Federal de Electricidad 1985
- Peña Delgado Francisco, 2010. “Simulación histórica y sintética de políticas de operación óptima de un sistema de presas en cascada en el río Santiago, Nayarit México” (Tesis)
- Domínguez, Ramón, Notas de su clase sobre Programación Dinámica
- Domínguez, Ramón; Mendoza, Rosalva; Alvarado C. A. y Márquez L. E., 1993 “Operación integral del sistema hidroeléctrico del río Grijalva” (elaborado para CFE por el instituto de ingeniería, UNAM)
- Domínguez, Ramón; Mendoza, Rosalva; Contreras, Claudia. 1998. “*Estudio hidrológico de la segunda etapa del análisis integral de la zona baja del río Grijalva*”. (Informe preliminar elaborado para CNA por el Instituto de Ingeniería, UNAM).
- Domínguez, Ramón; Maritza, Arganis; Carriosa, E., et al. 2006 “Determinación de las avenidas de diseño y ajuste de los parámetros del modelo de optimización de las políticas de operación del sistema de presas del río Grijalva” (Elaborado para CFE por el Instituto de Ingeniería, UNAM)
- Domínguez Mora, Ramón. de Luna Cruz, Faustino, et al. *Análisis de las inundaciones en la planicie tabasqueña en el periodo 1995 -2010*, Tecnología y ciencias del agua, vol. V, núm. 3, mayo-junio de 2014, pp. 5-32
- E. Sánchez C., y Wagner G. 2004 “Modelo numérico para la operación óptima de un hidrosistema de aguas superficiales” (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Morelos, México)”
- Hincapié López, Carolina. 2016 “*Actualización de las avenidas de diseño y de las políticas de operación del sistema de presas del río Santiago*” (Tesis)
- Hinojosa Corona, Alejandro., Rodríguez Moreno, Víctor Manuel., “El deslizamiento de ladera de noviembre 2007 y generación de una presa natural en el río Grijalva, Chiapas, México.” Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Vol. 63, núm. 1. Pp. 15 38
- <https://www.gob.mx/mexico-con-agua/articulos/agua-de-calidad-para-todos> revisado el 14 de julio de 2017
- http://www.antroglab.org/obara/apuntes/AHA_Presas.html#mozToclid809385 revisado el 14 de julio de 2017
- Huerta Loera, Sadoth Fabián. 2015 “Políticas de operación a largo plazo de un sistema de presas de propósito múltiple” (Tesis)

- Larios Malanche, Raúl. 1997 “Modelo de Programación Dinámica Estocástica para optimizar la operación de presas” (Tesis de licenciatura, UNAM)
- López Gonzales, Luis; 1970 “*Planeación para el desarrollo integral de la cuenca del río Grijalva*” (Tesis de Licenciatura, UNAM”
- Marengo Mogollón, Humberto; 2010 “*Estado del Arte y Prospectiva de la Ingeniería en México y el Mundo*”, *capítulo 10 “Estado actual y futuro de las presas en México y el mundo*”, Academia de Ingeniería, México con el patrocinio de CONACYT.
- Marengo Mogollón, Humberto agosto 2011, *Deslizamiento de Tierra y Roca que Obstruyó el Río Grijalva y su solución con túneles* (Presentación)
https://www.imta.gob.mx/potamologia/images/stories/ponencias_tercer_seminario/seminario/humberto_marengo/riesgos_caído.pdf
- Mendoza, Rosalva. 2009. “Manual del programa 1, 2 y 3 de optimización vía programación dinámica estocástica dos presas en serie” (Instituto de Ingeniería)
- Mendoza, Rosalva. 2017. “*Manual de los programas de cómputo: CAFIT2P.FOR, OPDIN2VS.FOR, y SIM2PCM.FOR: inclusión de penalizaciones variables por etapa para eventos de derrame, déficit y superar límites de curvas guía para un sistema de 2 presas en cascada. Caso de estudio y aplicación al sistema hidroeléctrico del río Grijalva*”
- Mendoza et al, 2014. “*políticas de operación del sistema Hidroeléctrico del Río Grijalva considerando el efecto de la correlación de volúmenes de ingreso*”. Artículo para el XXIII Congreso Nacional de Hidráulica
- Mendoza et al, 2012. “*Influencia de curvas guía en las políticas de operación para el manejo de un sistema Hidroeléctrico*”. Artículo para el XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica
- Mendoza et al, “Influencias de la variación por etapas de los coeficientes de penalización. Aplicación al sistema Hidroeléctrico del río Grijalva para obtener políticas de operación” (Artículo para la III Jornada de Ingeniería del Agua, La protección contra riesgos hídricos)
- Organismo regulador de seguridad de presas de argentina www.orsep.gob.ar
- Peña Delgado Francisco, 2010. “Simulación histórica y sintética de políticas de operación óptima de un sistema de presas en cascada en el río Santiago, Nayarit México” (Tesis)
- Plan estatal de Desarrollo, Chiapas 2013-2018.

- Presentación de programación dinámica, seminario de Idalia Flores, Facultad de Ingeniería.
http://www.ingenieria.unam.mx/sistemas/PDF/Avisos/Seminarios/SeminarioV/Sesion6_IdaliaFlores_20abr15.pdf
- *Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía en el consejo de la cuenca de los ríos Grijalva y Usumacinta*, 2004, Comisión Nacional del Agua.
- Ramírez Salazar, Luis Eusebio. 2011 *Actualización de las avenidas de diseño de las presas del Río Grijalva* (Tesis)
- R. Rebolledo S., 1990, "Operación óptima de un Sistema hidráulico formado por dos presas en paralelo" (Tesis de maestría, UNAM)
- Reportes hidrológicos del Departamento Regional de Hidrometría, Comisión Federal de Electricidad.
- Rubio, G.H., Triana, R. C., 2006 *Gestión Integrada de crecientes caso de estudio México: Río Grijalva* [abstract] Programa Asociado de Gestión de Crecientes.