

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS

DISEÑO DE UN PLAN DE EXPLOTACIÓN PARA LAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS DEL RÍO NERETVA (BOSNIA-HERZEGOVINA)



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS

Marzo de 2008

EJERCICIO FINAL DE CARRERA

MODALIDAD II

TITULACIÓN: INGENIERO DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

Autor: Héctor Macián Sorribes
Tutor: Abel Solera Solera
Cotutor: Javier Paredes Arquiola

Agradecimientos

Quería expresar mi más sincero agradecimiento a las siguientes personas.

- A mis padres y a toda mi familia, por el apoyo recibido y por el interés mostrado.
- A mis tutores, los profesores Abel Solera Solera y Javier Paredes Arquiola, por todo lo aprendido a su lado durante este tiempo.
- A mis amigos y compañeros del departamento Vicente Alonso Bertomeu, Manuel Lucas Salmerón, María Pedro Monzonís, Carlos Sancho Fernández y Carlos Enrique Segura Huerta, por la ayuda prestada y por los buenos ratos que hemos pasado juntos.
- A mis amigos y compañeros de clase, por la amistad, apoyo y compañía que hemos compartido durante estos años.
- A los profesores del departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia, por su ayuda en momentos puntuales y por las cosas que he aprendido de ellos todos estos años.

GRACIAS

Índice general

Introducción y objetivos	13
Recopilación de información acerca de la cuenca	15
Descripción general de la cuenca.....	15
Descripción del sistema de explotación de la cuenca	18
Embalse de Rama	21
Embalse de Jablanica	21
Embalse de Grabovica	22
Embalse de Salakovac	23
Embalse de Mostar	25
Descripción de las demandas de la cuenca	26
Descripción de los datos de aportaciones de la cuenca.....	28
Elaboración de un modelo conceptual para la simulación de la gestión de la cuenca	30
Construcción del modelo	30
Datos de los embalses	30
Datos de demandas y restricciones	31
Datos de aportaciones intermedias en régimen natural.....	32
Calibración del modelo.....	33
Análisis de diferentes posibilidades de gestión para las centrales hidroeléctricas en escala mensual.	36
Objetivos del modelo mensual.....	36
Hipótesis 1: Solo se turbinan cuando el embalse está lleno.....	37
Hipótesis 2: Se permite bajar el nivel de los embalses para turbinar	41
Hipótesis 3: Se establece un umbral de sueltas para cada embalse.....	47
Hipótesis 4: Se establece una curva de gestión para cada embalse.....	53
Comparación de las distintas hipótesis	60
Conclusiones.....	73
Análisis de las avenidas del sistema en escala diaria.....	75
Objetivos del modelo diario.....	75
Cálculo sin vertidos en Jablanica.....	75
Datos de partida del sistema	75
Simulaciones realizadas.....	78
Conclusiones del análisis	90
Cálculos forzando sueltas adicionales a la producción hidroeléctrica	91
Objetivos del análisis.....	91
Planteamiento del problema.....	91
Simulaciones y resultados.....	92
Conclusiones del análisis	97
Cálculo del volumen límite máximo sin desembalse forzado.....	100
Objetivos del análisis.....	100
Simulaciones y resultados.....	100
Conclusiones del análisis	101
Reformulación de la regla de gestión definida en escala mensual empleando la escala diaria.....	103
Objetivos del análisis.....	103
Planteamiento del problema	103
Simulaciones y resultados.....	104
Conclusiones del análisis	114

Validación de las conclusiones anteriores mediante un análisis de la gestión a escala horaria	116
Objetivos del análisis	116
Datos del modelo	116
Simulaciones y resultados.....	119
Conclusiones.....	120
Análisis de avenidas del sistema considerando distintos caudales máximos instantáneos en Mostar	122
Objetivos del análisis.....	122
Paso de caudales instantáneos a caudales horarios y diarios	123
Simulaciones y resultados.....	127
Avenidas consideradas en las simulaciones.....	127
Simulaciones realizadas y resultados obtenidos	129
Escala diaria.....	130
Escala horaria.....	134
Conclusiones.....	139
Conclusiones generales sobre el sistema de explotación del río Neretva	141
Anejo 1:Justificación de la elección de la regla de operación definida en la hipótesis 4 del análisis en escala mensual.....	145
Introducción.....	145
Simulaciones.....	145
Resultados.....	146
Conclusiones.....	149
Anejo 2:Contexto del proyecto realizado dentro de las actuaciones en materia hidrológica realizadas en la cuenca del río Neretva.....	151
Antecedentes.....	151
Trabajos previos.....	152
Análisis de estudios existentes.....	152
Recopilación de información de estaciones de medida hidráulicas y meteorológicas ...	152
Visitas in situ a instalaciones	153
Estudio del Sistema hidrológico-hidráulico	153
Descripción del proyecto	153
Actividad 1: Puesta en marcha de la oficina regional	153
Actividad 2: Mejora de la infraestructura hidráulico-hidrológica y de medida del río Neretva.....	154
Sub-actividad 2.1: Recopilación y catalogación de datos referentes a la red de estaciones del río Neretva	155
Sub-actividad 2.2: Identificación de posibles mejoras	156
Sub-actividad 2.3: Preparación de las especificaciones técnicas que deberá cumplir el equipamiento que deberá adquirirse.	156
Sub-actividad 2.4: Adquisición del equipamiento.	157
Sub-actividad 2.5: Supervisión en la instalación del equipamiento.	157
Sub-actividad 2.6: Formación del personal que va a manejar el equipamiento. ...	157
Sub-actividad 2.7: Recopilación de datos adicionales.	157
Actividad 3: Creación de un modelo de simulación	158
Actividad 4: Establecimiento de reglas de operación de embalses	158
Sub-actividad 4.1: Preparación de un borrador para la operación de embalses	158
Sub-actividad 4.2: Establecimiento y desarrollo de una mesa de negociación con los explotadores de los embalses	158
Actividad 5: Preparación de un plan de acción.....	159
Sub-actividad 5.1: Análisis del consumo de agua en la cuenca	159
Sub-actividad 5.2: Preparación de un plan de acción	159
Actividad 6: Pasos finales.....	159

Anejo 3:Descripción de datos y resumen de resultados del modelo Simges Aquatool para los análisis mensuales	161
Introducción.....	161
Hipótesis 1: Solo se turбина cuando el embalse está lleno.....	161
Eco de datos	161
Resumen de resultados.....	167
Hipótesis 2: Se permite bajar el nivel de los embalses para turbinar	170
Eco de datos	170
Resumen de resultados.....	175
Hipótesis 3: Se establece un umbral de sueltas para cada embalse.....	179
Eco de datos	179
Resumen de resultados.....	185
Hipótesis 4: Se establece una curva de gestión para cada embalse.....	188
Eco de datos	188
Resumen de resultados.....	194
Anejo 4:Descripción de datos y resumen de resultados del modelo Simges Aquatool para los análisis diarios.....	199
Introducción.....	199
Análisis de las avenidas del sistema en escala diaria. Cálculo del volumen límite sin desembalse forzado.....	199
Eco de datos	199
Resumen de resultados.....	205
Reformulación de la regla de gestión definida en escala mensual a escala diaria	209
Eco de datos.....	209
Resumen de resultados del invierno 2.....	214
Resumen de resultados del invierno 3.....	218
Resumen de resultados invierno 4	221
Resumen de resultados invierno 5	225
Resumen de resultados invierno 6	228
Anejo 5:Descripción de datos y resumen de resultados del modelo Simges Aquatool para los análisis horarios	233
Introducción.....	233
Eco de datos.....	233

Índice de figuras

Figura 2.1: Visión general del sistema de explotación	19
Figura 2.2: Red eléctrica de Bosnia-Herzegovina	27
Figura 3.1: Esquema de la cuenca diseñado con Aquatool	33
Figura 4.1: Resultados hidrológicos de Rama, Jablanica y Mostar. Hipótesis 1	38
Figura 4.2: Resultados en la central hidroeléctrica de Rama. Hipótesis 1	39
Figura 4.3: Datos de explotación de las centrales de Jablanica y Salakovac. Hipótesis 1	41
Figura 4.4: Principales variables hidrológicas de Rama, Jablanica y Mostar. Hipótesis 2	43
Figura 4.5: Datos de explotación de las centrales de Rama, Jablanica y Mostar. Hipótesis 2	45
Figura 4.6: Alturas de turbinado en los embalses de Rama, Jablanica y Salakovac. Hipótesis 2	46
Figura 4.7: Principales variables hidrológicas de Rama, Jablanica y Mostar. Hipótesis 3	49
Figura 4.8: Datos de explotación de las centrales de Rama, Jablanica y Mostar. Hipótesis 3	51
Figura 4.9: Alturas de turbinado en los embalses de Rama, Jablanica y Salakovac. Hipótesis 3	52
Figura 4.10: Principales variables hidrológicas de Rama, Jablanica y Mostar. Hipótesis 4	55
Figura 4.11: Datos de explotación de las centrales de Rama, Jablanica y Mostar. Hipótesis 4	58
Figura 4.12: Alturas de turbinado en los embalses de Rama, Jablanica, Salakovac y Mostar. Hip 4	59
Figura 4.13: Volúmenes mensuales para cada embalse y alternativa	62
Figura 4.14: Alturas de turbinado mensuales para cada embalse y alternativa	65
Figura 4.15: Vertidos mensuales para cada embalse y alternativa	68
Figura 4.16: Energía producida en Rama en los diferentes casos	69
Figura 4.17: Energía producida en Jablanica en los diferentes casos	70
Figura 4.18: Energía producida en Grabovica en los diferentes casos	70
Figura 4.19: Energía producida en Salakovac en los diferentes casos	71
Figura 4.20: Energía producida en Mostar en los diferentes casos	71
Figura 4.21: Valores anuales para cada una de las centrales	72
Figura 4.22: Producción anual por hipótesis	72
Figura 5.1: Aportaciones diarias acumuladas en la cuenca durante el periodo simulado	77
Figura 5.2: Caudal aguas abajo de Mostar para cada caudal objetivo de turbinado en Jablanica	78
Figura 5.3: Vertidos en el embalse de Jablanica para cada caudal objetivo de turbinado	79
Figura 5.4: Caudal turbinado en el embalse de Jablanica para cada caudal objetivo de turbinado	80
Figura 5.5: Caudal turbinado en el embalse de Jablanica dividido por meses y alternativas	80
Figura 5.6: Producción energética en la central de Jablanica para cada caudal objetivo de turbinado	81
Figura 5.7: Producción energética en la central de Rama para cada caudal objetivo de turbinado en Jablanica	82
Figura 5.8: Aportación intermedia en el embalse de Rama durante el periodo simulado	83
Figura 5.9: Producción energética en la central de Grabovica para cada caudal objetivo de turbinado en Jablanica	83
Figura 5.10: Producción energética en la central de Salakovac para cada caudal de turbinado objetivo en Jablanica	84
Figura 5.11: Producción energética en la central de Mostar para cada caudal objetivo de turbinado en Jablanica	85
Figura 5.12: Producción energética en el sistema para cada caudal objetivo de turbinado en Jablanica	86
Figura 5.13: Producciones energéticas por central durante el mes de Marzo para cada caudal objetivo de turbinado en Jablanica	86
Figura 5.14: Producciones energéticas por central durante el mes de Abril para cada caudal objetivo de turbinado en Jablanica	87
Figura 5.15: Producciones energéticas por central para cada caudal objetivo en Jablanica	88
Figura 5.16: Producción energética total en Marzo para cada caudal objetivo de turbinado	88
Figura 5.17: Producción energética total en Abril para cada caudal objetivo de turbinado	89
Figura 5.18: Producción energética total para cada caudal objetivo de turbinado	89
Figura 5.19: Aportaciones diarias durante la primera avenida de cálculo en Jablanica	91
Figura 5.20: Aportaciones diarias durante la segunda avenida de cálculo en Jablanica	92
Figura 5.21: Caudales máximos aguas abajo de Mostar para la primera avenida simulada en función del caudal forzado establecido en Mostar	93

<i>Figura 5.22: Producción energética en el sistema en 24 días tras eal inicio de la avenida.</i>	94
<i>Figura 5.23: Caudales máximos aguas abajo de Mostar para la segunda avenida simulada en función del caudal forzado establecido en Mostar.</i>	95
<i>Figura 5.24: Producción energética en el sistema durante los doce días siguientes al inicio de la avenida.</i>	96
<i>Figura 5.25: Volumen mínimo embalsado durante la avenida en Jablanica</i>	98
<i>Figura 5.26: Caudal necesario para laminar la avenida en función del volumen inicial embalsado en Jablanica</i>	98
<i>Figura 5.27: Caudales máximos en Mostar para cada volumen límite definido en Jablanica</i>	101
<i>Figura 6.1: Producción energética media en Jablanica para cada volumen objetivo. Primer periodo invernal.</i>	105
<i>Figura 6.2: Curva Cota-Volumen del embalse de Jablanica</i>	106
<i>Figura 6.3: Producción energética media en Jablanica para cada volumen objetivo. Segundo periodo invernal.</i>	107
<i>Figura 6.4: Producción energética media en Jablanica para cada volumen objetivo. Tercer periodo invernal.</i>	108
<i>Figura 6.5: Producción energética media en Jablanica para cada volumen objetivo. Cuarto periodo invernal.</i>	109
<i>Figura 6.6: Producción energética media en Jablanica para cada volumen objetivo. Quinto periodo invernal.</i>	110
<i>Figura 6.7: Producción energética media en Jablanica para cada volumen objetivo. Sexto periodo invernal.</i>	111
<i>Figura 6.8: Producción energética media en Jablanica para cada volumen objetivo. Séptimo periodo invernal.</i>	112
<i>Figura 6.9: Producción energética media en Jablanica para cada volumen objetivo. Media de todos los periodos simulados.</i>	113
<i>Figura 6.10: Producción energética para los 8 meses de la simulación en Jablanica en función de cada volumen objetivo.</i>	114
<i>Figura 7.1: Caudales de entrada a los embalses</i>	117
<i>Figura 7.2: Aportaciones intermedias en la cuenca.</i>	117
<i>Figura 7.3: Aportaciones intermedias acumuladas en la cuenca</i>	118
<i>Figura 7.4: Aportaciones intermedias introducidas al modelo (en hm³/hora</i>	119
<i>Figura 7.5: Caudales circulantes en Mostar obtenidos para cada simulación.</i>	120
<i>Figura 8.1: Aportaciones totales diarias aguas abajo de Mostar.</i>	123
<i>Figura 8.2: Aportaciones totales en Mostar para avenidas de distintos caudales máximos instantáneos en hm³/día.</i>	128
<i>Figura 8.3: Comparativa de avenidas a escala horaria</i>	128
<i>Figura 8.4: Aportaciones totales en Mostar para avenidas de caudales máximos instantáneos en hm³/hora</i>	129
<i>Figura 8.5: Caudales circulantes en Mostar para cada avenida considerada en el caso de establecer en el embalse de Jablanica un volumen límite de 245 hm³.</i>	131
<i>Figura 8.6: Caudales circulantes en Mostar para cada avenida considerada en el caso de establecer en el embalse de Jablanica un volumen límite de 200 hm³.</i>	132
<i>Figura 8.7: Caudales circulantes en Mostar para cada avenida considerada en el caso de establecer en el embalse de Jablanica un volumen límite de 150 hm³.</i>	132
<i>Figura 8.8 :Caudales circulantes en Mostar para cada avenida considerada en el caso de establecer en el embalse de Jablanica un volumen límite de 100 hm³.</i>	133
<i>Figura 8.9: Caudales circulantes en Mostar para cada avenida considerada en el caso de establecer en el embalse de Jablanica un volumen límite de 245 hm³.</i>	135
<i>Figura 8.10: Caudales circulantes en Mostar para cada avenida considerada en el caso de establecer en el embalse de Jablanica un volumen límite de 200 hm³.</i>	136
<i>Figura 8.11: Caudales circulantes en Mostar para cada avenida considerada en el caso de establecer en el embalse de Jablanica un volumen límite de 150 hm³.</i>	137
<i>Figura 8.12: Caudales circulantes en Mostar para cada avenida considerada en el caso de establecer en el embalse de Jablanica un volumen límite de 100 hm³.</i>	138

<i>Figura A1.1: Energías medias anuales por central y alternativa</i>	146
<i>Figura A1.2: Energías medias anuales totales por alternativa</i>	147
<i>Figura A1.3: Vertidos medios anuales por central y alternativa</i>	148
<i>Figura A1.4: Vertidos medios anuales totales por alternativa</i>	148

Índice de tablas

<i>Tabla 2.1: Características generales de los embalses y centrales hidroeléctricas del sistema de explotación del río Neretva</i>	20
<i>Tabla 3.1: Datos de los embalses necesarios para el modelo</i>	30
<i>Tabla 3.2: Características de los embalses necesarias para el modelo</i>	31
<i>Tabla 3.3: Características de las centrales hidroeléctricas necesarias para el modelo</i>	32
<i>Tabla 4.1: Curvas de gestión de los embalses del sistema</i>	54
<i>Tabla 4.2: Vertidos medios anuales por embalse</i>	68
<i>Tabla 4.3: Producción anual por central e hipótesis</i>	73
<i>Tabla 5.1: Datos diarios del sistema introducidos en el programa SimWin</i>	76
<i>Tabla 5.2: Comparación entre los datos mensuales del año 2004 y los datos mensuales máximos del sistema (hm³/mes)</i>	77
<i>Tabla 5.3: Tabla de valores de turbinado en Jablanica y producción total para cada caudal objetivo de turbinado</i>	90
<i>Tabla 5.4: Caudal laminador necesario y volumen mínimo alcanzado para diferentes volúmenes iniciales en el embalse de Jablanica</i>	97
<i>Tabla 7.1: Volúmenes iniciales de los embalses para cada simulación</i>	119
<i>Tabla 8.1: Caudales máximos y medios y coeficiente ρ para las avenidas sufridas por el sistema durante los años 2001-2006</i>	125
<i>Tabla 8.2: Caudales máximos instantáneos para las avenidas sufridas por el sistema durante los años 2001-2006</i>	126
<i>Tabla 8.3: Tabla resumen de las simulaciones realizadas a escala diaria</i>	133
<i>Tabla 8.4: Tabla resumen de las simulaciones realizadas a escala horaria</i>	139
<i>Tabla A1.1: Energías medias anuales por central y totales para cada alternativa</i>	146
<i>Tabla A1.2: Vertidos medios anuales por central y totales para cada alternativa</i>	147

Introducción y objetivos

El presente proyecto final de carrera consiste en la definición de un plan de explotación para las centrales hidroeléctricas de la cuenca hidrográfica del río Neretva, situado en Bosnia-Herzegovina. La explotación de dichas centrales, a cargo de las empresas hidroeléctricas que se encargaron de su construcción, ha venido realizándose de forma desorganizada, sin una regla de explotación claramente definida y sin que exista estudio alguno sobre producción hidroeléctrica ni sobre protección contra avenidas.

Esta falta de una herramienta adecuada de explotación del sistema conlleva no solo un uso ineficiente de los recursos hídricos de la cuenca, sino un grave peligro para las regiones situadas aguas abajo. Cabe destacar entre estas zonas en peligro la ciudad de Mostar, que con 104000 habitantes es una de las ciudades más importantes del país.

Por estas razones a principios de 2007 la empresa pública “*Public Company for Water area of the Adriatic Sea*” decidió impulsar un proyecto integral de mejora en la cuenca, bajo el título de “*Integrated Management of Neretva River Basin – Bosnia and Herzegovina*”. Dicho proyecto persigue los siguientes objetivos generales:

- Mejora de la red de estaciones meteorológicas, de calidad y de aforo de la cuenca, así como mejora de su gestión.
- Desarrollo y puesta en marcha de un Modelo Matemático de Gestión de Cuenca, así como de un Modelo de Elevación Digital de la misma.
- Planteamiento de reglas de explotación adecuadas para los embalses situados en la cuenca hidrográfica, así como la creación de un ente interno de regulación que permita una gestión conjunta efectiva entre la compañía de aguas y las empresas hidroeléctricas que operan los embalses de la cuenca.
- Plan de actuaciones y programas de mejora de gestión a medio y largo plazo

De este proyecto integral, la parte de elaboración de un Modelo Matemático de Gestión de la Cuenca y la definición de reglas de explotación ha sido encargada por la empresa adjudicataria del proyecto al Grupo de Ingeniería de Recursos Hídricos del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente (DIHMA) de la Universidad Politécnica de Valencia, constituyendo el presente proyecto final de carrera.

Los objetivos perseguidos en el presente proyecto final de carrera son los definidos a continuación:

- Definición, a escala mensual, de una regla de explotación que optimice la producción de energía eléctrica sin perjudicar la protección frente a avenidas del sistema.
- Análisis de avenidas en el sistema, a escala diaria, para definir medidas de protección adecuadas que garanticen la seguridad del sistema frente a avenidas.
- Redefinición de la regla de gestión anteriormente definida, a escala diaria, con el objeto de comprobar la validez de la regla definida a escala

mensual y, en su caso, proponer una modificación de la misma que garantice una adecuada producción de energía eléctrica y la seguridad del sistema frente a avenidas.

- Validación de las conclusiones anteriores mediante un análisis de la gestión de la avenida a escala horaria.

Los objetivos perseguidos por parte del alumno son los siguientes:

- Aprendizaje del alumno en aspectos generales de la elaboración de proyectos.
- Aprendizaje del alumno en aspectos particulares de los proyectos en materia de recursos hídricos, como son la recopilación de datos, la elaboración de modelos, la obtención, validación y presentación de resultados y la obtención de conclusiones.
- Aprendizaje y manejo de software especializado en materia de recursos hídricos.
- Aprendizaje del alumno en la elaboración de informes y presentaciones.
- Concienciación del alumno en la importancia y alcance de un proyecto real, así como en las repercusiones que un proyecto real tiene sobre aquellas personas y entidades a las que afecta.
- Concienciación y aprendizaje del alumno en aspectos básicos de su futuro ejercicio profesional, como el trabajo en equipo, el cumplimiento de plazos y la transmisión de información.

En este caso, para la elaboración del modelo informático de la cuenca va a emplearse el paquete de software “Aquatool”, desarrollado por el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente (DIHMA) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). Una vez construido y calibrado el modelo va a procederse a simular el mismo para las situaciones anteriormente descritas.

Recopilación de información acerca de la cuenca

Descripción general de la cuenca

El río Neretva nace en la zona central de Bosnia-Herzegovina, en la cordillera de los Alpes Dináricos.

El río recorre en su mayor parte la zona centro meridional de Bosnia-Herzegovina, concretamente el Cantón de Herzegovina-Neretva. En total recorre 225 km, de los cuales 203 están situados en territorio Bosnio. Los restantes 22 km. los recorre por Croacia, concretamente por la provincia Dubrovnik-Neretva, donde desemboca en el mar Adriático en la ciudad de Ploce.

En su cuenca alta tiene este río dos cursos de agua principales. El primero de estos cursos está situado en la parte más septentrional del cantón, teniendo como hito el embalse de Rama (478 hm³), situado cerca de la ciudad de Prozor (10150 habitantes). El segundo de estos cursos corre de este a oeste, recorriendo la región de Konjic, que tiene como punto más importante la ciudad del mismo nombre (15000 habitantes). Ambos cursos de agua confluyen en el embalse de Jablanica (318 hm³).



Paso del río Neretva por la ciudad de Konjic

A partir de este punto el río entra en su cuenca media. Recorre las poblaciones de Jablanica (6000 habitantes), Potoci (8200 habitantes) y Mostar (104000 habitantes), donde la cuenca media finaliza. Esta cuenca se caracteriza por la existencia de embalses en serie. Aguas abajo del embalse de Jablanica se sitúan los embalses de Grabovica (19.8 hm³), Salakovac (68 hm³) y Mostar (11 hm³).



El puente viejo de Mostar

La cuenca baja se caracteriza por el terreno llano y la no existencia de embalses. Hay algunos regadíos de poca importancia. Desde Mostar el río Neretva fluye en dirección suroeste, pasando por los núcleos urbanos de Capljina y Gabela antes de cruzar la frontera con Croacia entre Gabela y Metkovic (14000 habitantes) situada ya en Croacia. El río desemboca formando un pequeño delta en la ciudad de Ploce.



Desembocadura del río Neretva en Ploce (Croacia)

La principal demanda de la cuenca es la generación de energía eléctrica. El curso alto del río permite establecer grandes saltos de agua, mientras que en su tramo medio el caudal del río permite turbinar un gran volumen de agua. Además también existe una demanda de uso lúdico, sobretodo en la cuenca alta del río o en los embalses. La demanda agrícola es escasa en toda la cuenca y prácticamente nula antes del paso por

Mostar, existiendo tan solo escasos regadíos situados ya en la cercanía de la frontera con Croacia.



Central hidroeléctrica de Salakovac



Uso lúdico en el río Neretva aguas arriba de Konjic



Embarcadero en el embalse de Salakovac

Cabe destacar también que en la margen izquierda del río, desde Konjic hasta Mostar, se halla la carretera que une Mostar con Sarajevo, una de las vías de comunicación más importantes del país.



*Izquierda: Carretera de Mostar a Sarajevo en Grabovica
Derecha: Carretera de Mostar a Sarajevo en Salakovac*

Descripción del sistema de explotación de la cuenca

El sistema de explotación objeto del presente análisis se compone de cinco embalses con cinco centrales hidroeléctricas situadas a pie de presa. Dicho sistema de explotación se sitúa físicamente entre las poblaciones de Prozor, Konjic y Mostar. Una imagen general del sistema de explotación se expone a continuación.

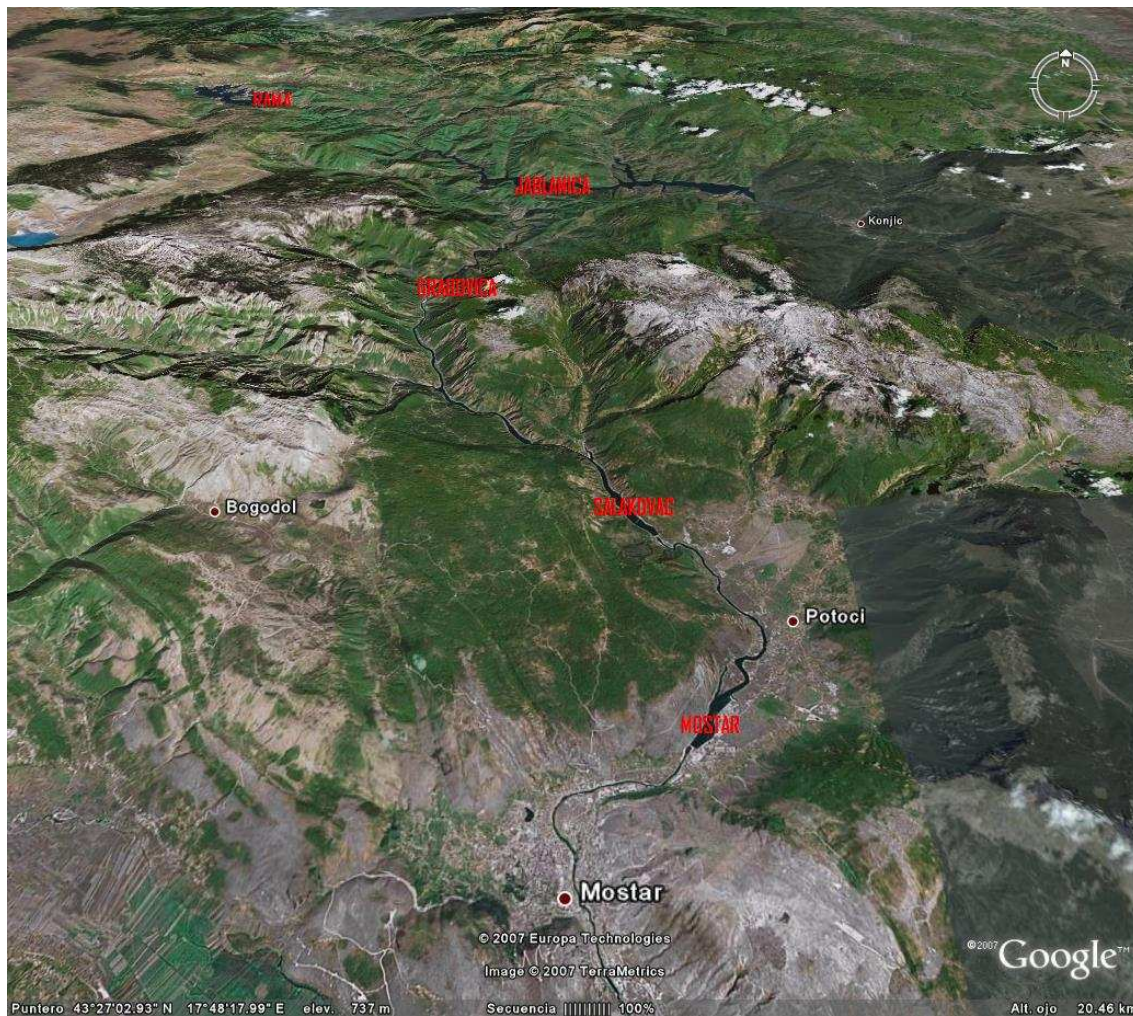


Figura 2.1: Visión general del sistema de explotación

Puede observarse que la situación de los embalses en el cauce es en serie. El embalse situado aguas arriba, el de Rama, se sitúa en el cauce más septentrional de los dos en los que se divide la cuenca alta del Neretva. En el embalse de Jablanica, situado a continuación de Rama, confluyen ambos cursos de agua. Inmediatamente aguas abajo de Jablanica se sitúa el embalse de Grabovica, siguiendo a continuación los embalses de Salakovac y Mostar, situado este último muy cercano a la ciudad del mismo nombre, una de las ciudades más importantes de Bosnia y la ciudad de mayor entidad de la cuenca hidrográfica. Un aspecto a destacar del sistema de explotación es la ausencia de regadíos de importancia, aspecto que puede observarse en la imagen.

Aguas abajo de Mostar no existe obra de regulación alguna. La ausencia de regadíos de importancia (a pesar de existir varias zonas regadas en Gabela y en territorio croata), unido a la ausencia de lugares donde poder situar cerradas aceptables debido a lo llano del terreno (Mostar está situado a escasos 50 metros sobre el nivel del mar, lo que limita la energía disponible al no poder conseguir saltos aceptables), provocan que no exista embalse alguno. El sistema de explotación, por lo tanto, concluye en la ciudad de Mostar. En dicha ciudad hay fijados unos límites de caudal. En concreto hay establecido un caudal ambiental mínimo de $50 \text{ m}^3/\text{s}$, y un caudal máximo de $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ para garantizar la seguridad frente a avenidas del sistema.

Los datos de las obras hidráulicas existentes en el sistema se presentan a continuación.

DATOS EMBALSES	Rama	Jablanica	Grabovica	Salakovac	Mostar
Caudal medio de entrada (m ³ /s)	33.1	111.7	136.2	182.7	197.4
Caudal medio de entrada (hm ³ /mes)	87	294	358	480	519
Volumen máximo (hm ³)	478	318	19.8	68	11
Caudal máximo de sueltas (m ³ /s)	702	4288	2460	2720	3170
Nivel máximo de embalse (m.s.n.m.m.)	595	270	159	123	78
Nivel mínimo de embalse (m.s.n.m.m.)	522	220	125	80	55

DATOS CENTRALES	Rama	Jablanica	Grabovica	Salakovac	Mostar
Caudal máximo (hm ³ /mes)	168	505	999	1419	946
Caudal máximo (hm ³ /día)	5.60	16.83	33.30	47.30	31.53
Caudal máximo (m ³ /s)	64.81	194.83	385.42	547.45	364.97
Salto bruto (m)	325	111	35	43	21.7
Cota base central (m)	270	159	124	80	56.3
Cota mínima de turbinado (m)	536	235	154.5	118.5	72
Potencia instalada (MW)	160	259	113	210	75
Tipo de central	fluyente	fluyente	puntas	puntas	fluyente
Año de construcción	1968	1955	1982	1982	1987

Tabla 2.1: Características generales de los embalses y centrales hidroeléctricas del sistema de explotación del río Neretva

Los valores de la tabla ponen de manifiesto la situación en serie de los embalses de la cuenca. Puede observarse como la cota de la base de la central de pie de presa de un embalse coincide con la cota correspondiente al nivel máximo alcanzable en el embalse siguiente. Así pues la cota de la base de la central de Rama coincide con el nivel máximo posible en Jablanica, la cota de la base de la central de Jablanica coincide con el nivel máximo posible en Grabovica, y de igual forma ocurre con el resto de embalses.

En la tabla también se aprecia el cambio gradual de morfología de la cuenca. El mayor salto bruto se alcanza en Rama, el embalse situado más aguas arriba de la cuenca, y que con 325 m es un salto típicamente de cuenca alta. El segundo salto bruto más grande es el de Jablanica, situado aguas abajo de Rama, y que presenta un salto de 111 m, un valor apreciable aunque muy lejano de Rama. Los siguientes saltos se corresponden ya con saltos de cuenca media, siendo el de Grabovica igual a 35.3 m, el de Salakovac igual a 42.9 m y el de Mostar igual a 21.7 m.

Además de en los saltos, también se aprecia la variación de morfología en las capacidades de los embalses. Los dos embalses situados aguas arriba (Rama y Jablanica) son los mayores de la cuenca, ya que al estar situados en la cuenca alta disponen de grandes desniveles y de lugares muy convenientes para las cerradas. Los otros embalses, situados ya en su cuenca media, presentan menores capacidades al no disponer de grandes desniveles.

Las centrales situadas aguas arriba (Rama y Jablanica) funcionan como centrales fluyentes. Las otras centrales funcionan en puntas, con el siguiente embalse haciendo las veces de contraembalse del anterior. Sin embargo en Mostar, debido a las restricciones

de caudal y a la imposibilidad de situar un contraembalse, la central funciona como fluyente.

Una vez descrito el sistema de explotación de forma general, va a realizarse una descripción detallada de cada elemento del sistema a continuación.

➤ **Embalse de Rama**

El embalse de Rama, puesto en servicio en el año 1968 conjuntamente con su central hidroeléctrica asociada, es el segundo construido en la cuenca hidrográfica, el que está situado más aguas arriba de la misma y el que cuenta con el mayor volumen, al tener una capacidad de 478 hm³. Se encuentra situado sobre el más septentrional de los dos cauces que forman la cuenca alta del Neretva.

El embalse fue construido por la empresa energética “*Elektroprivreda Hrvatske zajednice Herceg Bosne*”, empresa que se encarga de su explotación y que posee además la explotación del embalse de Mostar. Su función principal es la generación de energía eléctrica.

La presa de Rama tiene una altura de 103 m desde cimiento hasta coronación, presentando además una longitud de coronación igual a 230 m. La cota máxima de lámina de agua en el embalse es igual a 595 m.s.n.m.m. Su capacidad máxima de sueltas controladas es igual a 702 m³/s.

La central hidroeléctrica de Rama tiene una potencia instalada de 160 MW, funcionando como central fluyente. El caudal máximo capaz de turbinar es igual a 64 m³/s, lo que significa que es capaz de turbinar 168 hm³ al mes. La central se encuentra a 270 m.s.n.m.m., por lo que el salto bruto es igual a 325 m. La cota mínima de turbinado de la central está situada a 536 m.s.n.m.m.

La generación de energía de la central se realiza mediante 2 grupos turbina-generador iguales. Las turbinas son de tipo Francis, siendo fabricadas por la empresa Litostroj, de 80 MW de potencia instalada. Los generadores son de tipo trifásico síncronos, modelo S-4758-16, fabricados por Koncar. Su potencia nominal es igual a 90 MVA.

➤ **Embalse de Jablanica**

El embalse de Jablanica fue el primer embalse existente en la cuenca. En concreto se puso en servicio el año 1955, corriendo la construcción y la explotación a cargo de la empresa “*Elektroprivreda Bosne i Hercegovine*”, que gestiona además los embalses de Grabovica y Salakovac.

El embalse se encuentra situado inmediatamente aguas abajo de Rama, en el punto en que los dos cauces de la cuenca alta del río confluyen. Es, con 318 hm³ de volumen, el segundo mayor embalse de la cuenca. Este embalse está situado en un lugar importante de la cuenca, y es el que mayor cuenca vertiente intermedia presenta.



Presa de Jablanica

La presa de Jablanica tiene una altura total desde cimentación igual a 93,7 m. La cota correspondiente a la situación de embalse lleno es de 270 m.s.n.m.m. Su capacidad máxima de sueltas, tanto por compuertas de coronación como por tomas de turbinado y desagües de fondo es igual a 4288 m³/s, la mayor de todos los embalses de la cuenca, hecho que se justifica debido a su situación geográfica, que le convierte en el embalse con mayor cuenca intermedia, recibiendo además todas las aguas que llegan de la cuenca alta del río.

La central hidroeléctrica de Jablanica cuenta con 259 MW de potencia instalada. Funciona como central fluyente. El caudal máximo posible que se puede turbinar es igual a 192 m³/s, lo que significa que es capaz de turbinar 505 hm³ al mes. La cota de la central es de 159 m.s.n.m.m., por lo que el salto bruto de la misma es igual a 111 m. La cota mínima de turbinado de la central está situada a 235 m.s.n.m.m. La central genera energía eléctrica mediante seis grupos de turbinado contando todos ellos con turbinas de tipo Francis.

➤ **Embalse de Grabovica**

El embalse de Grabovica se puso en funcionamiento, conjuntamente con su central hidroeléctrica, durante el año 1982. Ocupa este embalse el tercer lugar en cuanto a situación en la cuenca. Está situado inmediatamente aguas abajo del embalse de Jablanica. Cuenta con una reserva de 19,8 hm³. Este embalse es gestionado por la empresa eléctrica “*Elektroprivreda Bosne i Hercegovine*”, que lo construyó para aprovechar sus posibilidades de generación eléctrica. Esta empresa se encarga también

de la gestión de los embalses de Jablanica y Salakovac (que se puso en funcionamiento el mismo año que Grabovica).



Estación meteorológica situada en la presa de Grabovica

La presa del embalse de Grabovica tiene una altura total desde coronación igual a 34 m. La cota máxima de operación del embalse es de 159 m.s.n.m.m. Su capacidad máxima de sueltas controladas es igual a 2460 m³/s.

La potencia instalada de la central hidroeléctrica de Grabovica es igual a 113 MW funcionando como central de puntas o de almacenamiento. Esta central es capaz de turbinar un caudal de hasta 380 m³/s, lo que arroja al mes un total de 1000 hm³ turbinables como máximo. La cota de la base de la central está situada a una cota de 124 m.s.n.m.m. Por lo tanto el salto bruto de la central es igual a 35 m. La cota a la que está situada la toma de la central, siendo por tanto la cota mínima de turbinado, es de 154,5 m.s.n.m.m. La generación de energía eléctrica se consigue mediante dos grupos turbina-generator iguales, con turbinas de tipo Kaplan.

➤ **Embalse de Salakovac**

El embalse de Salakovac se puso en funcionamiento a la vez que el de Grabovica, en el año 1982. Su construcción y explotación corrió a cargo de la empresa “*Elektroprivreda Bosne i Hercegovine*”, empresa propietaria y explotadora de los embalses de Jablanica y Grabovica. Su situación en la cuenca lo hace ocupar el cuarto lugar desde aguas arriba, situado a continuación del embalse de Grabovica, de cuya central hace las veces de contraembalse. Cuenta con una capacidad máxima de

almacenamiento de 68 hm^3 , convirtiéndole en el tercer embalse de la cuenca en cuanto a capacidad máxima.



Vista del río Neretva desde la presa de Salakovac

La presa de Salakovac cuenta con una altura igual a 47 m. La cota máxima de operación del embalse está situada a 123 m.s.n.m.m. Su capacidad máxima de sueltas controladas es igual a $2720 \text{ m}^3/\text{s}$.

La central hidroeléctrica del embalse de Salakovac tiene una potencia instalada igual a 210 MW funcionando como central de puntas. Es capaz de turbinar un caudal de hasta $540 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que significa que en un mes puede turbinar un máximo de 1420 hm^3 . La cota de base de la central está situada a una cota igual a 80 m.s.n.m.m. Este valor arroja un salto bruto igual a 43 m. La cota de toma de la central, o lo que es lo mismo, la cota mínima de turbinado, está situada a 118,5 m.s.n.m.m. La potencia de la central se reparte entre tres grupos generadores de idénticas características, funcionando con turbinas de tipo Kaplan.

➤ Embalse de Mostar

El embalse y central de Mostar es el último embalse construido en el sistema. Concretamente de puso en servicio el año 1987, al igual que su central de pie de presa. Es el embalse situado más aguas abajo de la misma, el que cuenta con una menor capacidad de almacenamiento y el situado más cerca del punto más delicado de la cuenca: el paso del río Neretva por la ciudad de Mostar. Cuenta el total con una capacidad de almacenamiento de 11 hm³.



Central hidroeléctrica de Mostar

La construcción del embalse y su posterior explotación ha sido realizada por la empresa energética “*Elektroprivreda Hrvatske zajednice Herceg Bosne*”, empresa que se encarga también de la explotación y mantenimiento del embalse de Rama. Su función principal es la generación de energía eléctrica.

La presa de Mostar cuenta con una altura de construcción de 28 m, con una longitud de coronación de 255,6 m. La cota máxima de lámina de agua que puede alcanzarse en el embalse es de 78 m.s.n.m.m. Es capaz de evacuar de forma controlada un total de 3170 m³/s.

La central hidroeléctrica de Mostar cuenta con 75 MW de potencia instalada, funcionando como central fluyente al no disponer de contraembalse. Su capacidad máxima de turbinado es de 360 m³/s, por lo que su capacidad máxima de turbinado en un mes es igual a 946 hm³. La central se encuentra a 56.3 m.s.n.m.m., por lo que el salto bruto es igual a 21.7 m. La cota mínima de turbinado de la central está situada a 72 m.s.n.m.m.

La generación de energía de la central se realiza mediante 3 grupos turbina-generador de características idénticas. Las turbinas son de tipo Kaplan, fabricadas por la empresa Litostroj, de 25 MW de potencia instalada. Los generadores son de tipo trifásico síncronos, modelo S-6546-40, fabricados por Koncar. Su potencia nominal es igual a 30 MVA.

Descripción de las demandas de la cuenca

La cuenca hidrográfica del río Neretva tiene un marcado carácter hidroeléctrico, tal y como pone de manifiesto su sistema de explotación. La construcción de los embalses de la cuenca y su explotación fue llevada a cabo por dos empresas energéticas diferentes. En concreto, la empresa “*Elektroprivreda Hrvatske zajednice Herceg Bosne*” gestiona los embalses de Rama y Mostar, mientras que la empresa “*Elektroprivreda Bosne i Hercegovine*” gestiona los embalses de Jablanica, Grabovica y Salakovac.

Para destacar la importancia del río Neretva en la generación de energía eléctrica basta indicar que la producción en las centrales de Jablanica, Grabovica y Salakovac es el 25% de la producción de energía obtenida por la empresa que explota estos tres embalses. En el caso de la otra compañía, que gestiona los embalses de Rama y Mostar, obtiene de estos dos embalses el 58% de su producción total. En total, las centrales hidroeléctricas del río Neretva generaron en 2006 un total de 2600 Gwh.

El río Neretva es, además, el río que más centrales hidroeléctricas presenta del país, ya que dispone de 5 mientras que el total de instalaciones de generación de energía hidroeléctrica en el país es de 13. Es decir, más de la tercera parte de las centrales hidroeléctricas de Bosnia-Herzegovina toma agua del río Neretva.

En resumen, la generación de energía hidroeléctrica es la demanda más significativa de la cuenca.

La demanda agrícola es prácticamente inexistente en la cuenca. La escarpada orografía de su cuenca alta, unida a la falta de infraestructuras de transporte de entidad en toda la cuenca y de regulación en su cuenca baja provoca la inexistencia de regadíos de entidad apreciable en la práctica totalidad de la cuenca. Tan solo se aprecia una acumulación aceptable de regadíos en la zona del delta, una vez cruzada la frontera con Croacia.

Por lo tanto, puede afirmarse que la demanda agrícola de la cuenca es inapreciable, por lo que no se va a tomar en consideración para el análisis posterior.

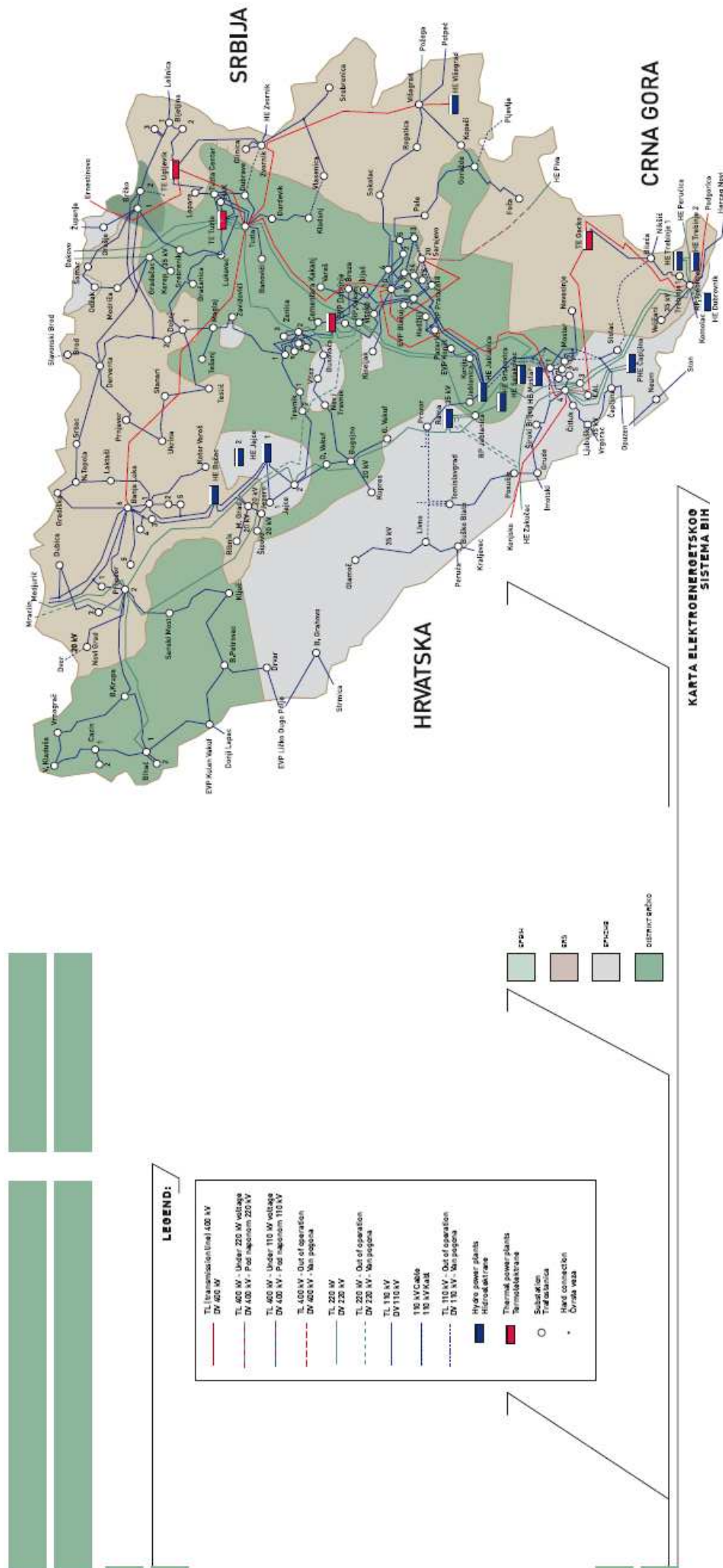


Figura 2.2: Red eléctrica de Bosnia-Herzegovina

Por lo que respecta a la demanda de agua para abastecimiento urbano, la situación es semejante a la de la demanda agrícola. La única ciudad de entidad apreciable es la ciudad de Mostar (104000 habitantes), y el abastecimiento de la misma se realiza mediante pozos.

En resumen, la demanda de abastecimiento urbano es inapreciable, por lo que no se va a tomar en consideración para este análisis.

Tampoco existen en la cuenca demandas de agua para refrigeración de centrales térmicas. En todo el país tan solo existen cuatro centrales de este tipo y ninguna de ellas se encuentra en las cercanías del río Neretva.

En cuanto a los usos lúdicos existentes en la cuenca pueden agruparse en dos tipos. Existen actividades de piragüismo en la cuenca alta, aguas arriba de los embalses de Rama y Jablanica, por lo que no aparecen en el sistema (siendo además de escasa entidad). Por otra parte existen algunos pequeños embarcaderos en los embalses, que a efectos del sistema no suponen más restricción que el hecho de mantener los embalses a un nivel constante los meses de verano, cuando aparece la demanda.

Sí cabe destacar una restricción del sistema en la ciudad de Mostar. En concreto hay establecido un caudal mínimo igual a $50 \text{ m}^3/\text{s}$ en ella. Además, el caudal máximo que garantiza la ausencia de peligro frente a avenidas en Mostar es igual a $1200 \text{ m}^3/\text{s}$.

Recapitulando, la única demanda que va a considerarse en el sistema es la generación de energía eléctrica. Además de esta demanda deben tenerse en cuenta las restricciones de caudal en Mostar.

Descripción de los datos de aportaciones de la cuenca

Se dispone de los datos de explotación de los embalses de la cuenca hidrográfica en tres escalas diferentes:

- A escala mensual se dispone de datos desde Enero de 1951 hasta Diciembre de 1990, un total de 50 años completos. En concreto se disponen los siguientes datos:
 - Cota de la lámina de agua a principios de mes.
 - Volumen almacenado a principios de mes.
 - Volumen de agua que ha entrado al embalse en todo el mes.
 - Volumen de agua turbinado en el embalse en todo el mes.
 - Volumen de agua evacuado por los órganos de desagüe (aliviadero y desagüe de fondo) del embalse en todo el mes.
- A escala diaria se dispone de datos desde el 1 de Enero de 2001 hasta el 31 de Diciembre de 2006, un total de 6 años completos. Se dispone de las mismas variables que a escala mensual:
 - Cota de la lámina de agua al inicio del día.
 - Volumen almacenado al inicio del día.
 - Volumen de agua que ha entrado al embalse en todo el día.
 - Volumen de agua turbinado en el embalse en todo el día.

- Volumen de agua evacuado por los órganos de desagüe (aliviadero y desagüe de fondo) del embalse en todo el día.
- A escala horaria, se dispone de datos de varias avenidas, entre las que se ha tomado la que va desde las 0 horas del día 23 de Marzo de 2004 hasta las 23 horas del día 24 de Marzo de 2004, un total de 2 días completos. Se dispone de las siguientes variables:
 - Cota de la lámina de agua al inicio de la hora.
 - Volumen de agua que ha entrado al embalse en una hora
 - Volumen de agua evacuado del embalse (aliviadero, turbinas y desagüe de fondo) durante una hora.

Estos datos deben ser tratados convenientemente para poder ser introducidos en el sistema. Los datos de niveles vienen dados en metros sobre el nivel medio del mar (m.s.n.m.m.). Los datos de volumen almacenado vienen dados en hectómetros cúbicos (hm^3). Respecto a los datos de caudales facilitados, la unidad depende de la escala considerada. En las escalas diaria y horaria la unidad de todos los datos de caudales es el metro cúbico por segundo (m^3/s), mientras que a escala mensual los datos de caudales se presentan en hectómetros cúbicos por mes (hm^3/mes).

El tratamiento de los datos para su introducción en el modelo conceptual se describe en el apartado siguiente.

Elaboración de un modelo conceptual para la simulación de la gestión de la cuenca.

Construcción del modelo

Para la elaboración del modelo informático de la cuenca va a emplearse el paquete de software “Aquatool”, desarrollado por el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente (DIHMA) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). Dicho programa permite realizar una modelación integral de la cuenca, obteniendo además un amplio rango de resultados. El programa se ha empleado en España para la elaboración de planes hidrológicos de cuenca, aplicándose también en países como Italia, Argentina y Brasil. En todos los casos se han obtenido buenos resultados, lo que avala la robustez y capacidad del programa.

En este caso el modelo va a constar de cuatro elementos distintos:

- Tramos de río
- Embalses
- Demandas y restricciones
- Aportaciones

Para la introducción de todos estos elementos, excepto en el caso de los tramos de río, es necesario introducir diferentes datos. Los datos necesarios en el modelo se detallan a continuación.

➤ **Datos de los embalses**

En el sistema existen cinco embalses descritos en el apartado anterior. Los datos de dichos embalses deben introducirse al modelo de la forma correcta y en la unidad correcta (el programa necesita los datos en m, hm³ y GW). Los datos necesarios son los siguientes:

	V. max	V.min	Capacidad de sueltas
	Hm3	Hm3	Hm3/mes
E RAMA	478	21	168
E JABLANICA	318	30	505
E GRABOVICA	19.8	15	999
E SALAKOVAC	68	55	1419
E MOSTAR	11	5	946

Tabla 3.1: Datos de los embalses necesarios para el modelo

El volumen máximo de los embalses a introducir en el modelo es la capacidad máxima de almacenamiento que presentan.

Para el programa el volumen mínimo es aquel por debajo del cual no se satisface demanda alguna excepto caudales ecológicos. En este caso el volumen mínimo es igual al volumen de agua almacenado en el embalse cuando el nivel de la lámina de agua

coincide con la cota mínima de turbinado, al ser la demanda hidroeléctrica la única considerada en el modelo.

En lo que respecta a la capacidad máxima de sueltas, el valor introducido en el modelo para cada embalse es igual al caudal máximo turbinable para cada central en hm^3/mes . De esta forma se asegura, por una parte, que no van a realizarse desembalses no turbinados excepto en el caso en que el embalse se halle lleno (situación que se da realmente en la cuenca al no existir más demanda que la hidroeléctrica, que al ser no consuntiva permite también satisfacer el caudal ecológico) y por otra parte permite obtener resultados separados de sueltas turbinadas y sueltas no turbinadas en embalses, en el caso en que el embalse se halle lleno (para el modelo estas sueltas figurarán como “vertidos”). En el análisis de la seguridad del sistema frente a avenidas este caudal máximo de sueltas controladas se aumentará, en previsión de que deban realizarse sueltas controladas con el embalse no lleno para poder laminar adecuadamente la avenida (además de convertir las unidades en ud/mes a $\text{ud}/\text{día}$).

El modelo también precisa de las curvas cota-superficie-volumen de los embalses, que se exponen a continuación:

E RAMA	c	522	547	558	565	571	577	582	586	589	596
	s										
	v	0	50	100	150	200	250	300	350	400	500
E JABLANICA	c	220	220	230	240	250	256	260	265	268	271
	s										
	v	0	0	20	50	100	150	200	250	300	350
E GRABOVICA	c	125	125	125	125	125	135	143	150	155	159
	s	0	0	0	0	0	0.3	0.6	0.8	1.1	1.4
	v	0	0	0	0	0	2	5	10	15	20
E SALAKOVA	c	77	92	97	106	110	115	117	119	120	124
	s	0	0.7	1.1	1.9	2.2	2.7	3.1	3.3	3.4	3.9
	v	0	5	10	20	30	40	50	55	60	70
E MOSTAR	c	55	64.5	67	69.5	71	72.5	74	75	76	78
	s										
	v	0	1	2	3	4	5	6	7	8	11

Tabla 3.2: Características de los embalses necesarias para el modelo

Se observa como no hay datos de superficie del embalse para cada cota. No son necesarios para el modelo, ya que el único cálculo para el que son necesarias las superficies es para el cálculo de evaporaciones, que van a despreciarse en este caso.

➤ Datos de demandas y restricciones

En el modelo solo va a introducirse un tipo de demanda, la hidroeléctrica, y una sola restricción, el caudal mínimo en Mostar. Satisfacer la otra restricción en Mostar, el caudal máximo, es el objetivo del análisis de avenidas.

Respecto a las demandas hidroeléctricas se van a introducir en el modelo las cinco centrales del sistema. Los datos de las mismas introducidos en el modelo son los siguientes:

	Caudal máximo	Cota base de la central	Cota mínima de turbinado	Coef. Energía
	hm ³ /mes	m	m	Gwh/(Hm ³ *m)
HE RAMA	168	270	536	0.00214
HE JABLANICA	505	159	235	0.00214
HE GRABOVICA	999	124	154.5	0.00234
HE SALAKOVA	1419	80	118.5	0.00252
HE MOSTAR	946	56.3	72	0.00236

Tabla 3.3: Características de las centrales hidroeléctricas necesarias para el modelo

Los datos de esta tabla son iguales a los presentados en el apartado de descripción de la cuenca. El único dato nuevo es el llamado coeficiente de energía. Dicho coeficiente es el que permite al modelo calcular la energía producida, y se obtiene como el producto del coeficiente de eficiencia global por un factor de conversión. Para los análisis a escala diaria las ud/mes se deberán convertir a ud/día.

En lo que respecta la restricción en Mostar, va a introducirse como caudal ecológico impuesto en el tramo de río situado aguas abajo de la central de Mostar. El caudal ecológico, igual a 50 m³/s, debe convertirse de unidad. Efectuando esta conversión se obtiene la siguiente restricción:

- Restricción en escala mensual: 131 hm³/mes
- Restricción en escala diaria: 4,32 hm³/día

➤ Datos de aportaciones intermedias en régimen natural

En el modelo van a establecerse cinco aportaciones intermedias. Dichas aportaciones se van a situar justo aguas arriba de cada embalse, y representan las aportaciones de la cuenca vertiente entre cada embalse y el siguiente.

El cálculo de dichas aportaciones intermedias se va a efectuar a partir de los datos de explotación de los embalses que se tienen. En concreto van a ser necesarios los datos siguientes datos:

- Volumen de agua que ha entrado al embalse en el periodo considerado.
- Volumen de agua turbinado en el embalse en el periodo considerado.
- Volumen de agua evacuado por los órganos de desagüe (aliviadero y desagüe de fondo) del embalse en el periodo considerado.

Para obtener las aportaciones intermedias en régimen natural debe restarse a las entradas de cada embalse (punto de desagüe de cada cuenca intermedia) las salidas del embalse anterior (que a su vez son las entradas en esa cuenca intermedia procedentes de la cuenca anterior). Dichas aportaciones intermedias están ya en régimen natural, pues no existe ningún elemento de regulación en la cuenca intermedia de cada embalse, al ser los cinco embalses existentes en la cuenca los que delimitan cada cuenca intermedia.

Así pues, para obtener las aportaciones intermedias en el embalse de Rama no hay que realizar acción alguna, puesto que aguas arriba de Rama no existe ningún otro embalse. Para el cálculo de las aportaciones intermedias en el embalse de Jablanica hay que restar a las entradas a dicho embalse las salidas del embalse de Rama, que son a su vez la suma de las salidas por turbinado y las salidas por órganos de desagüe (aliviaderos y desagües de fondo). Y así para el resto de embalses, restando a la entrada de los mismos las salidas del embalse anterior, que son a su vez la suma de los caudales evacuados por las turbinas y los órganos de desagüe.

Este proceso es el mismo independientemente de la escala. Sin embargo, a escala mensual los datos vienen dados en hm^3/mes , por lo que no hay que realizar conversión alguna; mientras que a escala diaria los datos vienen dados en m^3/s , por lo que estos datos deben convertirse previamente a $\text{hm}^3/\text{día}$.

Recapitulando todo el apartado, el modelo representado en el programa es el siguiente:

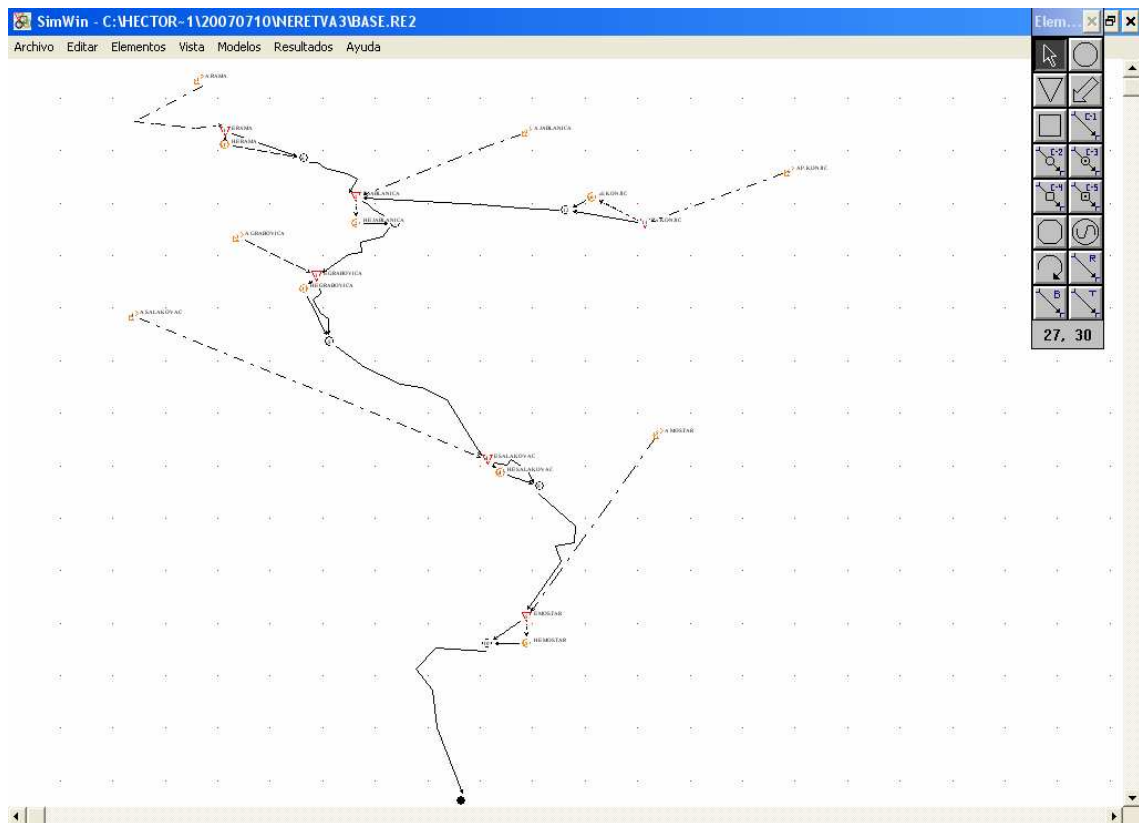


Figura 3.1: Esquema de la cuenca diseñado con Aqutool

Calibración del modelo

Como paso posterior al diseño del modelo es necesario calibrarlo. La calibración de un modelo consiste introducir variaciones en el mismo de tal forma que el modelo reproduzca las reglas de operación vigentes de la cuenca. De este modo puede ensayarse el efecto de realizar variaciones en estas reglas o de introducir nuevos elementos en el modelo.

Sin embargo, tal y como se ha expuesto en la introducción, las reglas de operación del sistema no estaban definidas, siendo la gestión un tanto desorganizada. Es por ello por lo que se ha descartado continuar con la situación existente hasta ahora y por lo que se ha impulsado el proyecto integral en el que se incluye este estudio, cuya finalidad es precisamente la de definir unas reglas de operación adecuadas para la cuenca. En otras palabras la regla de gestión que existía en el sistema ha sido rechazada, debiendo encontrarse una nueva regla de gestión que garantice el uso eficiente de los recursos del sistema.

Por lo tanto la calibración del modelo no debe efectuarse intentando reproducir la gestión existente, sino intentando reproducir las reglas de operación que vayan a ensayarse para encontrar aquella más adecuada. A priori se van a ensayar tres situaciones, aunque puede decidirse ensayar otras situaciones.

- Solo se permite turbinar con embalse lleno.
- Se permite turbinar hasta la cota mínima de turbinado.
- Se establece un volumen límite por debajo del cual no es posible turbinar pero sí por encima.

Es decir, que la calibración del sistema debe realizarse para cada una de estas alternativas de forma que se cumplan las reglas definidas en cada una de ellas. Para la primera hipótesis deberá calibrarse el sistema para que solo se turbine con embalse lleno, para la segunda deberá calibrarse para que permita el turbinado siempre que haya agua por encima de la cota mínima de turbinado y para la tercera deberá calibrarse para que el turbinado se realice cuando el embalse esté por encima del volumen límite.

Aunque deba calibrarse cada hipótesis por separado deben tomarse unas consideraciones generales que deberán seguirse para cada hipótesis. Tomar consideraciones de carácter general permite minimizar los cambios que deberán realizarse para pasar de una hipótesis a otra, lo que ahorra tiempo y permite definir más fácilmente hipótesis nuevas. Dichas consideraciones generales son las siguientes.

- a. En la cuenca únicamente se gestionan los embalses de Rama y Jablanica. Ambos embalses tienen mucha más entidad que el resto de embalses de la cuenca hidrográfica.
- b. La estrategia de desembalse de la cuenca asegura que la central hidroeléctrica de Mostar siempre estará turbinando el máximo caudal posible, siempre que haya agua disponible por encima del volumen límite. Esto se justifica en que es la central situada más aguas abajo y por tanto el caudal disponible es superior al del resto de centrales, además de estar situada aguas abajo de todos ellos. Si se plantease un régimen de sueltas condicionado por una central aguas arriba, resultaría en una pérdida de caudal útil en Mostar cuando la suma de las sueltas aguas arriba con las aportaciones intermedias resultara de un caudal superior a la capacidad de la central.
- c. El caudal en Mostar no debe ser inferior a $50 \text{ m}^3/\text{s}$, que para el modelo mensual supone $131 \text{ hm}^3/\text{mes}$. Este tampoco puede exceder de 1200

m³/s, pero esta limitación no puede comprobarse con un modelo de paso mensual, ya que el caudal máximo se dará puntualmente durante unas horas o unos días.

Además es necesario establecer unas prioridades y unos umbrales de sueltas en todos los embalses de la cuenca. De esta forma se implican en la gestión todos ellos, estableciendo un orden de sueltas entre ellos (de aguas arriba a aguas abajo, por lo que el primer embalse en desembalsar agua es Rama) y un umbral de sueltas en cada uno de ellos. Esta regla de gestión permite conseguir la mayor protección posible ante avenidas sin dejar de abastecer al mismo tiempo la demanda hidroeléctrica del mismo, al no desembalsar hasta último lugar los embalses menores de la cuenca, más sensibles a una reducción de cota que los embalses de Rama y Jablanica.

Una vez satisfechas estas consideraciones se buscarán reglas de gestión adecuadas para los embalses de Rama y Jablanica que permitan maximizar la generación de energía eléctrica sin que se vea comprometida la seguridad ante una avenida en Mostar. En este caso las reglas de operación se basan en volúmenes límite (el máximo, el mínimo y un volumen intermedio) por lo que los cambios a realizar entre una hipótesis y otra van a realizarse fundamentalmente en los embalses, variando los valores de los volúmenes máximo, mínimo y objetivo del modelo.

Análisis de diferentes posibilidades de gestión para las centrales hidroeléctricas en escala mensual.

Objetivos del modelo mensual

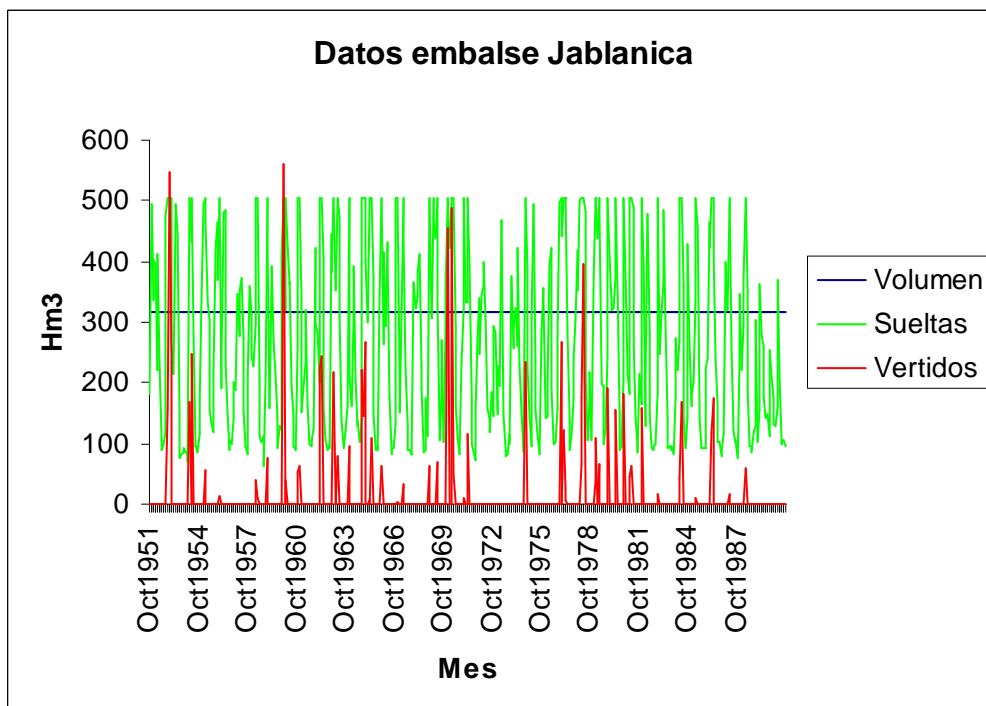
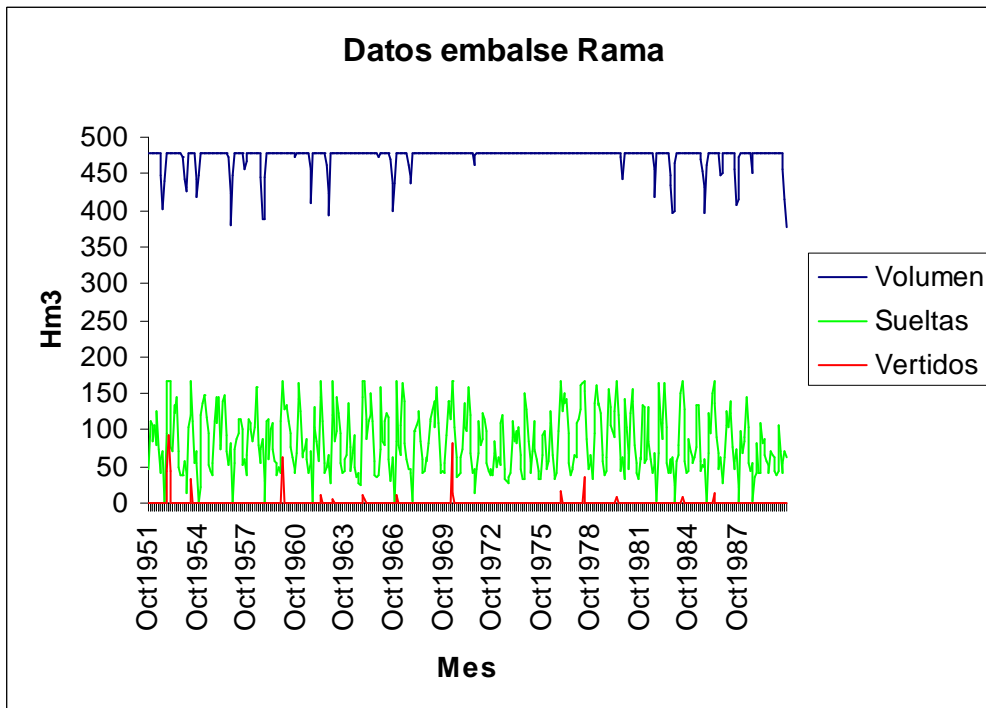
En este apartado se procederá a analizar la gestión de la cuenca hidrográfica en los casos siguientes. En ellos se ensayarán diferentes políticas de sueltas desde Rama y Jablanica para evaluar las estimaciones de producción derivadas de cada una de las mismas.

- a. Solo se permite producción de energía hidroeléctrica con los embalses llenos. Esta regla de gestión supone que solo se turbinará cuando los volúmenes de todos los embalses de la cuenca se hallen llenos. A pesar de que esta regla permite conseguir la mayor altura de agua posible para aprovechar la energía potencial del agua, dicha disposición provoca en todo el sistema un descenso en el resguardo contra avenidas y, en consecuencia, aumenta el peligro de avenida reduciendo la capacidad laminadora de los embalses. Debe tenerse en cuenta que los resultados aquí obtenidos serán excesivamente optimistas con respecto a la realidad, ya que el modelo considera que las aportaciones mensuales se dan repartidas uniformemente en todo el mes, mientras que la realidad es muy distinta.
- b. Se permite vaciar los embalses para la producción de energía eléctrica. Esta regla de gestión ocasiona un volumen de agua turbinada máximo, pero por el contrario se pierde altura de turbinado y por tanto energía.
- c. Establecer un umbral de sueltas, constante para todos los meses, en cada embalse de la cuenca. Si el agua se encuentra por debajo de este umbral (que se fijará para que se puedan cumplir los requisitos de energía de la cuenca) no podrá emplearse para la generación de energía eléctrica, mientras que si se encuentra por encima del mismo sí podrá turbinarse agua. Dicho umbral de sueltas se corresponde con cierto volumen de agua que asegura una cota mínima de lámina libre, suficiente para que, con las características de cada central, pueda satisfacerse toda la demanda asociada a la misma.

En cada uno de estos tres casos se analizará el estado de los embalses (volumen embalsado, sueltas y vertidos) y el estado de las centrales (caudal turbinado y energía generada). Mediante el análisis de todas estas variables podrá realizarse un diagnóstico sobre el funcionamiento de la cuenca, sus defectos y sus virtudes, para concluir después con un análisis comparativo que permita establecer la hipótesis de gestión más correcta desde el doble punto de vista de la generación de energía eléctrica y la protección frente a avenidas.

Hipótesis 1: Solo se turbinado cuando el embalse está lleno

En esta situación se intenta mantener los embalses llenos, ya que solo de esta forma se permite turbinar. A priori esta solución parece la más favorable para el turbinado, ya que se asegura siempre que se va a turbinar con la altura máxima posible de turbinado, lo que generará más energía. Sin embargo esta estrategia de mantener los embalses llenos puede provocar avenidas importantes al disminuir la capacidad de laminación de los embalses.



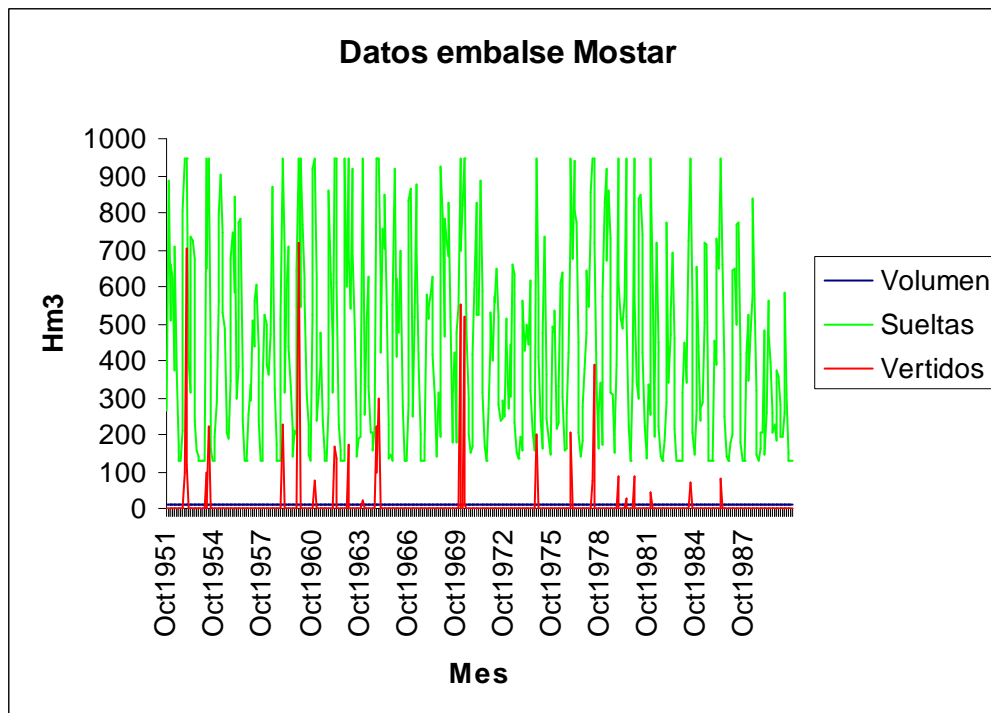


Figura 4.1: Resultados hidrológicos de Rama, Jablanica y Mostar

Las gráficas presentadas corresponden a los embalses de Rama, Jablanica y Mostar, estos dos últimos en los que se observan los mayores vertidos. En concreto la punta mensual de vertido en Mostar es de 721 hm^3 . En Jablanica la punta es de 562 hm^3 , muy por encima de las puntas cercanas a 250 hm^3 de Grabovica y Salakovac y los 100 hm^3 del embalse de Rama. Los grandes vertidos de Mostar se deben al hecho de estar al final de la cuenca, por lo que recibe todos los vertidos y caudales turbinados de los embalses anteriores. Respecto a Jablanica sus grandes vertidos se deben al hecho de no poder turbinar toda el agua que le llega desde el embalse de Rama y desde la cuenca vertiente entre ambos embalses. Al no poder turbinar todo lo que recibe debe verter el resto. Los menores vertidos se dan en Rama, ya que es el embalse situado más aguas arriba, por lo que no recibe volúmenes turbinados de ningún embalse.

Respecto a las sueltas estas siguen pautas parecidas en todos los embalses. Sin embargo cabe destacar que tanto en Rama como en Jablanica y Mostar dichas sueltas vienen condicionadas por la capacidad de turbinado de las centrales hidroeléctricas correspondientes. No son capaces de turbinar toda el agua que les llega, debiendo verter el resto. En el embalse de Rama los vertidos son poco considerables ya que el agua que recibe solo proviene de la cabecera de la cuenca, pero en Jablanica y Mostar, que reciben más aportaciones, estos vertidos son mucho mayores. Hay algunos meses en los que en el embalse de Rama no se turbinan debido a no estar lleno.

En cuanto a los niveles de los embalses todos los embalses del sistema permanecen siempre llenos excepto el de Rama, que sufre descensos coincidentes con las épocas de menor aportación. Estos descensos se dan solo en Rama debido a la regla de operación del sistema, que confiere a Rama la mayor prioridad de desembalse, por lo que es primero que se vacía para cumplir el caudal mínimo impuesto aguas abajo del embalse de Mostar.

Respecto a los turbinados las pautas de los mismos se exponen en las gráficas siguientes.

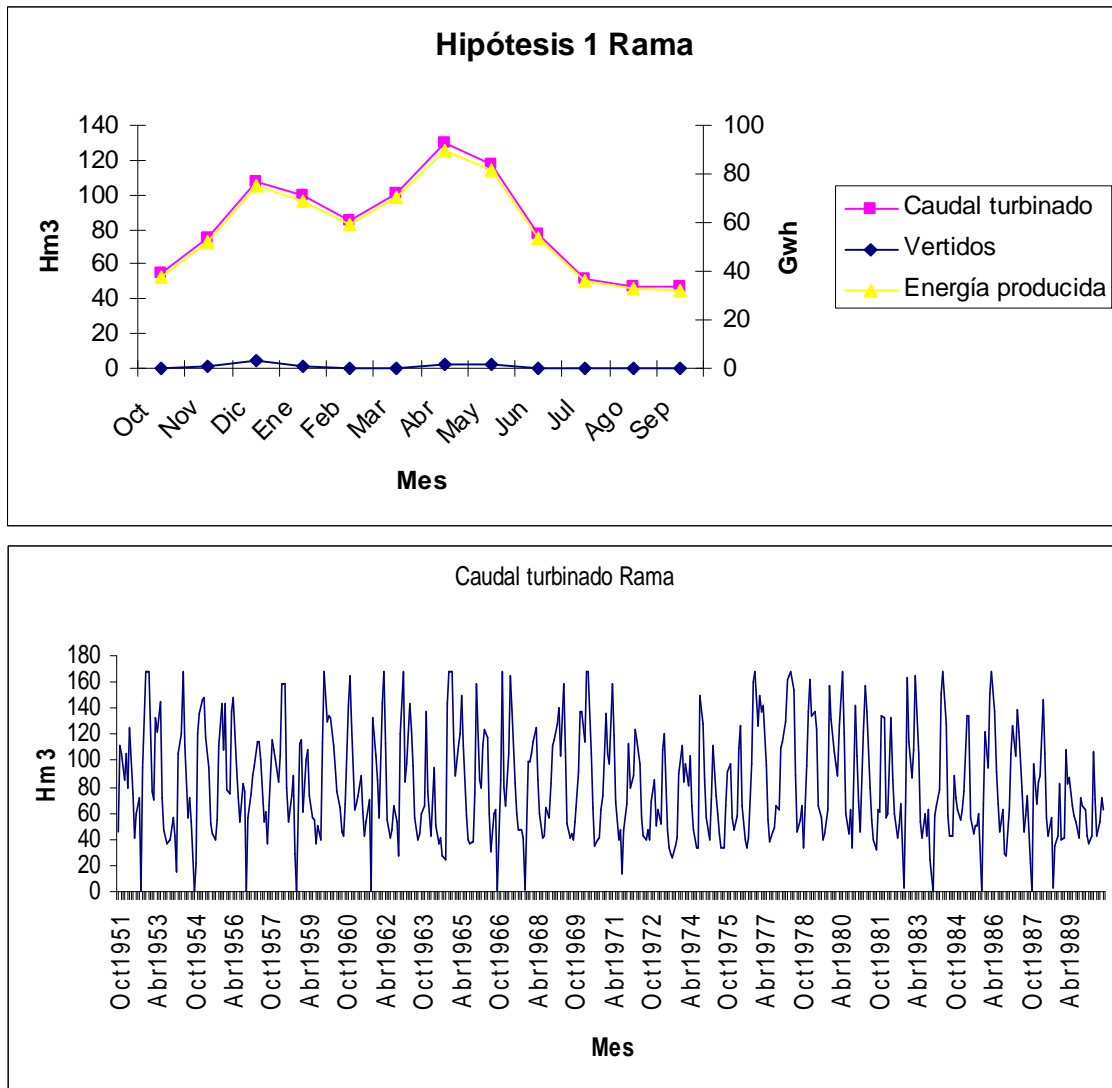
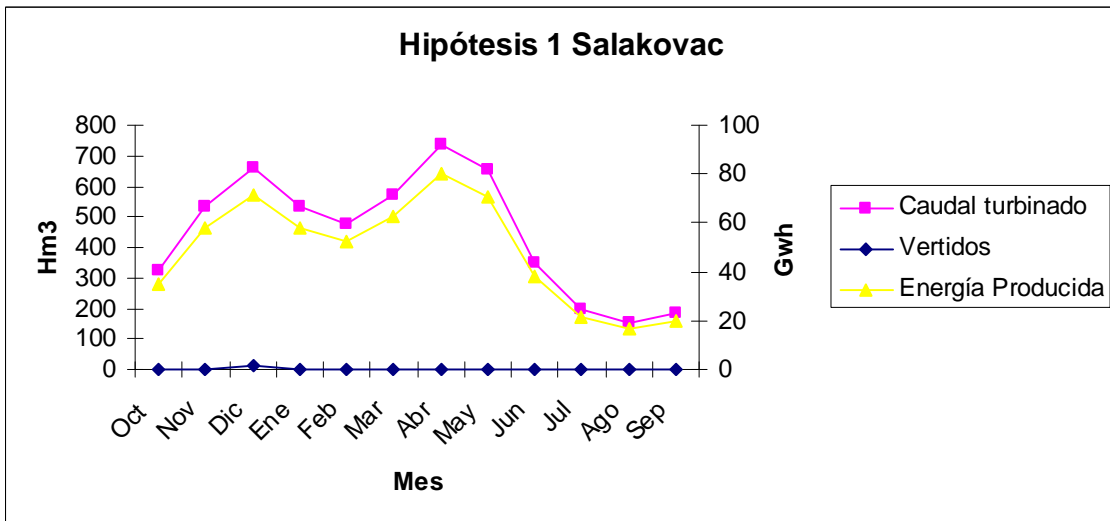
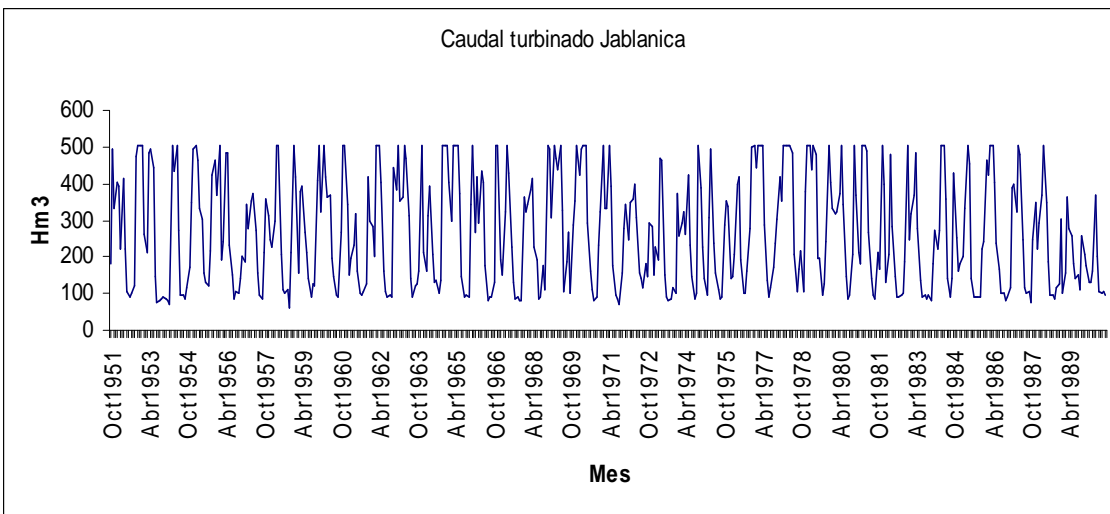
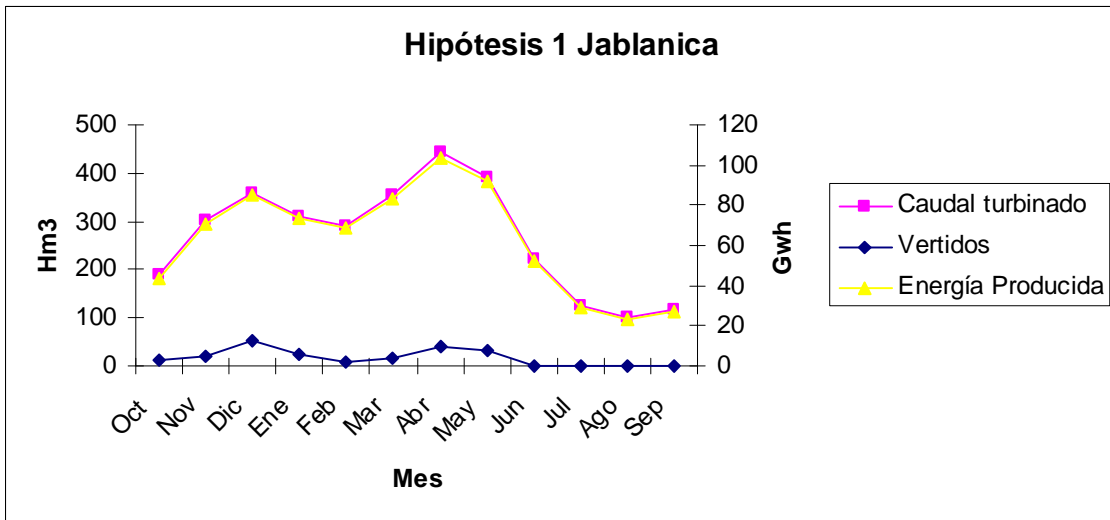


Figura 4.2: Resultados en la central hidroeléctrica de Rama

Se puede observar como hay algunos meses en los que no se turбина debido a que el embalse no se encuentra lleno porque previamente ha desembalsado agua para mantener el caudal mínimo aguas abajo de Mostar.



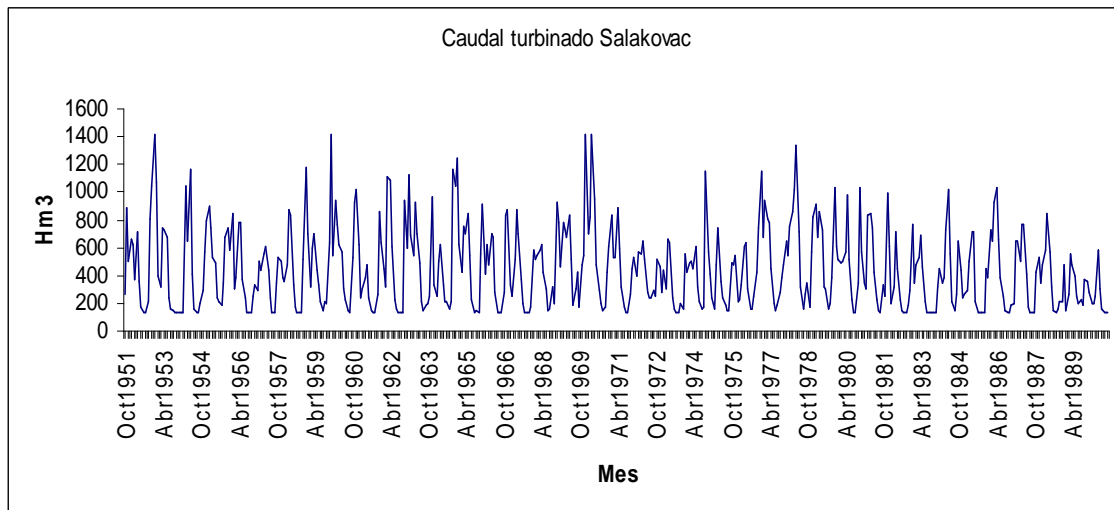


Figura 4.3: Datos de explotación de las centrales de Jablanica y Salakovac

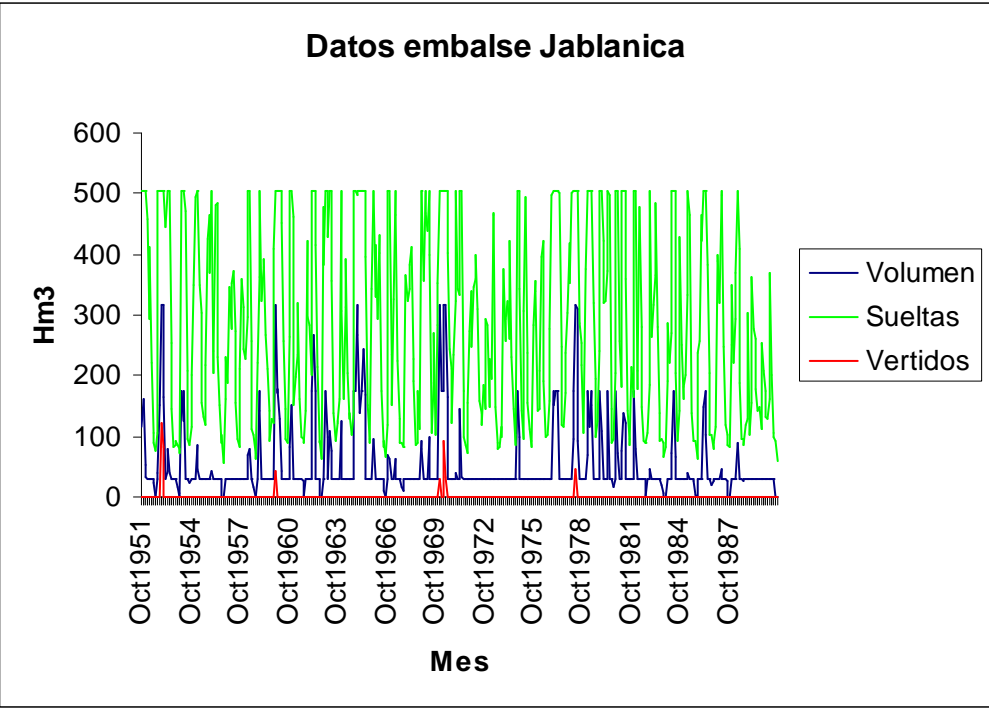
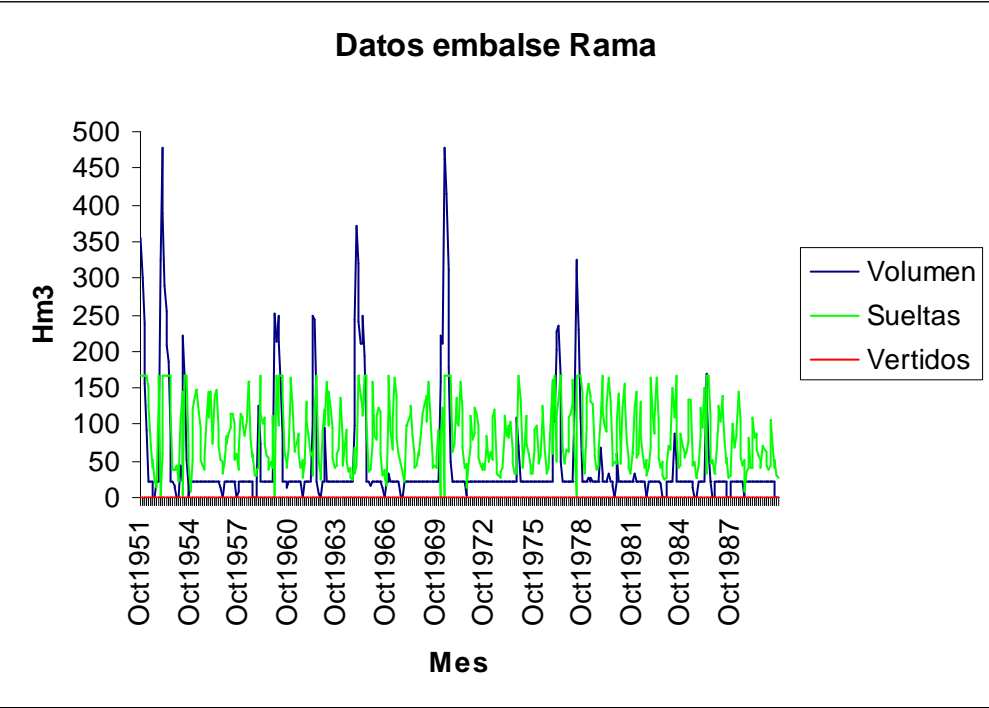
Tal y como sucedía en Rama se aprecia un comportamiento cíclico en el caudal turbinado coincidente en ambos embalses. Sin embargo en el embalse de Jablanica, al igual que en Mostar, se aprecia como la gráfica está coartada por la capacidad máxima de turbinado de las centrales de ambos embalses. En muchos meses las centrales de Jablanica y Mostar están funcionando con el caudal máximo que pueden turbinar.

Por término medio la energía generada en el sistema es igual a 2620 Gwh al año. La central con mayor capacidad de generación es la de Jablanica, que aporta 750 Gwh. Le siguen las centrales de Rama (670 Gwh), Salakovac (585 Gwh), Grabovica (320 Gwh) y Mostar (270 Gwh).

Por último cabe indicar que se cumplen los caudales mínimo y máximo impuestos en Mostar, siendo el caudal mínimo de $50,38 \text{ m}^3/\text{s}$. Sin embargo el resultado de caudal máximo no es válido, ya que solo se puede comprobar que el total mensual no supera los $3154 \text{ hm}^3/\text{mes}$, que se calculan al extrapolar el caudal máximo de $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ a valor mensual. Sin embargo dicho caudal máximo puede presentarse concentrado en pocas horas. Esto es más importante dada la regla de gestión definida para esta hipótesis, que tiende a mantener los embalses a su máxima capacidad, lo que los priva de cualquier margen para laminar avenidas.

Hipótesis 2: Se permite bajar el nivel de los embalses para turbinar

En esta hipótesis, al contrario que en la anterior, la regla de gestión da prioridad a maximizar el caudal turbinado permitiendo que baje el nivel de los embalses hasta la cota mínima a la que es posible turbinar. A priori esta solución provocará un estado de los embalses más vacíos, ya que se turbinará siempre que se pueda, lo que reducirá al mínimo los vertidos.



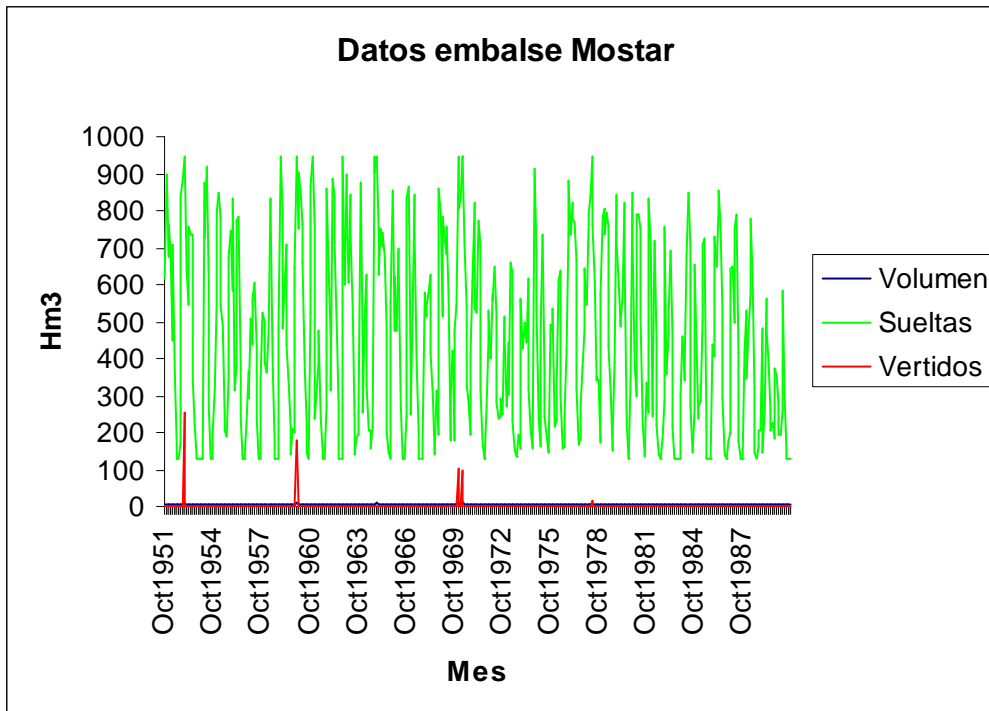


Figura 4.4: Principales variables hidrológicas de Rama, Jablanica y Mostar

En las gráficas se representa el comportamiento de los embalses característicos del sistema. En los embalses de Grabovica y Salakovac se aprecia un patrón similar al de Mostar, con unas sueltas cíclicas y el embalse siempre a nivel mínimo (en Mostar no se aprecia debido a la escala). Ni en Grabovica ni en Salakovac hay vertido alguno.

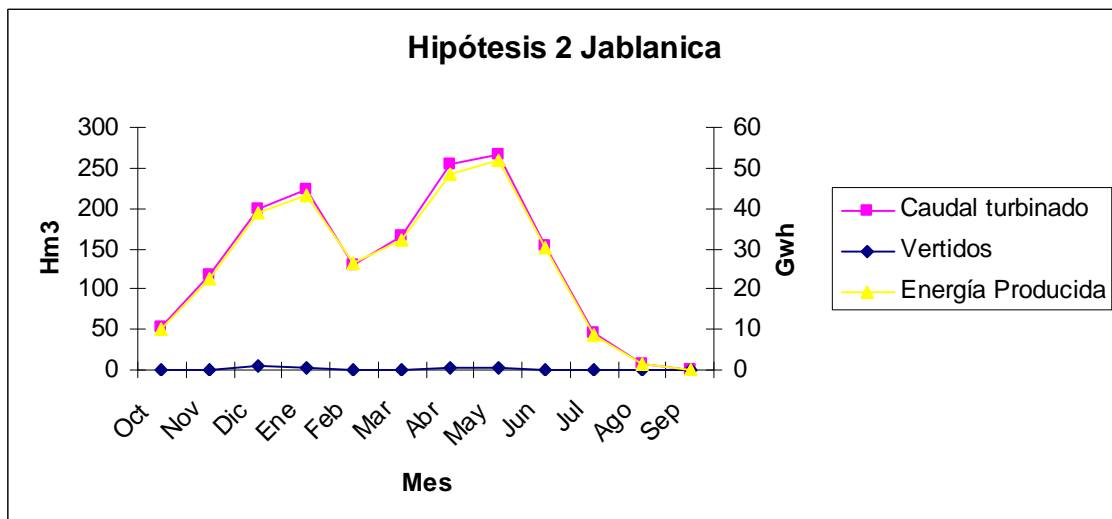
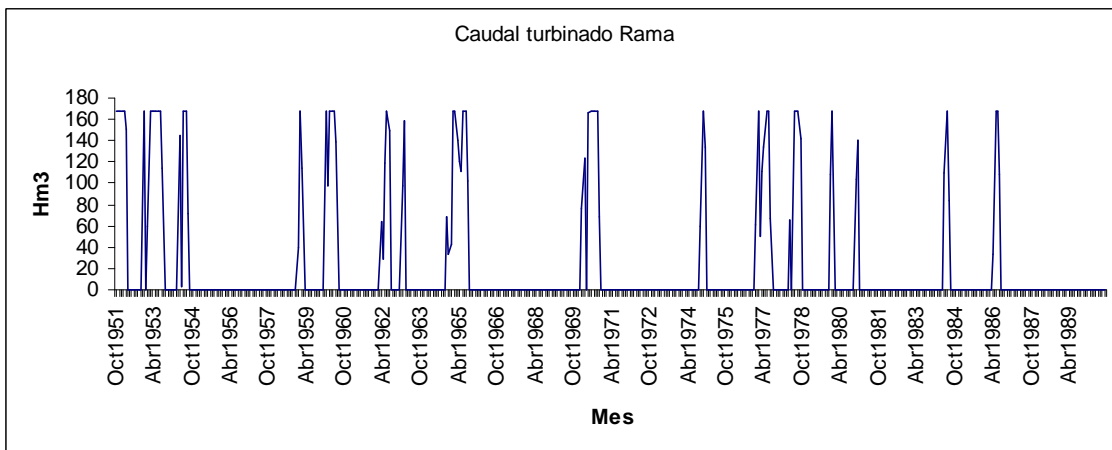
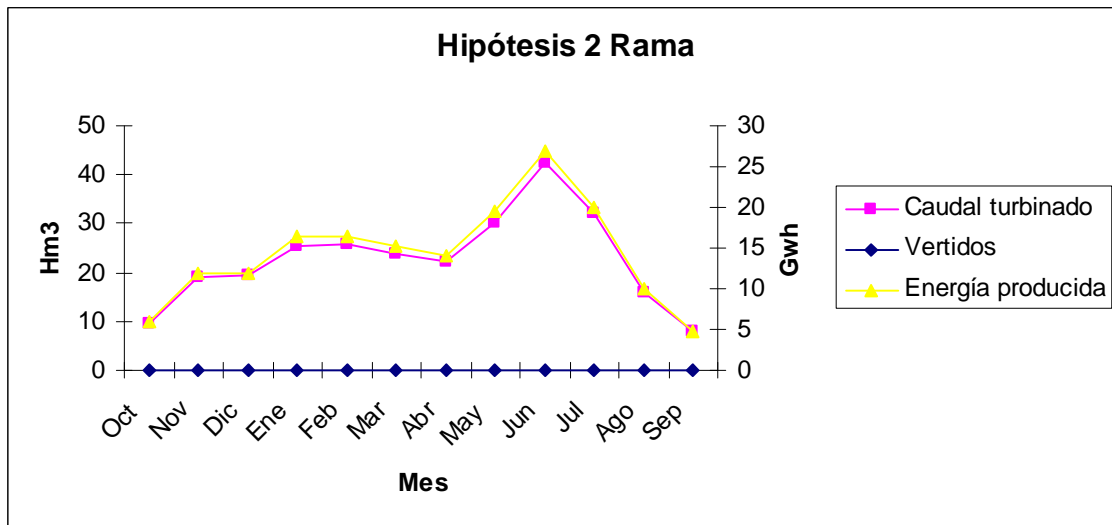
Respecto a los vertidos es el embalse de Mostar el que mayores vertidos presenta. Sin embargo, tal y como se aprecia en la gráfica, los vertidos disminuyen muchísimo respecto a la primera hipótesis. En concreto la punta de Mostar alcanza los 252 hm^3 . La punta en Jablanica es a su vez de 122 hm^3 . Los embalses de Rama, Grabovica y Salakovac no sufren vertido alguno.

En lo que respecta a las sueltas el comportamiento es idéntico al de la primera hipótesis. Las sueltas siguen una distribución cíclica.

En cuanto a los niveles cabe destacar que, excepto Rama y Jablanica, todos los embalses del sistema se encuentran siempre al nivel mínimo, que se había definido en el modelo como el mínimo nivel para turbinar. En Rama y Jablanica se aprecian bastantes momentos en los que el nivel está por encima de este mínimo (aunque en la mayor parte del tiempo se encuentran a nivel mínimo), debido a las épocas de grandes aportaciones que recibe el sistema. Cuando la aportación que reciben de aguas arriba supera a la capacidad de turbinado el embalse la almacena para que pueda ser turbinada más tarde.

También hay momentos en los que los niveles de Rama y Jablanica están por debajo del mínimo, lo que se debe al hecho de tener que atender el caudal mínimo aguas abajo de Mostar. En este caso, al encontrarse el embalse de Rama con un nivel bajo, no basta su reserva para mantener el caudal mínimo todos los meses, por lo que debe emplearse también la reserva de Jablanica para satisfacer este mínimo.

Respecto a los turbinados, las pautas que siguen los embalses del modelo se presentan en las siguientes gráficas.



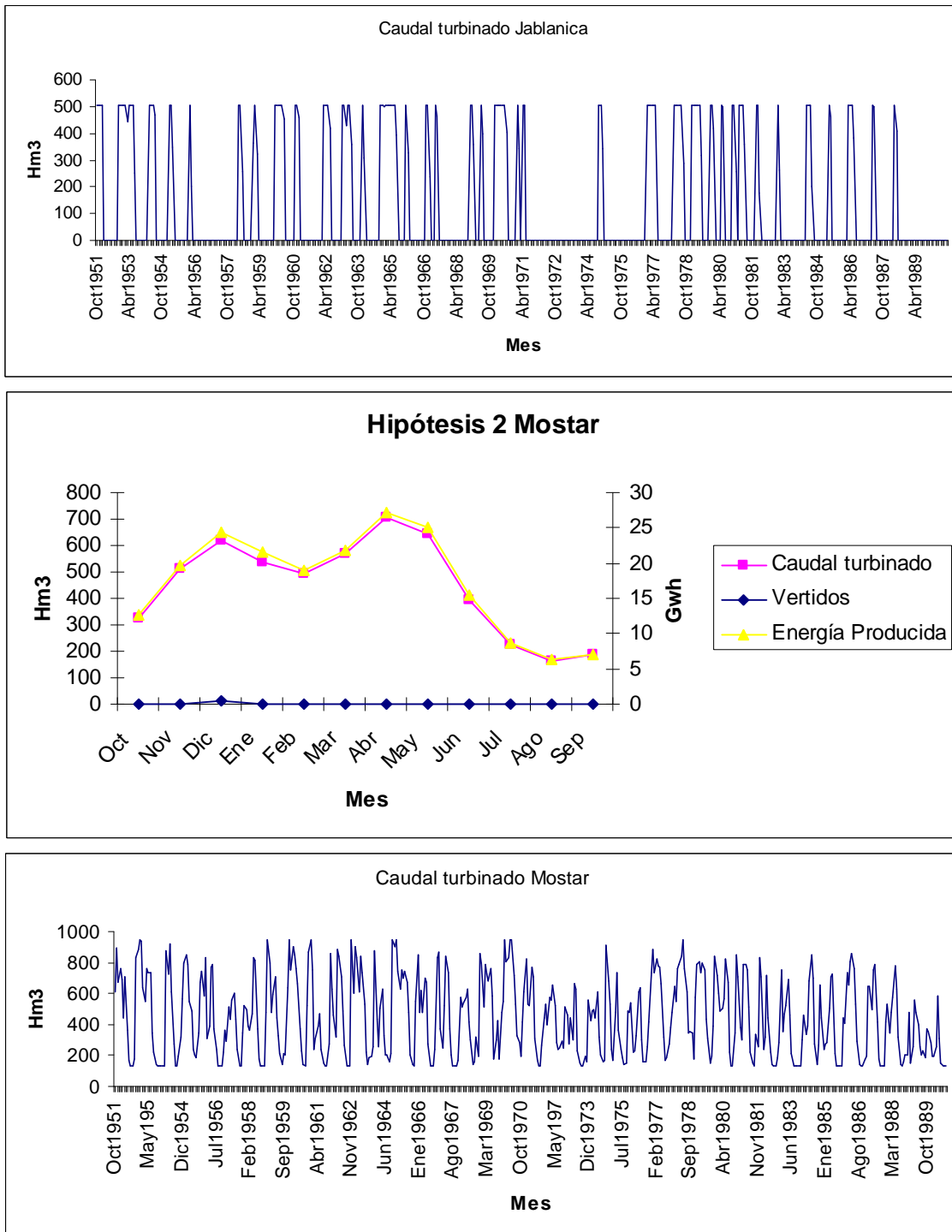


Figura 4.5: Datos de explotación de las centrales de Rama, Jablanica y Mostar

Se aprecia como en Rama y Jablanica el turbinado es intermitente, mientras que en Mostar tiene el mismo aspecto que en la hipótesis anterior. La razón de que no se turbine de forma continua en estos dos embalses es debido a las épocas de sequía. Al igual que las demás hipótesis hay establecido un caudal mínimo aguas abajo de Mostar. Dicho caudal debe ser atendido en primer lugar por el embalse de Rama, y después por el de Jablanica. En la hipótesis 1 el embalse de Rama se encontraba lleno al inicio de la sequía, por lo que almacenaba el agua suficiente para poder satisfacer el caudal mínimo. En esta ocasión el embalse de Rama se encuentra al nivel mínimo definido en el modelo cuando empieza la sequía. Mientras Rama tiene agua sigue siendo el embalse que

mantiene el caudal impuesto, pero llega un momento en que Rama se queda vacío y entonces debe ser Jablanica el que reduzca su almacenamiento, no pudiendo entonces turbinar. Es por esta razón por la que el turbinado en Rama es más intermitente que en Jablanica.

En el resto de embalses, excepto en Mostar, también hay periodos (en este caso muy puntuales y aislados) en los que no se puede turbinar por la razón antes mencionada.

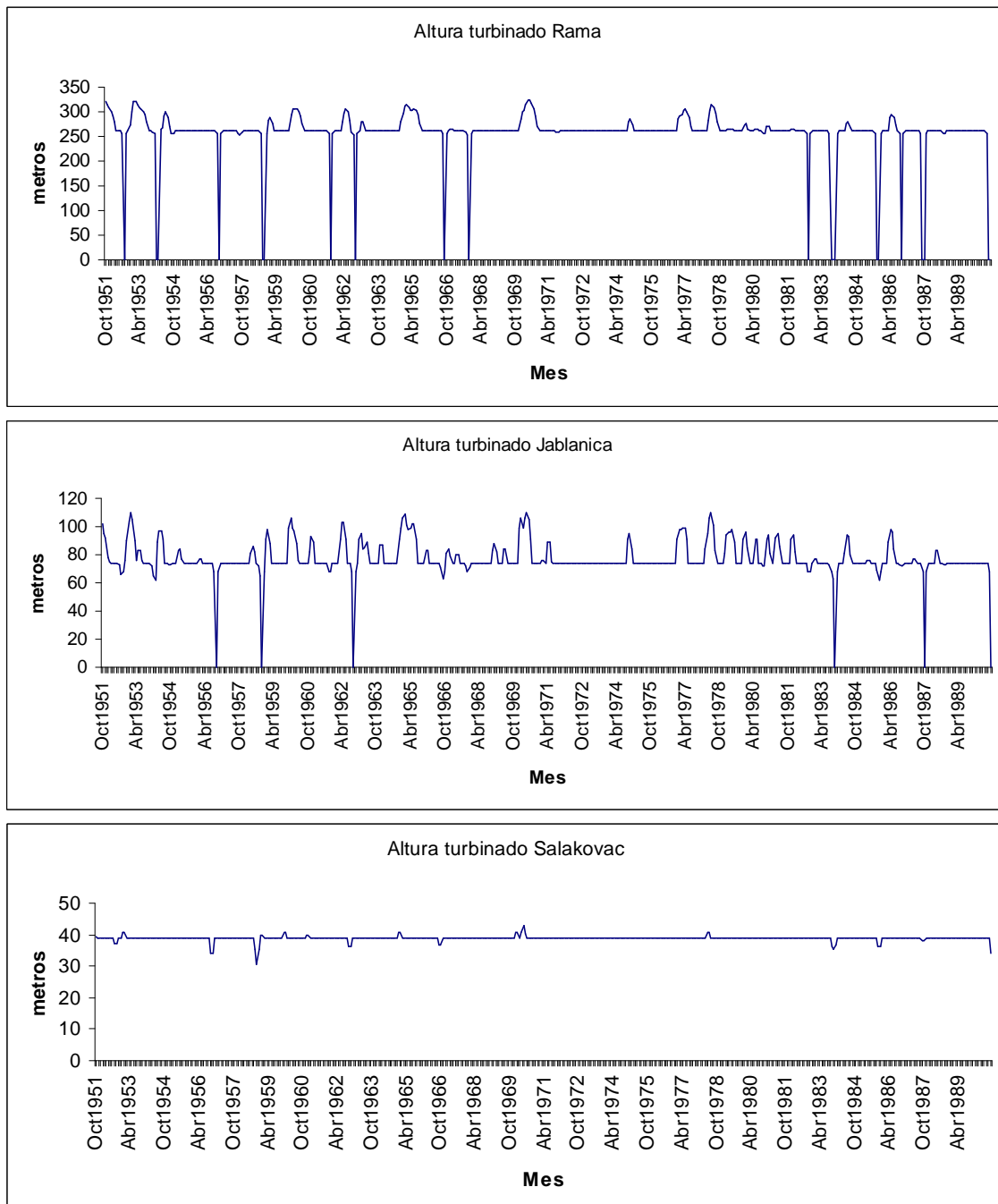


Figura 4.6: Alturas de turbinado en los embalses de Rama, Jablanica y Salakovac

En las alturas de turbinado de los cinco embalses se aprecia como mayormente se está turbinando a altura mínima. Tan solo en algunas ocasiones se turbinan por encima

de la cota mínima, correspondiendo estas a avenidas, cuando el nivel de los embalses se eleva. El caso de Rama es parecido a Jablanica, pero en él los periodos de nivel por encima del mínimo son menos frecuentes y de menor magnitud, debido a que Rama recibe menos aportaciones que Jablanica (que cuenta con la aportación intermedia y las sueltas de Rama). Cabe reseñar también que las alturas por debajo del nivel mínimo significan épocas de sequía en las que no se turbinan por tener que atender el caudal mínimo impuesto aguas abajo de Mostar. En Jablanica, al igual que en Rama, se aprecian puntos en los que la altura de turbinado es igual a 0, lo que significa que en esos momentos el embalse está vacío.

En lo que se refiere a energías, la energía media anual generada por el sistema es de 1500 Gwh.

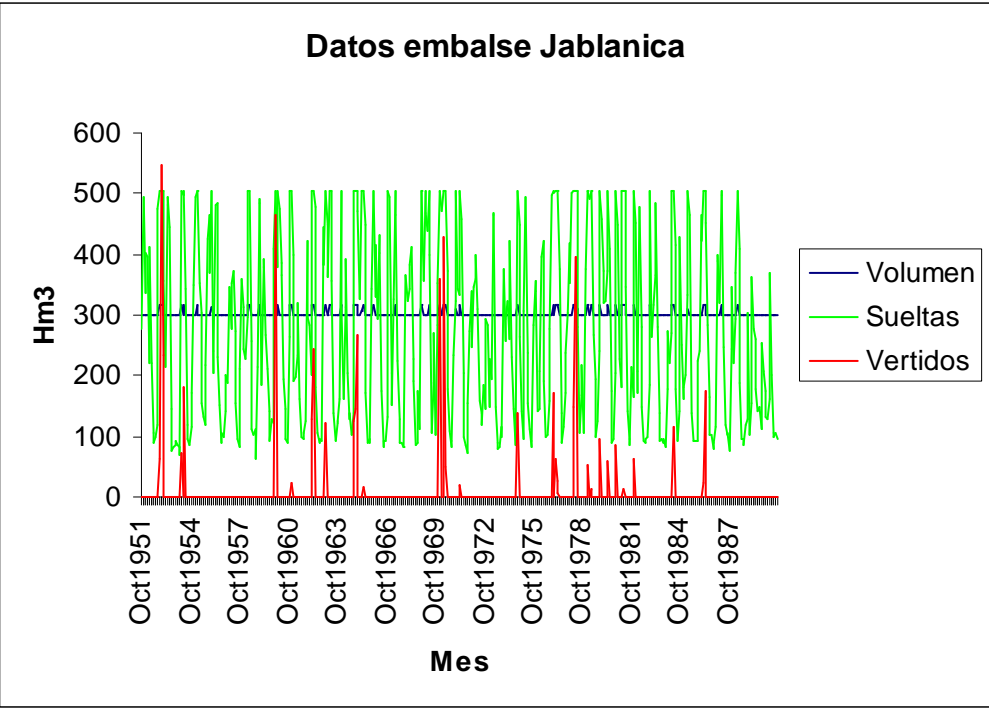
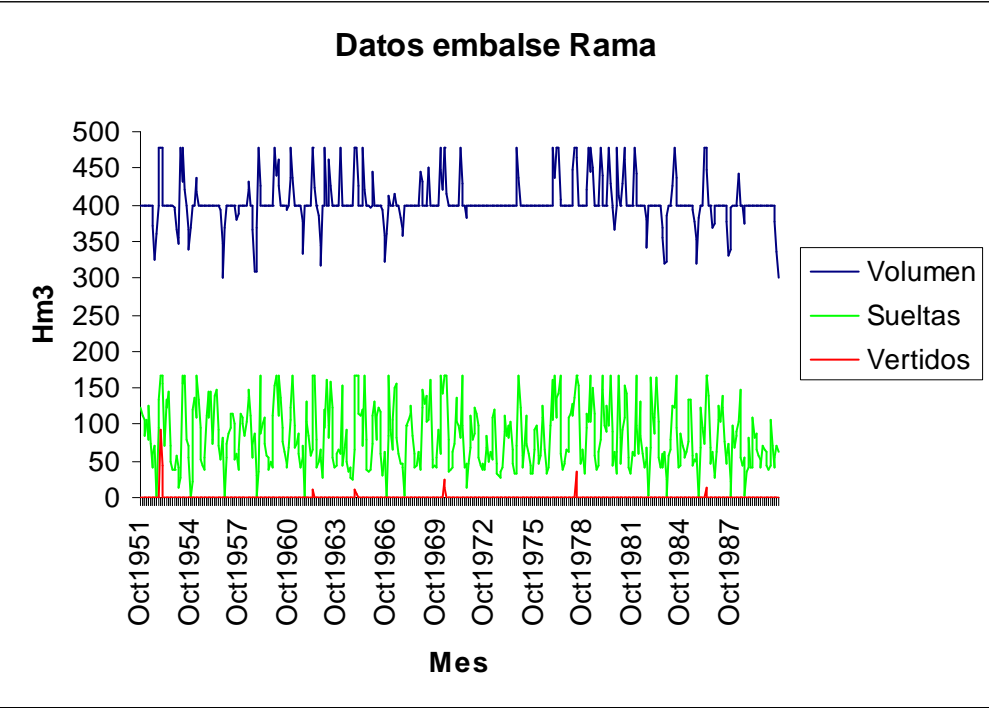
Por último, el caudal mínimo aguas abajo de Mostar es igual a $50,38 \text{ m}^3/\text{s}$, por lo que cumple el mínimo. El máximo a nivel mensual también se cumple pero, tal y como se indicaba en la hipótesis anterior, no se puede realizar esta comprobación de forma correcta con un modelo mensual, ya que los caudales se pueden concentrar en unas pocas horas o días.

Hipótesis 3: Se establece un umbral de sueltas para cada embalse

Esta hipótesis representa una solución intermedia entre las dos hipótesis anteriores. En ella se opta por mantener un nivel intermedio de embalse que permita aumentar el caudal turbinado sin reducir excesivamente la altura.

Para conseguirlo se establece, para cada embalse, un umbral de volumen constante todo el año. Por encima de ese umbral de volumen se permite turbinar, pero no por debajo. Esto permite, a la vez que aumentar el caudal turbinado sin disminuir apreciablemente la altura, mantener un resguardo para avenidas en los embalses.

Los umbrales de volumen escogidos para cada embalse son 400 hm^3 para Rama, 300 hm^3 para Jablanica, $18,5 \text{ hm}^3$ para Grabovica, 65 hm^3 para Salakovac y $9,5 \text{ hm}^3$ para Mostar. Se puede apreciar, dada la capacidad de los embalses, que el volumen de embalse que queda para laminación de avenidas es mayor en Rama y Jablanica que en el resto de embalses, en los que el umbral de sueltas se acerca a la capacidad.



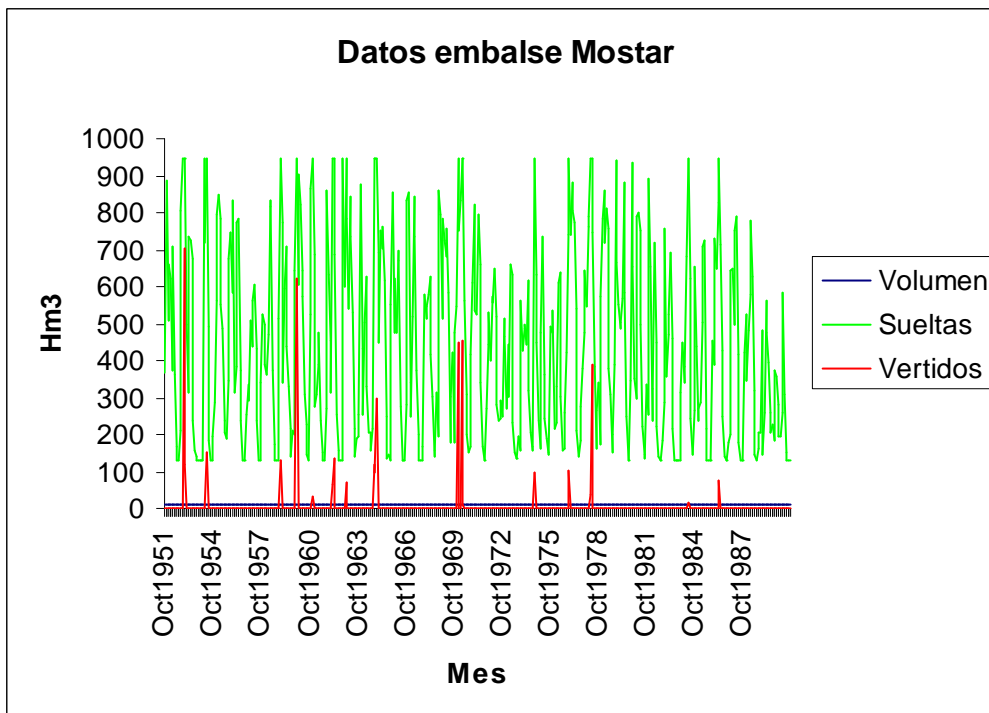


Figura 4.7: Principales variables hidrológicas de Rama, Jablanica y Mostar

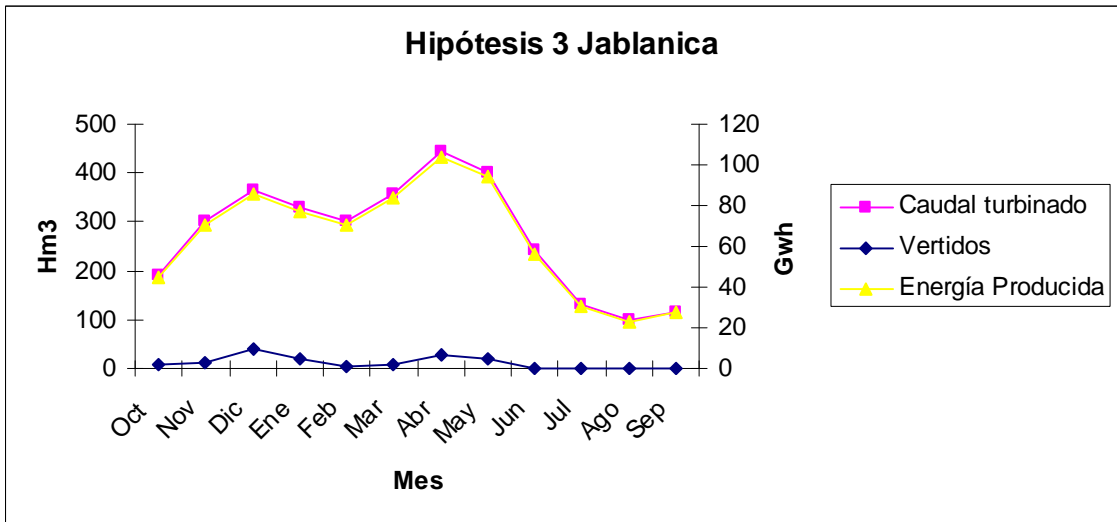
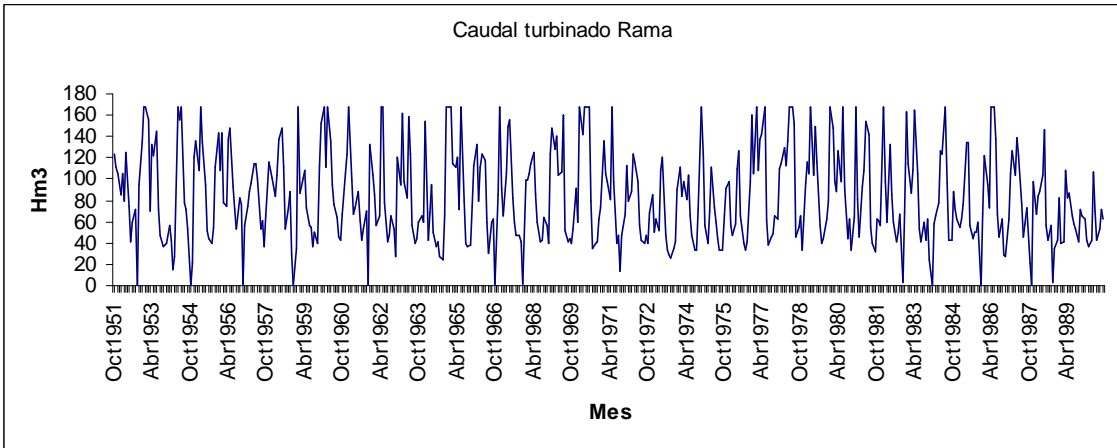
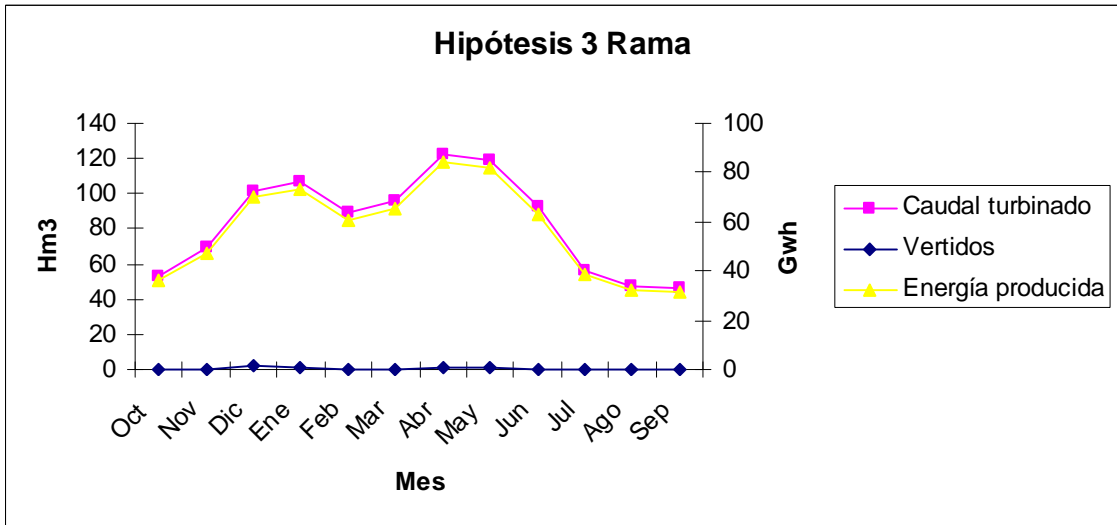
Las gráficas muestran los resultados mensuales en los embalses de Rama, Jablanica y Mostar. En los embalses de Grabovica y Salakovac, no mostrados en las gráficas, el patrón de comportamiento es semejante a Mostar, con el volumen de embalse igual al umbral definido anteriormente en la práctica totalidad de los meses. La diferencia de Grabovica y Salakovac con Mostar es el menor número de vertidos. En Grabovica solo se sufren 3 episodios de vertidos y en Salakovac únicamente 2.

Respecto al volumen de embalse se aprecia como en Grabovica, Salakovac y Mostar siempre es igual al umbral. En cambio en los embalses de Rama y Jablanica el volumen sufre variaciones, a pesar de mantenerse en la mayoría de meses en el volumen umbral. Los volúmenes situados por encima del mismo se deben a épocas de grandes aportaciones. Se observa como en Rama hay periodos en los que en nivel del embalse es menor al umbral, por lo que no se permite turbinar. Dicho comportamiento es debido a que el embalse de Rama es quien debe satisfacer el caudal mínimo aguas abajo de Mostar. El embalse de Jablanica no llega a tener que satisfacer este caudal, ya que la reserva del embalse de Rama permite mantenerlo.

Respecto a los vertidos es el embalse de Mostar el que presenta la mayor punta de vertido, con 700 hm^3 , provocada por ser el embalse que más aportaciones recibe. La segunda mayor punta se alcanza en Jablanica con 550 hm^3 . Muy lejos quedan los vertidos de Rama (90 hm^3) y Grabovica y Salakovac (con 225 hm^3).

Respecto a las sueltas el comportamiento es idéntico al del resto de las hipótesis. Las sueltas siguen una distribución cíclica.

Respecto a los turbinados, las pautas que siguen los embalses del modelo se presentan en las siguientes gráficas.



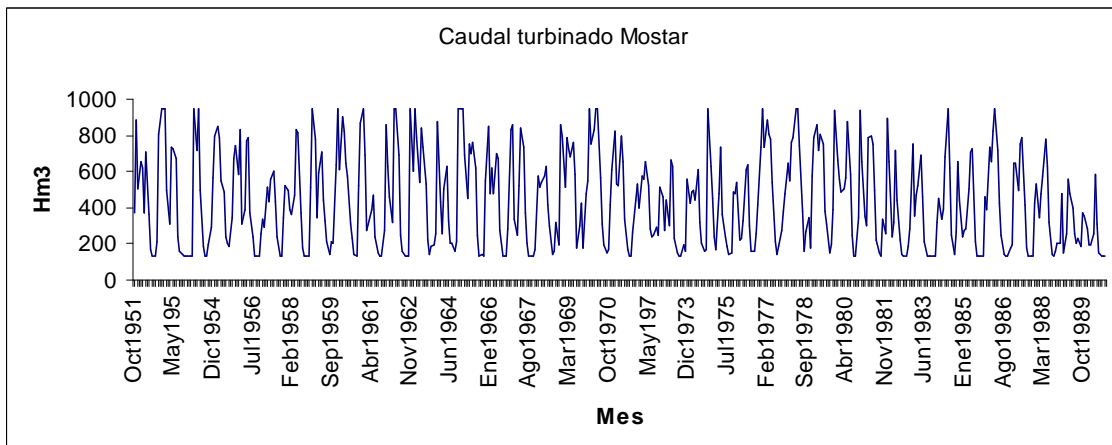
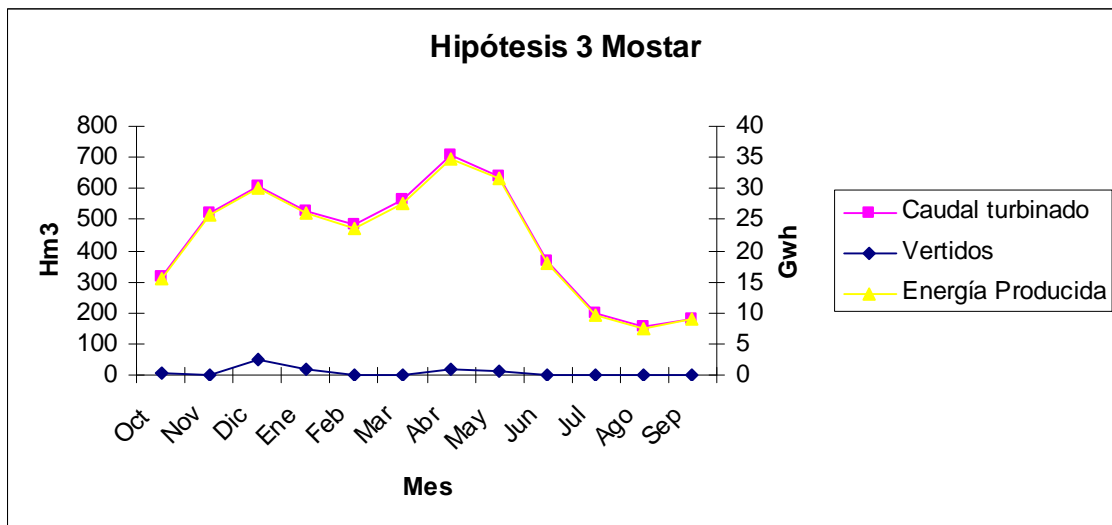
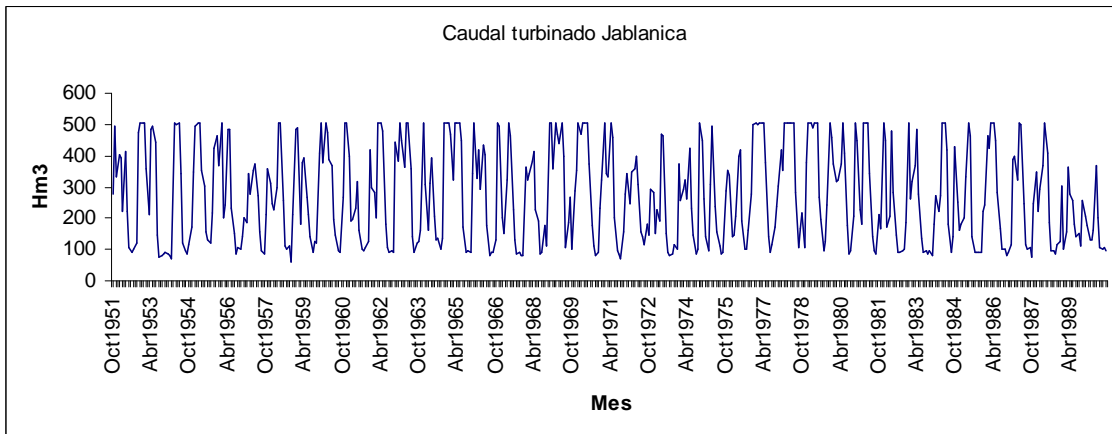


Figura 4.8: Datos de explotación de las centrales de Rama, Jablanica y Mostar

Se puede apreciar como en todos los embalses se turbinan de forma continua. Tan solo en el embalse de Rama hay algunos meses en los que no se turbinan debido a tener que satisfacer el caudal mínimo aguas abajo de Mostar. En el resto de embalses el nivel permite turbinar todos los meses.

La altura de turbinado se presenta en las gráficas que se exponen a continuación.

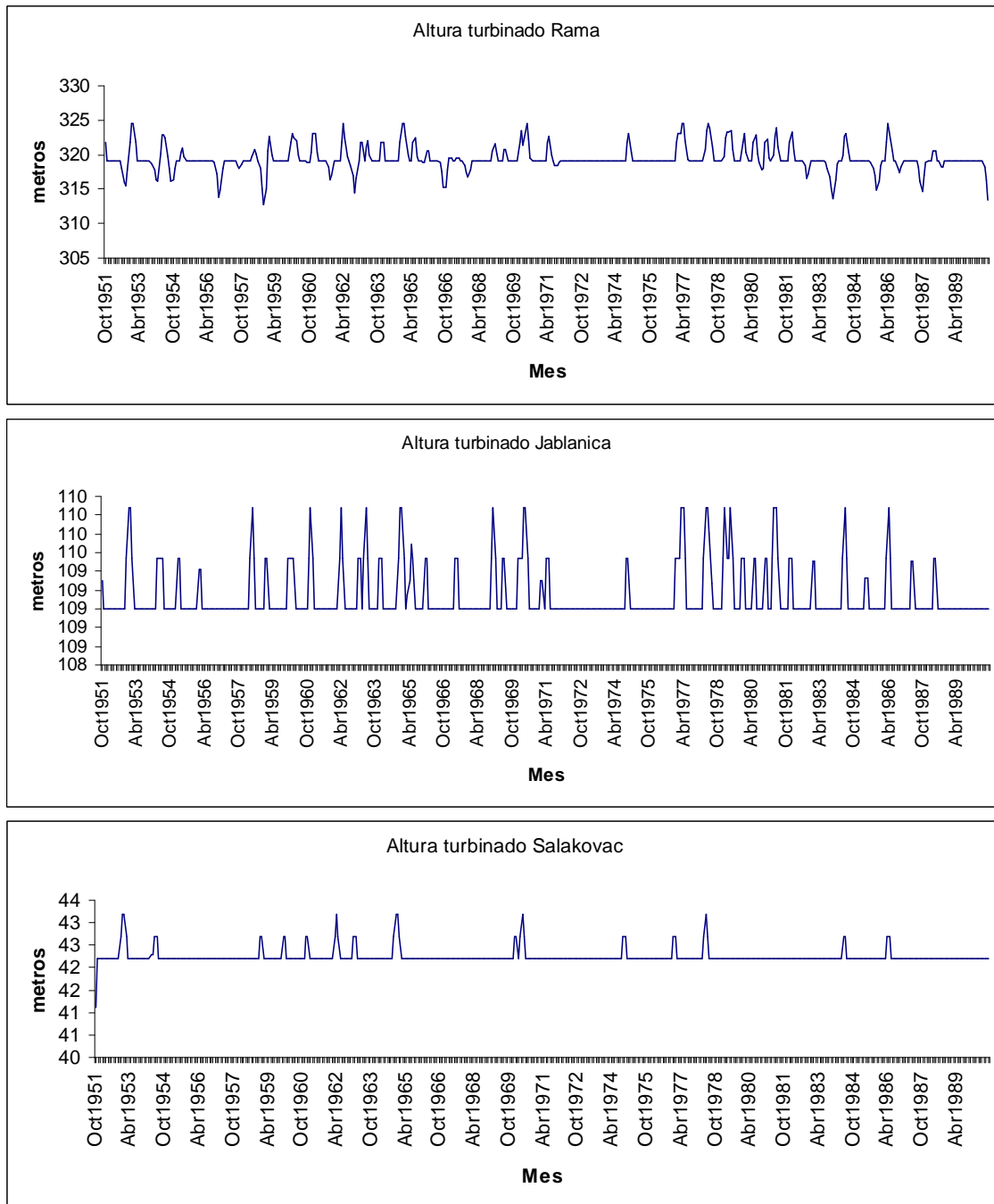


Figura 4.9: Alturas de turbinado en los embalses de Rama, Jablanica y Salakovac

Se puede observar como la mayor parte del tiempo se está turbinando a la altura correspondiente al volumen umbral definido al principio del modelo. Se pueden observar algunos meses en Rama en los que la altura de turbinado es inferior a la altura del volumen umbral, lo que significa que en esos meses el embalse está por debajo de ese volumen debido a los motivos expuestos anteriormente, por lo que no se turbinan. Respecto a los picos de las alturas el patrón de Grabovica y Mostar es semejante al de Salakovac, con unos pocos meses correspondientes a avenidas en los que se turbinan por encima de la cota umbral. En Rama y Jablanica esta situación se da con mayor frecuencia.

La energía total media generada por el sistema es de 2600 Gwh.

Por último, el caudal mínimo aguas abajo de Mostar es igual a $50,38 \text{ m}^3/\text{s}$, por lo que cumple el mínimo. El máximo a nivel mensual también se cumple pero, tal y como se indicaba en la hipótesis anterior, no se puede realizar esta comprobación de forma correcta con un modelo mensual, ya que los caudales se pueden concentrar en unas pocas horas o días.

Hipótesis 4: Se establece una curva de gestión para cada embalse.

En las tres hipótesis anteriores el volumen umbral definido era el mismo para todos los meses del año. Este planteamiento puede mejorarse definiendo un umbral de sueltas distinto para cada mes. De este modo se adapta la gestión de los embalses al ciclo hidrológico. En los meses de verano, en los que las aportaciones son menores, se permite mantener más alto el nivel de embalse. Mientras en otoño, donde es más probable que se presente una avenida, el nivel de embalse debe mantenerse más bajo.

Para poder hallar una curva de gestión adecuada se van a tomar como punto de partida los umbrales de volumen de la hipótesis anterior (ya que estos umbrales presentan una producción semejante respecto a mantener los embalses llenos, por lo que parecen adecuados), y se observarán los vertidos de la hipótesis 1 (ya que es la que mayores vertidos presenta).

Observando los valores mensuales medios de dichos vertidos (cuyas gráficas se presentan en el apartado dedicado a la hipótesis 1) se puede ver que no hay vertidos en los meses de Junio, Julio, Agosto y Septiembre; es decir en verano. Por lo tanto en dichos meses el volumen umbral puede tomarse igual al máximo.

Además se puede observar como, en la hipótesis 1, los vertidos de Grabovica y Salakovac son de poca entidad. Esta circunstancia, unida a que el volumen umbral de estos dos embalses se acerca mucho al máximo, permite concluir que estos dos embalses pueden permanecer llenos todo el año.

Además, dado que el volumen objetivo del embalse de Mostar es casi el máximo, se decide mantener el embalse de Mostar lleno todo el año.

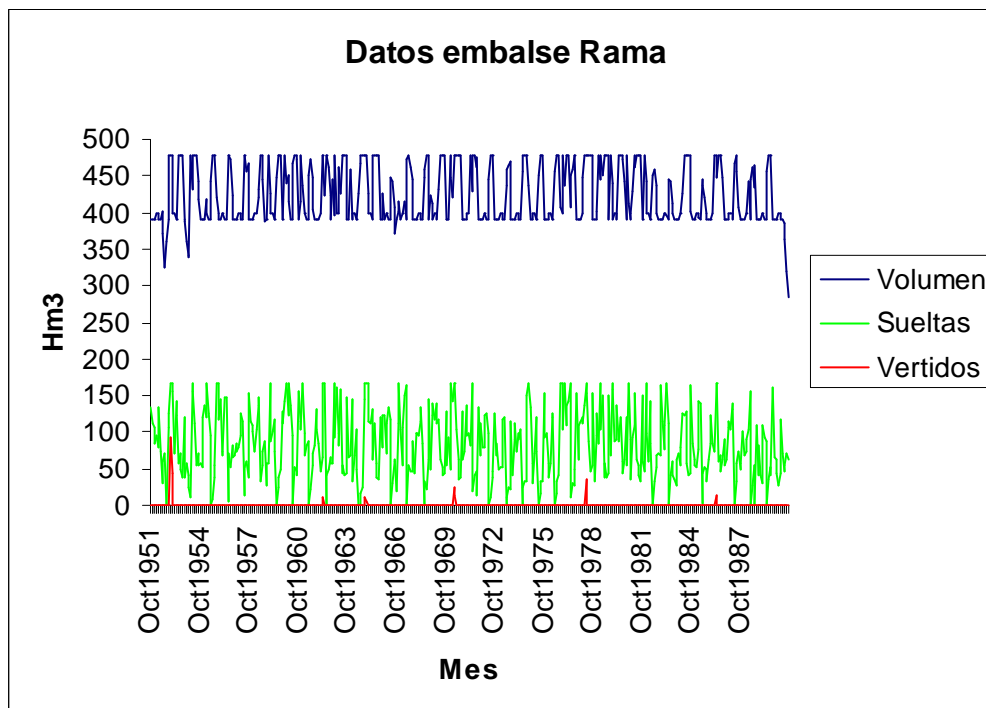
Finalmente se decide reducir 10 hm^3 los umbrales de Rama y Jablanica en los meses no mencionados antes, excepto en Febrero y Marzo, meses con pocos vertidos, en los que se mantiene el umbral de la hipótesis 3. Esta medida va encaminada a reducir los vertidos que se producen en estos meses, así como a aumentar el caudal turbinado en los mismos.

En resumen los umbrales de volumen que definen la curva de gestión de los embalses son los indicados en la siguiente tabla. Por encima de estos volúmenes se permite turbinar, pero no por debajo.

	Rama	Jablanica	Grabovica	Salakovac	Mostar
Octubre	390	290	19.8	68	11
Noviembre	390	290	19.8	68	11
Diciembre	390	290	19.8	68	11
Enero	390	290	19.8	68	11
Febrero	400	300	19.8	68	11
Marzo	400	300	19.8	68	11
Abril	390	290	19.8	68	11
Mayo	390	290	19.8	68	11
Junio	478	318	19.8	68	11
Julio	478	318	19.8	68	11
Agosto	478	318	19.8	68	11
Septiembre	478	318	19.8	68	11

Tabla 4.1: Curvas de gestión de los embalses del sistema

Los resultados de este modelo en los embalses se indican en las siguientes gráficas.



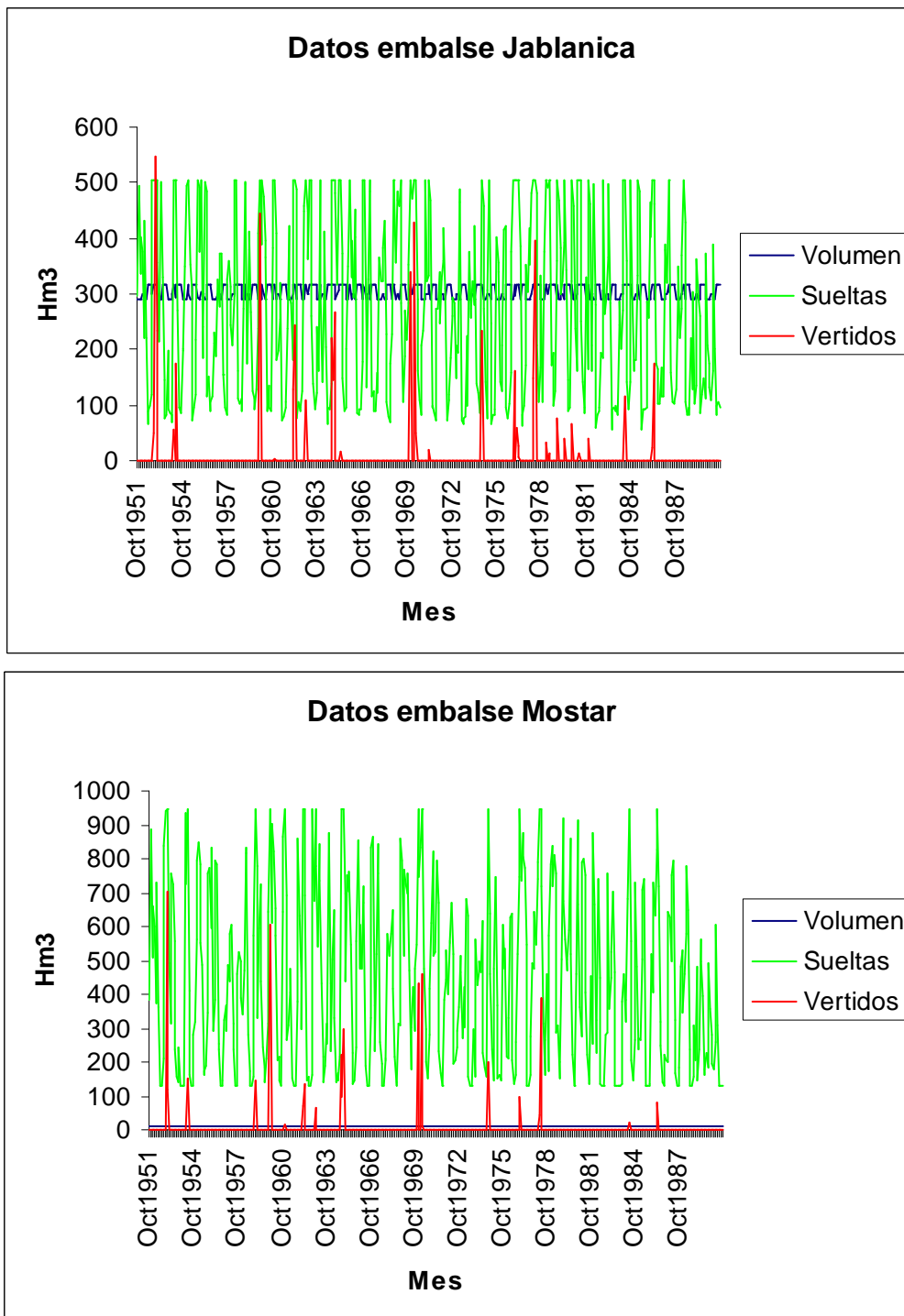


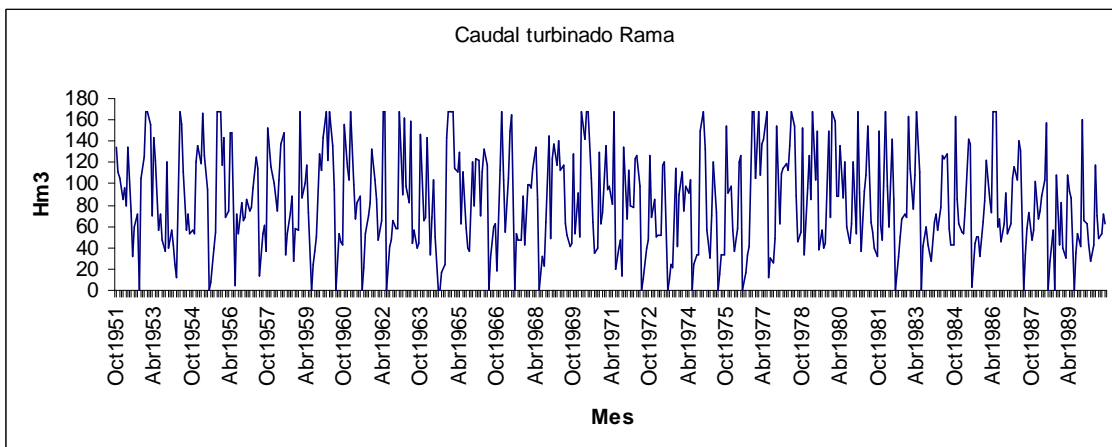
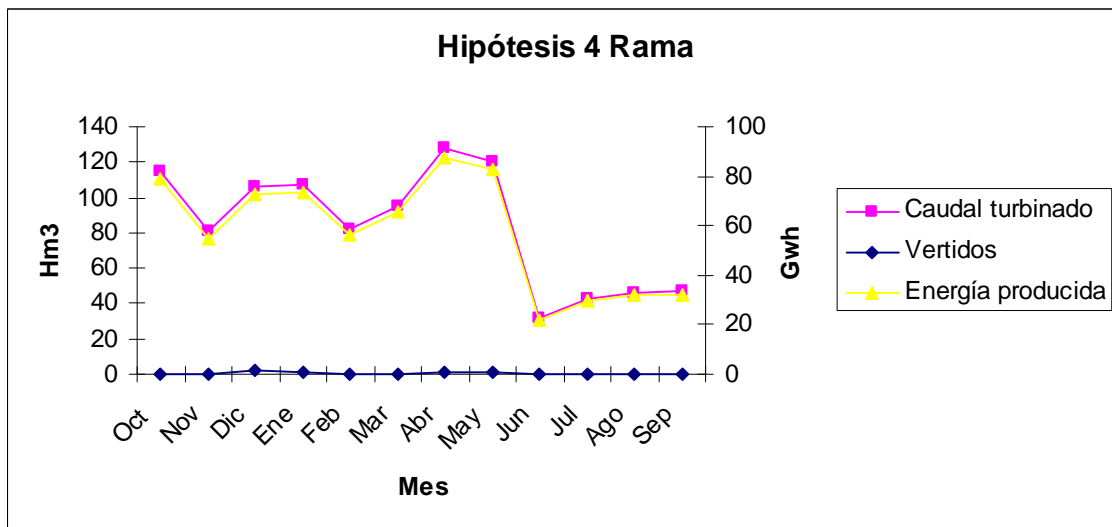
Figura 4.10: Principales variables hidrológicas de Rama, Jablanica y Mostar

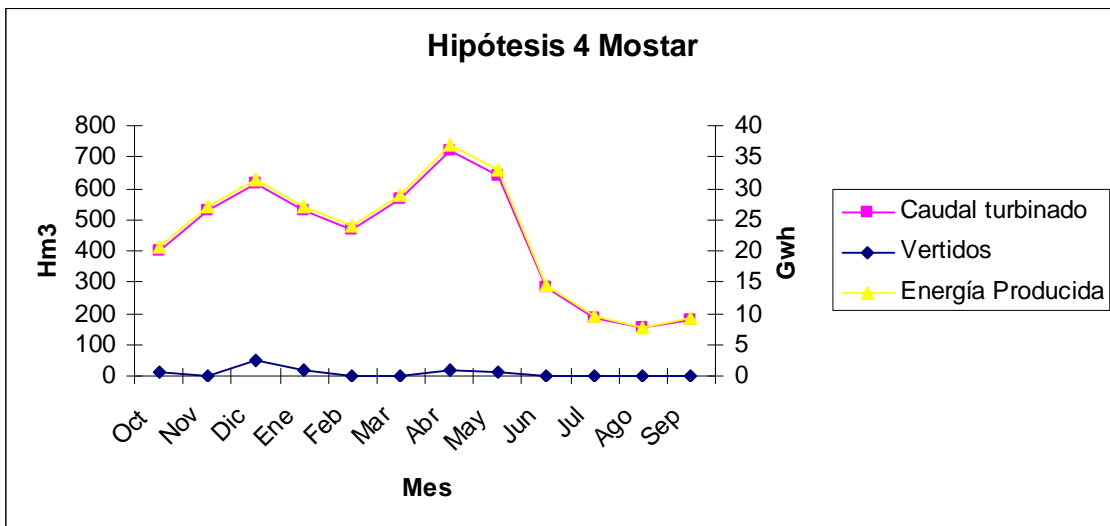
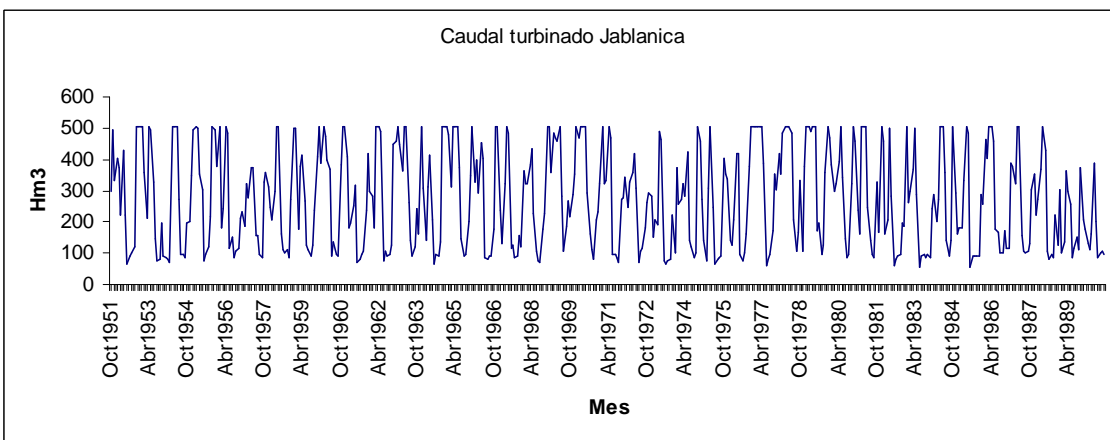
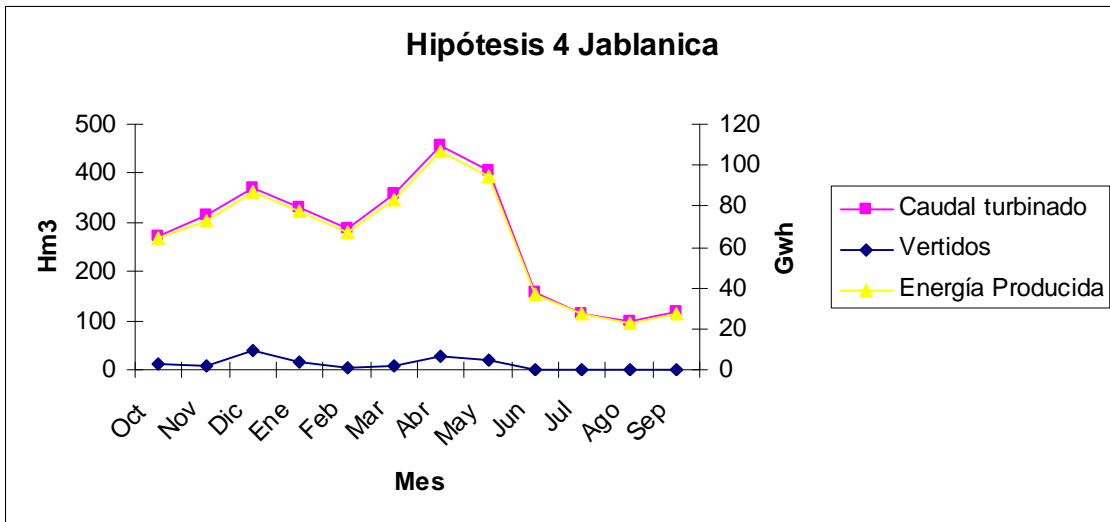
El primer aspecto que llama la atención de estas gráficas es la curva de volúmenes de embalse. En las hipótesis anteriores los volúmenes de embalse se mantenían constantes, pero en este caso lo que se aprecia es un comportamiento cíclico. Ello es provocado por la propia regla de gestión de estos embalses, que hace variar el volumen de embalse de un mes a otro. En el embalse de Mostar el volumen se mantiene siempre igual al máximo. Las gráficas de Grabovica y Salakovac, no representadas, son semejantes a las de Mostar. Las únicas diferencias vienen provocadas por los vertidos. Grabovica y Salakovac apenas sufren vertidos, al igual que sucedía en la hipótesis 3.

Respecto a los vertidos la pauta es muy semejante a la hipótesis 3. La mayor punta se alcanza en Mostar (700 hm³) por ser el punto más aguas abajo del sistema y por lo tanto el que mayores aportaciones recibe. Le sigue el embalse de Jablanica, cuya punta es igual a 550 hm³. Muy lejos de estos dos embalses se sitúan las puntas de Grabovica y Salakovac (230 hm³) y Rama (100 hm³). En estos últimos tres embalses los episodios con vertidos son escasos.

Respecto a las sueltas el comportamiento es idéntico al del resto de hipótesis. Las sueltas siguen una distribución cíclica.

Los datos hidroeléctricos de las centrales del sistema se exponen en las gráficas situadas a continuación.





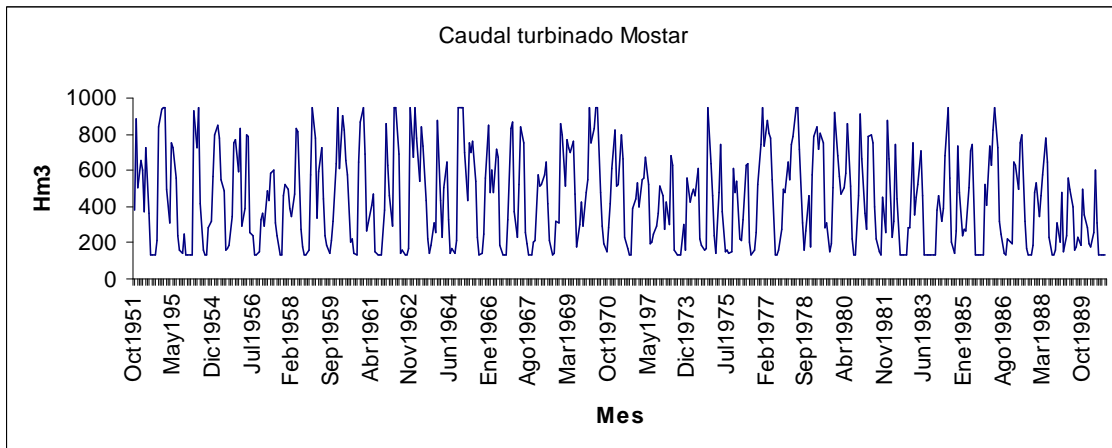
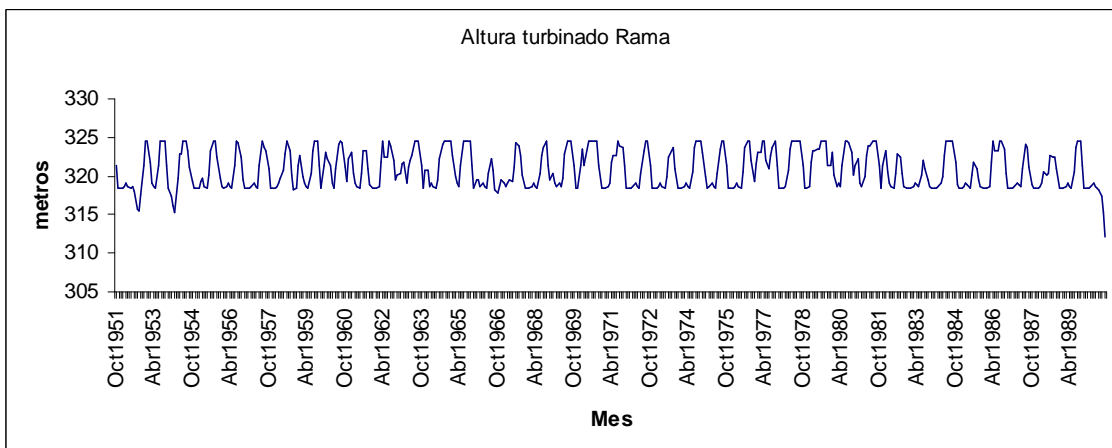


Figura 4.11: Datos de explotación de las centrales de Rama, Jablanica y Mostar

En las gráficas de Grabovica y Salakovac, no mostradas aquí, se aprecian patrones semejantes a los de Mostar, al igual que en las otras hipótesis. Se observa, sin embargo, como en el embalse de Rama, al contrario que en la hipótesis anterior, hay mayores periodos en los que no se turbinan porque el volumen de embalse está por debajo del umbral. Al variar dicho umbral cada año cantidades apreciables (entre Mayo y Junio la variación es de 88 hm³) las aportaciones que recibe Rama (las menores de toda la cuenca) se emplean en elevar el volumen de embalse en lugar de usarse para turbinar. En el resto de embalses se turbinan de forma continua. Tal y como se puede apreciar, al igual que en las otras hipótesis, los caudales turbinados siguen una distribución cíclica.

La altura de turbinado se presenta en las gráficas que se exponen a continuación.



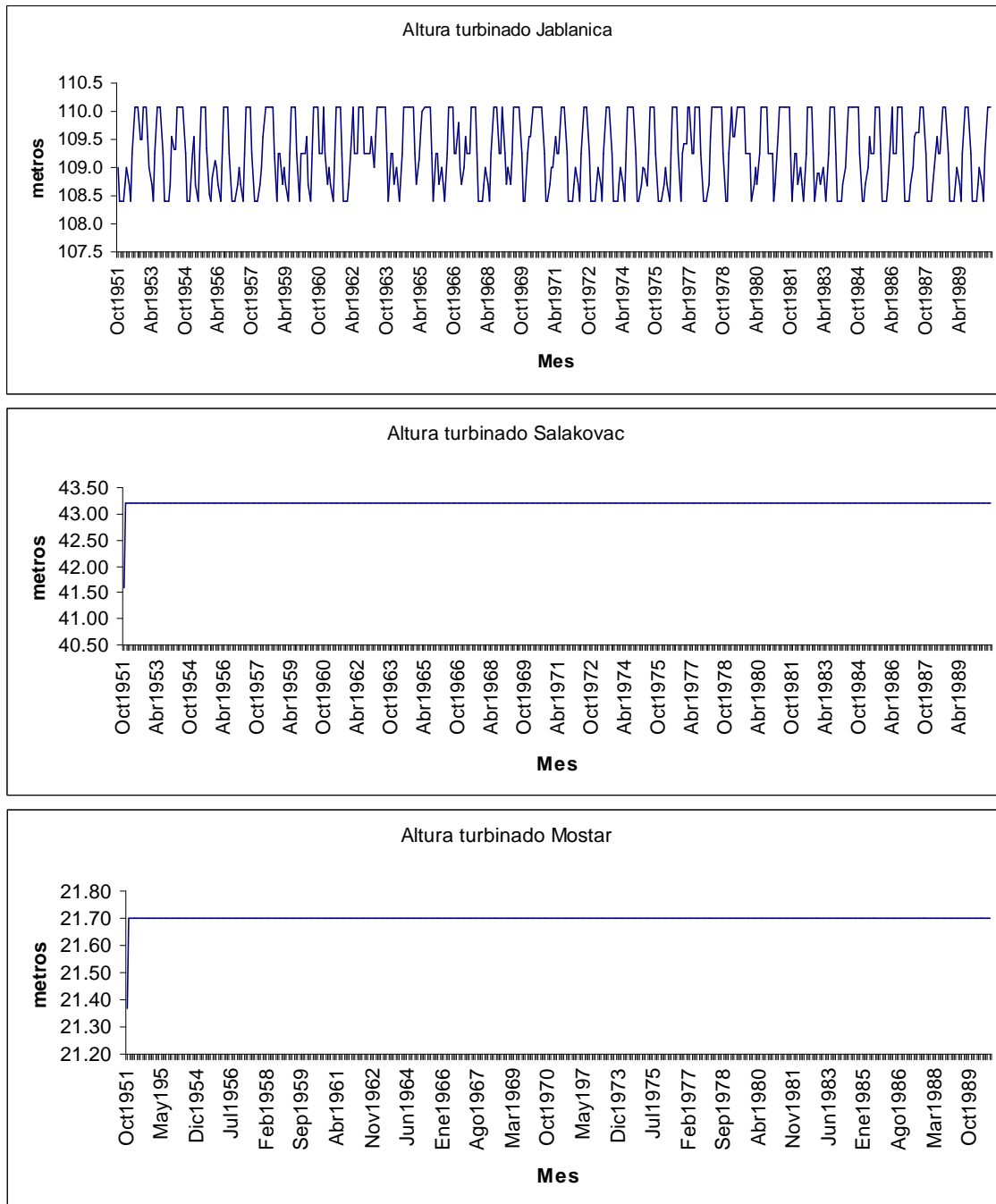


Figura 4.12: Alturas de turbinado en los embalses de Rama, Jablanica, Salakovac y Mostar

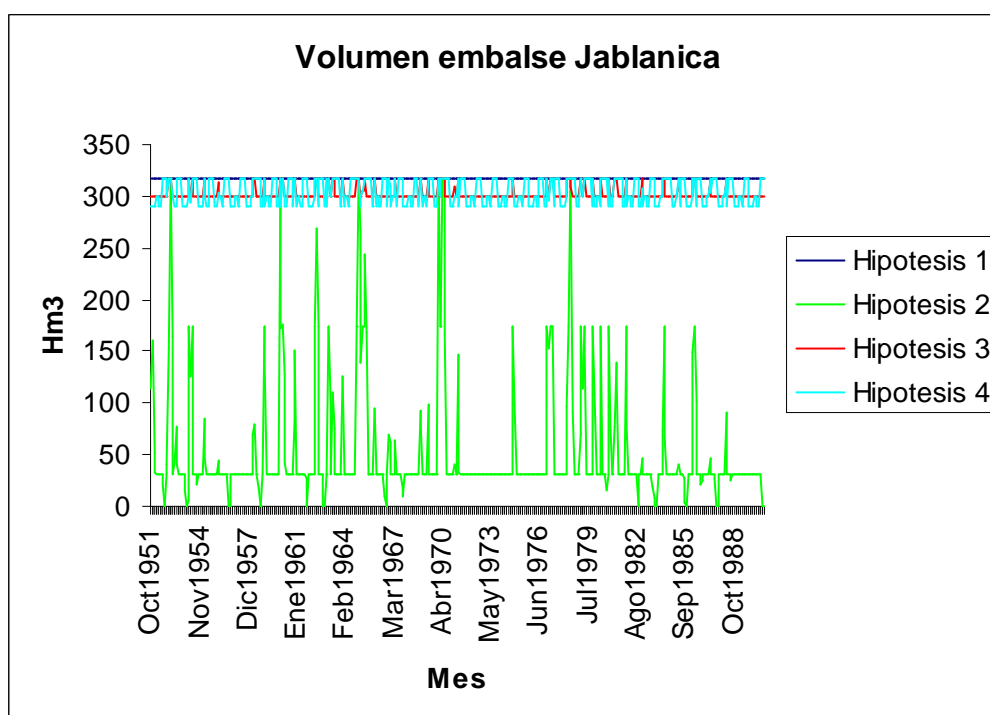
Estas gráficas de alturas de turbinado son las que presentan más diferencias respecto a las otras tres hipótesis. En Rama y Jablanica se aprecia un patrón de alturas de turbinado cíclico, provocado por la propia regla de gestión. Se aprecia como en Rama hay algunos periodos en los que el nivel de embalse toma valores por debajo de los niveles umbral, por lo que no se permite turbinar. En el resto de embalses se turbinan todos los meses. Respecto a las alturas de turbinado de Grabovica, Salakovac y Mostar, se mantienen constantes debido a que la regla de gestión de estos tres embalses consiste en mantenerlos al máximo todos los meses del año.

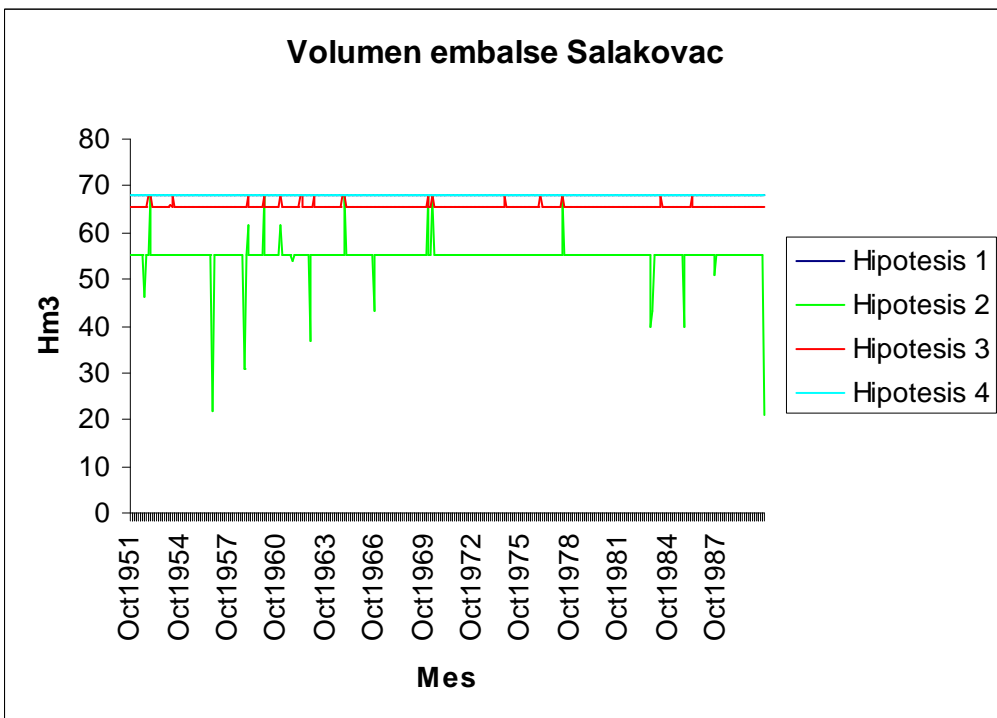
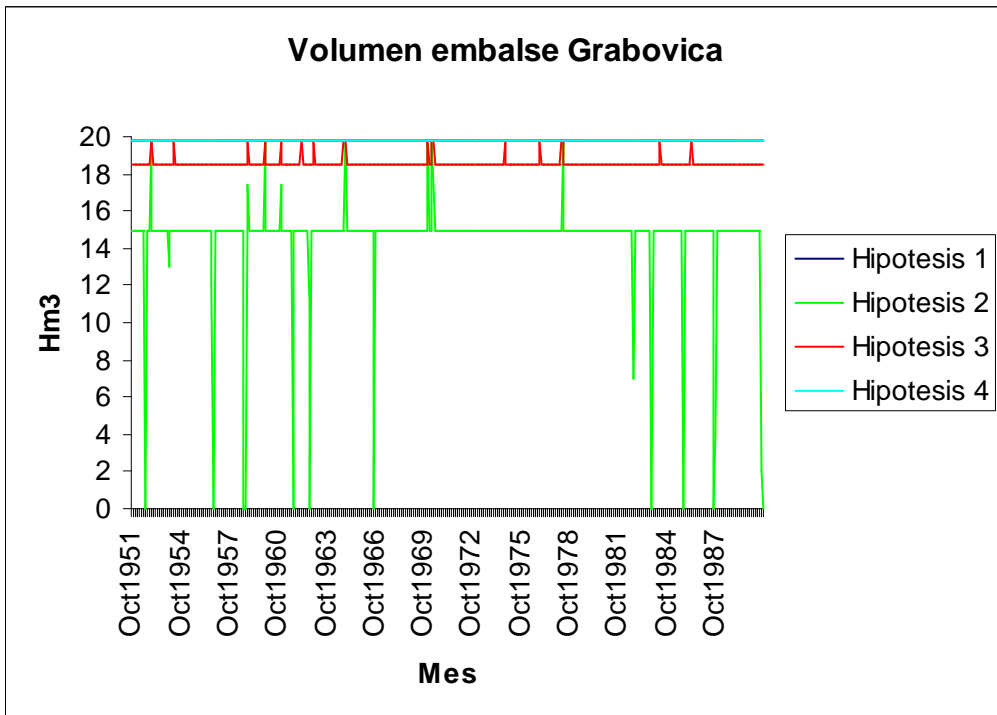
La energía total media generada por el sistema es de 2632 Gwh.

Por último, el caudal mínimo aguas abajo de Mostar es igual a 50,38 m³/s, por lo que cumple el mínimo. El máximo a nivel mensual también se cumple pero, tal y como se indicaba en la hipótesis anterior, no se puede realizar esta comprobación de forma correcta con un modelo mensual, ya que los caudales se pueden concentrar en unas pocas horas o días.

Comparación de las distintas hipótesis

En este apartado van a compararse las tres hipótesis definidas previamente al informe y la hipótesis definida en último lugar. La comparación se va a realizar desde dos puntos de vista. En primer lugar se compararán los volúmenes de embalse, los vertidos y las alturas de turbinado en régimen mensual y en valores medios mensuales. En segundo lugar se compararán las energías generadas por central en valores medios mensuales. Los datos de los embalses son los siguientes.





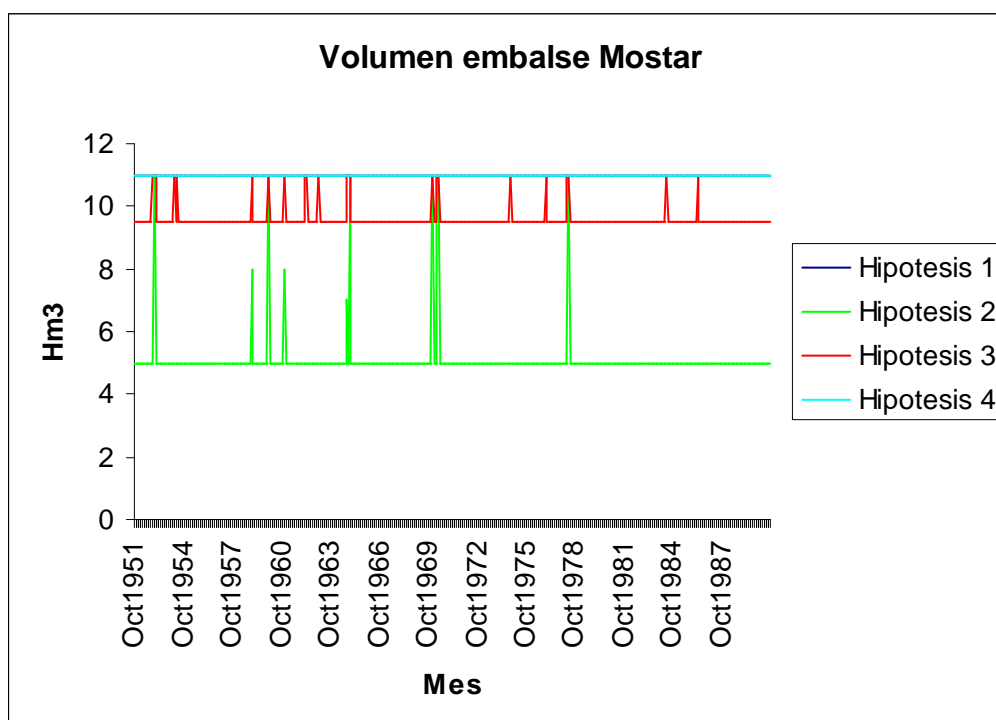


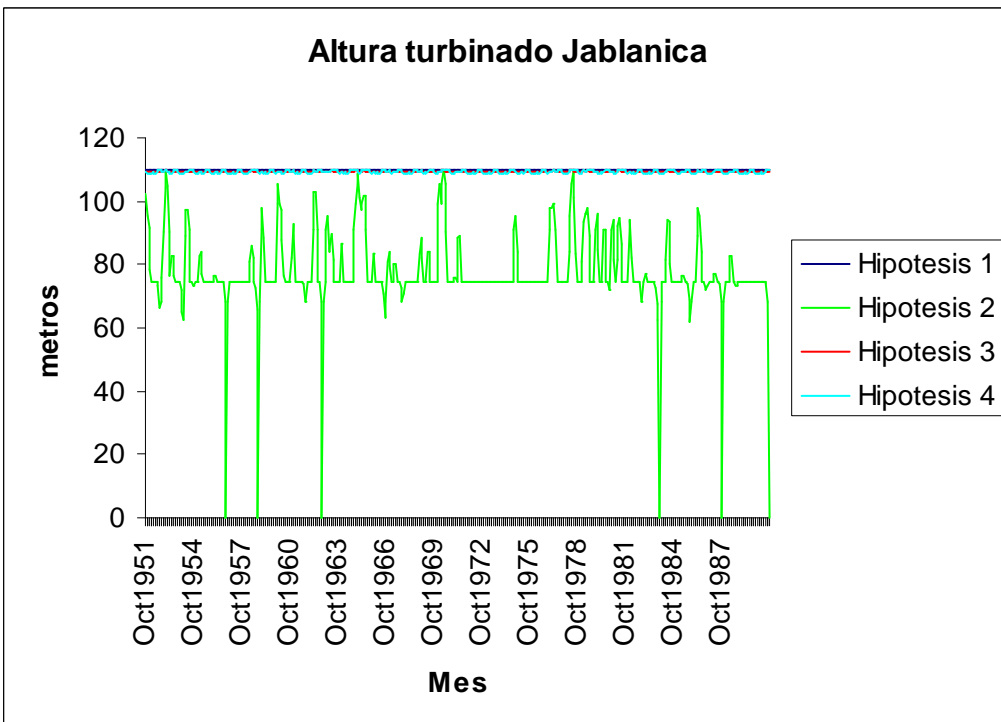
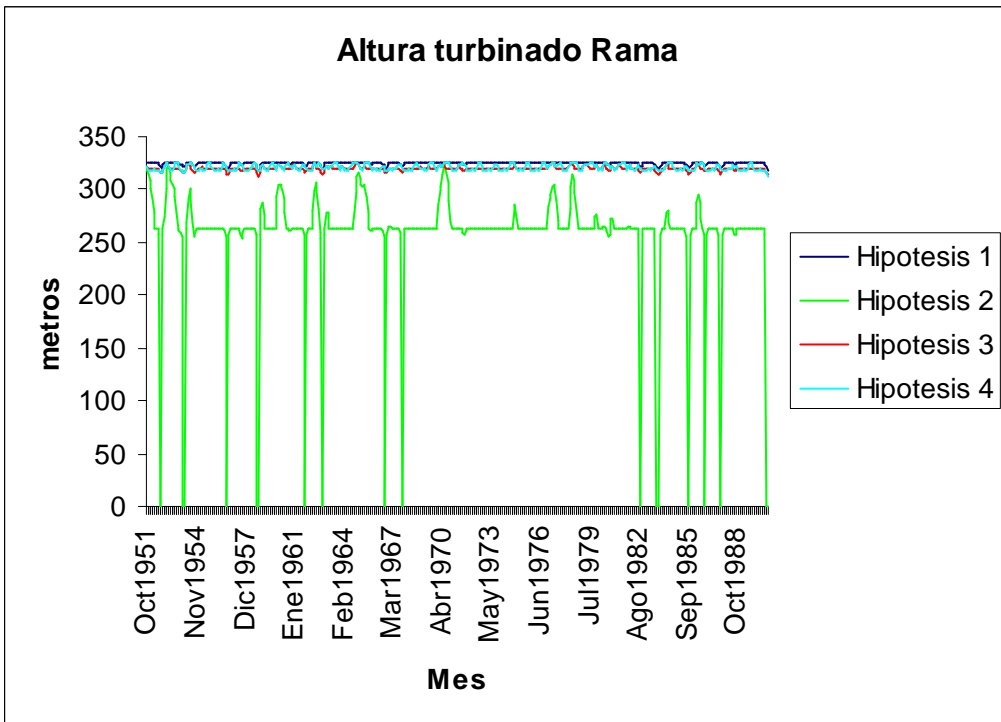
Figura 4.13: Volúmenes mensuales para cada embalse y alternativa

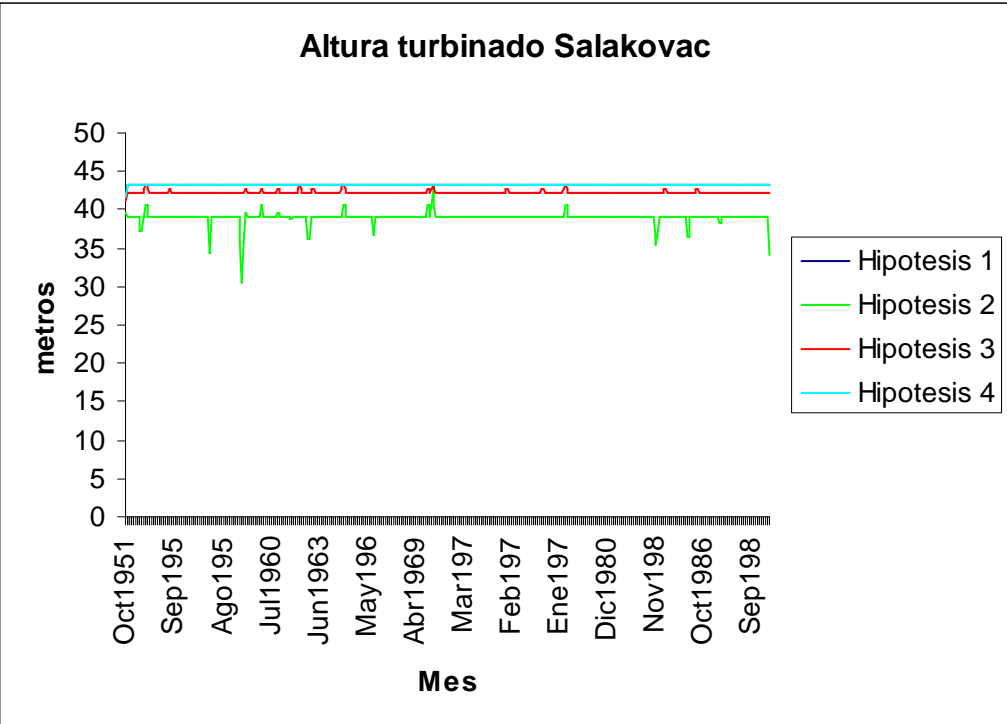
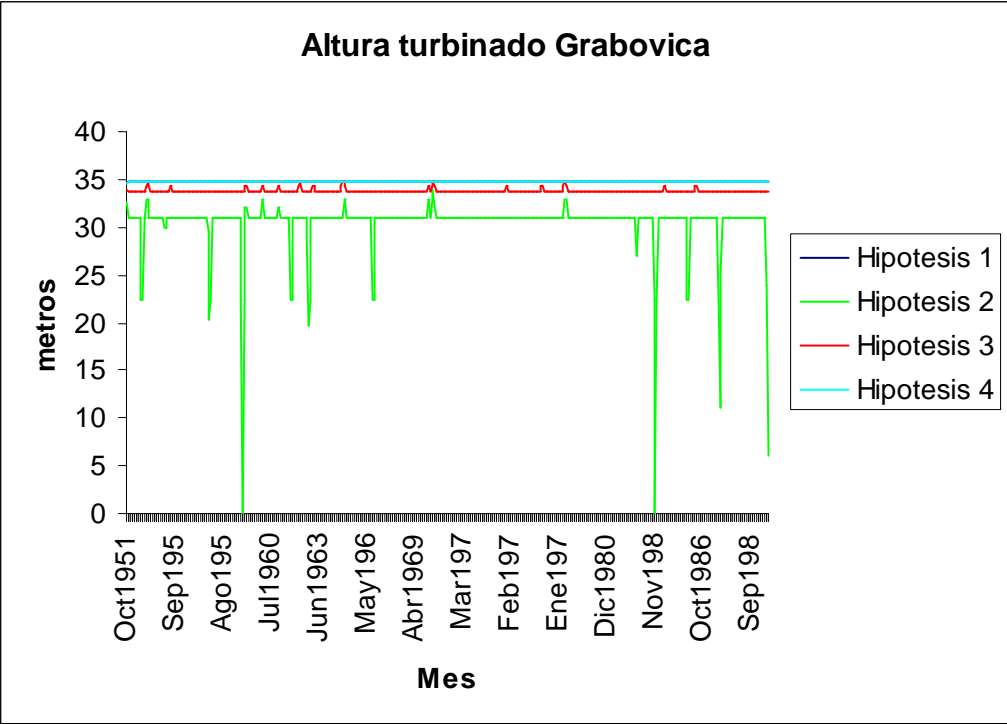
Se observa como en el caso de Rama y Jablanica la comparación entre alternativas es semejante. Los valores máximos de volumen embalsado se dan en la hipótesis 1, mientras que los mínimos se dan en la hipótesis 2. En la hipótesis 3 los volúmenes se sitúan en y alrededor del volumen umbral, situado por debajo del correspondiente a la hipótesis 1. Los valores de la hipótesis 4 oscilan de forma cíclica entre los valores de la hipótesis 1 y los de la hipótesis 3, oscilaciones provocadas por la propia regla de gestión del sistema tomada en esta hipótesis. También se aprecia que en la hipótesis 2 las oscilaciones del sistema son mayores que en el resto.

En los casos de Grabovica, Salakovac y Mostar los volúmenes en la hipótesis 1 son iguales a los de la hipótesis 4. Los valores de las otras dos hipótesis presentan las mismas características que en los otros embalses.

En resumen los mayores volúmenes de embalse se dan con la hipótesis 1. Los valores de la hipótesis 4 son un poco inferiores a los de la hipótesis 1 excepto en Grabovica, Salakovac y Mostar, donde son iguales. En la hipótesis 3 los valores son ligeramente inferiores a los de las dos anteriores, mientras que en la hipótesis 2 son mucho menores a los de las otras hipótesis. Además en la hipótesis 2 se producen las variaciones más bruscas en el volumen embalsado.

Las alturas de turbinado para cada embalse y cada hipótesis se presentan a continuación.





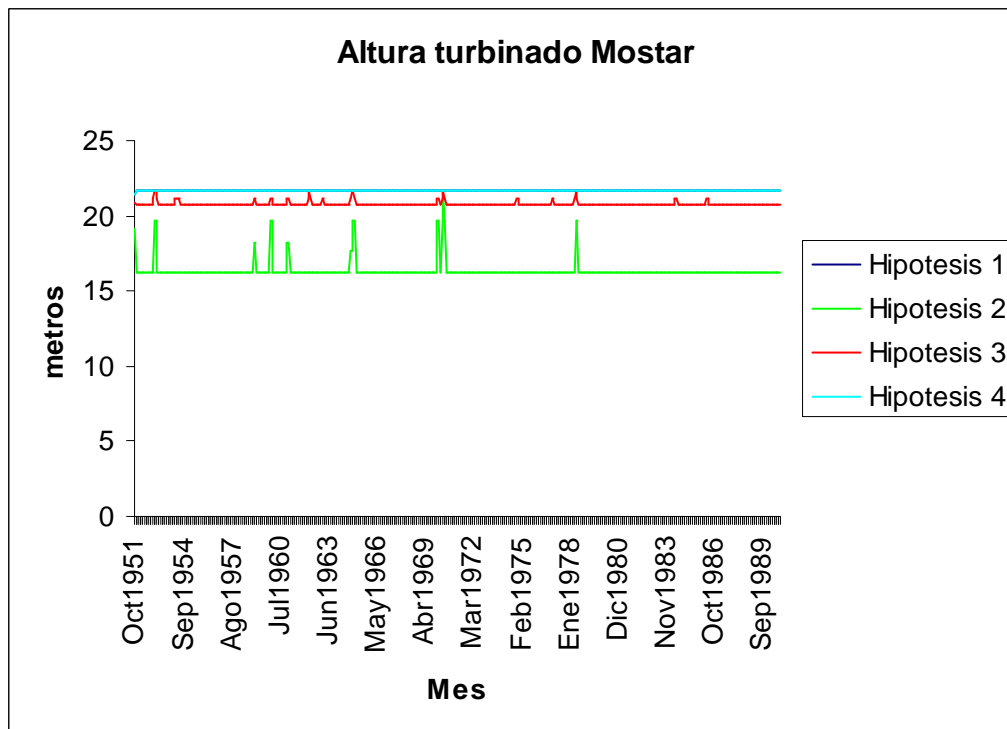
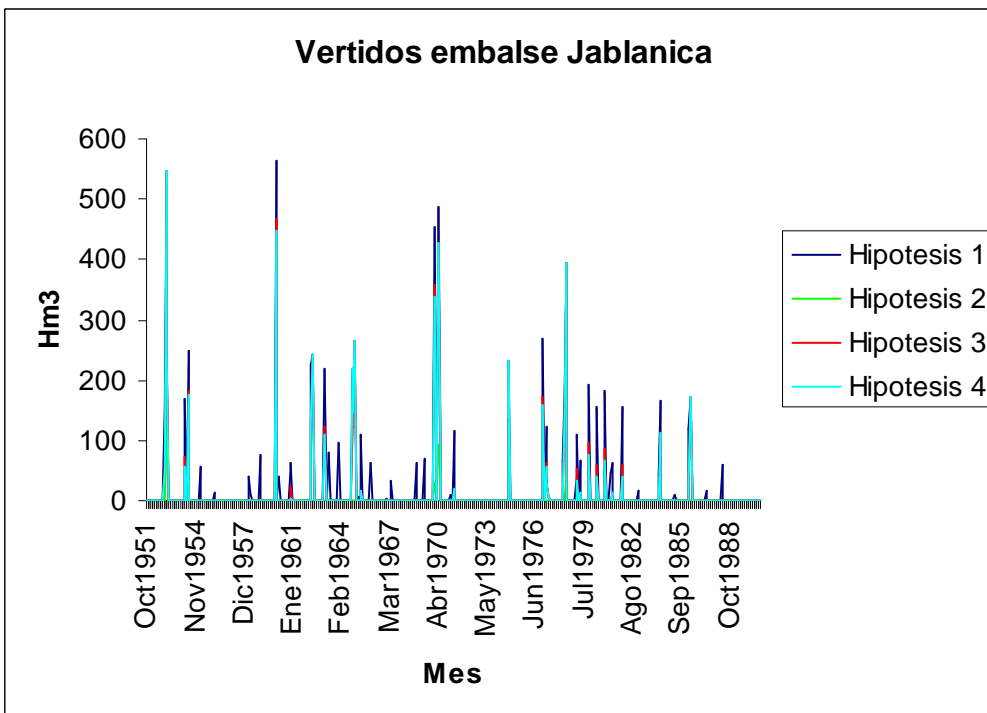
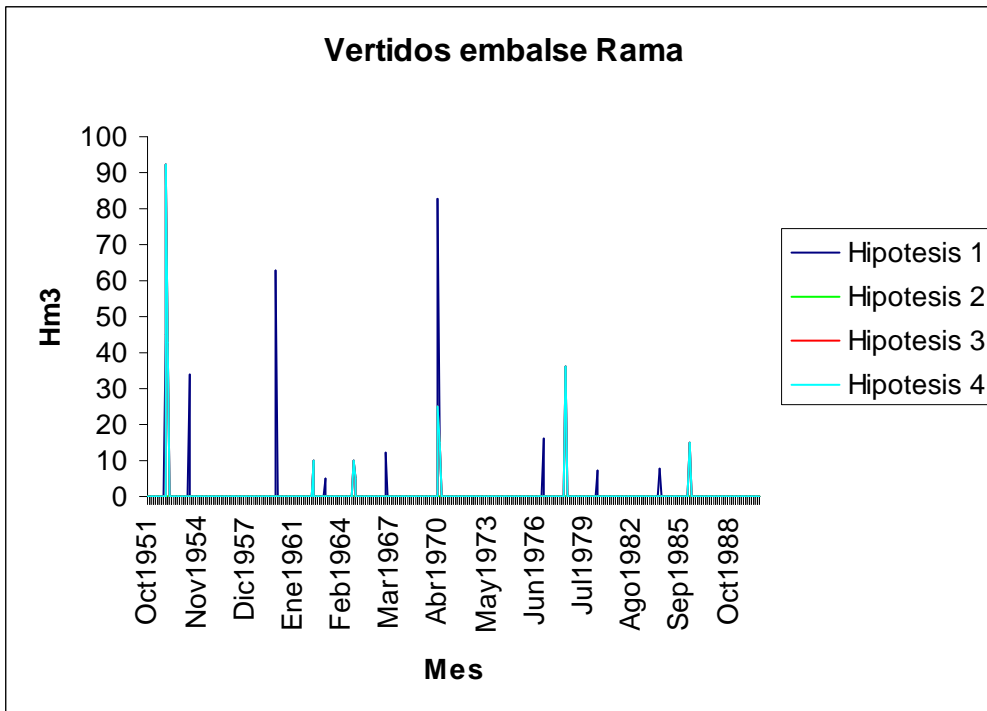


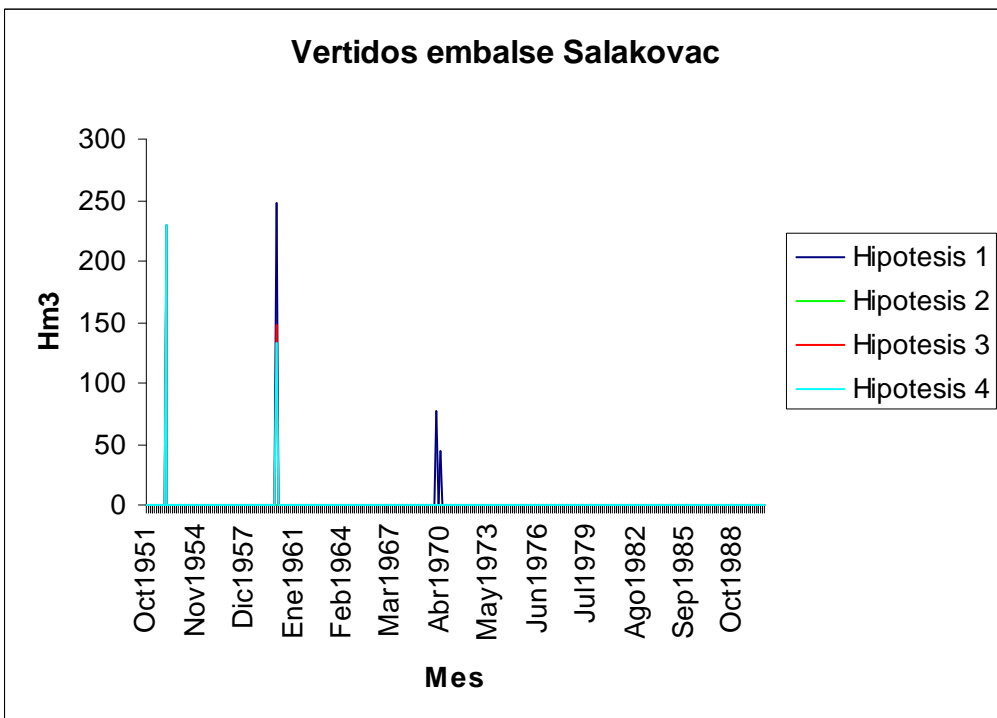
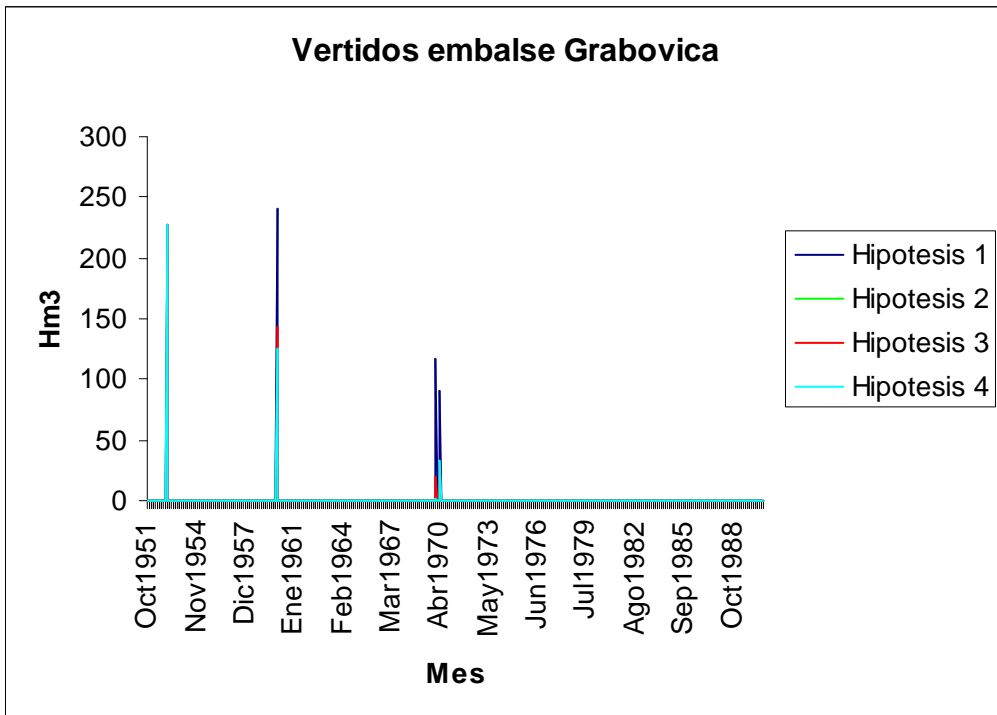
Figura 4.14: Alturas de turbinado mensuales para cada embalse y alternativa

Como se puede apreciar en las gráficas siguientes las pautas que se observaban en los volúmenes se observan también en las alturas de turbinado, ya que ambos parámetros están relacionados de forma directa. Los mayores valores de altura de turbinado se alcanzan en la hipótesis 1. En la hipótesis 3 dichos valores son ligeramente inferiores a los de la anterior. En la hipótesis 4 los valores de la altura de turbinado oscilan entre los valores de la hipótesis 1 y los de la hipótesis 3, oscilación provocada por la regla de gestión del sistema. Por último en la hipótesis 2 dichas alturas de turbinado son mucho menores a los de las otras tres hipótesis, presentando además variaciones bruscas.

Recopilando los dos puntos anteriores se puede afirmar que las hipótesis 1, 3 y 4 son muy parecidas en lo que a volúmenes de embalse y alturas de turbinado respecta. La única hipótesis que se desmarca claramente en estos dos aspectos es la hipótesis 2, donde los volúmenes y las alturas de turbinado son muy inferiores a los de las otras tres hipótesis.

En cuanto a los vertidos la comparación entre alternativas se refleja en las siguientes gráficas.





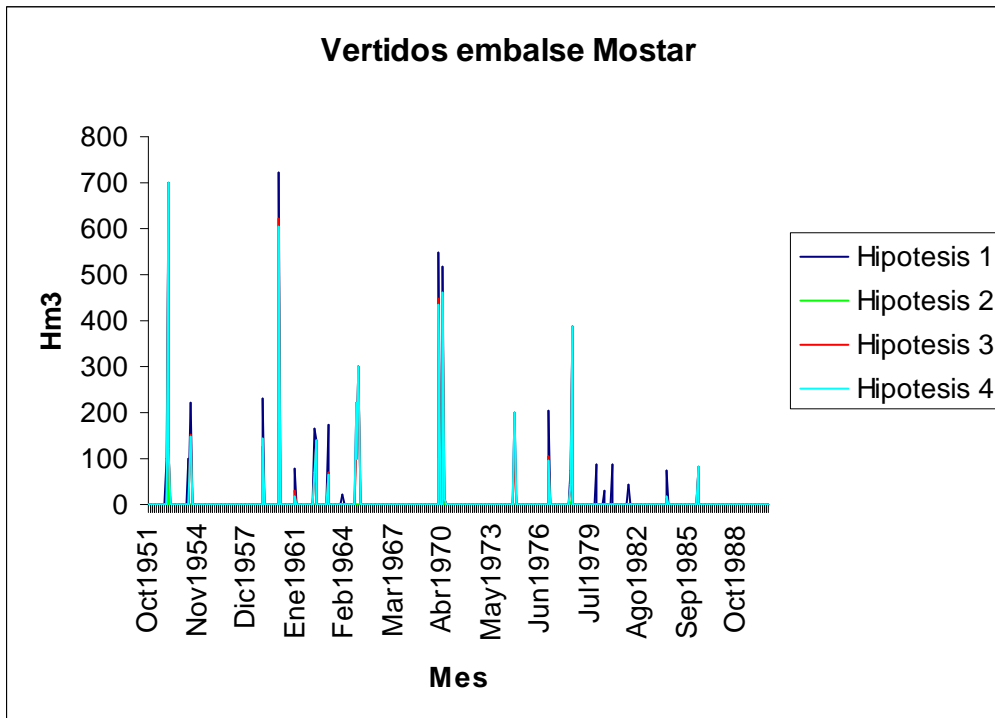


Figura 4.15: Vertidos mensuales para cada embalse y alternativa

En estas gráficas se observa como los valores de las hipótesis 2 y 3 se hallan cubiertos por los de las otras dos hipótesis. Se observa claramente que los mayores vertidos se dan en la hipótesis 1. La hipótesis 4 presenta, al igual que la hipótesis 3 (a la que cubre) valores punta semejantes a los de la hipótesis 1, pero se observa también que en ambas hipótesis los vertidos se dan con menor frecuencia que en la primera, sobretodo en los embalses de Rama y Jablanica. En la hipótesis 2 apenas se dan vertidos.

Además de las gráficas también se pueden comparar valores medios anuales de vertidos para cada embalse. Estos valores se presentan en la tabla siguiente.

Vertidos	Rama	Jablanica	Grabovica	Salakovac	Mostar	Total
H1	13	209	17	15	147	401
H2	0	11	0	0	17	28
H3	6	131	11	10	107	265
H4	6	131	10	9	112	268

Tabla 4.2: Vertidos medios anuales por embalse

En la tabla se aprecia como los vertidos en la hipótesis 1 son mucho mayores al resto de hipótesis. Las hipótesis 3 y 4 provocan vertidos semejantes en todos los embalses, mientras que en la hipótesis 2 los vertidos se reducen al mínimo en todos los embalses. Las mayores diferencias entre hipótesis se dan en los embalses de Jablanica y Mostar, que es donde se dan más vertidos en el sistema.

En resumen los menores vertidos, con mucha diferencia, se producen en la hipótesis 2. Las hipótesis 3 y 4 son idénticas en lo que respecta a vertidos, mientras que los vertidos de la hipótesis 1 superan en gran medida a los del resto de hipótesis.

Además cabe destacar que en todas las hipótesis se cumple el caudal mínimo aguas abajo de Mostar. El caudal máximo a escala mensual también se cumple en todos los casos, pero deberá ser comprobado en un modelo de paso inferior al mensual, ya que el caudal máximo puede darse en pocas horas o días.

Las energías generadas en término medio por mes y por central se presentan a continuación. En ellas se han incluido, además de las cuatro hipótesis antes mencionadas, los datos del estudio denominado “Régimen de trabajo y esquema de las centrales eléctricas sobre el río Neretva para las condiciones hidrológicas normales”, elaborado en Julio de 2001 para las centrales hidroeléctricas del río Neretva. Este estudio fue elaborado a propuesta de las empresas explotadoras de las centrales y estima las aportaciones, los caudales turbinados y la energía producida en el sistema para diferentes reglas de operación.

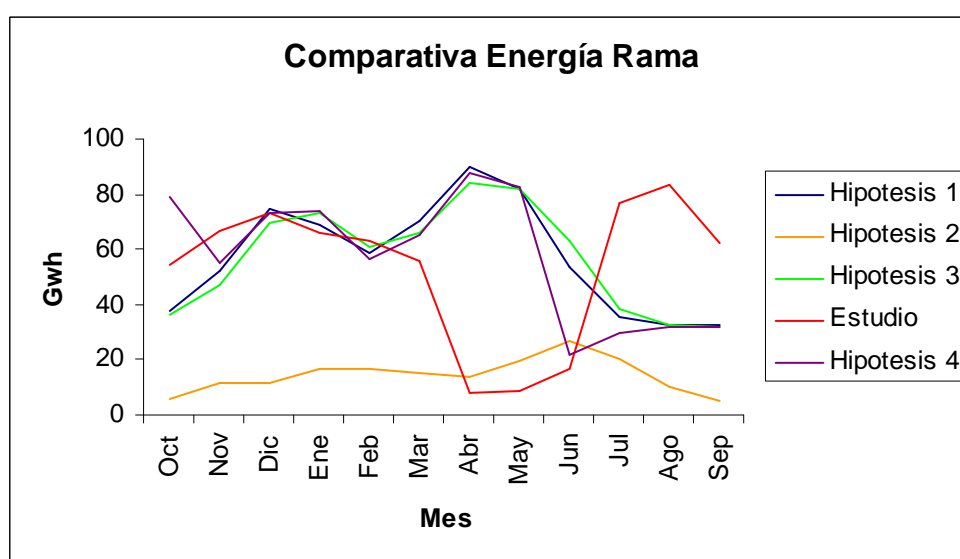


Figura 4.16: Energía producida en Rama en los diferentes casos.

Se observa como claramente la hipótesis 2 presenta valores muy inferiores al resto de hipótesis. Los valores de las otras tres hipótesis son semejantes en casi todos los meses. De entre ellas la hipótesis 4 es la que más se diferencia del resto, ya que produce una cantidad menor de energía en Junio y una mayor en Octubre, estando en el resto de los meses en valores cercanos a los de las hipótesis 1 y 3. En cuanto a los datos del estudio se aprecian unas diferencias apreciables respecto a las otras hipótesis. Según el estudio los mayores valores de producción de energía se dan en los meses de verano, en los que por el contrario los valores obtenidos para cada una de las cuatro hipótesis son los mínimos de todo el año hidrológico. Por el contrario según el estudio los valores mínimos de producción se dan en primavera, donde se producen los máximos de las hipótesis.

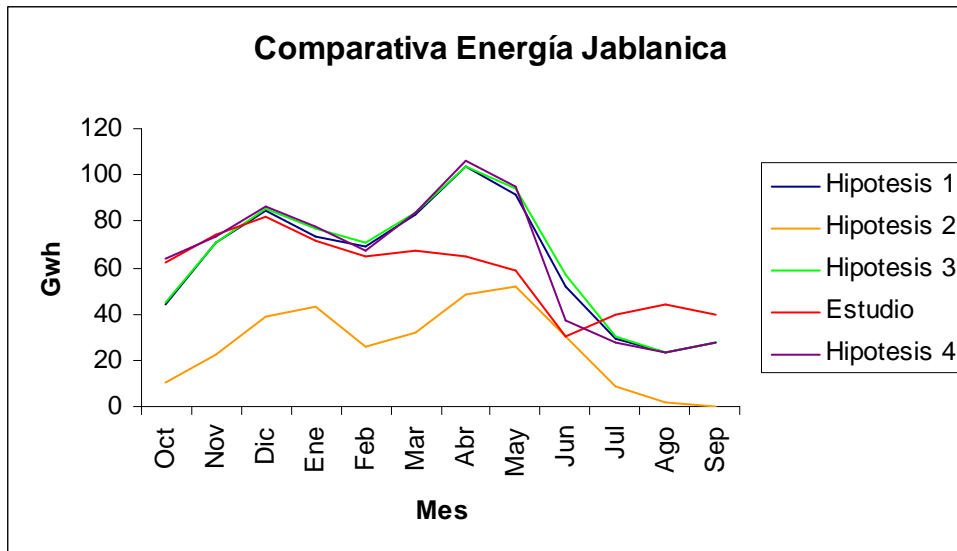


Figura 4.17: Energía producida en Jablanica en los diferentes casos.

En la central de Jablanica, al igual que en Rama, los valores obtenidos por la hipótesis 2 son claramente inferiores al resto, sobretodo al inicio del año hidrológico. En las otras tres hipótesis los valores son mucho más semejantes, sobretodo entre las hipótesis 1 y 3. En lo que respecta al estudio su curva de producción de energía es más parecida a la de las hipótesis de lo que era en Rama. Las mayores diferencias se dan en los meses de primavera, donde los datos del estudio son visiblemente menores a los de las hipótesis 1, 3 y 4. En verano los valores del estudio son ligeramente superiores a los de las hipótesis.

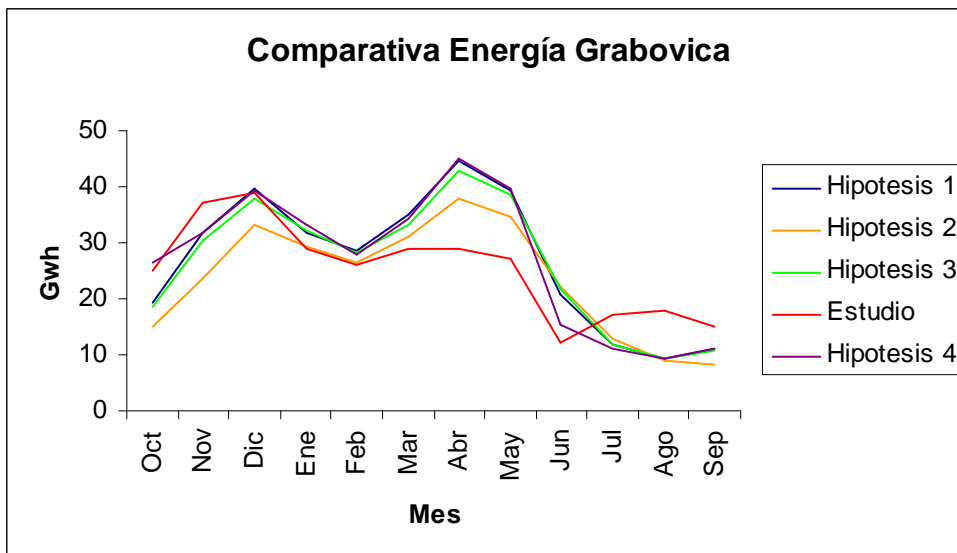


Figura 4.18: Energía producida en Grabovica en los diferentes casos.

En este caso se aprecia como los valores de las cuatro hipótesis consideradas son muy parecidos entre sí, aunque la hipótesis 2 toma valores más bajos que las anteriores excepto en verano. Respecto al estudio sus valores son también parecidos a los de las hipótesis excepto en los meses de primavera, donde es apreciablemente inferior. En verano los valores del estudio son superiores a los de las otras tres hipótesis.

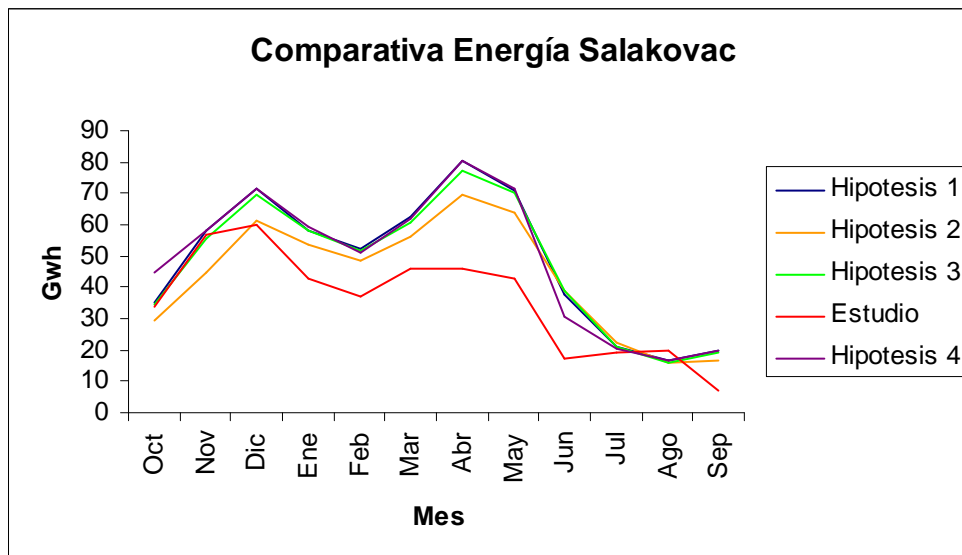


Figura 4.19: Energía producida en Salakovac en los diferentes casos.

En este caso, al igual que en el anterior, los valores que toman las cuatro hipótesis son muy parecidos entre sí, aunque la hipótesis 2 toma valores ligeramente inferiores. En lo que respecta al estudio sus valores son inferiores a los de las cuatro hipótesis, sobretudo en los meses centrales del año hidrológico.

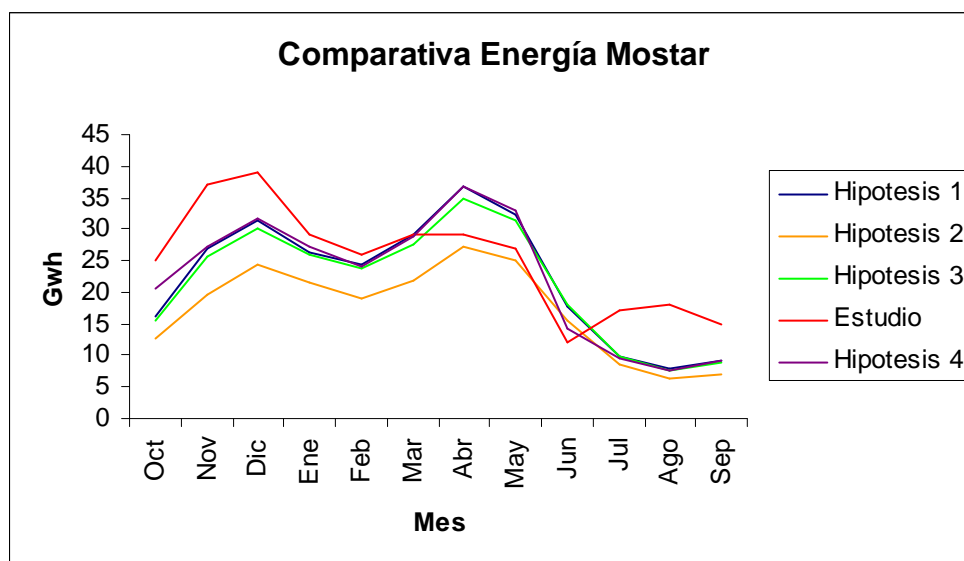


Figura 4.20: Energía producida en Mostar en los diferentes casos.

En este caso, al igual que en los dos anteriores, correspondientes a los embalses de menor capacidad de la cuenca, los valores de las cuatro hipótesis son semejantes. La hipótesis 2 toma valores ligeramente inferiores al resto excepto en los meses de verano. Respecto al estudio los valores del mismo son semejantes a los de las cuatro hipótesis en los meses centrales del año hidrológico tomando valores superiores a estas en los meses de verano y otoño.

En resumen las diferencias entre los valores de las hipótesis son mayores en los embalses de Rama y Jablanica, ya que son los embalses de mayor capacidad del sistema y en los que más puede variar la altura de turbinado. Los datos del estudio son también

semejantes, excepto en el caso de Rama, a los de las cuatro hipótesis. Los datos del estudio son menores a los de las hipótesis en primavera y mayores en verano. Se observa que los datos de las hipótesis 1, 3 y 4 son semejantes entre sí, mientras que los datos de la hipótesis 2 son menores que los del resto de casos.

La producción anual por central se presenta a continuación.

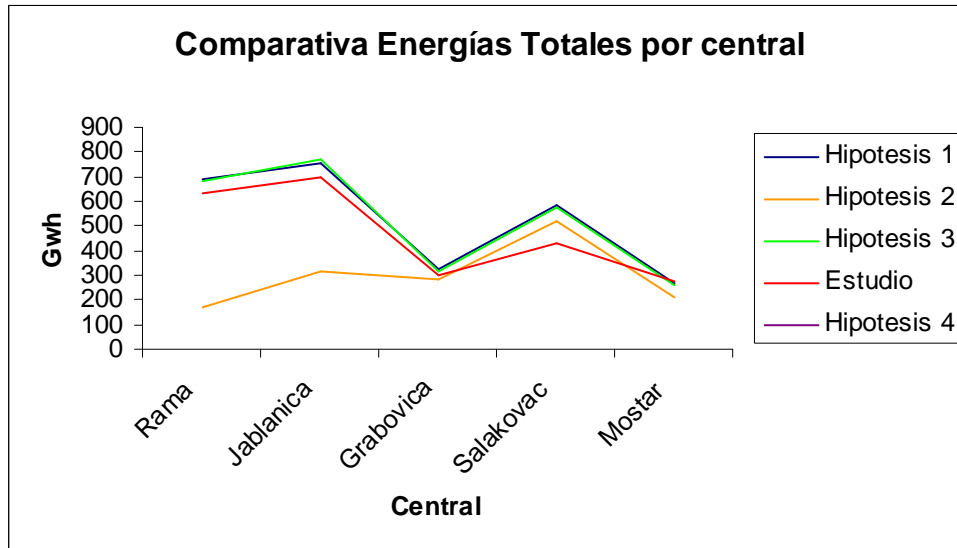


Figura 4.21: Valores anuales para cada una de las centrales.

Se observa como los valores anuales de las hipótesis y el estudio son semejantes en los embalses situados aguas abajo de la cuenca, ya que son los embalses con menor capacidad de regulación y de producción de energía. En los embalses de Rama y Jablanica se aprecian diferencias entre la hipótesis 2 y el resto de casos. La propia hipótesis 2 provoca que los embalses con menor producción de energía sean los de Rama y Jablanica, los mayores embalses del sistema.

La producción total en el sistema se expone en la gráfica y en la tabla siguiente.

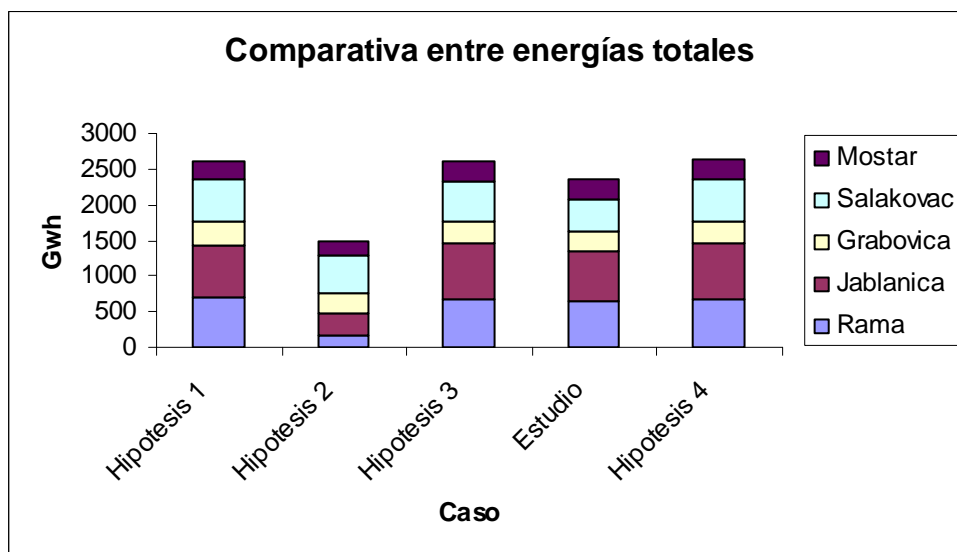


Figura 4.22: Producción anual por hipótesis

Energía	Rama	Jablanica	Grabovica	Salakovac	Mostar	Total
H1	689	754	323	584	268	2618
H2	173	313	283	521	209	1499
H3	685	767	315	573	259	2599
H4	687	767	324	585	270	2633
Estudio	635	700	303	429	278	2345

Tabla 4.3: Producción anual por central e hipótesis

Se aprecia como la hipótesis 2 presenta un valor de producción bastante inferior al de las otras hipótesis. El resto de hipótesis toman valores muy parecidos excepto el estudio, que presenta un valor ligeramente inferior. En la tabla se puede observar como el mayor valor de producción se da en la hipótesis 4, aunque muy cerca se sitúan los valores de las hipótesis 1 y 3. Los valores del estudio son ligeramente inferiores, quedando por debajo los datos de la hipótesis 2. Las hipótesis 1, 3 y 4 están por encima del estudio.

Comparando los valores de cada alternativa para cada central, los valores de producción máximos para la central de Rama se dan en la hipótesis 1. Los valores máximos de la central de Jablanica se dan en las hipótesis 3 y 4. Los valores máximos de Grabovica y Salakovac se dan en la hipótesis 4. Los valores máximos de la central de Mostar se dan en el estudio.

Conclusiones

Tras la comparación de las cuatro hipótesis, tres de ellas definidas a la vez y otra definida posteriormente a las demás, desde los puntos de vista de la seguridad ante avenidas (vertidos) y producción hidroeléctrica, se puede concluir lo siguiente:

- La hipótesis que mayor seguridad proporciona frente a las avenidas es la hipótesis 2, que mantiene los embalses a un nivel más bajo que el resto de alternativas.
- La hipótesis que menor seguridad proporciona frente a las avenidas es la hipótesis 1, ya que en ella los embalses se mantienen llenos la mayor parte del tiempo.
- La hipótesis que mayor producción de energía presenta es la hipótesis 4. De las hipótesis iniciales la que produce mayor energía es la hipótesis 1.
- La hipótesis que menor energía eléctrica produce es la hipótesis 2.

Con ello se puede realizar la siguiente valoración de cada una de las hipótesis.

- La hipótesis 1 es, de las tres hipótesis iniciales, la que mayor producción media de energía proporciona, con 2618 Gwh. Sin embargo es, con 401 hm³ de media, la que mayores vertidos provoca, y por tanto la más insegura frente a la protección de avenidas.
- La hipótesis 2 es la que mayor protección frente a avenidas presenta, con 28 hm³ vertidos de media. Sin embargo es, con 1500 Gwh de media, la que proporciona una menor cantidad de energía.

- La hipótesis 3 presenta una producción de energía semejante a la 1, con 2600 Gwh. Sin embargo la protección que proporciona frente a avenidas es muy superior a la hipótesis 1, con 265 hm³ vertidos por término medio.
- La hipótesis 4, definida posteriormente, presenta la mayor producción media de todas las hipótesis presentadas, con 2633 Gwh. Además proporciona una protección ante avenidas semejante a la hipótesis 3, con 268 hm³.

Por lo tanto se puede afirmar que los mejores resultados obtenidos con el modelo son los correspondientes a la hipótesis 4, ya que es la que proporciona una mayor producción de energía de todas proporcionando además una protección contra avenidas aceptable. La gran ventaja de esta regla de gestión radica en que tiene en cuenta la variabilidad del año hidrológico al definir un umbral de sueltas para cada mes.

Análisis de las avenidas del sistema en escala diaria

Objetivos del modelo diario

Una vez ejecutado el modelo mensual y analizados sus resultados se pudo observar como había alternativas semejantes en lo que a producción de energía respecta. Entre algunas de estas alternativas había, sin embargo, claras diferencias en lo que respecta a la seguridad frente a avenidas. A la luz de estos resultados se consideró que la regla de gestión más adecuada consistía en definir un volumen objetivo para cada embalse. De este modo se conseguía reducir el riesgo de avenidas manteniendo la producción a un nivel semejante al caso de mantener los embalses siempre llenos.

Sin embargo se puntualizó que dichos resultados no son suficientes para evaluar la situación durante las avenidas, ya que un modelo mensual considera que la aportación es constante en todo el mes, situación muy alejada de la realidad. Todo esto, unido al establecimiento de un caudal máximo para garantizar la seguridad de la ciudad de Mostar, obliga a comprobar la validez del modelo a escala diaria y, en su caso, proponer soluciones ante los episodios de avenida.

El objetivo del presente estudio es, por tanto, comprobar la validez de la regla de gestión elegida anteriormente aplicando una escala diaria. En caso de que los caudales resultantes en Mostar sean superiores a los admisibles se buscarán reglas de gestión específicas para episodios de avenida. Dichas medidas van a centrarse en el embalse de Jablanica, ya que es el embalse con mayor cuenca intermedia y además su importancia en el total de la cuenca ha quedado ya clara en el análisis mensual.

Cálculo sin vertidos en Jablanica

El objetivo de este apartado es doble. Por un lado se van a determinar los caudales circulantes en Mostar para el episodio de avenida, comparándolos con el máximo preestablecido. Por otra parte se va a determinar cual es el caudal objetivo de turbinado en Jablanica que menores caudales produce en el sistema. El desembalse no turbinado se limitará a la situación con embalse lleno.

Para poder llevar a cabo estas simulaciones es necesario convertir los datos mensuales a datos diarios para poder introducirlos en el SimWin.

➤ Datos de partida del sistema

Se dispone para las simulaciones de las aportaciones diarias medidas en todos los embalses del sistema entre los años 2001 y 2006. Observando estos datos se puede apreciar que los máximos valores de aportaciones se dan en los meses de Marzo y Abril del año 2004, por lo que estos dos meses van a ser los elegidos para efectuar una simulación de 60 días en el programa SimWin.

Dichas aportaciones deben ser tratadas para que puedan ser introducidas en el modelo. El tratamiento de los datos puede resumirse en los siguientes puntos.

- En primer lugar se deben convertir las aportaciones totales en aportaciones intermedias. Los datos obtenidos reflejan el caudal de toda la cuenca vertiente por encima del punto de medida. Sin embargo el programa trabaja con los datos de aportaciones intermedias entre dos puntos de la cuenca. La conversión de aportaciones totales a aportaciones intermedias se consigue restando a los datos totales los datos de las aportaciones que recibe el río del tramo anterior. Dado que en este caso las cuencas intermedias están delimitadas por los embalses los datos de entradas de río a cada cuenca intermedia son los datos de sueltas y vertidos del embalse situado aguas arriba. Así pues para hallar la aportación intermedia en Jablanica hay que restarle a la aportación total las sueltas y los vertidos de Rama, y así sucesivamente.
- Los datos de las simulaciones correspondientes a embalses y centrales que se manejaban anteriormente deben cambiarse de unidades, de hm^3/mes a $\text{hm}^3/\text{día}$. Dicha conversión se presenta en la siguiente tabla.

DATOS EMBALSES	Rama	Jablanica	Grabovica	Salakovac	Mostar
Número prioridad	10	5	3	2	1
Volumen inicial (hm3)	400	300	19.8	68	11
Caudal máximo de sueltas (hm3/día)	5.6	16.83	33.3	47.3	31.53
Volumen máximo (hm3)	478	318	19.8	68	11
Volumen mínimo (hm3)	21	30	15	55	5
Volumen objetivo (hm3)	400	300	19.8	68	11

DATOS CENTRALES	Rama	Jablanica	Grabovica	Salakovac	Mostar
Caudal máximo (hm3/día)	5.6	16.83	33.3	47.3	31.53
Caudal mínimo (hm3/día)	0	0	0	0	0
Cota base central (m)	270	159	124	80	56.3
Coef. Energía (Gwh/(hm3 x m))	0.00214	0.00214	0.00235	0.00252	0.00236
Cota de turbinado (m)	536	235	154.5	118.5	72

Tabla 5.1: Datos diarios del sistema introducidos en el programa SimWin

- Hay que apuntar que los datos diarios disponibles son demasiado limitados, ya que solo cubren 6 años que no incluyen las avenidas máximas históricas. Es por esto por lo que aquí se ha preferido emplear los datos mensuales disponibles para utilizarlos como referencia para la generación de datos diarios de avenidas superiores a las registradas. Se va a comparar dichas aportaciones con los máximos de la cuenca en esos meses. Los datos de Abril y Marzo de 2004 pueden no corresponder con los máximos datos disponibles del sistema en esos meses. La comparación debe realizarse en escala mensual, al ser la escala de la que se tienen más datos. Se extraerán los datos mensuales máximos en los meses de Marzo y Abril para cada embalse y se compararán con los datos de los meses de Marzo y Abril de 2004. Una vez comparados se establecerá un coeficiente mayorador para los datos de Marzo y Abril de 2004.

El primer punto es sencillo de aplicar ya que en los embalses de Jablanica, Grabovica y Salakovac se dispone, además de los datos de aportaciones, las sueltas y vertidos de los embalses. En los otros dos embalses, Rama y Mostar, no se dispone de

estos datos pero no son necesarios, ya que Rama es la cabecera de la cuenca (por lo que sus aportaciones totales no precisan de corrección) y el embalse de Mostar es el último de la cuenca, por lo que no son necesarias sus salidas al no existir aguas abajo ninguna aportación intermedia. Las aportaciones intermedias de los embalses se presentan a continuación.

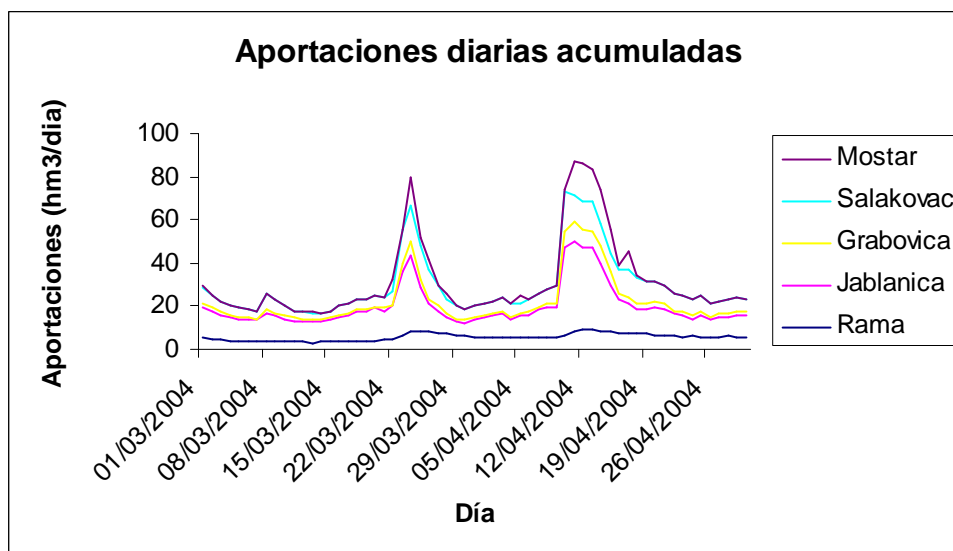


Figura 5.1: Aportaciones diarias acumuladas en la cuenca durante el periodo simulado.

En la gráfica se aprecia como las aportaciones más importantes se dan entre los embalses de Rama y Jablanica.

El segundo punto descrito anteriormente debe realizarse atendiendo a los datos de las aportaciones intermedias en periodo mensual. Para poder obtener la media, los máximos y mínimos de cada embalse para los meses de Marzo y Abril es necesaria una reordenación de los datos. Una vez llevada a cabo pueden extraerse las medias, máximos y mínimos del modelo para compararlos con los datos obtenidos anteriormente. Dicha comparación se resume en la siguiente tabla.

	Rama	Jablanica	Grabovica	Salakovac
Máximo Marzo (hm3/mes)	183	585	151	290
Máximo Abril (hm3/mes)	251	741	132	373
Marzo 2004 (hm3/mes)	150	396	47	199
Abril 2004 (hm3/mes)	195	472	88	260
Coef. Marzo	1,22	1,48	3,19	1,46
Coef. Abril	1,29	1,57	1,50	1,43

Tabla 5.2: Comparación entre los datos mensuales del año 2004 y los datos mensuales máximos del sistema (hm3/mes)

A la vista de la tabla puede concluirse que el coeficiente adecuado para mayorar las series de datos es igual a 1,5 veces los datos de aportaciones intermedias. Puede observarse que este valor es aproximadamente el que resulta de comparar los datos de Jablanica en el año 2004 con los datos máximos en Jablanica, siendo este embalse el

que más aportaciones tiene y por tanto el más importante. En Grabovica y Salakovac los valores son parecidos a Jablanica mientras que en Rama son un poco inferiores. Por lo tanto el coeficiente elegido es igual a 1,5 para todos los embalses.

En resumen las aportaciones intermedias que van a ser introducidas en el sistema para realizar las simulaciones son las que resultan de convertir las aportaciones totales en intermedias para el año 2004 mayorándolas con el coeficiente 1,5 determinado anteriormente. Esos son los datos de aportaciones del modelo diario.

➤ **Simulaciones realizadas**

Se ha dicho anteriormente que el objetivo de estas simulaciones, en las que no se va a permitir el desembalse, es doble: comparar los datos para diferentes caudales objetivo de turbinado y comprobar si los datos de caudales en Mostar exceden del máximo.

Los resultados de la simulación van a ser las producciones de cada central, los caudales circulantes aguas abajo del embalse de Mostar, los caudales turbinados en Jablanica y los vertidos en Jablanica. Las hipótesis de turbinado se establecerán como un porcentaje del caudal máximo que se puede turbinar en la central de Jablanica, caudal igual a 16,83 hm³/día (192 m³/s).

El caudal circulante aguas abajo de Mostar se presenta a continuación.

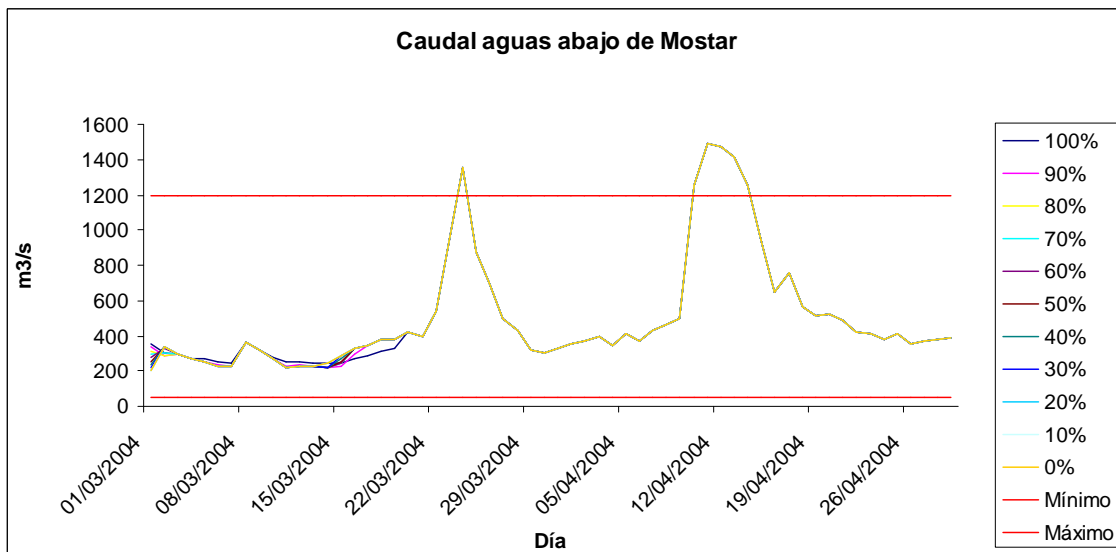


Figura 5.2: Caudal aguas abajo de Mostar para cada caudal objetivo de turbinado en Jablanica.

Se puede observar en la gráfica como los caudales aguas abajo de Mostar varían muy poco con cada hipótesis de turbinado, siendo totalmente idénticos a partir del día 20 de Marzo. Por lo que respecta a los máximos puede apreciarse como hay dos periodos en los que se supera. Dichos periodos se corresponden con las mayores avenidas sufridas por el sistema en esos dos meses.

Por lo tanto puede concluirse que el caudal objetivo de turbinado apenas influye, pero cabe recordar que dicho caudal objetivo de turbinado solo se aplica si el embalse no se encuentra lleno. Si el embalse se encuentra lleno el modelo turbinado el caudal máximo posible y vierte el resto. Por lo tanto los periodos en los que las hipótesis son idénticas corresponden a periodos en los que el embalse de Jablanica se encuentra lleno. Esta afirmación será comprobada en las siguientes gráficas.

Los vertidos del embalse de Jablanica se exponen a continuación:

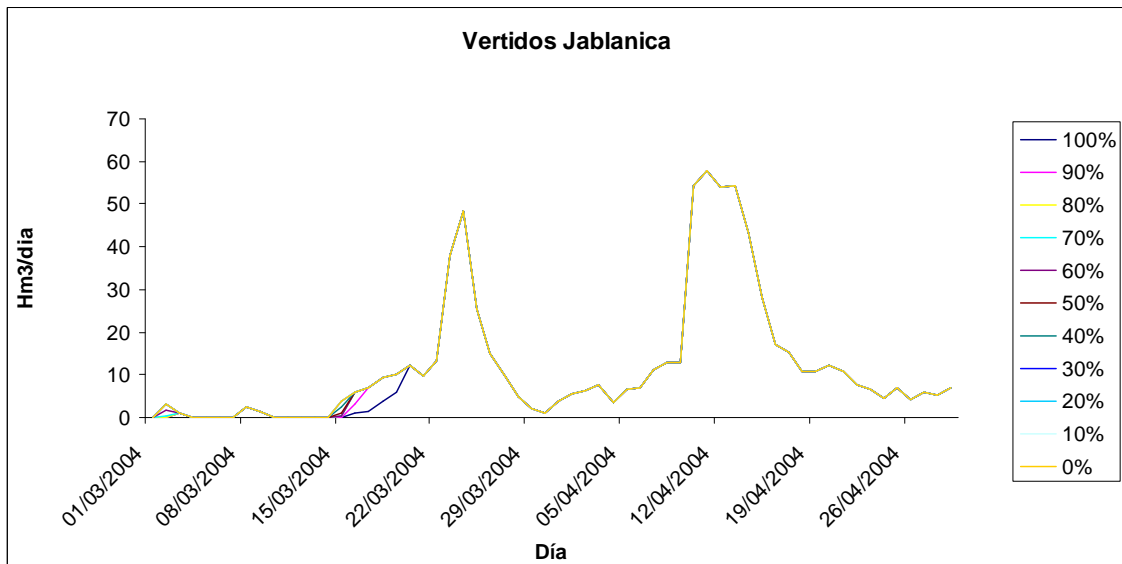


Figura 5.3: Vertidos en el embalse de Jablanica para cada caudal objetivo de turbinado.

La gráfica representada presenta un patrón idéntico al de la anterior. Hay dos episodios de avenida muy fuertes en los cuales el embalse tiene que verter. Se aprecia además como los vertidos son muy parecidos en todas las hipótesis, siendo de hecho iguales a partir del día 20 de Marzo. Como se apreciaba en la gráfica anterior ese día es cuando ocurre el llenado del embalse, por lo que a partir del mismo la respuesta del sistema es la misma sin importar el caudal objetivo de turbinado, ya que una vez lleno se turbinado al 100%.

Los caudales turbinados en el embalse de Jablanica se presentan en la gráfica siguiente.

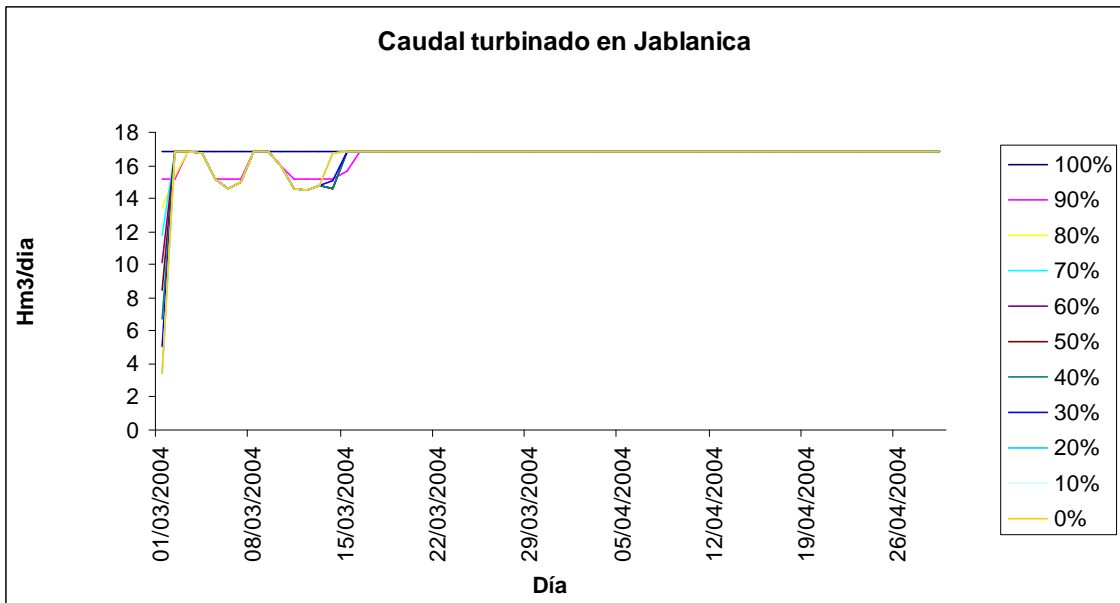


Figura 5.4: Caudal turbinado en el embalse de Jablanica para cada caudal objetivo de turbinado.

Se aprecia un patrón de caudales turbinados muy parecido en todas las hipótesis. Tal y como ocurría en las gráficas anteriores, a partir de cierto momento los datos de todas las series coinciden, ya que el embalse se ha llenado. El hecho de definir un caudal objetivo de turbinado u otro tiene aplicación en los primeros días, ya que después las grandes aportaciones condicionan por completo el comportamiento del sistema. Incluso en esos primeros días la respuesta del sistema es semejante en todas las alternativas. En la siguiente gráfica se aprecia la variabilidad del turbinado mensual.

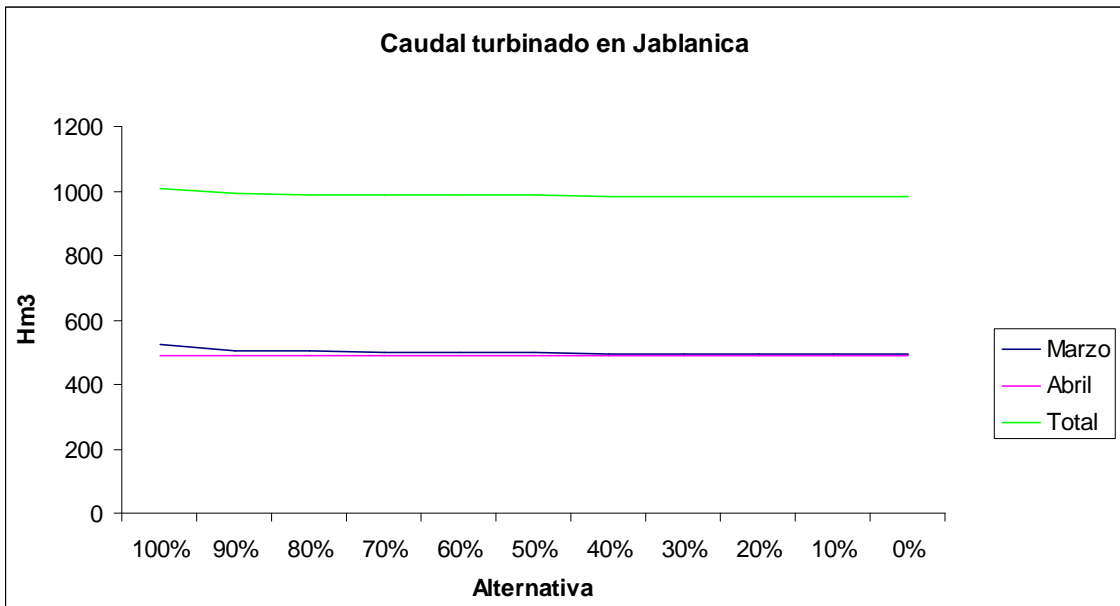


Figura 5.5: Caudal turbinado en el embalse de Jablanica dividido por meses y alternativas.

Se puede apreciar como en esta gráfica las líneas permanecen horizontales en casi todas las alternativas, lo que revela muy pocas diferencias entre ambas.

En resumen a lo largo de estas gráficas se han comparado, para cada caudal objetivo de turbinado, las diferentes variables hidrológicas (caudal aguas abajo de Mostar, vertidos y turbinados del embalse de Jablanica) llegando a la conclusión de que las diferencias entre ambas hipótesis son muy pequeñas, no afectando además a los máximos del sistema. La respuesta hidrológica del sistema viene condicionada fuertemente por las aportaciones, y la mayoría del tiempo de avenida la respuesta del sistema es una respuesta forzada por estas aportaciones, no una regla fijada de antemano. Con el caudal de turbinado no se puede regular la avenida.

Sin embargo, a pesar de las pocas diferencias en lo que a aspectos hidrológicos se refiere, puede haber mayores diferencias en cuanto a aspectos energéticos, por lo que conviene comparar las producciones energéticas en todos los embalses del sistema.

La producción energética del embalse de Jablanica se representa en la siguiente gráfica.

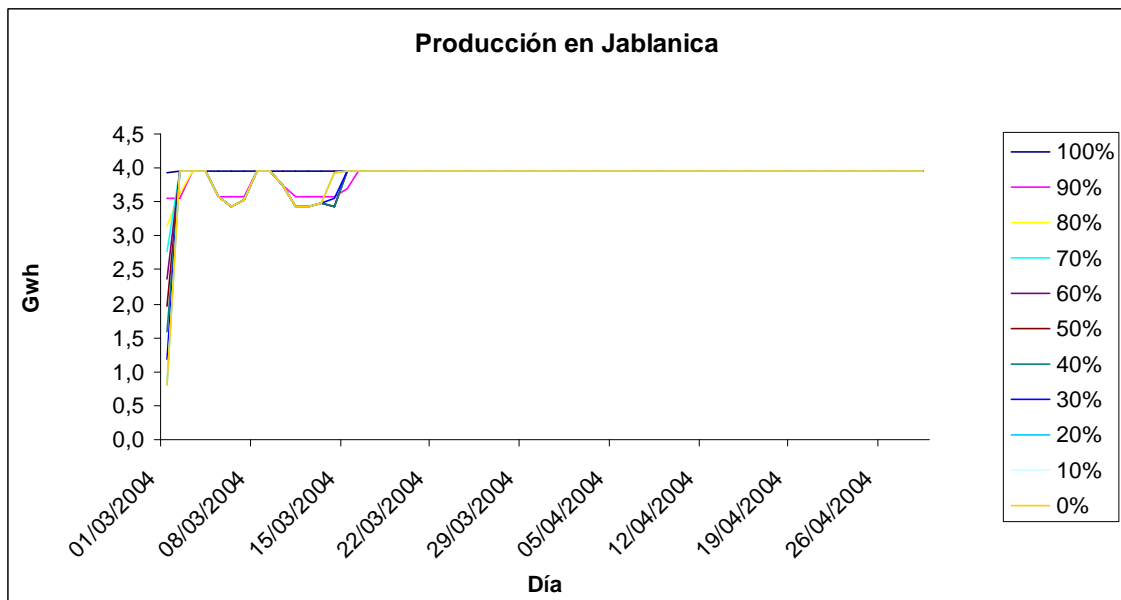


Figura 5.6: Producción energética en la central de Jablanica para cada caudal objetivo de turbinado.

Tal y como se esperaba la gráfica de producción de energía es idéntica a la de caudales turbinados. Se aprecia el mismo patrón que en la anterior, con el sistema fuertemente influenciado por las aportaciones que recibe.

La producción en el embalse de Rama viene dada por la siguiente gráfica.

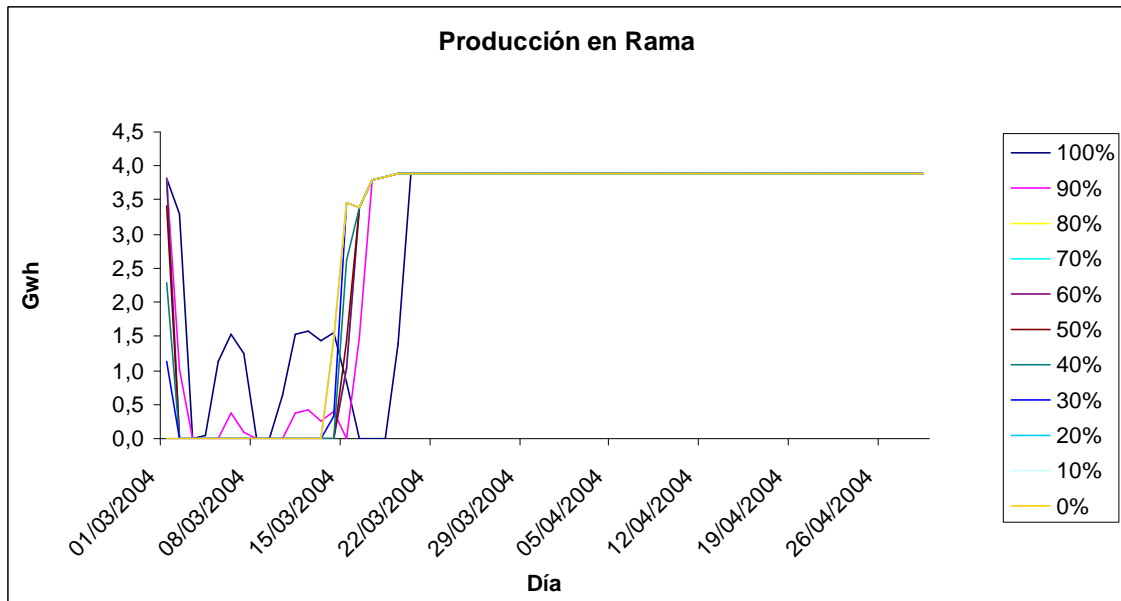


Figura 5.7: Producción energética en la central de Rama para cada caudal objetivo de turbinado en Jablanica.

En esta gráfica se puede apreciar como al principio el embalse de Rama apenas produce energía. Ello es debido a la propia regla que rige el sistema, consistente en mantener un caudal de turbinado en Jablanica sin provocar vertidos. El embalse de Jablanica, tal y como se aprecia en la gráfica de vertidos, tarda muy poco tiempo en llenarse. A partir de la primera semana de la simulación se produce una situación en la que Rama no está lleno pero sí está lleno Jablanica. Dada la mayor prioridad de Rama es quien primero debe soltar agua para asegurar el caudal de turbinado en Jablanica.

Por lo tanto se da el siguiente caso: si la aportación intermedia de Jablanica permite satisfacer su caudal turbinado Rama no puede turbinar caudales de su central, ya que si turbinara Rama el agua al llegar a Jablanica forzaría un vertido en este embalse, lo que no se permite con el modelo. De esta forma los puntos al inicio de la simulación en los que Rama no turbinaba se deben a que son puntos en los que Jablanica está lleno y recibe aportaciones que le permiten mantener su caudal turbinado, provocando incluso vertidos. Estos días el embalse de Rama no turbinaba porque hacerlo provocaría más vertidos en Jablanica.

Por el contrario los días en los que la aportación de Jablanica no permite satisfacer su caudal turbinado Rama debe completarlo, pues es quien tiene mayor prioridad. Rama aprovecha estas sueltas para turbinarlas en su central. Son esos días los que se reflejan al inicio de la simulación, en los que turbinaba caudales que luego servirán para completar el caudal en Jablanica.

También comentar que llega un momento en el que Rama se llena. A partir de entonces ya debe turbinar toda la aportación que recibe ya que de no hacerlo debería verterla. Como la aportación intermedia que recibe a partir de este momento es mayor a su capacidad de turbinado de $5,6 \text{ hm}^3/\text{día}$ (hecho que se aprecia en la gráfica siguiente) significa que a partir de este momento Rama turbinaba al 100%, como demuestra la gráfica de producción energética, sufriendo además pequeños vertidos.

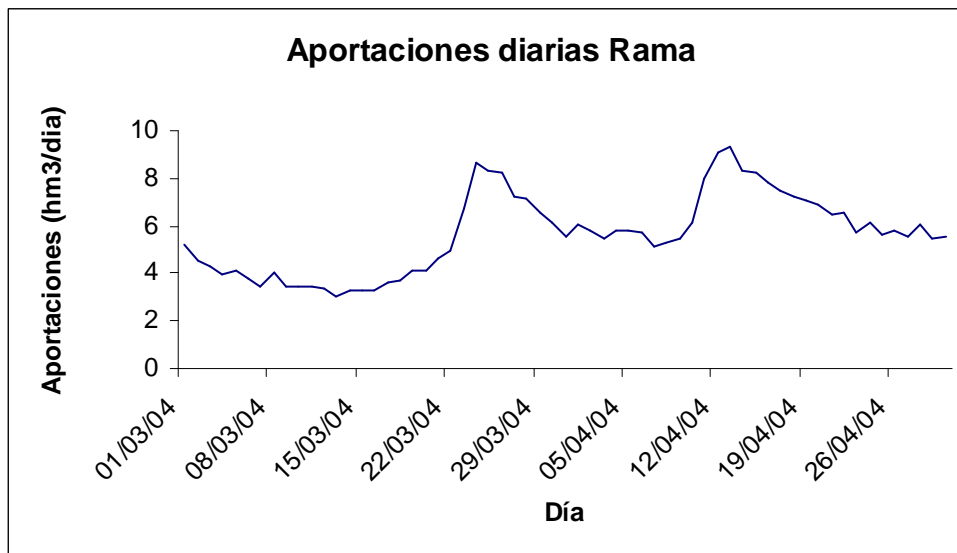


Figura 5.8: Aportación intermedia en el embalse de Rama durante el periodo simulado.

La producción energética de Grabovica es la que representa la siguiente gráfica.

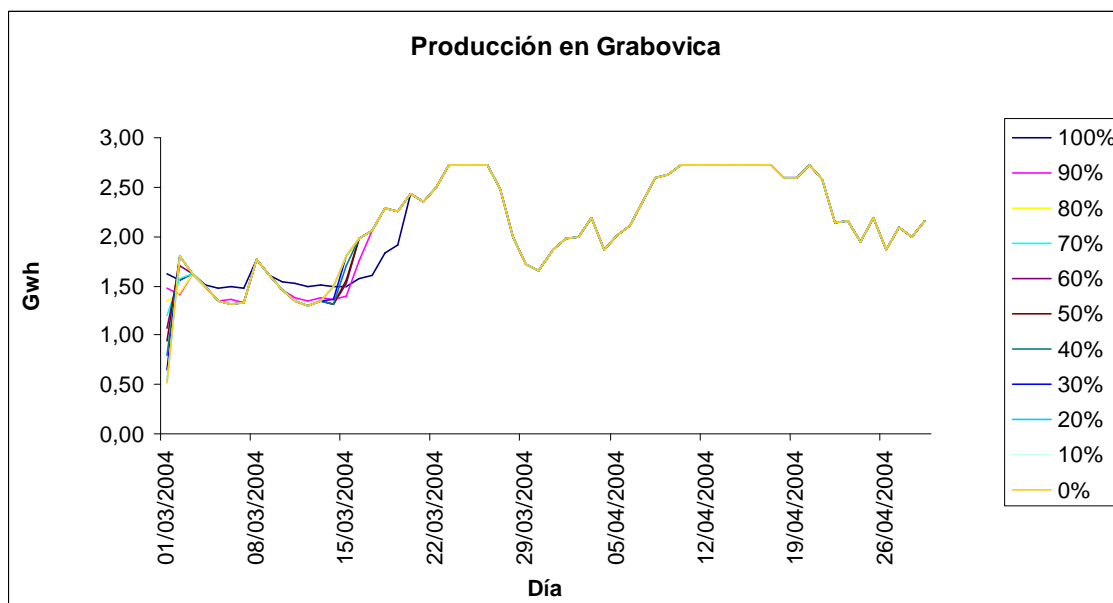


Figura 5.9: Producción energética en la central de Grabovica para cada caudal objetivo de turbinado de Jablanica.

Se puede apreciar en este caso un turbinado menos constante que el de Jablanica. Ello es debido a que la capacidad de turbinado de Grabovica es mayor a la de Jablanica. Es por ello capaz de turbinar los grandes caudales que recibe principalmente de Jablanica, debiendo verter tan solo en episodios puntuales al poder turbinar una gran cantidad de agua diariamente. Se aprecian momentos en los que la gráfica es horizontal, lo que significa que en ese momento, coincidente con los mayores vertidos de Jablanica, la central se encuentra turbinando al 100%. El resto de días puede turbinarse toda la aportación recibida.

Al igual que en las gráficas anteriores llega un punto, en torno al 20 de Marzo, en el que todas las hipótesis de caudal turbinado en Grabovica se igualan, lo que significa que el sistema pierde su capacidad de regulación ante la magnitud de las aportaciones.

La energía generada en la central de Salakovac durante la simulación viene dada por la siguiente gráfica.

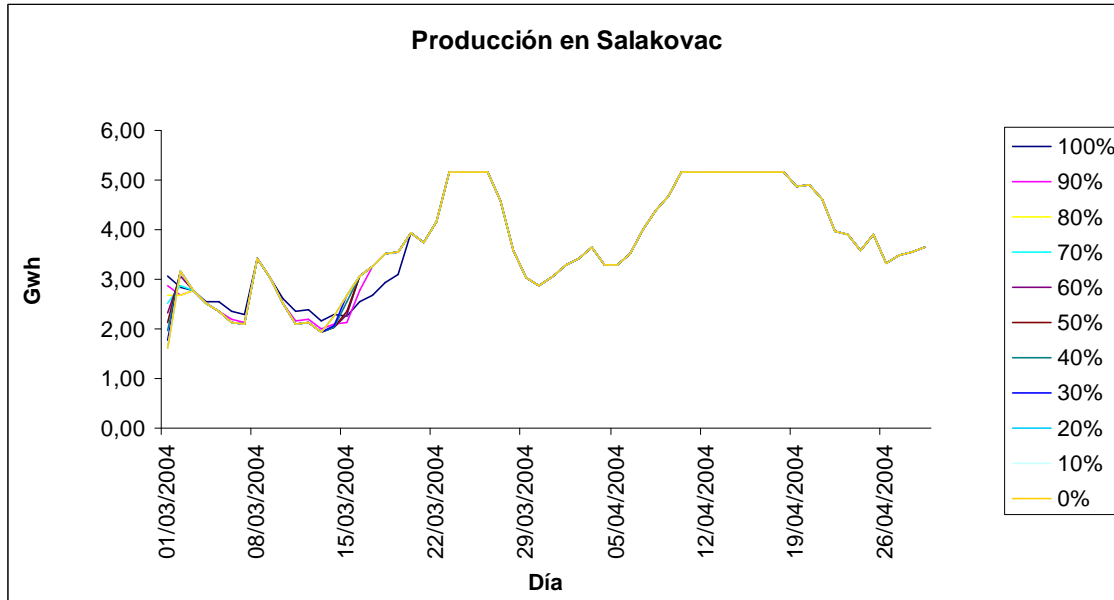


Figura 5.10: Producción energética en la central de Salakovac para cada caudal de turbinado objetivo en Jablanica.

Se aprecia un patrón semejante a Grabovica, con un turbinado inconstante excepto en ciertos momentos, coincidentes con los mayores episodios de aportaciones, en los que el embalse turbinata al máximo. Al igual que Grabovica este embalse solo turbinata el caudal que circula procedente de las sueltas y vertidos en Jablanica (que es el embalse que condiciona la cuenca) y de la aportación intermedia entre estos dos embalses, ya que la regla de gestión de este embalse es mantenerlo al máximo volumen, por lo que solo puede turbinata el volumen sobrante. Cuando ese sobrante es superior a su capacidad de turbinado debe verter el resto. La gráfica tiene el mismo aspecto que la de Grabovica, pero la producción en Salakovac es mayor debido a las condiciones hidroeléctricas del embalse y la central correspondiente.

Tal y como ocurría en las anteriores gráficas llega un momento a partir del cual la solución para cada una de las hipótesis es la misma.

La producción en Mostar se representa a continuación.

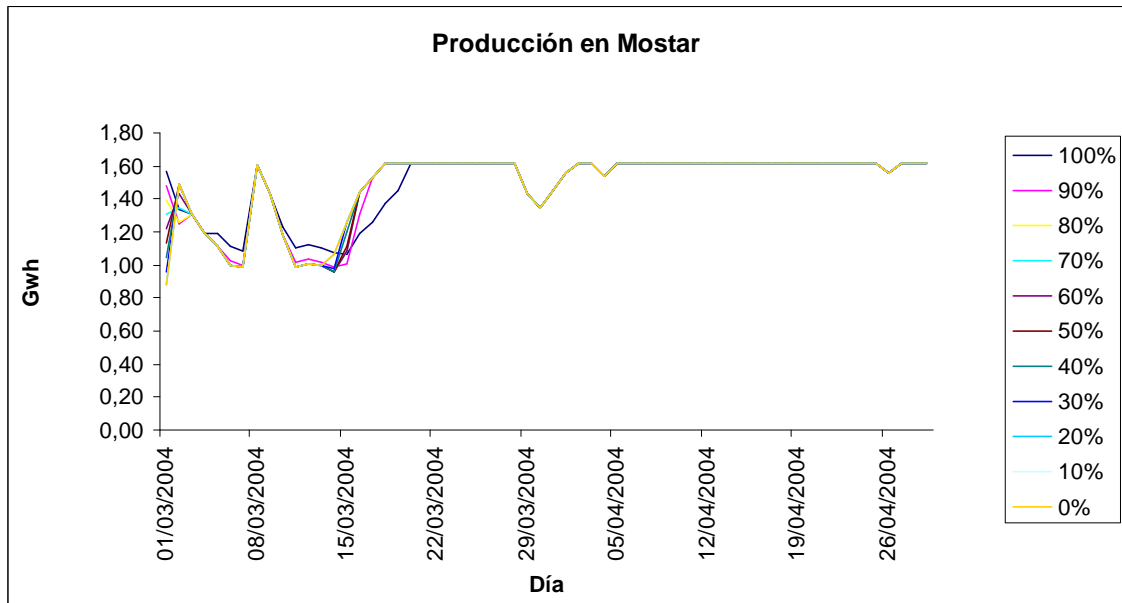


Figura 5.11: Producción energética en la central de Mostar para cada caudal objetivo de turbinado en Jablanica.

Se aprecia en esta gráfica un patrón algo diferente al que siguen Grabovica y Salakovac. En Mostar se está turbinando la mayor parte del tiempo a la capacidad máxima excepto al principio de la simulación, cuando el sistema aun dispone de margen de regulación. Las aportaciones que recibe el embalse de Mostar son casi las mismas que en Salakovac, tal y como puede apreciarse en la gráfica de aportaciones representada anteriormente. El hecho de que se esté turbinando a la capacidad máxima es debido a que la capacidad de turbinado de Mostar es inferior a la de Salakovac, por lo que ante una aportación de igual magnitud Salakovac es capaz de turbinarla sin problemas, pero Mostar no puede hacerlo y debe verter el resto. Por ello la gráfica es prácticamente horizontal al final de la simulación, cuando no se puede turbinar toda la aportación que recibe y debe verterse el resto.

Recapitulando los gráficos anteriores puede representarse la producción total en el sistema en la siguiente gráfica.

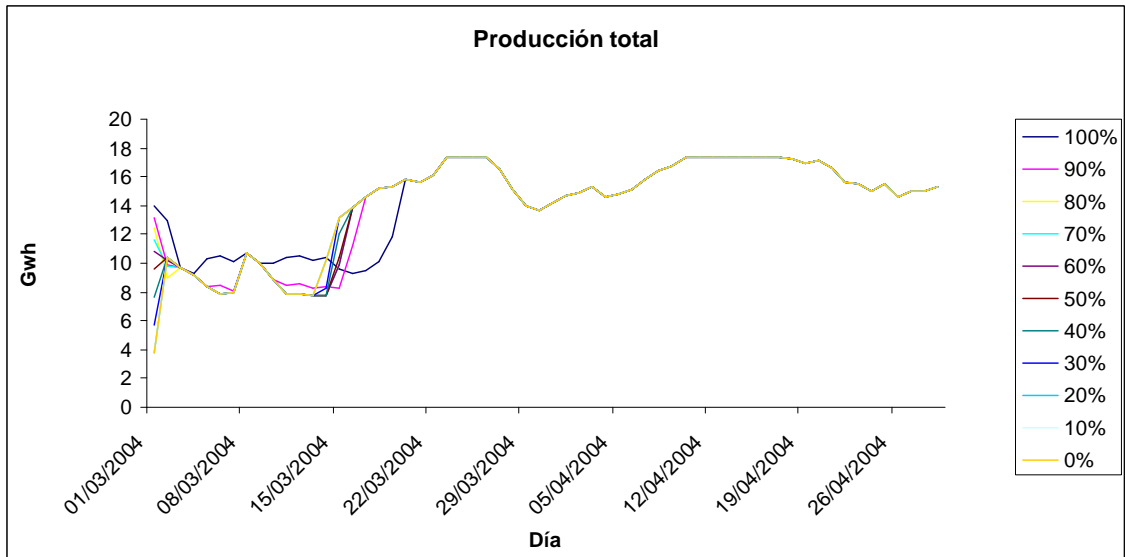


Figura 5.12: Producción energética en el sistema para cada caudal objetivo de turbinado en Jablanica.

Puede apreciarse un patrón semejante al que se apreciaba en las gráficas anteriores. También se observan dos momentos, coincidentes con las máximas aportaciones, en los que la producción permanece constante debido a que todos los embalses están turbinando al 100% e incluso vertiendo a su vez. Se observan pocas diferencias entre las alternativas, y a partir de aproximadamente el día 20 de Marzo todas las hipótesis ensayadas se igualan debido a que el sistema ha agotado su capacidad de regulación.

Dividiendo la producción en los dos meses de la simulación, la producción por central durante el mes de Marzo se representa a continuación.

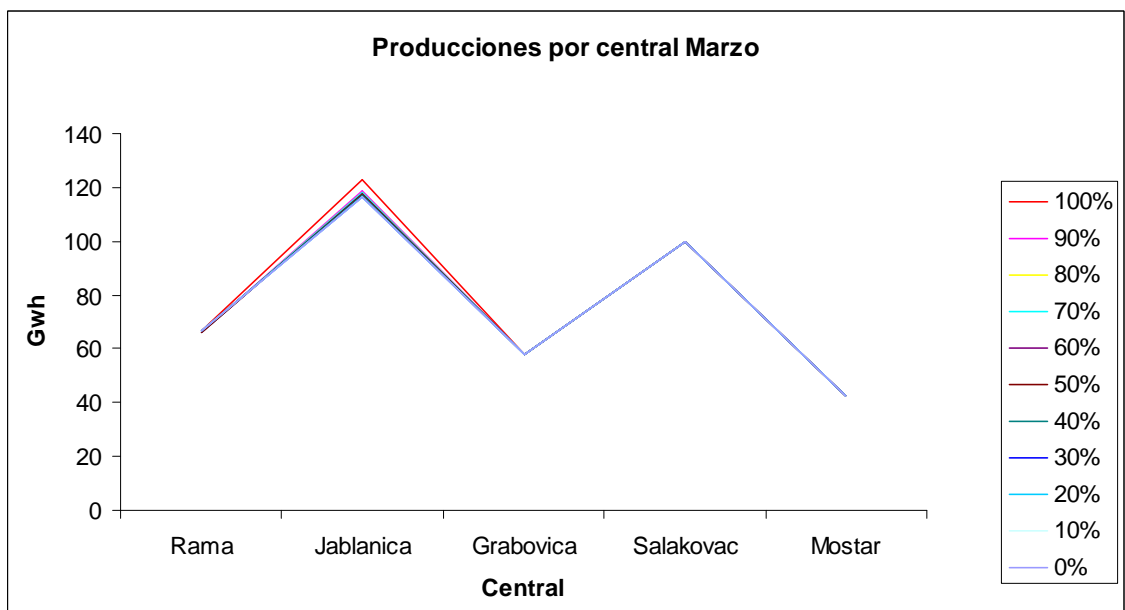


Figura 5.13: Producciones energéticas por central durante el mes de Marzo para cada caudal objetivo de turbinado en Jablanica.

Puede apreciarse como el único embalse del sistema en el que se aprecian diferencias entre hipótesis es el embalse de Jablanica, en el que sin embargo estas diferencias son muy pequeñas. En el resto de embalses apenas hay diferencias entre hipótesis. Ello se debe a que es en Jablanica donde se fuerzan las diferencias, al definir allí la regla de gestión. Las diferencias, en resumen, son mínimas, no apreciándose en el resto de embalses.

En el mes de Abril las producciones por central se representan a continuación.

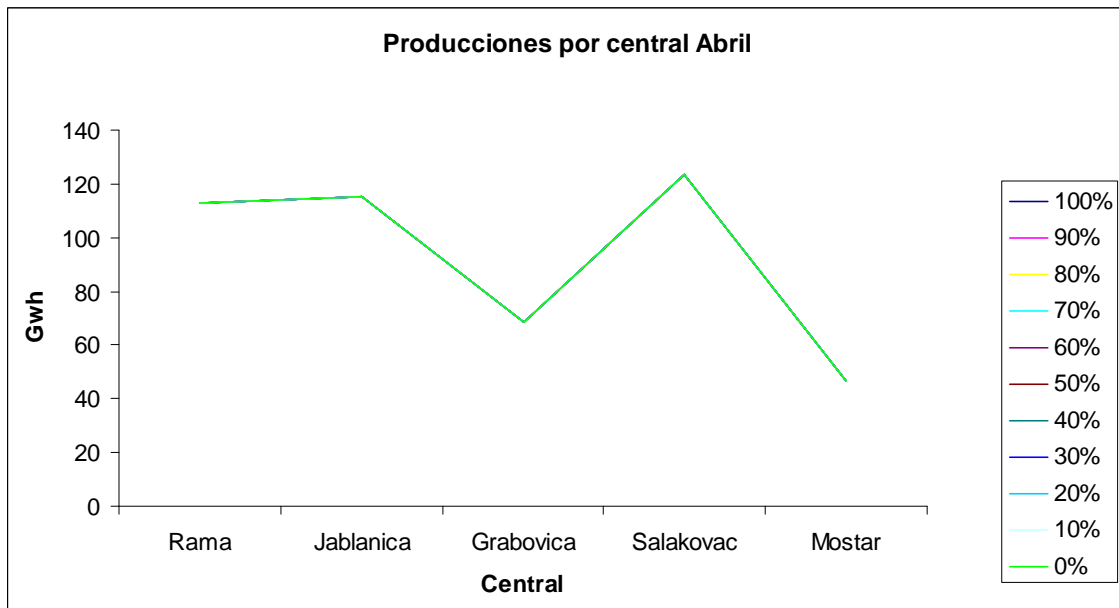


Figura 5.14: Producciones energéticas por central durante el mes de Abril para cada caudal objetivo de turbinado en Jablanica.

No se aprecia diferencia alguna entre hipótesis. Ello es debido a que en Abril el sistema ya ha agotado su capacidad de regulación, no existiendo diferencia alguna entre hipótesis. Anteriormente se había observado como a partir de más o menos el día 20 de Marzo Jablanica debe turbinar al 100% debido a que las aportaciones que recibe son ya demasiado grandes y el embalse se encuentra lleno. Por lo tanto, si a partir de este momento Jablanica debe turbinar ya al 100% forzosamente en Abril no hay ninguna diferencia entre hipótesis, ya que Jablanica debe turbinar el máximo independientemente del caudal objetivo que se establecía el 1 de Marzo.

Sumando ambas gráficas se aprecia lo siguiente.

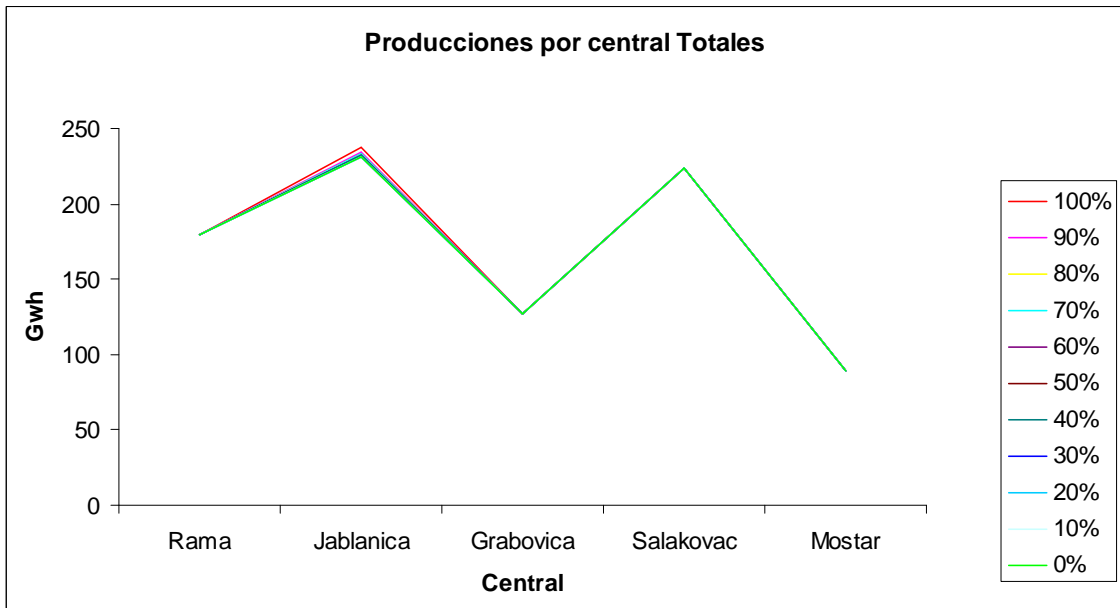


Figura 5.15: Producciones energéticas por central para cada caudal objetivo de turbinado en Jablanica.

Se aprecia como la gráfica es semejante a la del mes de Marzo. Las diferencias tan solo se aprecian en Jablanica y son mínimas, debido a que el sistema agota su capacidad de regulación antes de la mitad del periodo simulado.

Sumando las producciones de todas las centrales se aprecia el siguiente comportamiento.

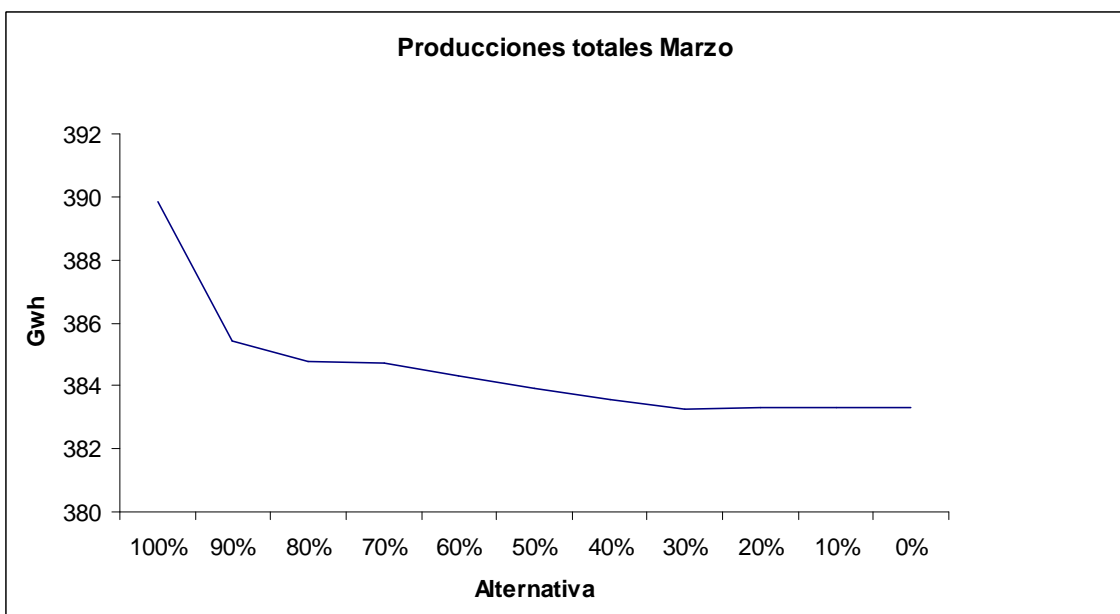


Figura 5.16: Producción energética total en Marzo para cada caudal objetivo de turbinado

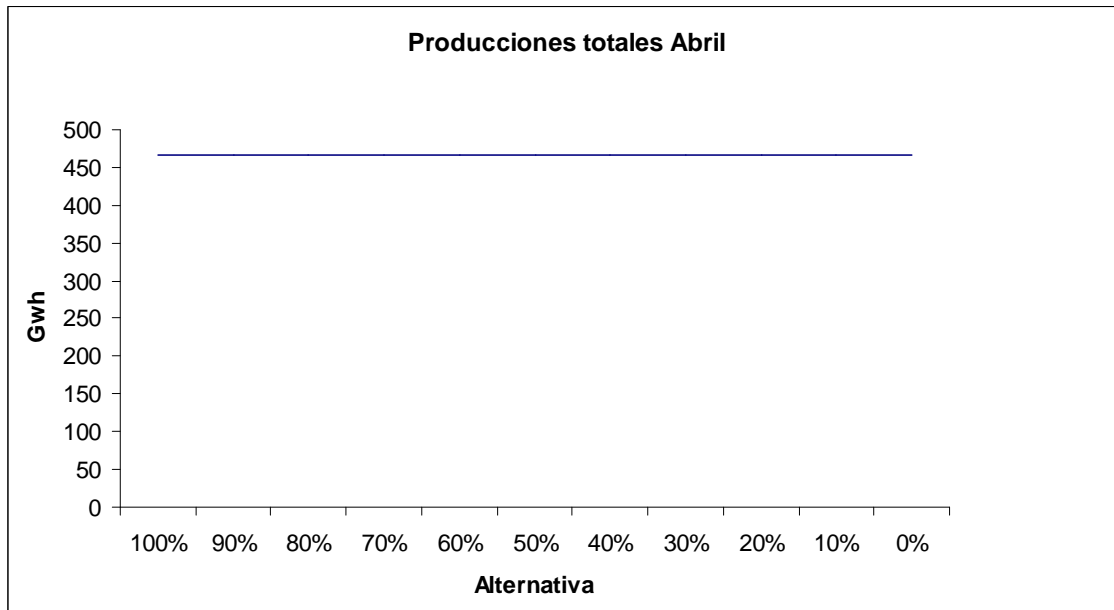


Figura 5.17: Producción energética total en Abril para cada caudal objetivo de turbinado

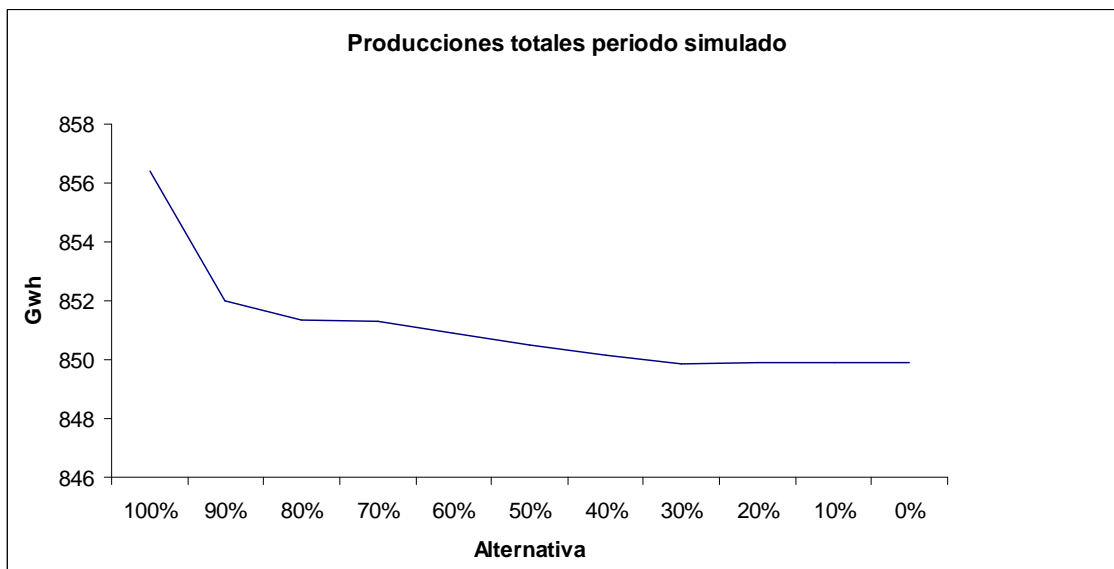


Figura 5.18: Producción energética total para cada caudal objetivo de turbinado.

En estas tres gráficas se representa la producción total para cada alternativa. Aquí se permiten apreciar mejor las diferencias entre alternativas, que sin embargo siguen siendo mínimas, no difiriendo en más de 10 Gwh la producción entre turbinar siempre al 100% o no turbinar más que cuando sea necesario.

Tal y como ocurría en las gráficas anteriores no se aprecia diferencia alguna en Abril, debido a que en este mes el sistema ya se encuentra forzado por las aportaciones. En las gráficas de Marzo y del total de ambos meses se aprecia el mismo patrón. En estas dos la mayor producción de energía se alcanza en la hipótesis en la que el caudal objetivo de turbinado en Jablanica es igual al 100% de su capacidad. También se aprecia que a partir de la hipótesis de turbinar al 70% ya apenas existen diferencias.

La siguiente tabla presenta los valores de caudal turbinado en Jablanica por mes y total, y producción de energía en el sistema por mes y total.

Alternativa	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	0%
Turbinado Jabla Marzo (hm3)	521,7	504,4	501,4	501,1	499,5	497,8	496,1	494,9	494,9	494,9	494,9
Turbinado Jabla Abril (hm3)	488,0	488,0	488,0	488,0	488,0	488,0	488,0	488,0	488,0	488,0	488,0
Turbinado Jabla total (hm3)	1009,	992,5	989,4	989,2	987,5	985,9	984,2	983,0	983,0	983,0	983,0
Producción Marzo (Gwh)	389,8	385,4	384,7	384,7	384,3	383,9	383,5	383,2	383,3	383,3	383,3
Producción Abril (Gwh)	466,5	466,5	466,5	466,5	466,5	466,5	466,5	466,5	466,5	466,5	466,5
Producción total (Gwh)	856,4	852,0	851,3	851,2	850,9	850,5	850,1	849,8	849,8	849,8	849,8

Tabla 5.3: Tabla de valores de turbinado en Jablanica y producción total para cada caudal objetivo de turbinado.

En la tabla puede apreciarse lo anteriormente comentado. La hipótesis con mayor producción es aquella en la que se turбина siempre al 100% pero las diferencias son muy pequeñas entre hipótesis.

➤ **Conclusiones del análisis**

Se ha simulado la gestión del sistema en un periodo invernal de 2 meses consecutivos durante los cuales se dan dos episodios de avenida con riesgo de inundaciones en Mostar. La primera avenida se presenta unos 20 días después del inicio de la simulación, y es durante estos primeros 20 días en que se obtiene resultados diferentes entre alternativas.

Se ha simulado diferentes alternativas de caudal de sueltas impuesto en Jablanica, desde 0 al 100% de su capacidad de turbinado.

A la vista de los resultados obtenidos en el análisis realizado se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- Se comprueba que los mayores caudales turbinados y mayores producciones se obtienen turbinando el máximo posible en Jablanica.
- Las diferencias entre hipótesis se dan solo en los días previos a la avenida. Ello es debido a que las aportaciones superan con creces la capacidad de turbinado de las centrales. El sistema se encuentra tras cierto tiempo dominado por las aportaciones y la regla de gestión elegida se hace insuficiente para laminar las avenidas y reducir los caudales máximos de vertido.
- Establecer un caudal objetivo de turbinado no es suficiente para prevenir el riesgo de inundación, ya que como se aprecia en las gráficas ninguna de las hipótesis cumple el caudal máximo circulante por Mostar. Por lo tanto se hace necesario el empleo de otras reglas de gestión para lograr cumplir dicho caudal mínimo.

Cálculos forzando sueltas adicionales a la producción hidroeléctrica.

➤ Objetivos del análisis

En el apartado anterior se había llegado a la conclusión de que actuar tan solo sobre el caudal turbinado no bastaba para lograr la protección contra avenidas en el sistema. Por lo tanto es necesario establecer una regla de gestión diferente para poder asegurar esta protección.

En este análisis la regla determinada para asegurar la protección contra avenidas va a consistir en establecer un caudal de sueltas forzado en Mostar. Dicho caudal de sueltas provocará un desembalse en Jablanica previo a la llegada de la avenida, por lo que se dispondrá de un mayor resguardo para laminar avenidas. El caudal de sueltas empezará a aplicarse cuando la aportación diaria intermedia en el embalse de Jablanica supere los $20 \text{ hm}^3/\text{día}$.

➤ Planteamiento del problema

En este problema existen tres variables básicas:

- Condición de embalse inicial: Va a analizarse como afecta el volumen inicial que tenga el embalse al caudal mínimo a desembalsar para garantizar la seguridad ante avenidas.
- Caudal forzado en Mostar: Van a establecerse diferentes caudales forzados en Mostar para determinar su efecto sobre los caudales máximos en este punto.
- Avenida de cálculo: En este caso van a ensayarse dos avenidas de cálculo distintas. Dichas avenidas son las correspondientes a los dos periodos de mayores aportaciones del apartado anterior La primera avenida de cálculo en Jablanica es la representada en la siguiente gráfica.

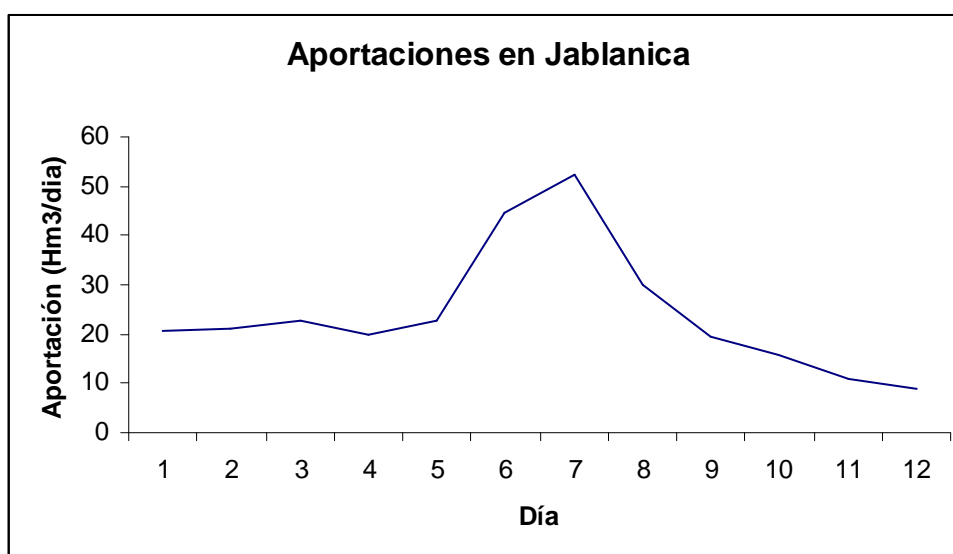


Figura 5.19: Aportaciones diarias durante la primera avenida de cálculo en Jablanica

La segunda, por su parte, presenta la siguiente gráfica.

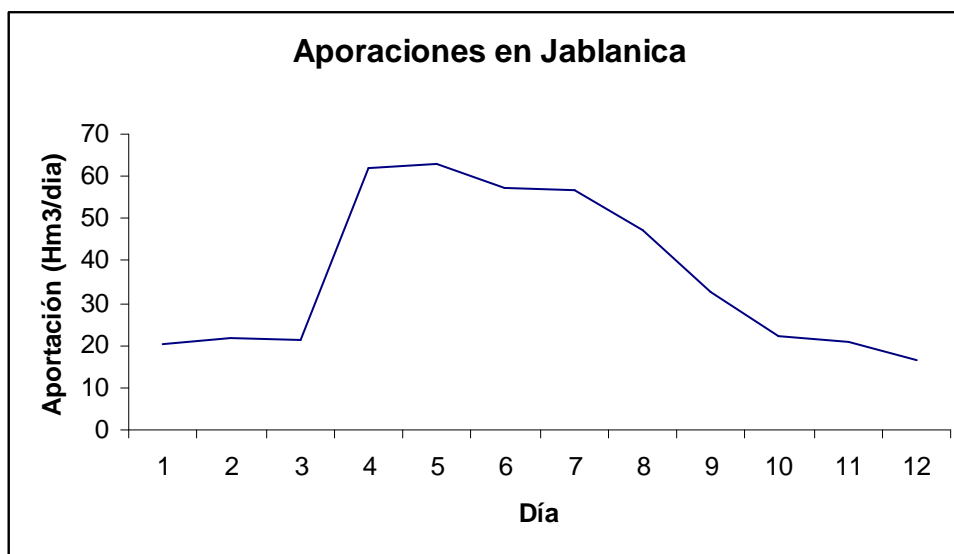


Figura 5.20: Aportaciones diarias durante la segunda avenida de cálculo en Jablanica

➤ Simulaciones y resultados

Las simulaciones de todos estos casos van a realizarse de la siguiente forma: Para cada una de las dos avenidas de cálculo se va a definir un volumen inicial de embalse, y para ese volumen de embalse se van a definir diferentes caudales forzados en Mostar.

Los caudales forzados aguas abajo de Mostar elegidos para ser simulados son los correspondientes a: 0, 20, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75 y 80 $\text{hm}^3/\text{día}$. En todos los casos de picos y volúmenes iniciales simulados se ha dejado de simular cuando el caudal forzado en Mostar ha logrado laminar completamente la avenida.

Los volúmenes iniciales de embalse de Jablanica se han establecido con variaciones entre ellos de 40 hm^3 . Así pues se han elegido los volúmenes iniciales de 318, 280, 240, 200, 160, 120, 80 y 30 hm^3 . Además se ha añadido el valor de 290 hm^3 iniciales, ya que este valor se corresponde con el volumen objetivo de Jablanica.

Para cada caso simulado se han obtenido los siguientes resultados: el caudal pico de la avenida aguas abajo de Mostar para cada caudal forzado y la producción hidroeléctrica de todo el sistema para cada caudal forzado.

Por último indicar que el inicio de los picos se ha establecido cuando la aportación en el embalse de Jablanica es igual o superior a 20 $\text{hm}^3/\text{día}$. Por lo tanto el caudal forzado a establecer en Mostar empezará a aplicarse cuando la aportación en un día en el embalse de Jablanica supere los 20 hm^3 .

Los resultados de las simulaciones con las aportaciones correspondientes al primer pico para cada volumen inicial y para cada caudal forzado aguas abajo de Mostar se presenta en la gráfica siguiente.

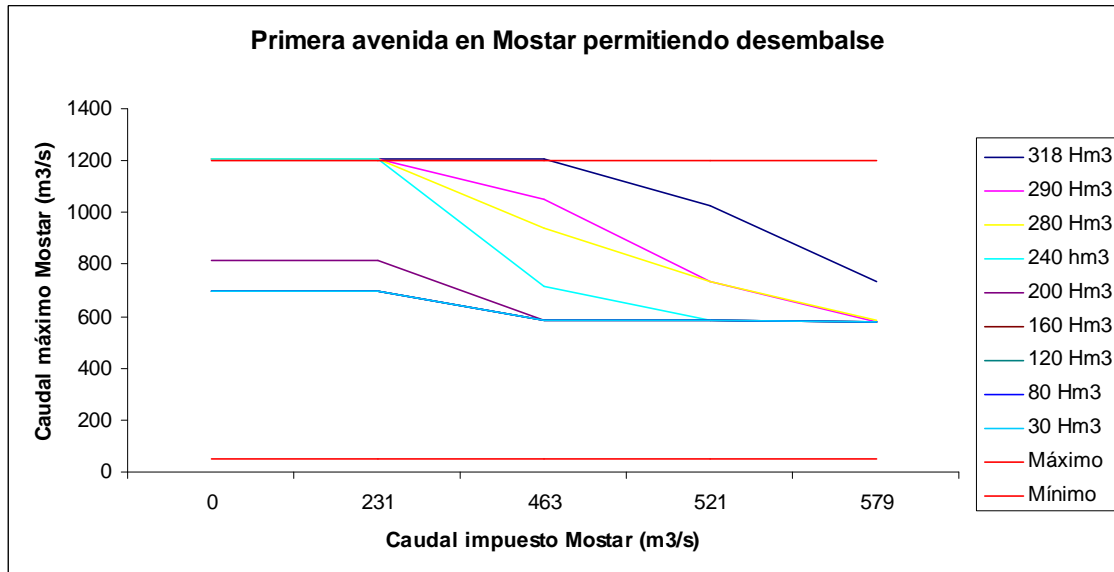


Figura 5.21: Caudales máximos aguas abajo de Mostar para la primera avenida simulada en función del caudal forzado establecido en Mostar.

En la gráfica de los caudales pico se observa como el valor máximo de 1200 m³/s se sobrepasa ligeramente. Se aprecia como para un volumen inicial de embalse igual o inferior a 200 hm³ el caudal pico está por debajo del máximo permitido independientemente del caudal forzado elegido.

En cambio, para volúmenes de embalse iniciales entre los 240 hm³ y los 290 hm³ las soluciones son parecidas. Con caudales impuestos inferiores a 231 m³/s se sobrepasa el caudal máximo permitido aguas abajo de Mostar. Si los caudales forzados son superiores a los 300 m³/s se puede comprobar como no se sobrepasa el caudal máximo.

A su vez, para un volumen inicial de 318 hm³, el correspondiente a la situación de embalse lleno, se observa como el caudal de 300 m³/s no consigue reducir el caudal máximo por debajo del objetivo. Dicho caudal máximo se consigue estableciendo un caudal forzado aguas abajo de Mostar igual o superior a 500 m³/s.

Resumiendo, con un volumen inicial inferior a 200 hm³ no es necesario establecer un caudal forzado. Con un volumen inicial superior a 200 hm³ e inferior a 290 hm³ el máximo se lamina estableciendo un caudal forzado superior a 300 m³/s. Con un volumen inicial igual al máximo se consigue garantizar la seguridad del sistema con un caudal forzado superior a los 500 m³/s.

Por lo que respecta a la producción de energía, esta se representa en la siguiente gráfica.

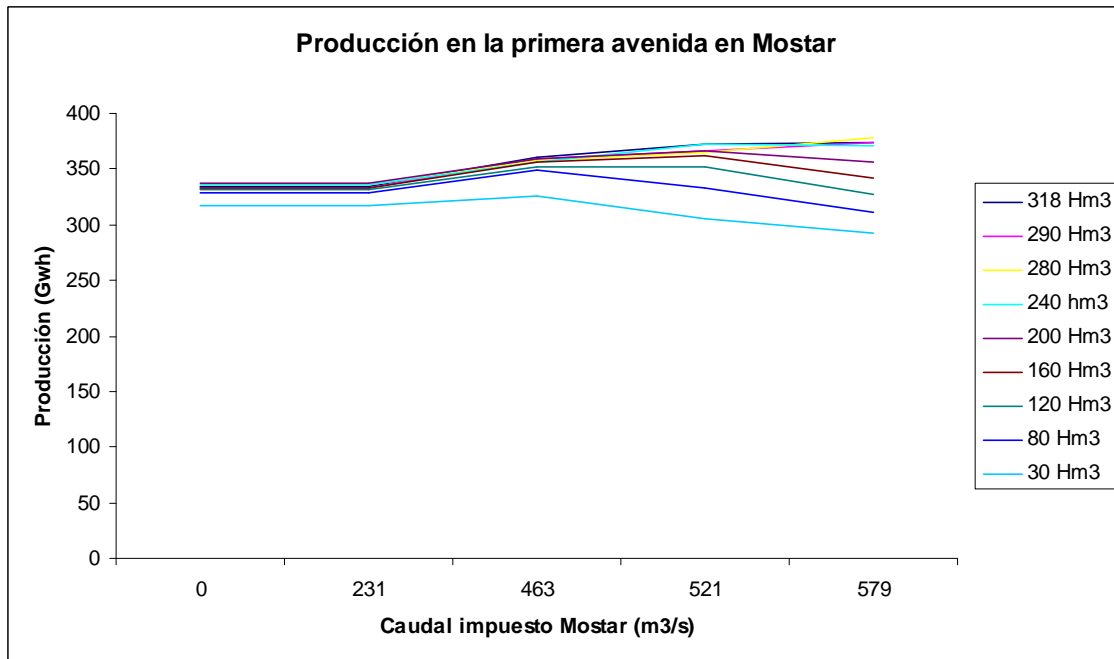


Figura 5.22: Producción energética en el sistema durante los 24 días siguientes al inicio de la avenida.

Se aprecia como la producción energética presenta un valor máximo alrededor de los 500 m³/s si los volúmenes iniciales de embalse son inferiores a los 200 hm³. En cambio si los volúmenes iniciales de embalse son superiores a los 200 hm³ la gráfica de producción de energía hidroeléctrica es creciente con el caudal impuesto. Además cabe reseñar que entre 0 y 200 m³/s y entre 450 y 600 m³/s la variación de la producción energética es muy pequeña.

En resumen se puede concluir que se maximiza la producción para caudales superiores a 450 m³/s. Esto se explica porque la capacidad de la central de Salakovac es 540 m³/s, lo que le permite aprovechar mejor las sueltas.

Los resultados de las simulaciones realizadas con las aportaciones correspondientes al segundo pico se exponen en la siguiente gráfica.

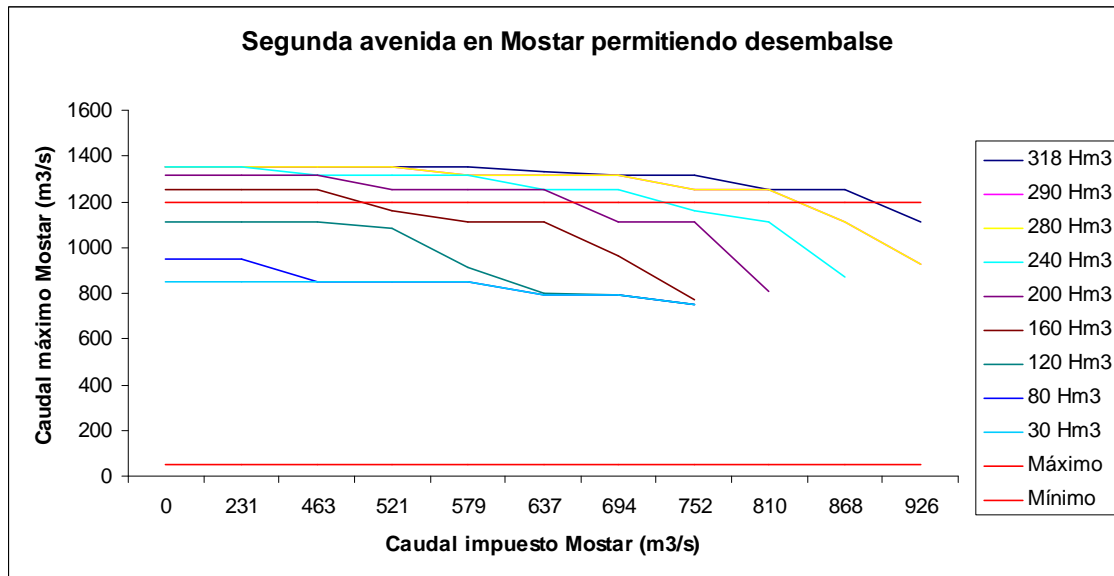


Figura 5.23: Caudales máximos aguas abajo de Mostar para la segunda avenida simulada en función del caudal forzado establecido en Mostar.

En esta gráfica se observa como la diferencia entre los casos es mucho más apreciable que en el pico anteriormente simulado. Además se puede observar como los caudales máximos aguas abajo de Mostar son más elevados que en el caso anterior. Estas diferencias entre el primer pico y el segundo se deben a las diferencias entre ambos. En las aportaciones del segundo pico se observa, tal y como aparece en la gráfica anterior, que la máxima aportación diaria se alcanza en el tercer día de simulación. Esto significa que tan solo se dispone de dos días para laminar la avenida.

Se puede apreciar como para un volumen inicial igual o inferior a los 120 hm³ se consigue reducir el caudal máximo por debajo de los 1200 m³/s independientemente del caudal forzado, por lo que si el embalse inicial es igual o inferior a los 120 hm³ no es necesario establecer un caudal forzado en Mostar, ya que la reserva del embalse permite laminar la avenida.

Para un volumen inicial de embalse alrededor de los 160 hm³ se consigue reducir la avenida imponiendo un caudal forzado aguas abajo de Mostar alrededor de los 550 m³/s. Si el volumen inicial de embalse se sitúa alrededor de los 200 hm³ se consigue reducir el caudal máximo por debajo de los 1200 m³/s imponiendo un caudal forzado aguas abajo de Mostar de 700 m³/s. Para un volumen inicial de embalse de 240 hm³ se consigue reducir la avenida por debajo del máximo imponiendo un caudal forzado aguas abajo de Mostar de 750 m³/s. Si el volumen inicial de embalse está situado alrededor de los 290 hm³ (el volumen objetivo) la seguridad contra avenidas se consigue imponiendo un caudal forzado en Mostar igual a 900 hm³. Por último, si el embalse se encuentra lleno al principio de la avenida, se consigue laminar la avenida estableciendo un caudal forzado aguas abajo de Mostar de 950 m³/s.

Resumiendo, si el embalse cuenta inicialmente con una reserva igual o superior a los 280 hm³ el caudal forzado en Mostar que permite asegurar la protección frente a avenidas es de 950 m³/s. Si el embalse inicial se encuentra entre los 200 hm³ y los 240 hm³ la avenida queda laminada por debajo del máximo permitido estableciendo un caudal forzado de 750 m³/s. Si el volumen inicial embalsado es igual o inferior a los

160 hm³ se reduce el pico por debajo del máximo estableciendo un caudal forzado de 550 m³/s. Si el volumen inicial embalsado se sitúa por debajo de los 120 hm³ no es necesario establecer caudal forzado alguno. Tal y como se aprecia, en este caso el caudal a establecer en Mostar tiene una mayor dependencia del volumen inicial de embalse que en el caso anterior.

La producción hidroeléctrica en el segundo pico se representa a continuación.

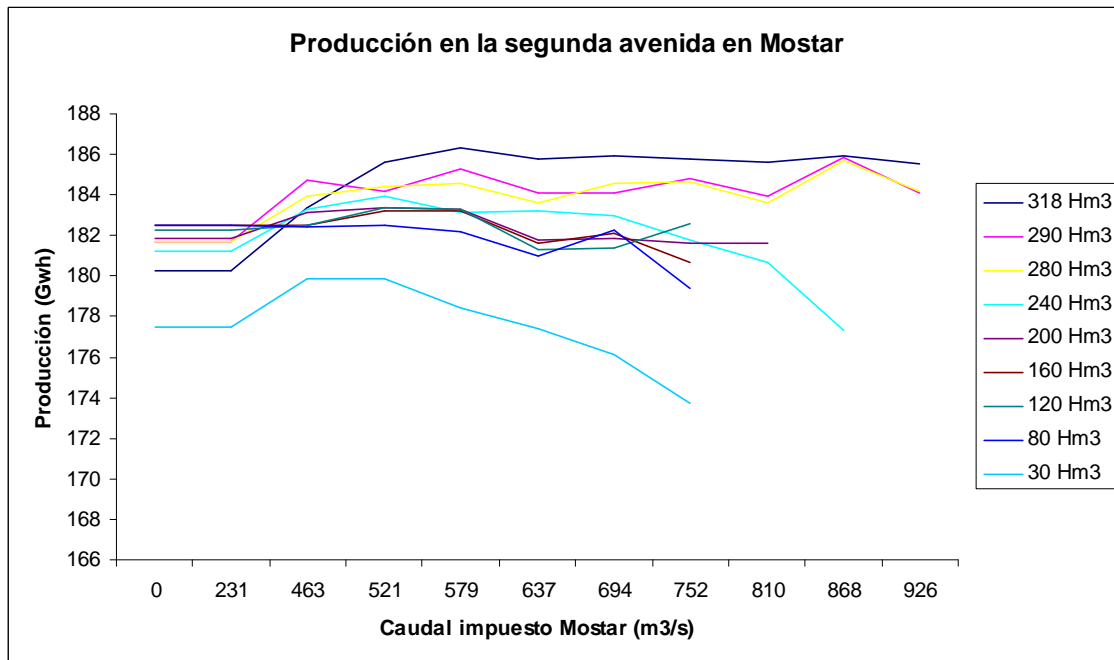


Figura 5.24: Producción energética en el sistema durante los doce días siguientes al inicio de la avenida.

En primer lugar aclarar que las diferencias entre los resultados de producción en ambas simulaciones (24 días para el primer pico y 12 días para el segundo) se deben a los días que tarda en alcanzarse el pico, que son los días de margen disponibles para laminar la avenida. Por lo tanto adquiere especial importancia el hecho de poder prever con antelación la avenida. Tal y como se aprecia en las gráficas la diferencia entre los caudales forzados aguas abajo de Mostar entre el primer pico (cinco días previos) y el segundo (dos días previos) es importante.

En la gráfica puede apreciarse como para un caudal por debajo de 250 m³/s la producción energética no varía. Ello es debido a que las aportaciones que recibe el sistema provocan un caudal mínimo por encima de estos 250 m³/s, por lo que establecer un caudal mínimo inferior no supone al sistema restricción alguna.

Al igual que en la gráfica anterior, cuando para un valor de caudal forzado se consigue laminar completamente la avenida (se eliminan todos los picos de caudal en Mostar) se ha dejado de simular. No se simula con caudales mayores debido a que la avenida ya se ha laminado completamente y mantener un caudal superior tan solo provoca un descenso en la producción hidroeléctrica, lo que no sería conveniente.

Por encima de estos 250 m³/s se observa como la producción de energía eléctrica se mantiene constante independientemente del volumen inicial del sistema (aunque para

volúmenes bajos esta afirmación es menos válida). Hay pequeñas variaciones de producción energética entre algunos valores de los caudales, pero son variaciones mínimas que pueden ser interpretadas como errores de redondeo efectuados al sumar las energías de cada central. Por lo tanto se puede afirmar que la producción hidroeléctrica es independiente del caudal forzado aguas abajo de Mostar.

Se observa también en las curvas de producción hidroeléctrica como para 240 hm³ de volumen embalsado la curva es decreciente para valores de caudal muy elevados. Ello es debido a que los caudales más altos provocan un desembalse excesivo que no permite mantener la producción energética los últimos días simulados. Este comportamiento no se aprecia en los volúmenes inferiores porque en dichos casos ya no es necesario alcanzar valores de caudal impuesto tan altos, ya que la avenida se encuentra completamente laminada. Este descenso de producción se alcanza, sin embargo, para caudales en los que ya se ha conseguido laminar el pico de caudal aguas abajo de Mostar, por lo que no es necesario imponer caudales tan elevados y que provocan un descenso de producción.

Comparando las curvas para cada nivel inicial de embalse se aprecia como la mayor producción se alcanza cuando el embalse se encuentra lleno. Sin embargo se aprecia como las diferencias entre mantener el embalse lleno o mantenerlo hasta los 240 hm³ de reserva de agua son pequeñas, no llegando a los 4 Gwh. Para valores comprendidos entre los 200 y los 80 hm³ las diferencias entre ellos son inapreciables, aunque son un poco inferiores a los valores obtenidos para una reserva de 280 hm³. Para un valor de embalse de 30 hm³ (nivel mínimo) la producción es muy inferior.

➤ **Conclusiones del análisis**

Se ha simulado por separado la gestión del sistema para dos episodios de avenida evaluando las consecuencias de distintas decisiones sobre el caudal mínimo de sueltas impuesto en Mostar y dependiendo también del valor inicial de las reservas en Jablanica.

Estas simulaciones van encaminadas a encontrar una regla de gestión consistente en dar un caudal forzado en Mostar que permita laminar la avenida. Este caudal forzado se calcula como el caudal mínimo necesario en función de las reservas en Jablanica. Y deducido de los resultados de las simulaciones anteriores quedaría como se refleja en las siguientes figuras.

Volumen inicial (Hm3)	Caudal forzado (m3/s)	Volumen mínimo (Hm3)
318	926	215
290	868	202
280	868	192
240	752	182
200	694	157
160	521	162

Tabla 5.4: Caudal laminador necesario y volumen mínimo alcanzado para diferentes volúmenes iniciales en el embalse de Jablanica

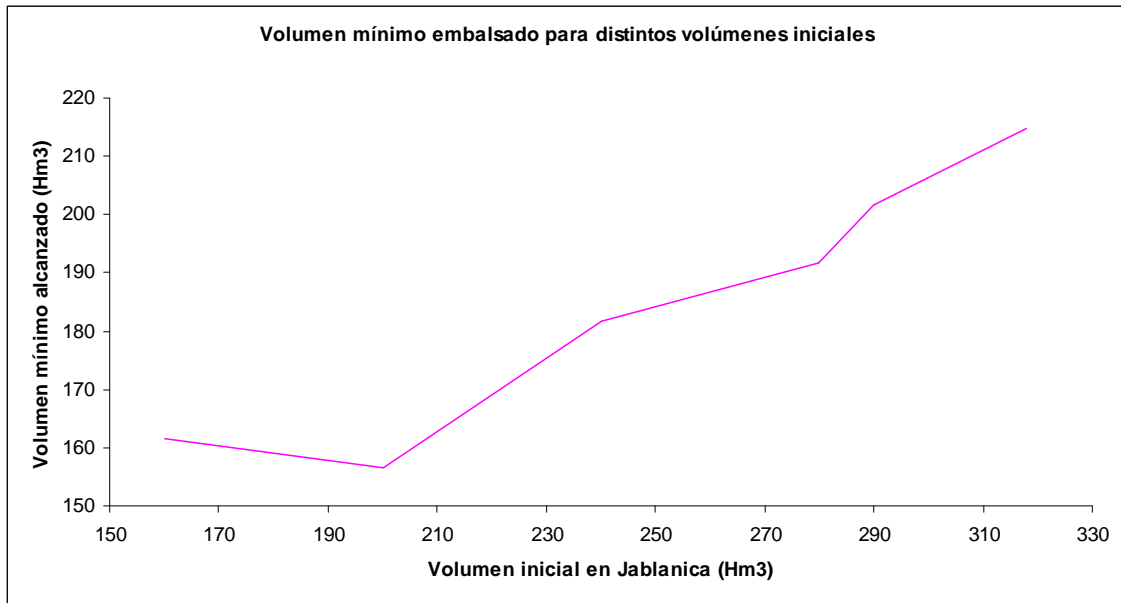


Figura 5.25: Volumen mínimo embalsado durante la avenida en Jablanica

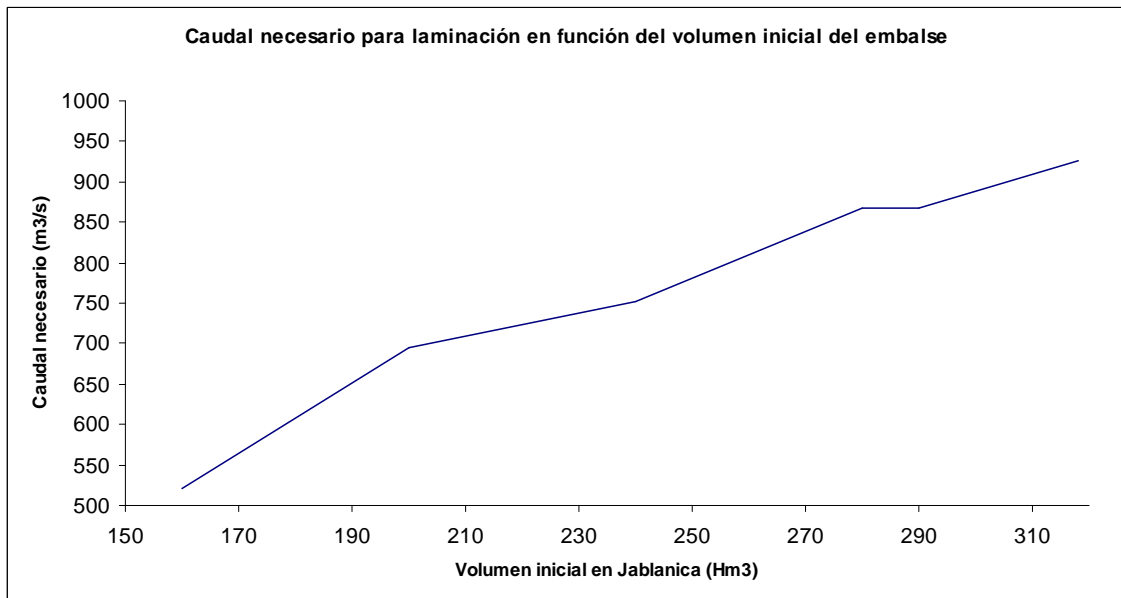


Figura 5.26: Caudal necesario para laminar la avenida en función del volumen inicial embalsado en Jablanica

En ellas se aprecia como el caudal necesario para laminar la avenida sigue aproximadamente una relación lineal con el volumen embalsado al inicio de la avenida. También se observa como el volumen mínimo embalsado durante el episodio guarda también relación con el volumen inicial, alcanzando un volumen mínimo cercano a los 160 hm³ y un volumen máximo en torno a los 220 hm³, que se alcanza para un volumen inicial de 318 hm³.

Se ha comprobado a la vista de las diferencias en los resultados obtenidos para ambas avenidas que la elección del día para el inicio de la simulación es muy importante, ya que este da el margen de anticipación de que se dispone para laminar la avenida. En los casos analizados se ha seleccionado arbitrariamente el día en que el caudal de entrada a Jablanica supera los 20 hm³/día, con lo que se dispone de 5 y 3 días

en cada caso para anticiparse al máximo de la avenida. Por tanto pueden establecerse la siguiente conclusión principal:

- Es fundamental para una adecuada anticipación en la laminación de avenidas el disponer de algún mecanismo de predicción de avenidas de entrada que permita anticiparse al máximo sobre la llegada de una avenida.

También se pueden realizar las siguientes conclusiones:

- Tampoco está justificado realizar un desembalse masivo en caso de conocer con mucha antelación la existencia de la avenida, ya que si esta no apareciera se está perdiendo un agua excesiva que puede poner en peligro la producción hidroeléctrica de la cuenca. Por lo tanto, a la vista de la producción hidroeléctrica del sistema para ambos casos, se puede afirmar que no es aconsejable forzar el desembalse en Jablanica por debajo de los 240 hm³. Un menor volumen compromete la demanda hidroeléctrica del sistema.
- Se observa que los resultados obtenidos para el segundo pico son más desfavorables de los obtenidos en el caso del primer pico de la avenida, por lo que estos resultados van a ser los que justifiquen la regla de gestión expuesta a continuación.
- De acuerdo con los resultados obtenidos, para garantizar la seguridad del sistema frente a un episodio de avenidas los caudales a desembalsar son los siguientes.
 - Si se detecta un riesgo de avenida para los próximos días, encontrándose el embalse al nivel del volumen objetivo definido en el estudio mensual (290 hm³) será necesario forzar las sueltas de Jablanica o Rama hasta alcanzar un caudal del orden de 850 m³/s en Mostar. Esto en la simulación supone bajar Jablanica hasta los 200 hm³ de almacenamiento.
 - Si al inicio de la avenida el embalse de Jablanica se encuentra con una reserva de 240 hm³ será necesario desembalsar un caudal de 750 m³/s para mantener el caudal aguas abajo de Mostar dentro de los límites. Esto en la simulación supone bajar Jablanica hasta los 180 hm³ de almacenamiento.
 - Este desembalse deberá iniciarse cuando la aportación intermedia en el embalse de Jablanica supere los 20 hm³ en un día.

Esta regla de gestión hace que se alcance antes de la avenida un volumen en Jablanica más bajo que el inicial. Esto puede resultar arriesgado, ya que a pesar de que los resultados de producción hidroeléctrica son mejores, esto es debido a que se está aprovechando un volumen de agua mayor gracias a que se produce la avenida. En el caso de que esta avenida no se diera no se conseguiría este aumento de la producción. En conclusión se puede decir que si hay una confianza elevada en que esta avenida se producirá esta regla de gestión es interesante desde el punto de vista energético.

Dado que esta regla de gestión es arriesgada, se va a estudiar a continuación otro tipo de regla.

Cálculo del volumen límite máximo sin desembalse forzado

➤ **Objetivos del análisis**

Los resultados obtenidos en el apartado anterior presentaban el problema de que el volumen mínimo alcanzado en el embalse de Jablanica era excesivamente bajo, lo que podría poner en peligro la producción de energía eléctrica del sistema. Para evitarlo se debe definir una nueva regla de gestión.

Por ello, en lugar de ensayar la situación para varios caudales forzados y volúmenes iniciales, va a definirse un único caudal de sueltas, y para ese caudal de sueltas va a encontrarse el volumen de embalse más alto posible que garantice la seguridad frente a las avenidas. Por encima de ese volumen se establecerá el caudal de sueltas definido previamente a las simulaciones, mientras que por debajo de ese volumen límite no se tomará medida alguna.

➤ **Simulaciones y resultados**

Para realizar las simulaciones es necesario establecer un caudal forzado en Mostar. Una vez establecido dicho caudal se van a realizar simulaciones con diferentes volúmenes límite del sistema con el objetivo de encontrar el volumen límite mayor posible.

Dicho volumen límite está definido de forma que, si el embalse de Jablanica se encuentra por encima de ese volumen, debe mantenerse el caudal forzado de sueltas elegido previamente para Mostar. Si el embalse de Jablanica se encuentra por debajo del volumen límite el sistema funciona con normalidad, no estableciéndose por tanto caudal impuesto alguno.

Por lo tanto la única decisión que se debe tomar antes de iniciar las simulaciones es definir el caudal forzado en Mostar. Dicho caudal debe ser inferior a los $1200 \text{ m}^3/\text{s}$, ya que este es el límite que garantiza la seguridad de la ciudad de Mostar. Ya que es preferible mantener el embalse de Jablanica al mayor nivel posible con el fin de no comprometer la producción energética el caudal a imponer debe ser el mayor posible, ya que un caudal demasiado bajo provocaría a su vez un volumen límite más bajo debido a que, como se ha comprobado en el apartado anterior, cuando menor es el caudal establecido menor es el volumen que lamina la avenida.

Teniendo en cuenta todas las razones expuestas anteriormente, se debe escoger un caudal lo más próximo posible al límite de $1200 \text{ m}^3/\text{s}$, pero dejando cierto margen de seguridad. En este caso se ha optado por un valor de caudal forzado de $1000 \text{ m}^3/\text{s}$.

Una vez definido el caudal a imponer en Mostar se ha simulado el sistema para diferentes volúmenes límite del embalse de Jablanica. Los resultados de estas simulaciones se presentan en la siguiente gráfica.

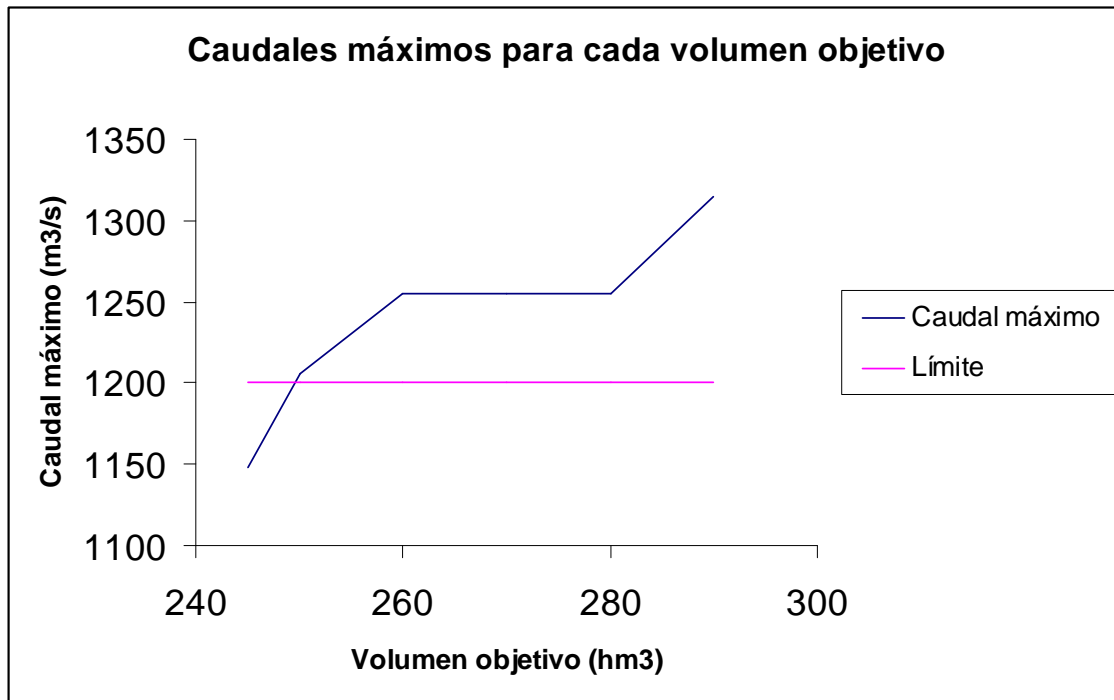


Figura 5.27: Caudales máximos en Mostar para cada volumen límite definido en Jablanica

Se observa por lo tanto que el máximo volumen para el que imponiendo un caudal de sueltas de $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ consigue laminarse la avenida es igual a 245 hm^3 .

Por lo tanto ante una avenida el sistema debe gestionarse de la siguiente forma:

- Si el volumen embalsado en Jablanica es igual o superior a los 245 hm^3 se debe imponer en Mostar un caudal de $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ para lograr laminar la avenida de forma segura.
- Si el volumen de Jablanica es inferior a los 245 hm^3 no es necesario efectuar desembalse adicional alguno.

➤ Conclusiones del análisis

Dado que la regla de gestión definida en el apartado anterior provocaba que el embalse de Jablanica alcanzara niveles que podían comprometer la demanda eléctrica del sistema se definió una nueva regla de gestión. La regla de gestión elegida en este caso consiste en fijar un volumen límite en el embalse de Jablanica y un caudal forzado en Mostar. Si el embalse de Jablanica se encuentra por debajo del volumen límite no se aplica el caudal forzado, pero si se encuentra por encima de dicho volumen debe establecerse el caudal forzado para laminar la avenida de forma segura.

El caudal de sueltas en Mostar decidido ha sido igual a $1000 \text{ m}^3/\text{s}$, ya que es preferible mantener un caudal alto para que el volumen límite sea lo mayor posible.

Una vez decidido el caudal de sueltas se ha simulado el sistema para diferentes volúmenes límite. Una vez realizadas las simulaciones pueden establecerse la siguiente conclusión:

- El volumen límite por encima del cual es necesario desembalsar un caudal de $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ es igual a 245 hm^3 . Este volumen es el máximo posible que garantiza la protección de la ciudad de Mostar frente a avenidas

Reformulación de la regla de gestión definida en escala mensual empleando la escala diaria

Objetivos del análisis

Mediante el modelo mensual se establecieron unas curvas de reserva para cada embalse que garantizaban una producción de energía hidroeléctrica óptima sin comprometer la protección frente a avenidas del sistema. Sin embargo esta última afirmación no pudo comprobarse a escala mensual, ya que esta escala no permite comprobar que el sistema está protegido frente a avenidas. La seguridad del sistema frente a avenidas se ha comprobado a escala diaria.

Una vez establecidos los criterios necesarios para garantizar la seguridad del sistema frente a avenidas va a reestudiarse el sistema desde el punto de vista de la producción hidroeléctrica, empleando para ello la escala diaria. El objetivo es redefinir la regla de gestión obtenida a escala mensual para hallar una regla de gestión del sistema satisfactoria desde los dos puntos de vista ensayados anteriormente: la producción hidroeléctrica y la seguridad frente a avenidas.

Por lo tanto van a realizarse las simulaciones necesarias a escala diaria para poder obtener un volumen objetivo en el embalse de Jablanica que garantice la satisfacción de la demanda de energía eléctrica garantizando además la protección del sistema frente a avenidas. Se va a analizar tan solo el embalse de Jablanica ya que es el embalse crítico de la cuenca. En el embalse de Rama las aportaciones son menores y en los tres embalses aguas abajo (Grabovica, Salakovac y Mostar) su tamaño no permite realizar una laminación adecuada.

Planteamiento del problema

Se dispone de los datos diarios del sistema desde el 1 de Enero de 2001 hasta el 31 de Diciembre de 2006.

Partiendo de los resultados del análisis mensual se van a realizar simulaciones para encontrar el volumen objetivo del embalse de Jablanica que optimice la generación de energía asegurando además la máxima protección frente a avenidas del sistema. En el análisis mensual se determinó como volumen objetivo para Jablanica en periodos invernales igual a 290 hm^3 , mientras que en periodos veraniegos la regla de gestión óptima aconsejaba mantener el embalse al máximo nivel posible. Dicha regla de gestión garantizaba la máxima producción hidroeléctrica en el sistema a escala mensual, así como cierto control en cuanto a los vertidos. Sin embargo no se pudo asegurar la protección del sistema frente a avenidas, ya que en un modelo mensual no se puede realizar semejante afirmación. Las actuaciones necesarias para garantizar la seguridad del sistema frente a avenidas se definieron a escala diaria en el estudio anterior.

En este análisis se va a simular el sistema durante diferentes periodos invernales. Para cada periodo invernal se simularán diferentes volúmenes objetivo en el embalse de Jablanica. Para cada volumen objetivo se obtendrá la energía producida en dicho embalse. Con los resultados de estas simulaciones se podrá comprobar la validez de la regla de operación definida en el modelo mensual y, en su caso, se definirá una nueva regla de operación para el embalse de Jablanica que garantice la optimización de la producción energética y la protección del sistema frente a avenidas.

Los datos de los que se dispone en escala diaria pueden desglosarse en 7 periodos invernales. En este caso se ha definido como periodo invernal el que va desde el día 1 de Octubre hasta el día 31 de Mayo del año siguiente. Por lo tanto cada periodo invernal consta de 8 meses de datos diarios. Los periodos veraniegos corresponden a los meses de Junio, Julio, Agosto y Septiembre, teniendo por tanto una duración de 4 meses. Sin embargo los datos solo permiten disponer de 5 periodos invernales de 8 meses, además de un periodo invernal de 3 meses (Octubre, Noviembre y Diciembre) y otro periodo invernal de 5 meses (Enero, Febrero, Marzo, Abril y Mayo).

Resumiendo, se dispone en primer lugar de un periodo invernal de 5 meses de duración, cinco periodos invernales con una duración de 8 meses y un último periodo invernal de 3 meses de duración.

En este análisis no se va a simular ningún periodo veraniego. En estos periodos no existe riesgo de avenida, por lo que no es necesario reformular la regla de operación obtenida a escala mensual para que garantice la protección frente a avenidas. Por lo tanto en los meses de Junio, Julio, Agosto y Septiembre la regla de operación del embalse de Jablanica será la definida a escala mensual, consistente en mantener el embalse al máximo (318 hm^3).

Respecto a los volúmenes objetivo en el periodo invernal se van a tomar incrementos de volumen de 10 hm^3 entre los 290 y los 100 hm^3 . El volumen máximo de 290 hm^3 se ha tomado por ser el volumen objetivo definido en el análisis a escala mensual. El volumen mínimo de 100 hm^3 se ha tomado por considerarse un volumen lo suficientemente bajo. Se van a realizar por lo tanto 20 simulaciones por periodo invernal.

Por lo tanto teniendo 7 periodos invernales y realizando 20 simulaciones por periodo el total de simulaciones a realizar va a ser de 140.

Simulaciones y resultados

Se han realizado en total 140 simulaciones. Para cada periodo invernal se han simulado volúmenes objetivo entre los 290 y los 100 hm^3 con un incremento de 10 hm^3 . Para cada simulación se ha obtenido la producción hidroeléctrica diaria media en el embalse de Jablanica.

Los resultados de las simulaciones correspondientes al primer periodo invernal se presentan en la siguiente gráfica.

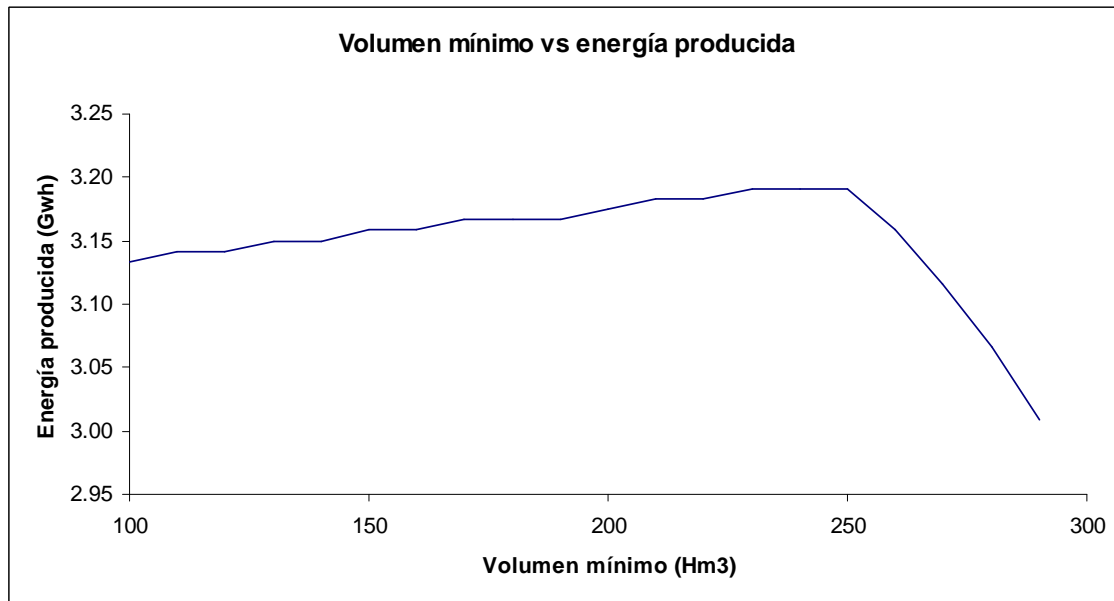


Figura 6.1: Producción energética media en Jablanica para cada volumen objetivo. Primer periodo invernal

Este periodo invernal comprende los meses de Enero, Febrero, Marzo, Abril y Mayo del año 2001. Es por lo tanto uno de los dos periodos invernales más cortos que la mayoría teniendo una duración de tan solo 5 meses.

En la gráfica se observa como la producción energética en el embalse de Jablanica varía muy poco entre los 100 y los 250 hm³, siendo este último valor el de mayor producción energética. La variación apenas llega a los 0,05 Gwh de diferencia entre los dos valores anteriores. Sin embargo, para valores de volumen objetivo superiores a los 250 hm³ se aprecia una mayor variación entre volúmenes objetivo. En concreto para 290 hm³ de volumen objetivo el valor medio de energía producida está cercano a los 3 Gwh, con una diferencia de 0,2 Gwh entre estos 290 y los 250 hm³. El valor máximo de producción se alcanza a los 250 hm³ de volumen objetivo, correspondiendo el mínimo a los 290 hm³ de volumen objetivo.

Las razones de que el máximo valor de energía se obtenga a los 250 hm³ en lugar de a los 290 hm³, el valor para el que la altura de turbinado es mayor, además del valor elegido en el análisis a escala mensual, son debidas al propio perfil cota-volumen del embalse de Jablanica, representado en la siguiente gráfica.

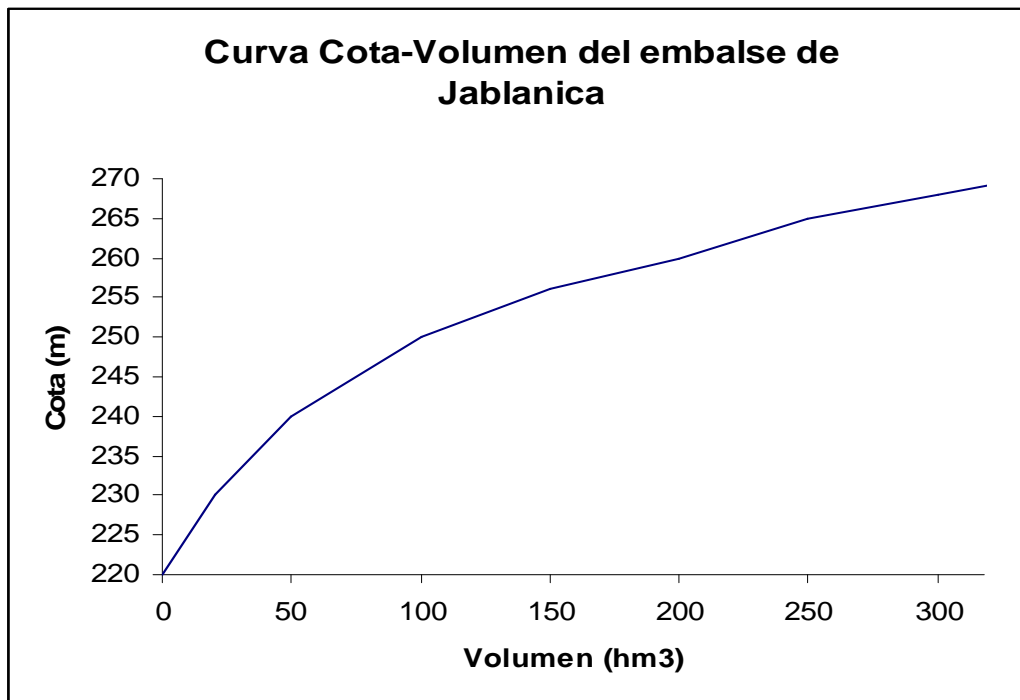


Figura 6.2: Curva Cota-Volumen del embalse de Jablanica

Se observa como para un volumen de 290 hm^3 la cota de turbinado del embalse es igual a 267,5 metros. Para un volumen de 250 hm^3 la cota de turbinado es igual a 265 metros. La diferencia entre cotas de turbinado es de 2,5 metros; pero en contrapartida se están turbinando 40 hm^3 más. Este volumen turbinado de más compensa el descenso de cota de turbinado, por lo que en este caso para un volumen de 250 hm^3 la energía producida es mayor que para un volumen de 290 hm^3 .

El hecho de que bajar la cota permita aumentar la energía producida depende de las aportaciones del sistema y su orden de magnitud respecto al volumen adicional turbinado. Para unas aportaciones pequeñas el volumen adicional turbinado adquiere mayor importancia, hecho que compensa el descenso de cota de turbinado provocando una mayor producción de energía. Sin embargo si las aportaciones son más grandes el volumen adicional turbinado deja de tener importancia, por lo que en este caso no compensa el hecho de turbinar un mayor volumen respecto a la reducción de cota de turbinado que ello conlleva, provocando por tanto que la energía producida sea menor.

Es por estas razones por las que este efecto no se apreció en la realización del análisis a escala mensual. A escala mensual las aportaciones son mucho mayores que a escala diaria pero la ganancia de volumen turbinado sigue siendo la misma. Por lo tanto a escala mensual dicho volumen adicional turbinado apenas influye en el total, mientras que la pérdida de cota de turbinado si tiene una influencia apreciable. Es por ello por lo que a escala mensual la producción de energía con un volumen objetivo de 290 hm^3 es mayor que la energía producida con un volumen objetivo de 250 hm^3 . A escala diaria, en la que las aportaciones son menores, el descenso de cota de turbinado para aumentar el volumen turbinado si provoca una mayor producción de energía eléctrica.

En cambio para volúmenes inferiores a los 250 hm^3 se aprecia como la curva cota-volumen se vuelve más pronunciada. En concreto la cota asociada a un volumen de 200 hm^3 la cota de embalse es de 260 metros. En un descenso de 50 hm^3 el descenso de

cota es de 5 metros, mientras que entre los 290 hm³ y los 250 hm³ el descenso de cota era de 2,5 metros. Este aumento de la pendiente provoca que por debajo de los 250 hm³ ya no aumente la energía producida al bajar de volumen, ya que el descenso de cota cobra más importancia que el aumento de volumen turbinado.

Además este periodo invernal simulado es más corto que los de los años siguientes (5 meses frente a 8) por lo que las diferencias son más pronunciadas entre los 250 hm³ y los 290 hm³ y menos pronunciadas entre los 250 hm³ y sus inferiores. En los siguientes periodos invernales, más largos, sería esperable una menor diferencia entre los 250 hm³ y los 290 hm³, siendo posible incluso que la producción de energía para los 290 hm³ supere a la alcanzada para los 250 hm³. También sería lógico que la diferencia entre la producción energética entre los 250 hm³ y valores inferiores sea mayor. Todo esto es debido a que, al ser periodos más largos, el volumen adicional turbinado tendrá menor peso respecto al total de lo que tenía en este periodo.

Los resultados obtenidos simulando el segundo periodo invernal se exponen en la gráfica presentada a continuación.

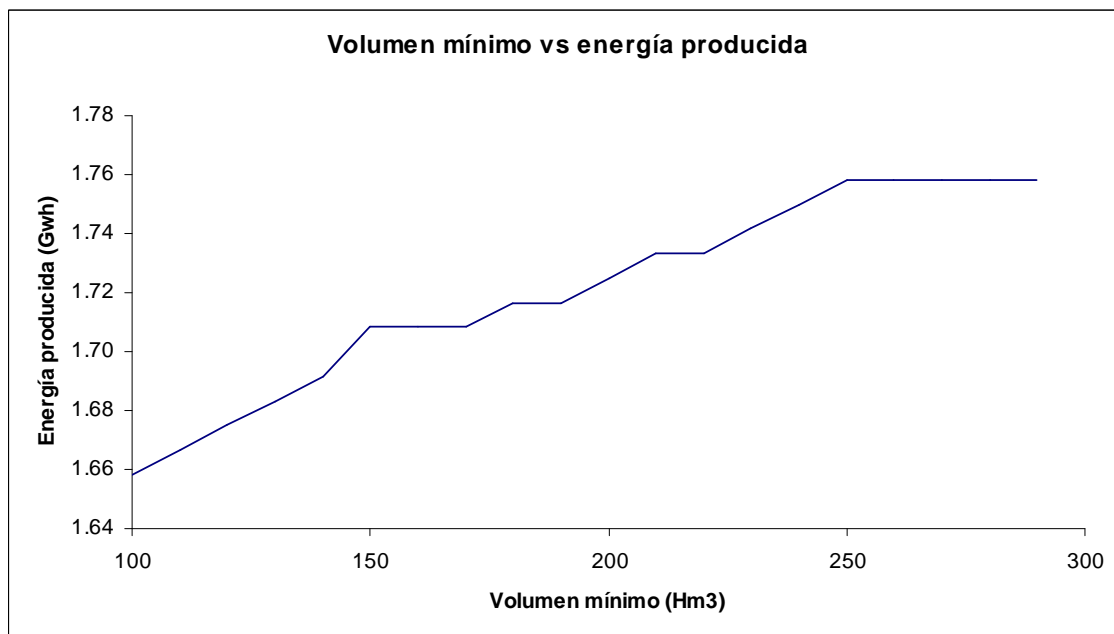


Figura 6.3: Producción energética media en Jablanica para cada volumen objetivo. Segundo periodo invernal

En este caso se observa como entre los 290 y los 250 hm³ de volumen objetivo la energía producida es idéntica. Ello se debe a debido a que los 40 hm³ que se turbinan de más bajando el volumen objetivo de 290 a 250 compensan exactamente el efecto de mantener la altura de turbinado más alta. Por ello en este caso la energía es la misma. Para volúmenes inferiores a los 250 hm³ la energía producida es menor debido al hecho de que por debajo de los 250 hm³ la curva cota-volumen se vuelve más pronunciada y por ello ya no compensa ganar volumen turbinado perdiendo altura de turbinado. La diferencia entre la mínima energía producida y la máxima llega hasta unos 0,1 Gwh de valor medio diario, lo que en 8 meses supone una pérdida de 24 Gwh.

Por lo tanto para este segundo periodo invernal el valor máximo de energía se da entre los 290 y los 250 hm³ de volumen objetivo. Sin embargo es preferible mantener el

embalse a 250 hm³, ya que con la misma producción hidroeléctrica la reserva que queda para laminación de avenidas es mayor.

Las producciones energéticas en función del volumen objetivo para el tercer periodo invernal se presentan a continuación.

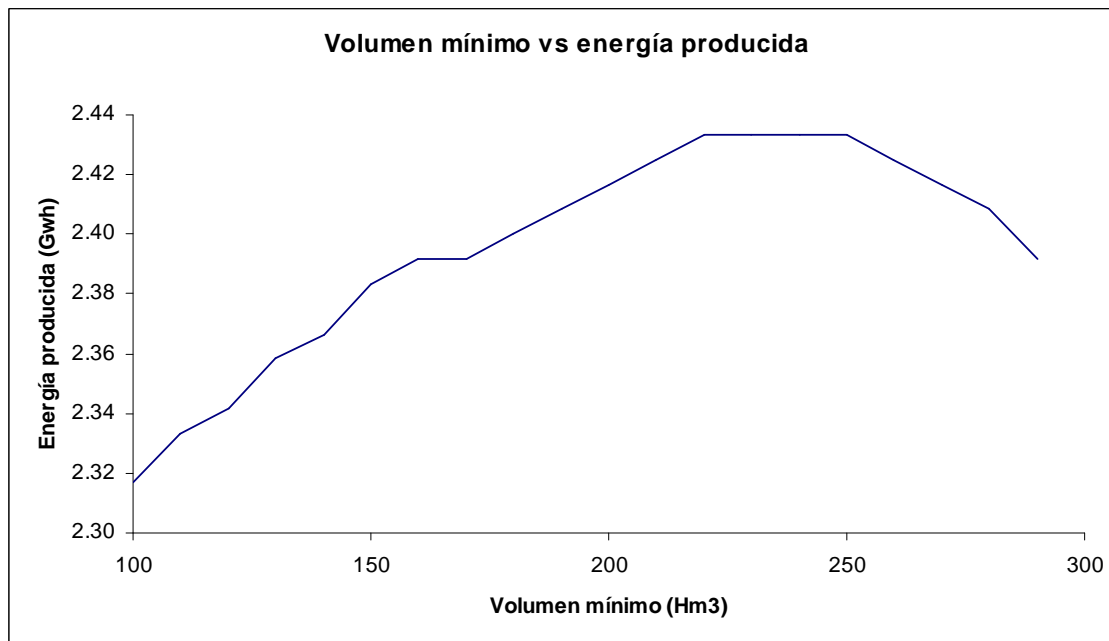


Figura 6.4: Producción energética media en Jablanica para cada volumen objetivo. Tercer periodo invernal

En este caso se observa como el valor máximo de producción energética se alcanza para un valor situado en los 250 hm³. Para valores superiores a estos 250 la mayor altura de turbinado no compensa la producción energética, teniendo más peso el volumen adicional que se turbinaría bajando la altura de turbinado. La diferencia entre 290 hm³ y 250 hm³ es sin embargo pequeña, alcanzando los 0,03 Gwh de media diaria, lo que en 8 meses significa un total de 7 Gwh menos producidos.

Para valores por debajo de los 250 hm³, tal y como sucedía con los periodos anteriores, la curva cota-volumen es más pronunciada, lo que se traduce en un mayor descenso de cota de turbinado, por lo que a partir de aquí no compensa turbinar un mayor volumen de agua bajando la altura de turbinado. En concreto la diferencia entre el máximo y el mínimo es igual a 0,11 Gwh de media, lo que se traduce en 8 meses en una pérdida de 27 Gwh.

Para el cuarto periodo invernal la producción energética en función del volumen objetivo viene dada por la siguiente gráfica.

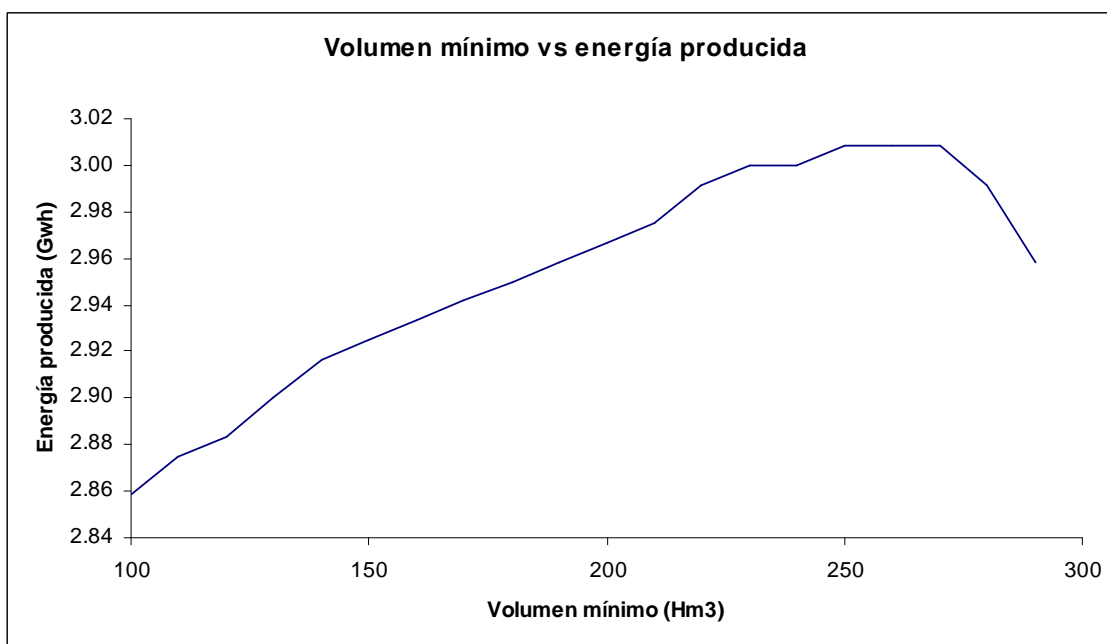


Figura 6.5: Producción energética media en Jablanica para cada volumen objetivo. Cuarto periodo invernal

Este caso es idéntico al anterior. La producción máxima se encuentra alrededor de los 250 hm³. Para valores superiores a estos 250 hm³ la energía producida es menor dado que se turbinan menor volumen y no compensa elevar la altura de turbinado. Para valores inferiores a los 250 hm³ adquiere mayor importancia el hecho de perder altura de turbinado, ya que como se ha comentado anteriormente la curva cota-volumen de Jablanica es más pronunciada por debajo de este valor.

En concreto la pérdida energética ocurrida entre mantener el volumen objetivo a 250 hm³ y mantenerlo a 290 hm³ es de 0,04 Gwh medios diarios, lo que se traduce en los 8 meses de duración del periodo invernal en una pérdida de 10 Gwh. La pérdida energética entre el máximo (250 hm³) y el mínimo (100 hm³) es de 0,15 Gwh medios diarios, lo que significa que en los 8 meses se pierde un total de 36 Gwh.

Los resultados obtenidos realizando la simulación para el quinto periodo invernal son los presentados a continuación.

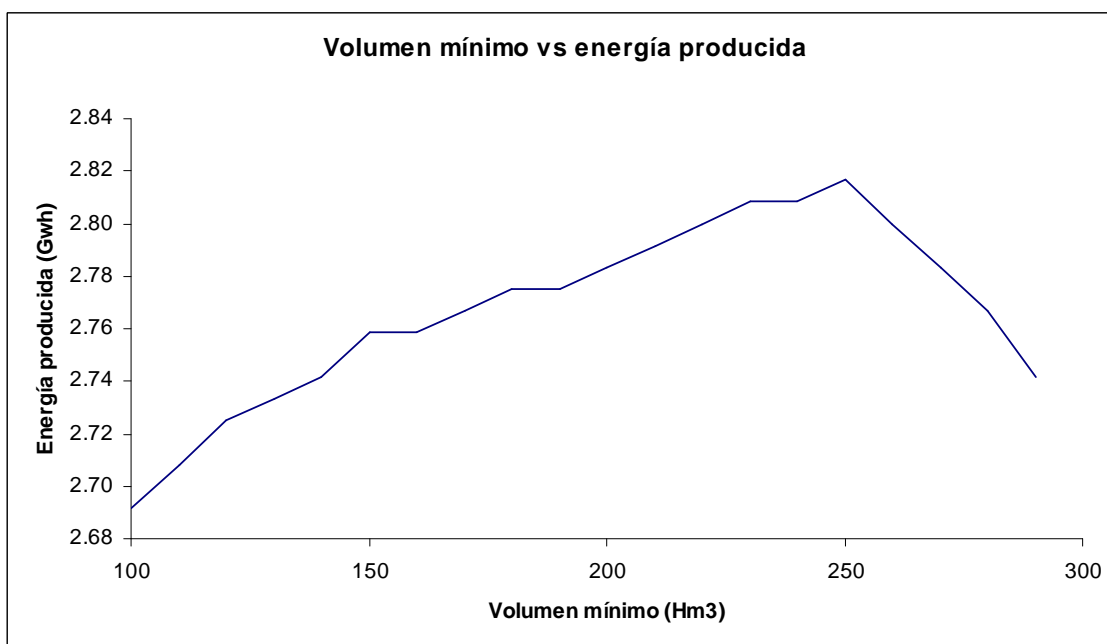


Figura 6.6: Producción energética media en Jablanica para cada volumen objetivo. Quinto periodo invernal

En este caso los resultados son muy parecidos a los obtenidos en el periodo anterior. La única diferencia se da en el pico, que en esta ocasión se corresponde claramente con el valor de volumen objetivo de Jablanica igual a 250 hm³.

Por encima de los 250 hm³ el hecho de mantener la altura de turbinado más alta provoca un descenso en la energía producida debido a que se turbinan un menor volumen de agua. Por debajo de los 250 hm³ la pérdida de altura de turbinado es más pronunciada, por lo que bajar la altura de turbinado para turbinar un mayor volumen provoca un descenso en la energía producida.

En concreto la pérdida de energía entre los 250 y los 190 hm³ de volumen objetivo es igual a 0,07 Gwh medios diarios, por lo que en 8 meses la energía perdida es de 17 Gwh. La pérdida de energía entre los 250 hm³ y los 100 hm³, para los que se da el valor mínimo de energía producida, es de 0,12 Gwh medios diarios, lo que arroja un valor en 8 meses de 29 Gwh perdidos.

La producción energética media diaria para el sexto periodo invernal simulado se presenta a continuación.

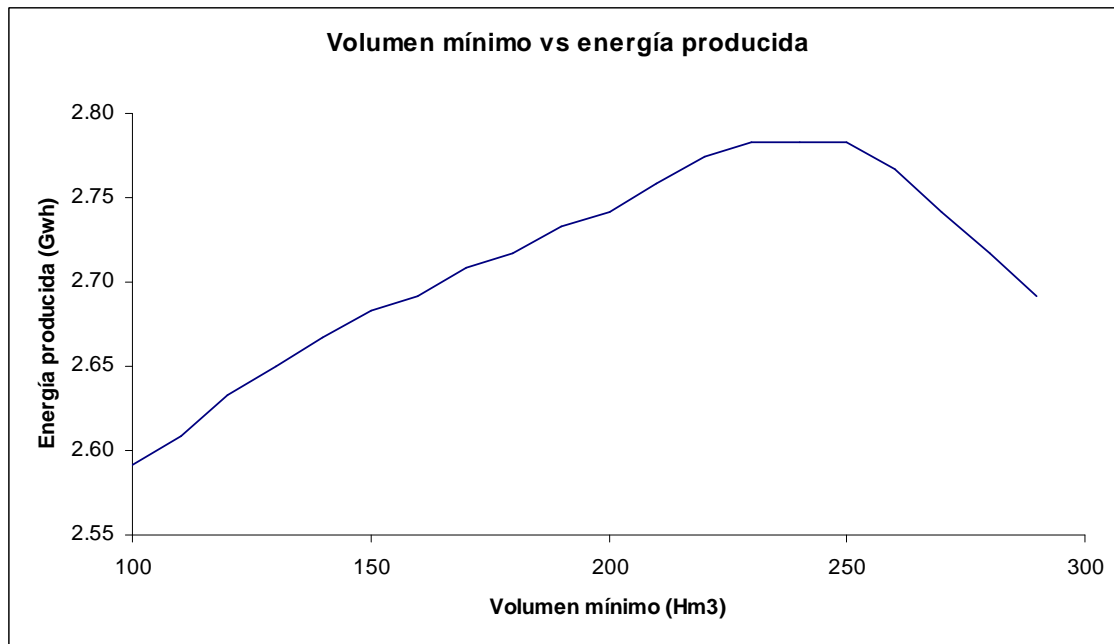


Figura 6.7: Producción energética media en Jablanica para cada volumen objetivo. Sexto periodo invernal

En este periodo los resultados de la simulación son semejantes a los obtenidos en los anteriores periodos simulados. El valor máximo de energía producida se da para un volumen objetivo del embalse de Jablanica igual a 250 hm³. Por encima de este volumen no compensa dejar de turbinar para mantener la altura de turbinado, y por debajo de este volumen la pérdida de altura de turbinado provoca que no compense turbinar un mayor volumen de agua.

La diferencia energética entre mantener el embalse a 250 hm³ y mantenerlo a 290 hm³ es igual a 0,09 Gwh diarios medios, por lo que en el total de los 8 meses de duración del periodo la diferencia equivale a 22 Gwh. La diferencia entre el mínimo y el máximo de la gráfica es igual a 0,2 Gwh diarios medios, lo que significa que en 8 meses la diferencia es de 48 Gwh.

Los resultados obtenidos simulando las aportaciones del séptimo y último periodo invernal seleccionado se corresponden con la siguiente gráfica.

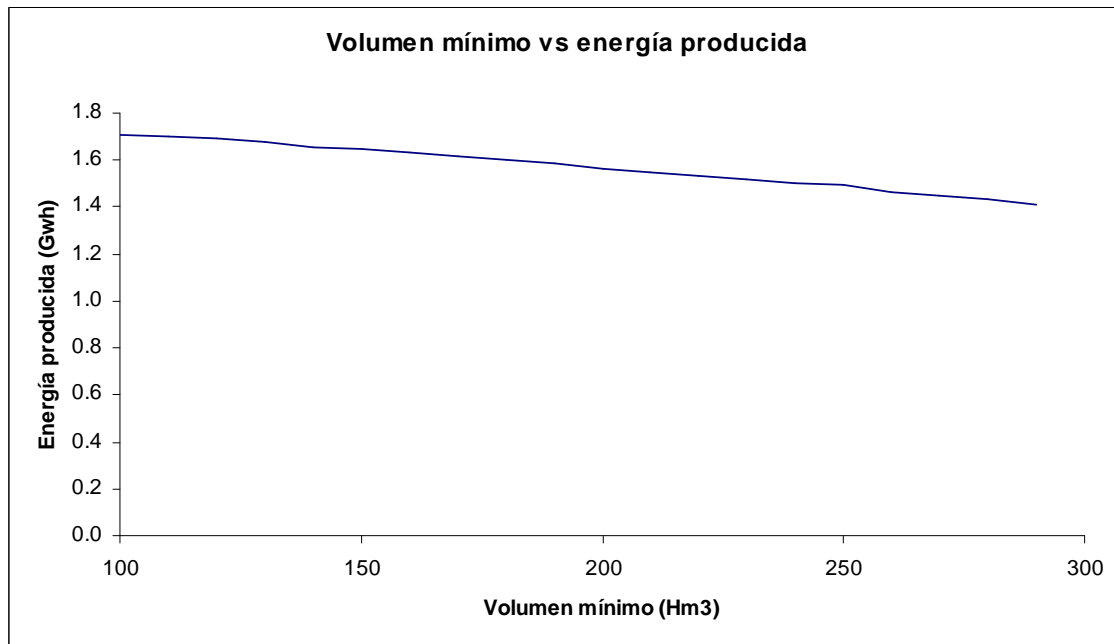


Figura 6.8: Producción energética media en Jablanica para cada volumen objetivo. Séptimo periodo invernal

Este caso es muy distinto de todos los anteriores. En la gráfica se observa como se produce un ascenso en la energía producida si desciende la altura de turbinado independientemente de la altura reducida.

Este hecho es provocado por la propia duración de este último periodo invernal. La duración de esta última simulación es de 3 meses (Octubre, Noviembre y Diciembre) por lo que las aportaciones del sistema son menores a las de los otros periodos invernales, de mayor duración. Es por ello por lo que, tal y como se ha descrito anteriormente, turbinar un mayor volumen de agua consigue aumentar la producción energética, pese al descenso en la altura de turbinado.

En concreto las diferencias entre la máxima energía producida (a los 100 hm³) y la mínima (a los 290 hm³) llega a un valor de 0,3 Gwh diarios medios, lo que en los 3 meses de simulación significa una pérdida de 27 Gwh.

Por último reseñar que este resultado no es demasiado representativo de la gestión de la cuenca, ya que el periodo de duración de esta última simulación es mucho menor al que va a darse en la realidad, donde el volumen objetivo se mantendrá constante 8 meses en lugar de los 3 meses de duración de esta simulación.

Tomando los valores medios de producción energética de todos los periodos simulados se puede hallar la producción media diaria que se da en el sistema en todos los periodos invernales desde 2001 a 2006. Este resultado puede observarse en la siguiente gráfica.

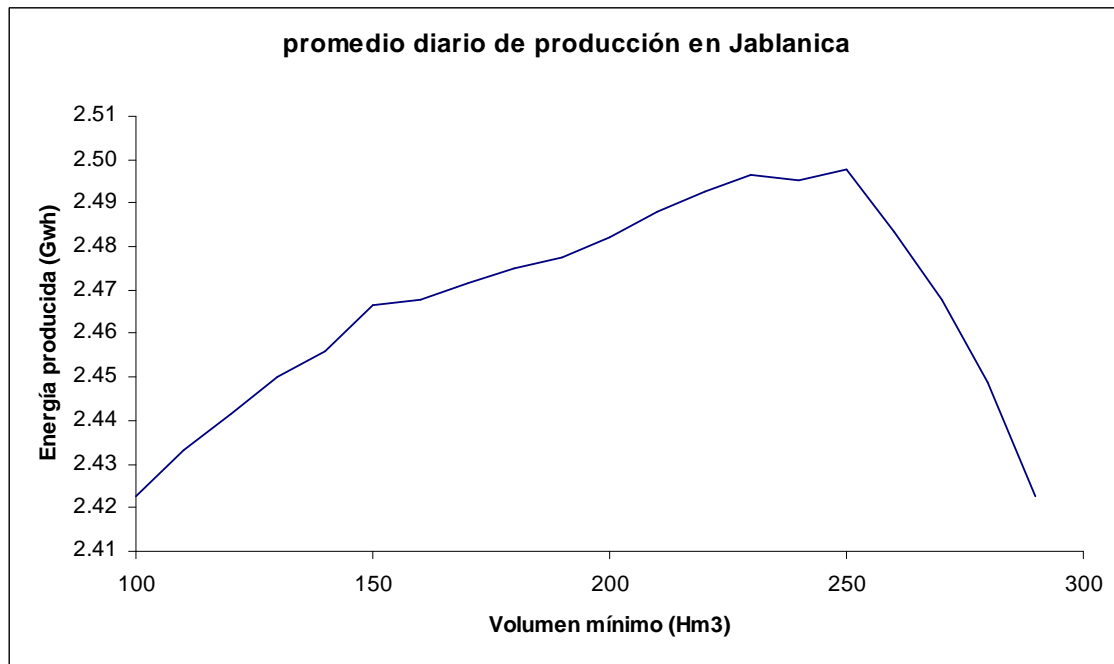


Figura 6.9: Producción energética media en Jablanica para cada volumen objetivo. Media de todos los periodos simulados.

Se observa un patrón de conducta semejante al ocurrido en la mayoría de los periodos ensayados. El valor máximo de producción energética se alcanza cuando el volumen objetivo del embalse de Jablanica es igual a 250 hm³. Si el volumen almacenado es mayor el hecho de turbinar a mayor cota no compensa el volumen que se deja de turbinar, por lo que la energía producida es menor. Si el volumen almacenado es menor el descenso de altura de turbinado es más pronunciado, lo que provoca que turbinar un mayor volumen de agua no sea rentable, ya que la pérdida de altura de turbinado provoca que la energía producida sea menor.

En concreto, la diferencia entre el valor máximo (para 250 hm³) y el valor mínimo (para 290 y para 100 hm³) es de 0,08 Gwh diarios medios.

Por lo tanto, la producción energética media para los 8 meses de duración del periodo invernal puede representarse en una gráfica como la siguiente.

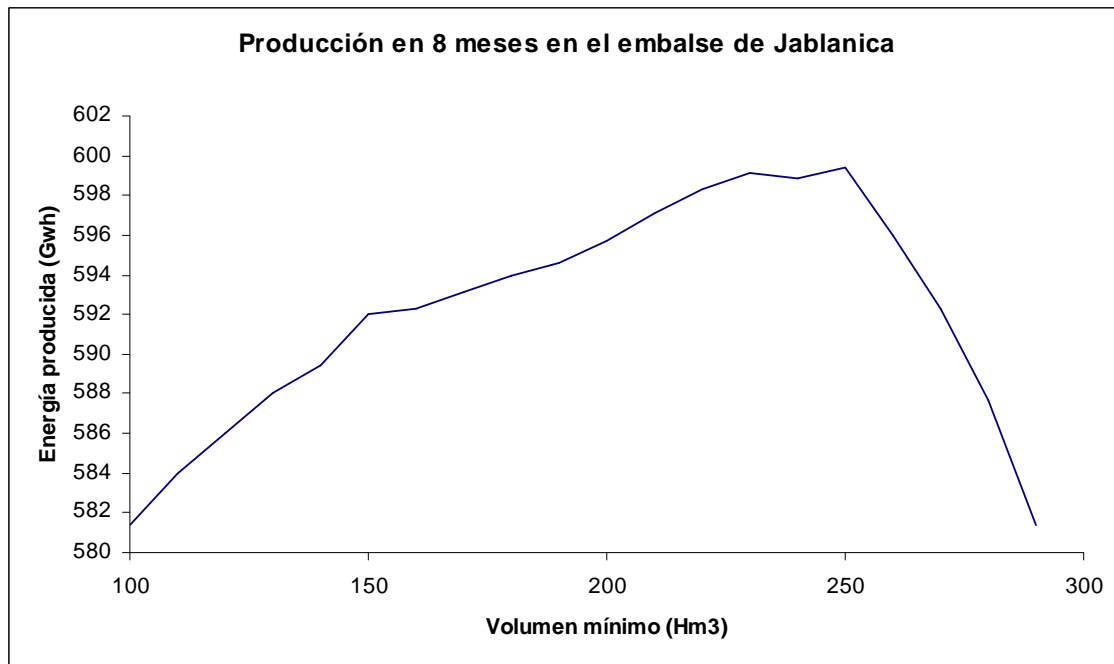


Figura 6.10: Producción energética para los 8 meses de la simulación en Jablanica en función de cada volumen objetivo.

En la gráfica se aprecia como la diferencia entre el valor máximo y el mínimo de producción energética para los 8 meses de duración del periodo invernal es aproximadamente de 20 Gwh.

Conclusiones del análisis

El objetivo de este análisis es efectuar una revisión de la regla de operación definida en el análisis mensual una vez definidas las actuaciones a tener en cuenta en caso de avenida.

Para ello se han definido dos volúmenes objetivo en el embalse de Jablanica. El primero de ellos será el adoptado en el embalse para los periodos estivales, correspondientes a los meses de Junio, Julio, Agosto y Septiembre. El segundo volumen objetivo entrará en funcionamiento durante el periodo invernal, entre el mes de Octubre y el mes de Mayo del año siguiente.

Respecto al volumen objetivo estival puede tomarse como el volumen máximo del embalse (el resultado del análisis mensual) ya que en el periodo estival la probabilidad de que ocurran avenidas en el sistema es muy reducida.

Para definir el volumen objetivo invernal se ha simulado el sistema, en escala diaria, para 7 periodos invernales. Los datos de dichos periodos invernales corresponden a los años 2001-2006. Para cada periodo invernal se ha obtenido la energía producida en el embalse de Jablanica para cada volumen objetivo definido en dicho embalse. El volumen objetivo elegido debe tener una producción hidroeléctrica óptima, garantizando además la protección del sistema frente a avenidas.

Por lo tanto tras observar los resultados obtenidos en las diversas simulaciones realizadas pueden hacerse las siguientes conclusiones:

- El volumen objetivo estival del embalse de Jablanica, que será el adoptado para los meses de Junio, Julio, Agosto y Septiembre; puede tomarse igual a la máxima capacidad de dicho embalse, equivalente a 318 hm^3 , ya que en este periodo la probabilidad de una avenida es muy baja.
- El volumen objetivo invernal del embalse de Jablanica, que será adoptado para los meses de Octubre, Noviembre, Diciembre, Enero, Febrero, Marzo, Abril y Mayo; puede tomarse igual a 250 hm^3 . Las razones por las que se ha elegido este valor son dos:
 - Por una parte según los resultados de las simulaciones es el volumen objetivo para el que se alcanza una mayor producción energética.
 - Por otra parte dicho volumen de 250 hm^3 está muy cerca del volumen definido como volumen máximo que puede alcanzar el embalse antes de tomar medidas frente a avenidas, igual a 245 hm^3 según el análisis efectuado en el punto anterior.

Validación de las conclusiones anteriores mediante un análisis de la gestión a escala horaria

Objetivos del análisis

Se han definido en escala diaria unas reglas de gestión adecuadas con el objetivo de conseguir la seguridad del sistema ante una avenida en Mostar. Dichas reglas de gestión afectaban al embalse de Jablanica. Esto se justificó con el hecho de que el volumen útil de los embalses situados aguas abajo de Jablanica no es apreciable, por lo que a escala diaria no se tomaron en consideración. Sin embargo a escala horaria dichos embalses sí que pueden desempeñar una función activa en la laminación de la avenida. Determinar esta función es el objetivo principal de este estudio.

Este análisis va a tener una menor profundidad que el análisis a escala diaria. Las razones son varias. En primer lugar solo se dispone de los datos a escala horaria de un total de cinco avenidas (dos de las cuales están situadas muy próximas en el tiempo) lo que implica la imposibilidad de realizar de forma conveniente comparaciones entre avenidas para poder ubicar la importancia de cada una de ellas, lo que no ocurriría con los datos en escala diaria, que sí podían compararse entre sí y con los datos a escala mensual. En segundo lugar el objetivo del análisis es conocer el efecto que pueden tener en la laminación de la avenida los embalses de Grabovica, Salakovac y Mostar, que no podía estudiarse en el análisis realizado a escala diaria por las razones antes mencionadas. Las posibles actuaciones que podrían tomarse ante avenidas en el embalse de Jablanica han sido objeto de un análisis exhaustivo comentado en apartados anteriores de este documento, ensayando diferentes avenidas y diferentes modos de actuación en profundidad.

Datos del modelo

A escala horaria se dispone de los datos de una avenida ocurrida en la cuenca los días 23 y 24 de Marzo de 2004. En concreto van desde las 0 horas del día 23 de Marzo de 2004 hasta las 23 del día 24 de Marzo de 2004. Se dispone en concreto de la cota de lámina de agua al inicio de cada hora, del volumen de agua que ha entrado en el embalse en una hora y del volumen de agua evacuado del embalse en una hora.

La avenida empleada para simular la cuenca a escala horaria es por tanto la avenida ocurrida en la cuenca los días 23 y 24 de Marzo de 2004. Los caudales de entrada a cada uno de los embalses de la cuenca durante la avenida se presentan en la siguiente gráfica.

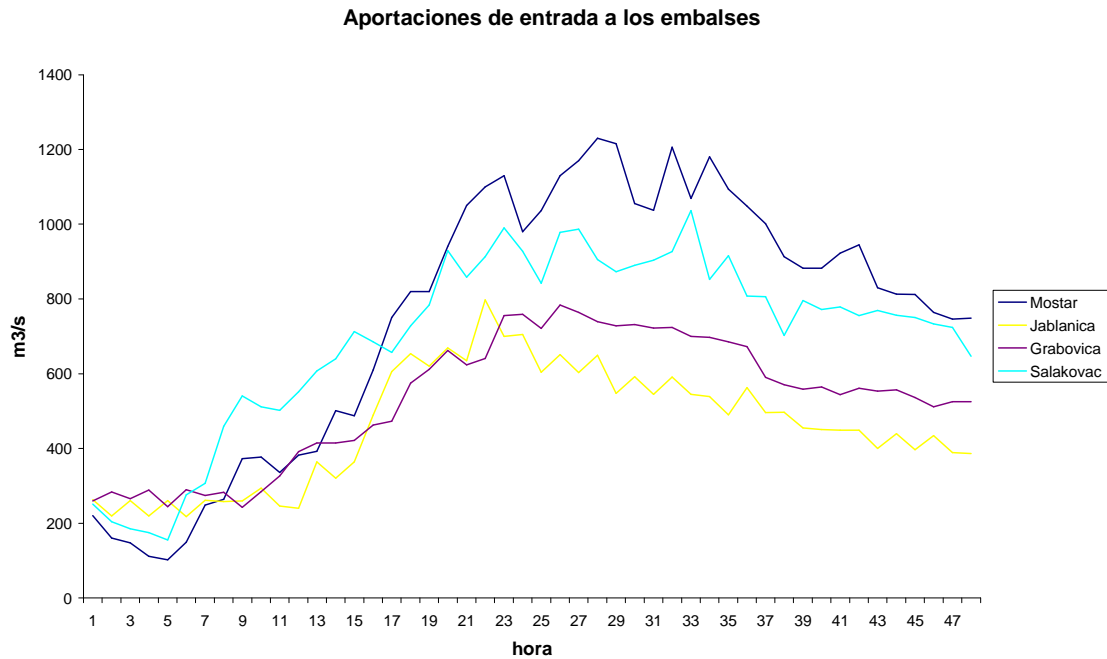


Figura 7.1: Caudales de entrada a los embalses

No se han representado los caudales de entrada al embalse de Rama debido a que en este análisis va a considerarse que el embalse de Rama se encuentra cerrado durante la avenida. Dicha simplificación se apoya en el hecho de que las aportaciones del embalse de Rama son de menor entidad que en Jablanica al estar aguas arriba en la cuenca, contando además con el suficiente volumen necesario para almacenarlas sin sufrir vertido alguno. Por lo tanto el embalse de Rama no va a realizar desembalse alguno durante la avenida.

Las aportaciones intermedias de cada embalse de la cuenca se presentan a continuación. Se han obtenido de forma análoga a lo descrito a escala mensual y diaria.

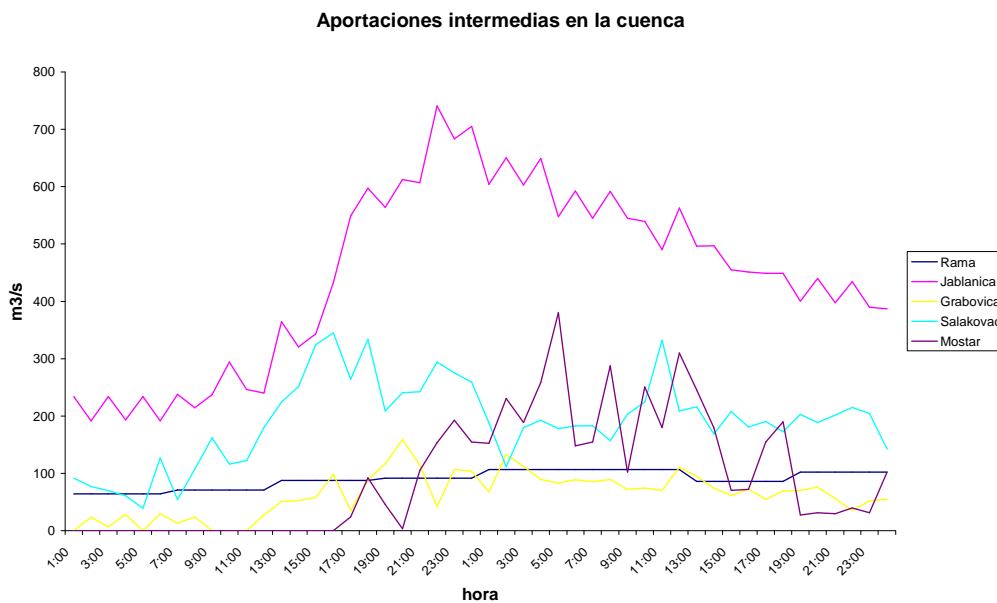


Figura 7.2: Aportaciones intermedias en la cuenca

Se observa como hay algunos periodos en los embalses de Grabovica y Mostar la aportación intermedia es nula. Ello se debe a que la resta efectuada para calcularlas ha resultado ser negativa. Como un valor negativo carece de sentido se ha optado por igualarlo a cero en estos casos. Se han representado las aportaciones en Rama ya que después van a obtenerse las aportaciones acumuladas, aunque en las simulaciones se va a considerar el embalse de Rama cerrado durante la avenida.

Las aportaciones intermedias acumuladas en la cuenca se presentan a continuación.

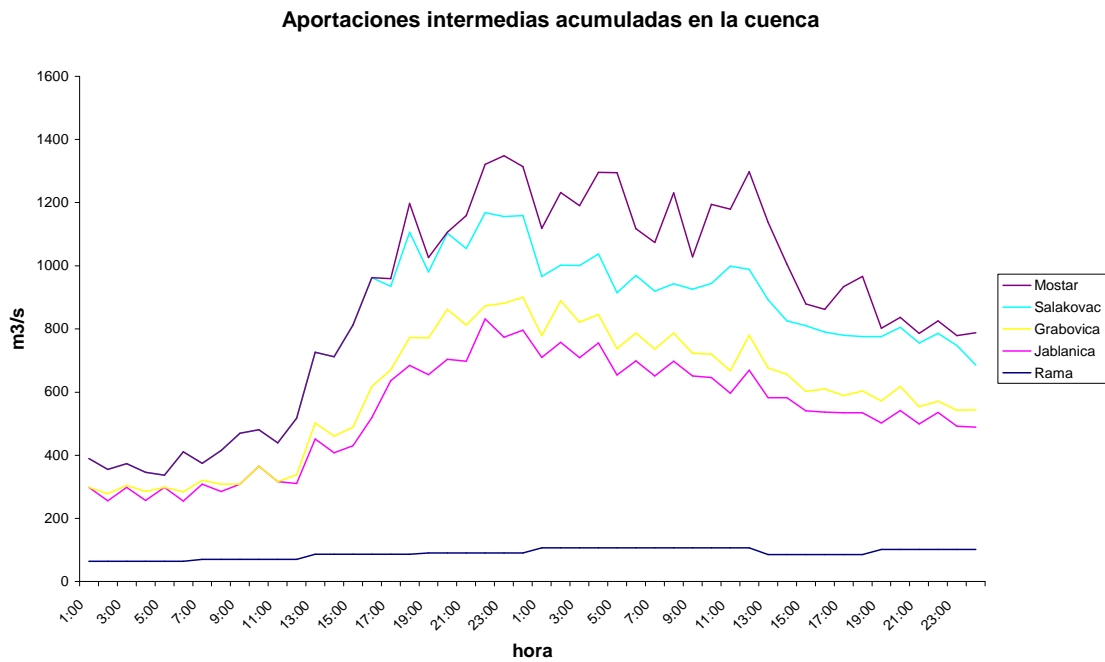


Figura 7.3: Aportaciones intermedias acumuladas en la cuenca

De acuerdo con los datos la avenida se inicia a las 12 horas del día 23. Se va a suponer que no se han tomado decisiones anticipadas al inicio de la avenida. Por lo tanto se utilizarán para la simulación los datos desde las 12 horas del día 23 y el día 24 completo.

Estas series reflejan un valor máximo de caudal de entrada a embalses inferior a $1400 \text{ m}^3/\text{s}$. A continuación se ha generado una serie de caudales de aportación mayorados multiplicando estos datos por un coeficiente mayorador igual a 1.9, lo que arroja un caudal máximo aproximado de $2400 \text{ m}^3/\text{s}$ (del orden de magnitud de la avenida de noviembre de 1999, la máxima de la que se dispone de datos). Finalmente los datos utilizados para el cálculo son los que se reflejan en la siguiente gráfica.

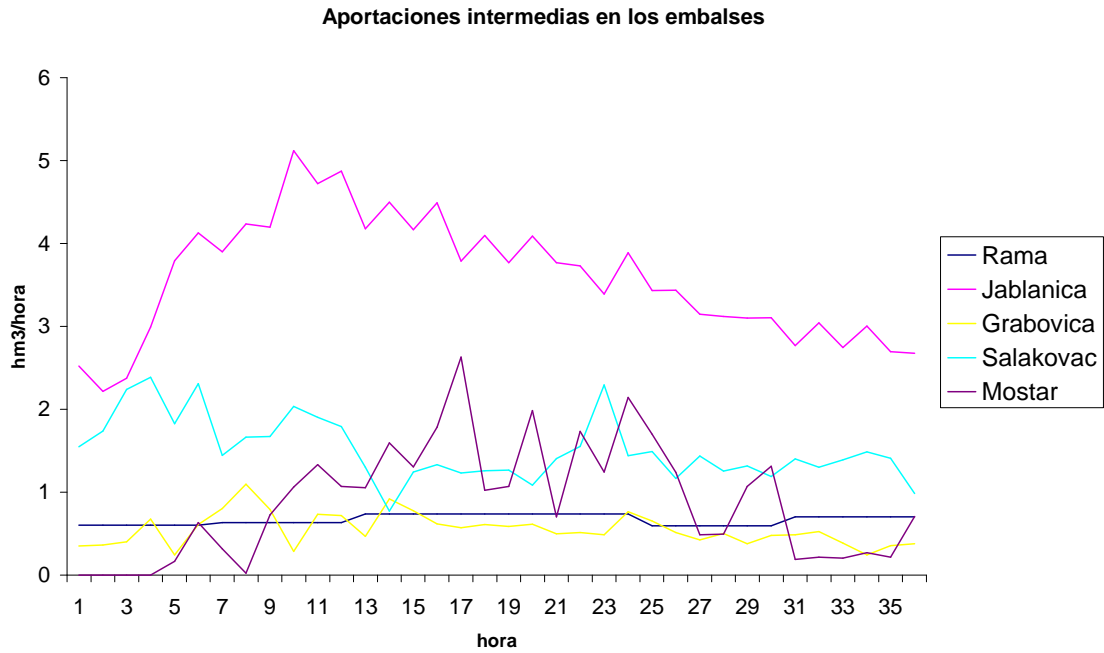


Figura 7.4: Aportaciones intermedias introducidas al modelo (en hm3/hora)

Simulaciones y resultados

Con los datos de aportaciones seleccionados se ha realizado una serie de simulaciones de la gestión de la cuenca variando las condiciones iniciales de embalses. En concreto se han realizado cuatro simulaciones distintas, denominadas S1, S2, S3 y S4.

Los datos de embalses iniciales han sido los siguientes (Rama se supone cerrado durante la avenida y por tanto no afecta a los resultados).

Embalse	Volumen de embalse inicial			
	S1	S2	S3	S4
Jablanica	275	275	250	240
Grabovica	19.8	18.8	18.8	18.8
Salakovac	68	65.5	65.5	65.5
Mostar	11	8	8	8

Tabla 7.1: Volúmenes iniciales de los embalses para cada simulación

En el análisis a escala diaria se había llegado a la conclusión de que era necesario establecer un caudal forzado de sueltas en Mostar. Por ello en estas simulaciones va a considerarse dicho caudal forzado. Para el caso S1 se han considerado dos caudales de sueltas en Mostar para las primeras horas de la simulación. El primero de ellos igual a 500 m³/s y el segundo igual a 1000 m³/s, lo que genera dos resultados distintos denominados S1A y S1B. Para el resto de simulaciones se ha establecido un caudal mínimo en Mostar de 1000 m³/s.

Los resultados de caudal calculado en Mostar para las cinco simulaciones se reflejan a continuación.

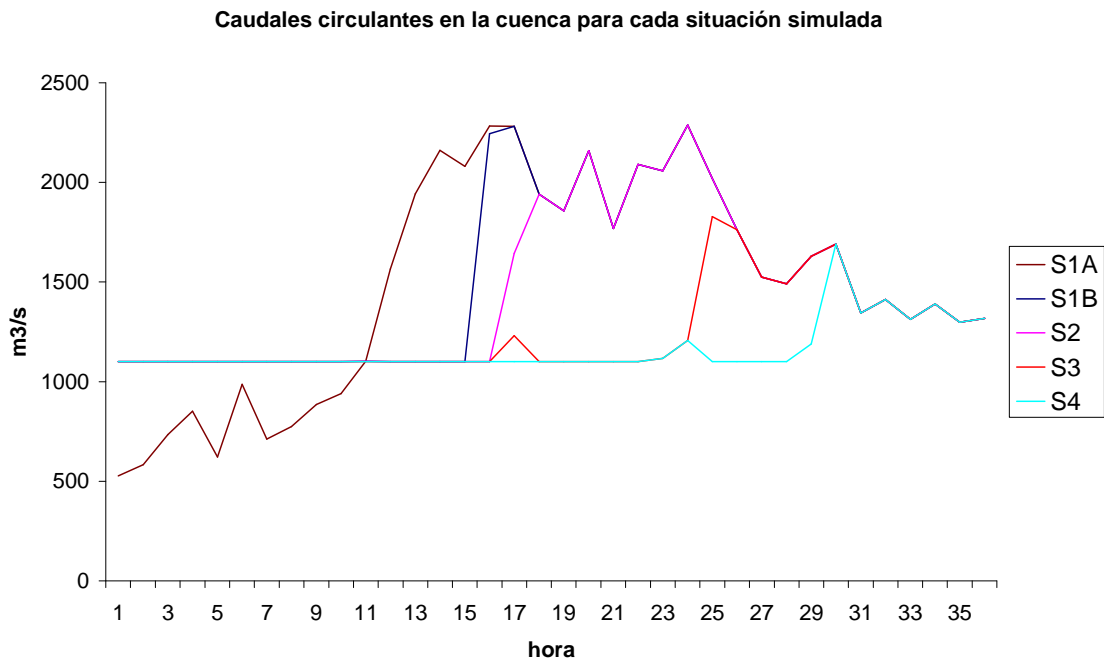


Figura 7.5: Caudales circulantes en Mostar obtenidos para cada simulación

En la gráfica se observa como los menores caudales se dan en la S4. Se aprecia además como los máximos alcanzados son mayores en las hipótesis S1A y S1B, descendiendo en simulaciones siguientes hasta alcanzar el mínimo en la S4. Sin embargo todas superan el valor máximo de 1200 m³/s fijado para Mostar. Este dato, sin embargo, no pone en entredicho los resultados obtenidos en el modelo diario, ya que para este ensayo se ha considerado que no se han tomado medidas anticipadas al inicio de la avenida, algo que en el análisis a escala diaria ya se consideró como arriesgado, evidenciando los resultados obtenidos en dicho análisis que la capacidad de anticiparse a la avenida hace variar bruscamente la magnitud del caudal que conseguía laminar la avenida. El objetivo principal de este análisis es determinar la función laminadora que puede efectuarse en los embalses de Grabovica, Salakovac y Mostar a escala horaria, dado que esta función es inapreciable a escala diaria. La laminación principal de la avenida se realiza desde el embalse de Jablanica, al que se han dedicado varios análisis para poder determinar las actuaciones necesarias que deben llevarse a cabo en él.

Conclusiones

Se ha simulado la cuenca a escala horaria empleando una avenida sufrida en la cuenca hidrográfica los días 23 y 24 de Marzo de 2004. El objetivo de estas simulaciones es determinar el efecto laminador que puede llevarse a cabo desde los embalses de Grabovica, Salakovac y Mostar, ya que no puede determinarse en un modelo a escala diaria. De las simulaciones realizadas pueden establecerse las siguientes conclusiones:

- El primer escenario (S1) correspondiente a una cota de explotación de Jablanica igual a 266,5 m.s.n.m.m (275 hm³) supone una laminación de la avenida de

entre 11 y 15 horas dependiendo de si se es capaz de anticipar un caudal de sueltas máximo en Mostar al inicio de la avenida.

- Reducir 1 m la altura de turbinado en los embalses Grabovica y Salakovac reduciendo además 2 m la altura de turbinado de Mostar permite alargar el control de la avenida entre 2 y 3 horas (reduciendo el caudal en unos 500 m³/s como media de 3 horas) ya que se dispone de 6,5 hm³ más de reserva.
- Aumentar la reserva para laminación de avenidas en estos embalses hasta el máximo de espacio para laminación de avenidas disponible en ellos (igual a 24 hm³) puede suponer entre 8 y 10 horas más de laminación de avenida.
- Disponer de 25 hm³ más de espacio en Jablanica proporciona 8 horas más de laminación y 35 hm³ proporcionan 12 horas de laminación. Aproximadamente se podría decir que cada 10 hm³ de reservas permiten laminar la avenida entre 3 y 4 horas.
- Las consideraciones anteriores se han calculado para un caudal de entradas durante la avenida de alrededor de 2400 m³/s. Es lógico suponer que caudales mayores reducirían los plazos mencionados. Sin embargo, ya que el máximo caudal circulante en Mostar supera los 1200 m³/s, incluso en el caso en el que Jablanica cuenta con una reserva de 240 hm³ estando el resto de embalses a cotas inferiores al máximo, se considera que la avenida simulada es lo suficientemente desfavorable.
- Los resultados evidencian la necesidad de disponer de un adecuado sistema de previsión que permita anticiparse a la avenida con la suficiente antelación. Este sistema puede basarse en datos de precipitaciones, datos de nieve u otros datos meteorológicos de la cuenca.

Análisis de avenidas del sistema considerando distintos caudales máximos instantáneos en Mostar

Objetivos del análisis

Hasta ahora los estudios de avenidas realizados en el sistema se han llevado a cabo de una forma más o menos determinista, sin considerar periodos de retorno en las series de aportaciones empleadas para realizar las simulaciones. Las razones por las cuales no se ha realizado un análisis estadístico provienen de los objetivos buscados al realizar los análisis.

Los análisis de avenidas realizados a escala diaria tenían como objeto proponer varias actuaciones que pudieran llevarse a cabo en caso de avenida. Los análisis realizados a escala horaria tenían como objetivo conocer el efecto de los embalses menores del sistema en la laminación. El fin de todos estos análisis era, en resumen, definir unas reglas de operación del sistema para poder hacer frente a las avenidas de forma adecuada. Como resultado se ha obtenido un caudal forzado aguas abajo del embalse de Mostar ($1000 \text{ m}^3/\text{s}$) y un volumen límite en el embalse de Jablanica (245 hm^3).

La avenida con la cual se han definido estas reglas de operación partía de la base de una avenida real sufrida por el sistema durante el mes de Abril del año 2004. De esta avenida se disponía de la aportación total del mes, de la aportación diaria del mes y de la aportación horaria de los días 23 y 24 de ese mismo mes. Estos datos se relacionaron con el resto de datos facilitados para poder conseguir una avenida de características semejantes a la avenida máxima que se ha registrado en la cuenca. En concreto se relacionaron los datos diarios con los mensuales, cuya extensión temporal es mayor; y se relacionaron los datos diarios con un registro de 1999 que cifraba el máximo en $2400 \text{ m}^3/\text{s}$.

Mediante estas comparaciones se amplificaron ambas avenidas (la diaria y la horaria) para asegurar que los datos de ambas eran semejantes a los peores datos registrados en la cuenca. Con estos datos se ha trabajado para obtener unas reglas de operación adecuadas. Una vez definidas estas reglas y redefinidos los planes de explotación para los embalses mediante el análisis de recursos a escala diaria va a estimarse la seguridad, expresada en forma de caudal máximo instantáneo, que presenta el sistema ante avenidas.

Esta comprobación debería realizarse en rigor empleando las avenidas asociadas a un periodo de retorno en lugar de a un caudal máximo. Pero dada la insuficiencia de datos de los que se dispone para realizar este análisis, ya que tan solo se han facilitado datos diarios de seis años, el análisis no puede realizarse de esta forma.

Sin embargo en la cuenca se está llevando a cabo en la actualidad un trabajo de recopilación y ordenación de todos los datos disponibles. Por lo tanto es posible que en un futuro cercano se disponga de los suficientes datos de caudales para poder realizar un análisis estadístico de los mismos, que permitirá obtener los caudales asociados a

diferentes periodos de retorno. Es por esta razón por la que se ha decidido plantear este análisis en términos de caudal máximo instantáneo, en lugar de periodo de retorno. El resultado de este análisis será el caudal máximo instantáneo que es capaz de laminarse de forma segura en la cuenca. Con este caudal máximo que va a determinarse en este análisis, una vez se disponga en la cuenca de los datos suficientes de caudales y se haya realizado el análisis estadístico de los mismos, podrá hallarse la seguridad de la cuenca en términos de años de periodo de retorno.

En resumen, en el presente análisis va a determinarse qué caudal máximo instantáneo es capaz de laminar el sistema de forma segura. Este caudal máximo podrá ser empleado (una vez se disponga en la cuenca de suficientes datos para realizar el análisis estadístico y se hayan determinado los caudales asociados a distintos periodos de retorno) para situar cual es la seguridad de la misma en años de periodo de retorno.

Paso de caudales instantáneos a caudales horarios y diarios

Los datos de los que se dispone en escala diaria son los datos de explotación de los embalses desde el 1 de Enero del año 2001 hasta el 31 de Diciembre del año 2006. El tratamiento de dichos datos para convertirlos en aportaciones intermedias en régimen natural ya se realizó en el estudio de avenidas a escala diaria, al ser necesario para la obtención de la avenida que se usó en dicho estudio y que va a tomarse como modelo para la realización del presente.

Estos datos de aportaciones intermedias en régimen natural se han acumulado para obtener las aportaciones totales en régimen natural aguas abajo de Mostar. Estos datos se presentan en la gráfica que sigue.

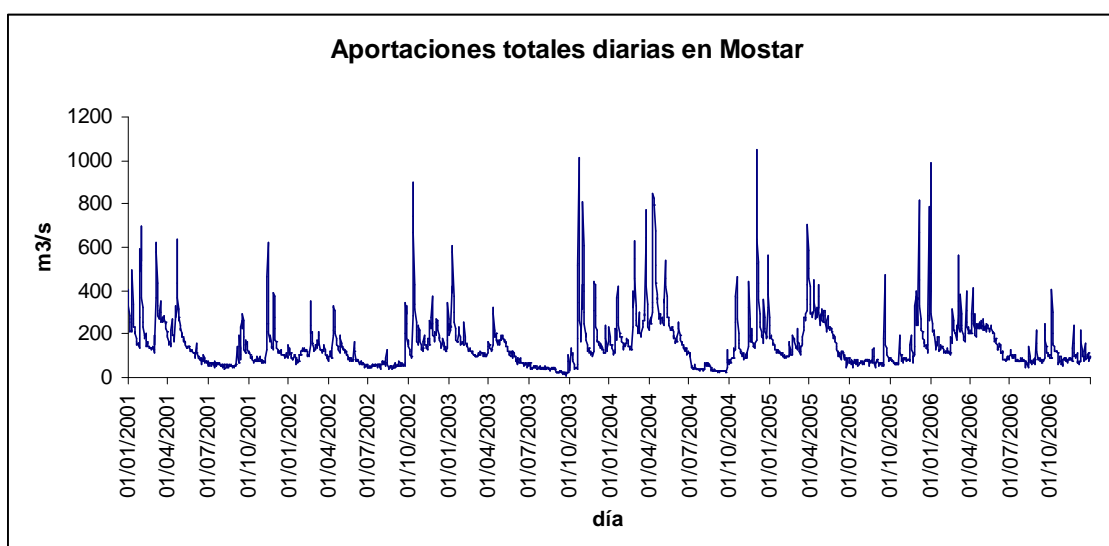


Figura 8.1: Aportaciones totales diarias aguas abajo de Mostar

Estas aportaciones totales en Mostar son necesarias para poder pasar de caudales instantáneos a caudales diarios. Es necesario realizar esta conversión ya que los datos del modelo deben introducirse en unidades horarias o diarias, pero las avenidas se deben

definir según su caudal máximo instantáneo. Además los análisis estadísticos de caudales que deberán realizarse en la cuenca una vez se disponga de los suficientes datos deberán realizarse sobre caudales instantáneos. Es por estas razones por lo que la magnitud de cada avenida deberá expresarse con su caudal máximo instantáneo, ya que este caudal será después el que deberá compararse con los obtenidos en el futuro análisis estadístico. Por lo tanto debe convertirse dicho caudal máximo instantáneo en un caudal máximo diario, para después poder emplear este caudal diario para mayorar la avenida que se va a emplear como base.

Para obtener los datos instantáneos a partir de los datos diarios va a emplearse el método de Fuller. Según este método el caudal instantáneo puede aproximarse a partir del caudal medio diario mediante la siguiente expresión:

$$Q_i = \rho * Q_d$$

Siendo Q_i el caudal instantáneo, Q_d el caudal diario y ρ un coeficiente que puede obtenerse de dos formas distintas:

- Mediante la expresión: $\rho = 1 + (a / S^b)$, en la que S es la superficie de la cuenca en km^2 y a y b son constantes características de la cuenca.
- Mediante la observación de los hidrogramas de avenida de la cuenca, de los que puede aproximarse ρ como la relación entre el caudal punta de la avenida y el medio diario durante los días en los que dura la crecida. La media de estas relaciones ponderada de acuerdo al caudal medio diario arroja un valor aproximado de ρ .

En este caso va a estimarse el coeficiente ρ mediante la observación de las avenidas de la cuenca. Para cada avenida se va a obtener el caudal máximo diario durante la misma y la media de todos los caudales diarios durante los días en los que dura la avenida. La relación entre estos dos caudales es el coeficiente ρ de cada avenida. La media de todos estos coeficientes ponderada respecto al caudal medio diario de cada avenida es el coeficiente ρ buscado, que permitirá convertir los caudales diarios en caudales instantáneos.

Los caudales medios y máximos diarios que se dan durante las veintisiete avenidas sufridas por la cuenca en los seis años de datos se presentan en la página siguiente.

m3/s	m3/s	
Máximo caudal diario en la avenida	Caudal medio diario de la avenida	Coefficiente
495.	270	1.83
697	428	1.63
625	316	1.98
639	241	2.66
619	276	2.24
393	252	1.56
350	204	1.72
328	230	1.43
348	232	1.50
899	389	2.31
373	212	1.76
609	255	2.39
256	170	1.51
325	218	1.49
1014	358	2.83
442	266	1.66
420	235	1.79
845	309	2.73
467	283	1.65
444	227	1.95
1047	286	3.67
704	286	2.46
469	260	1.80
819	309	2.65
992	366	2.71
562	230	2.44
405	243	1.67

Tabla 8.1: Caudales máximos y medios y coeficiente ρ para las avenidas sufridas por el sistema durante los años 2001-2006

La media de todos los coeficientes obtenidos ponderada mediante el caudal medio de cada avenida arroja un coeficiente medio igual a 2,12.

Por lo tanto, el coeficiente a emplear para convertir los caudales instantáneos en caudales diarios es de 2,12.

Para convertir el dato instantáneo en horario puede procederse de forma más directa. Se dispone de un total de cuatro avenidas con datos diarios y horarios (en realidad se dispone de cinco series de datos horarios, pero dos de estas series están muy próximas en el tiempo, por lo que pertenecen a una única avenida). El procedimiento seguido en este caso consiste en dividir el dato máximo instantáneo (obtenido a partir del dato máximo diario mediante el coeficiente que acaba de calcularse) entre el dato máximo horario en las avenidas en las que se posea dicho dato. Una vez obtenidos estos coeficientes va a determinarse la media de los mismos, siendo este coeficiente medio el que se empleará para pasar de datos instantáneos a datos horarios.

m3/s Datos inst.	m3/s Datos horarios	Coficiente horario
1050		
1477		
1325		
1355		
1313		
834		
743		
697		
739		
1908		
790		
1293		
544		
690		
2150		
938		
892		
1792	1370	1,31
991		
941		
2220	1496	1,48
1494		
995		
1736		
2103	1231	1,71
1191	462	2,58
860		

Tabla 8.2: Caudales máximos instantáneos para las avenidas sufridas por el sistema durante los años 2001-2006

El coeficiente resultante final ha sido la media de tres coeficientes, ya que se ha optado por rechazar el coeficiente igual a 2,58 por considerarse anómalamente alto (es mayor incluso al coeficiente obtenido a escala diaria). Los coeficientes restantes son 1.31, 1.48 y 1.71. La media de estos tres coeficientes es 1,5. Por lo tanto, el coeficiente por el que va a dividirse los valores instantáneos para convertirlos en valores horarios es de 1,5.

Simulaciones y resultados

➤ Avenidas consideradas en las simulaciones

Las avenidas que van a ensayarse en las simulaciones van a ser las avenidas asociadas a los caudales máximos instantáneos iguales a 2500, 3000, 3500, 4000, 5000 y 6000 m³/s.

Para convertir los caudales instantáneos anteriores en caudales diarios el procedimiento a seguir es el inverso al hecho para convertir los caudales diarios en instantáneos. Para convertir un dato instantáneo en dato diario debe dividirse el dato instantáneo entre el coeficiente ρ determinado según el método de Fuller. Es decir, debe dividirse el caudal instantáneo entre 2,12.

A su vez para convertir los caudales instantáneos en caudales horarios se deberá dividir el valor instantáneo entre el coeficiente determinado anteriormente, igual a 1,5.

Una vez convertidos los valores instantáneos en horarios y diarios puede procederse a mayorar las avenidas. Para obtener el coeficiente mayorador basta con dividir el caudal horario o diario obtenido a partir de cada uno de los caudales instantáneos antes mencionados entre el valor máximo de caudal total en Mostar obtenido para la avenida empleada como base (el caudal total en Mostar se obtiene sumando todas las aportaciones intermedias de la avenida). La división entre estos dos valores proporciona el coeficiente mayorador, que se va a aplicar sobre todas las aportaciones intermedias de la avenida.

La avenida empleada como base a escala diaria es una avenida real del sistema, de 12 días de duración, concretamente los días 7-18 de Abril de 2004, y que se ha empleado también como base en los estudios anteriores.

Las avenidas en escala diaria que van a simularse en el sistema se presentan en la gráfica expuesta en la página siguiente.

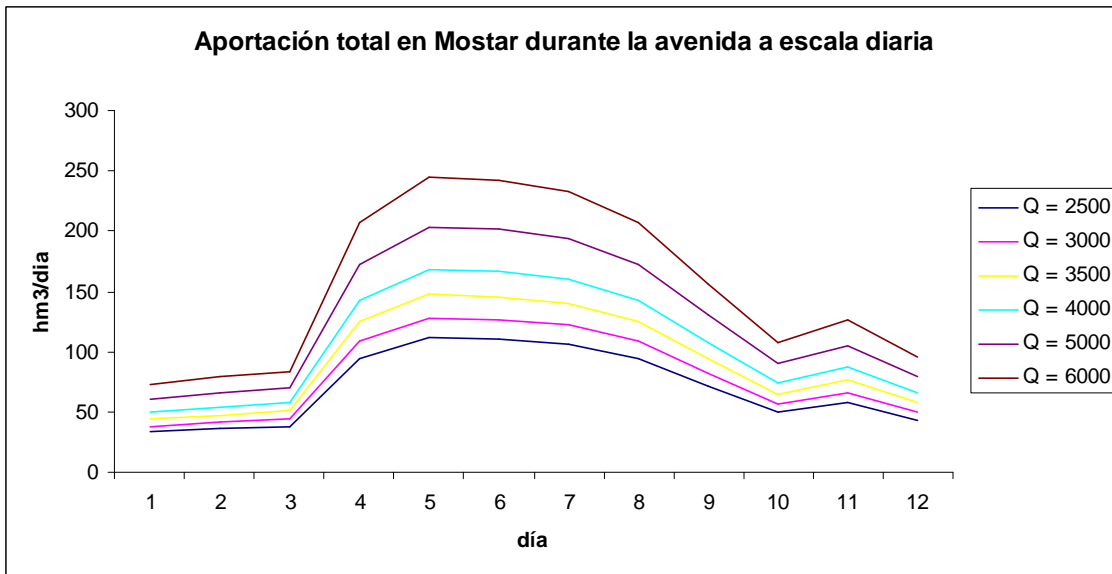


Figura 8.2: Aportaciones totales en Mostar para avenidas de distintos caudales máximos instantáneos en $hm^3/día$

A escala horaria la avenida empleada como base se corresponde con una avenida ocurrida en el sistema los días 23 y 24 de Marzo de 2004. La justificación de la elección de esta avenida sobre las otras cuatro avenidas disponibles se explica mediante la gráfica siguiente.

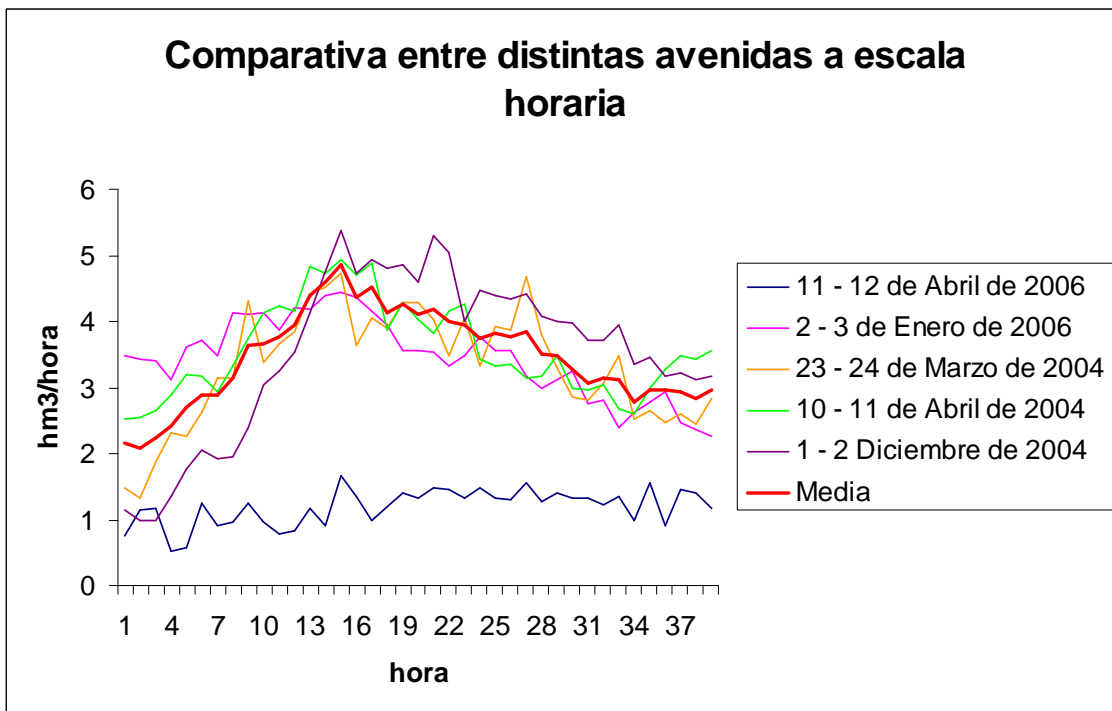


Figura 8.3: Comparativa de avenidas a escala horaria

En la gráfica se han representado las cinco avenidas de las que se dispone de datos, situadas de forma que el valor máximo está representado en todas ellas en la hora número 15. Se observa como puede descartarse de entrada la primera de las avenidas, ya que sus aportaciones horarias son claramente inferiores a las correspondientes al resto de avenidas. De las cuatro avenidas restantes se ha hallado la media, representada

también en el gráfico. Puede observarse como todas las avenidas restantes se mueven en el mismo rango de datos. La alternativa elegida finalmente ha sido la avenida correspondiente a los días 23 y 24 de Marzo de 2004. Se ha elegido esta avenida porque al contar con un periodo de aportaciones máximas más largo que en el resto de avenidas, una vez mayorada resultará en una avenida más desfavorable que en el resto de casos. La avenida correspondiente a los días 2 y 3 de Enero de 2006 presenta un valor máximo poco pronunciado, lo que provocaría al ser mayorada unas aportaciones excesivas. Las dos avenidas restantes, pese a tener máximos ligeramente superiores a la elegida, presentan una duración del pico inferior, lo que provocaría tras la mayoración de las mismas una situación menos desfavorable que la correspondiente a la avenida elegida.

Las avenidas que van a simularse en escala horaria, teniendo como base la avenida sufrida por el sistema los días 23 y 24 de Marzo de 2004, son las representadas en la gráfica que figura a continuación.

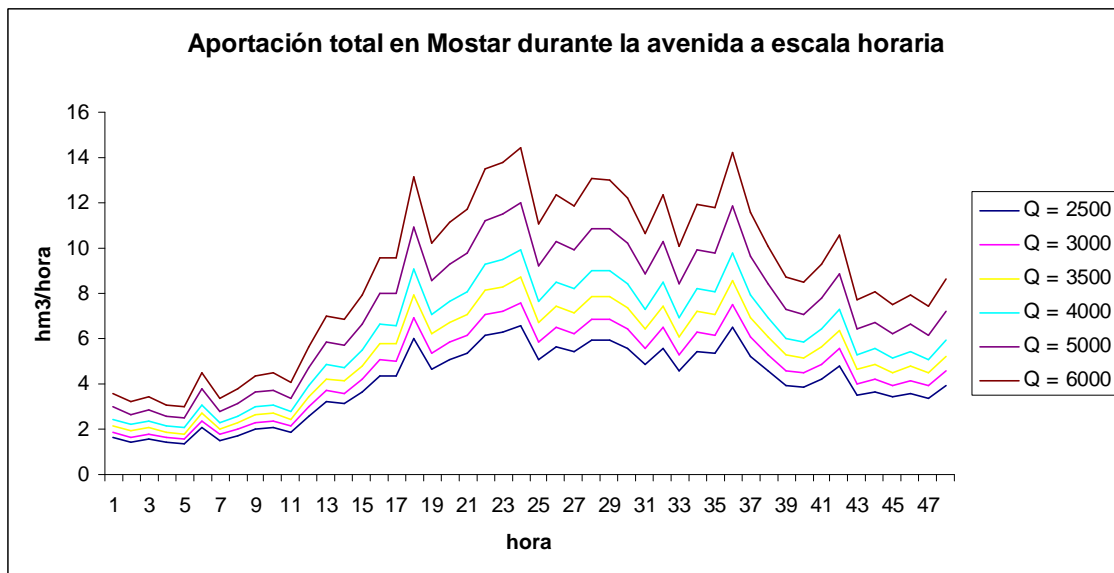


Figura 8.4: Aportaciones totales en Mostar para avenidas de caudales máximos instantáneos en $hm^3/hora$

➤ **Simulaciones realizadas y resultados obtenidos**

Las avenidas anteriores van a simularse en un modelo elaborado empleando el software Aquatool tanto a escala diaria como a escala horaria. La regla de operación inicial que va a simularse es la determinada en los análisis anteriores. Dicha regla de gestión consiste en establecer un volumen límite en el embalse de Jablanica. Cuando la reserva almacenada en el embalse sea superior a este volumen límite se procederá a efectuar un desembalse de $1000 m^3/s$ hasta que la reserva iguale al volumen límite. Cuando la reserva almacenada sea inferior a este volumen límite no se tomará medida extraordinaria alguna. Este volumen límite se ha determinado en los análisis anteriores igual a $245 hm^3$. Teniendo en cuenta que el volumen propuesto de forma definitiva para los meses invernales (desde Octubre hasta Mayo) es igual a $250 hm^3$, el volumen límite de $245 hm^3$ hallado en los análisis de avenidas puede alcanzarse en unas pocas horas de

desembalse controlado (de forma segura pueden desembalsarse hasta 3,6 hm³ cada hora).

Sin embargo, adicionalmente, van a ensayarse más volúmenes límite para el embalse de Jablanica, con el objeto de establecer cuanto aumenta la seguridad del sistema cuando se baja la reserva de Jablanica. En concreto van a ensayarse volúmenes límite iguales a 200, 150 y 100 hm³. Hay que indicar que un volumen almacenado excesivamente bajo en el embalse de Jablanica puede poner en peligro la producción hidroeléctrica del sistema, por lo que debe estar justificado un desembalse previo que deje el volumen del embalse de Jablanica por debajo del nivel recomendado.

En caso de desembalsarse de forma excesiva sin tener bien definida la severidad de la avenida próxima es posible que, debido a un error de predicción, la avenida no se produzca o que su severidad sea menor a lo previsto, en cuyo caso la demanda de energía en los próximos días puede verse comprometida. Es necesario contar con un sistema de predicción fiable que permita evaluar la magnitud de la avenida con una precisión aceptable, para evitar efectuar desembalses excesivos que puedan poner en peligro la producción energética del sistema.

Además de ensayarse diferentes volúmenes límite para el embalse de Jablanica, en el caso de las simulaciones a escala horaria van a ensayarse de forma adicional dos casos en los que varían los volúmenes iniciales de los embalses situados aguas abajo de Jablanica. El primer caso que va a ensayarse consistirá en mantener los embalses de aguas abajo a volumen máximo (19.8 hm³ para Grabovica, 68 hm³ para Salakovac y 11 hm³ para Mostar). El segundo caso a ensayarse consistirá en mantener los embalses de aguas abajo a un volumen igual al correspondiente a su cota mínima de turbinado (15 hm³ para Grabovica, 55 hm³ para Salakovac y 5 hm³ para Mostar).

▪ **Escala diaria**

A escala diaria se han realizado simulaciones de todos los caudales máximos instantáneos para todos los volúmenes límite indicados anteriormente. Una vez realizadas todas las simulaciones van a compararse los resultados obtenidos para establecer la seguridad proporcionada por todos los casos analizados.

Para todas las avenidas simuladas se han obtenido los caudales circulantes en Mostar. Después se han agrupado para cada volumen objetivo los caudales circulantes para todas las avenidas simuladas.

En lo que respecta a los embalses aguas abajo de Jablanica se han mantenido al volumen inicial máximo (el volumen aconsejado en los análisis anteriores). Su efecto en la laminación no puede estudiarse de forma correcta a escala diaria, por lo que van a determinarse a escala horaria. Cabe indicar sin embargo que el volumen de estos embalses no es fijo, sino simplemente el volumen inicial. Por ello puede desembalsarse agua de estos embalses en el caso que sea necesario para mantener el caudal forzado de 1000 m³/s aguas abajo de Mostar. En otras palabras en estos embalses, al contrario que en el de Jablanica, no se establece volumen mínimo. Por lo tanto pueden desembalsarse para completar el caudal forzado de 1000 m³/s si se cumplen las condiciones bajo las que debe establecerse este caudal.

Los resultados obtenidos para un volumen objetivo de 245 hm³ se presentan a continuación.

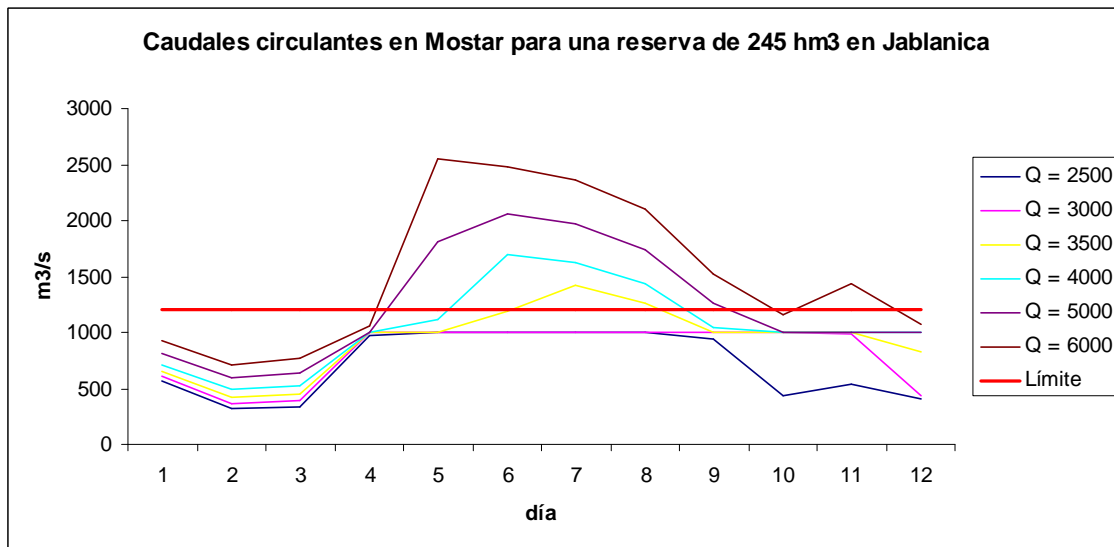


Figura 8.5: Caudales circulantes en Mostar para cada avenida considerada en el caso de establecer en el embalse de Jablanica un volumen límite de 245 hm³.

Puede observarse como el sistema consigue mantener el caudal en Mostar por debajo del límite de 1200 m³/s en las simulaciones correspondientes a las avenidas de 2500 y 3000 m³/s de caudal máximo instantáneo. Para las avenidas cuyo caudal máximo instantáneo es superior no se consigue mantener el caudal circulante en Mostar dentro de los límites de seguridad. Puede por lo tanto asegurarse que para un volumen límite de 245 hm³ (el definido en los análisis anteriores) la seguridad del sistema queda garantizada para avenidas cuyo caudal máximo instantáneo sea de 3000 m³/s o inferior.

Se observa además como, tal y como previsiblemente suceda en el resto de casos, en las primeras fases de la avenida no puede cumplirse el caudal forzado de 1000 m³/s debido a que el volumen de Jablanica alcanza los 245 hm³ y los volúmenes de los embalses menores alcanzan a su vez la cota mínima de turbinado, por lo que según las condiciones establecidas para que se realice el desembalse no es necesario desembalsar 1000 m³/s, limitándose el caudal circulante en Mostar al caudal que excede de los volúmenes indicados (límite en Jablanica y cota mínima de turbinado en Grabovica, Salakovac y Mostar).

Para el supuesto en el que el volumen límite de Jablanica sea de 200 hm³ los resultados obtenidos se indican en la siguiente gráfica.

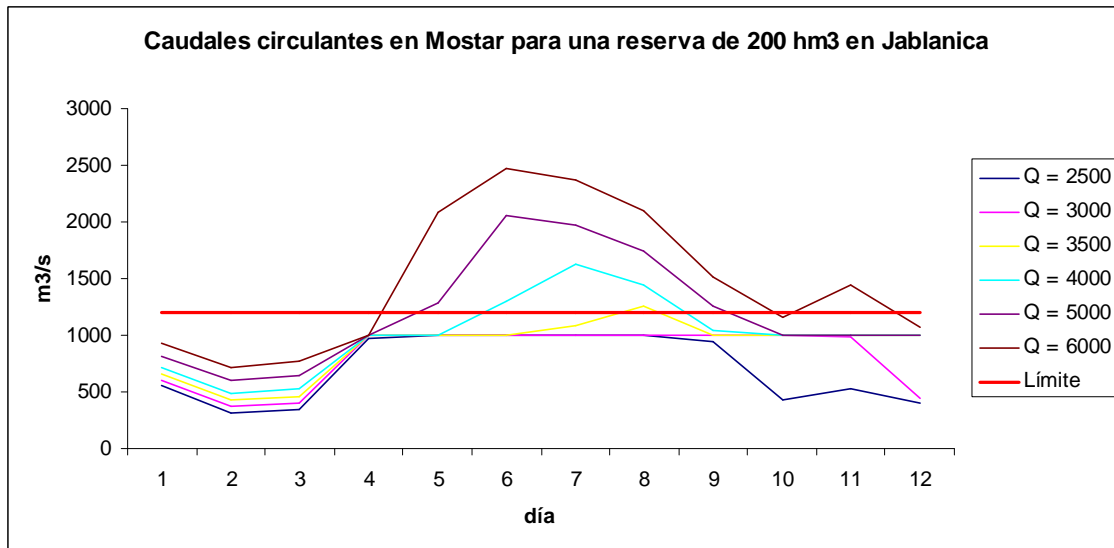


Figura 8.6: Caudales circulantes en Mostar para cada avenida considerada en el caso de establecer en el embalse de Jablanica un volumen límite de 200 hm³.

Se aprecia en esta ocasión como los resultados son semejantes a los obtenidos para el caso anterior. El sistema mantiene el caudal circulante en Mostar dentro de los límites de seguridad para las avenidas de 2500 y 3000 m³/s de caudal máximo instantáneo. Para el resto de caudales máximos instantáneos considerados el caudal circulante en Mostar supera los límites. Puede establecerse en este caso que para un volumen límite de 200 hm³ la seguridad del sistema se mantiene para avenidas de 3000 m³/s de caudal máximo instantáneo o inferiores.

Para el caso en que el volumen límite de Jablanica se establezca en 150 hm³ los caudales circulantes en Mostar vienen dados por la siguiente gráfica.

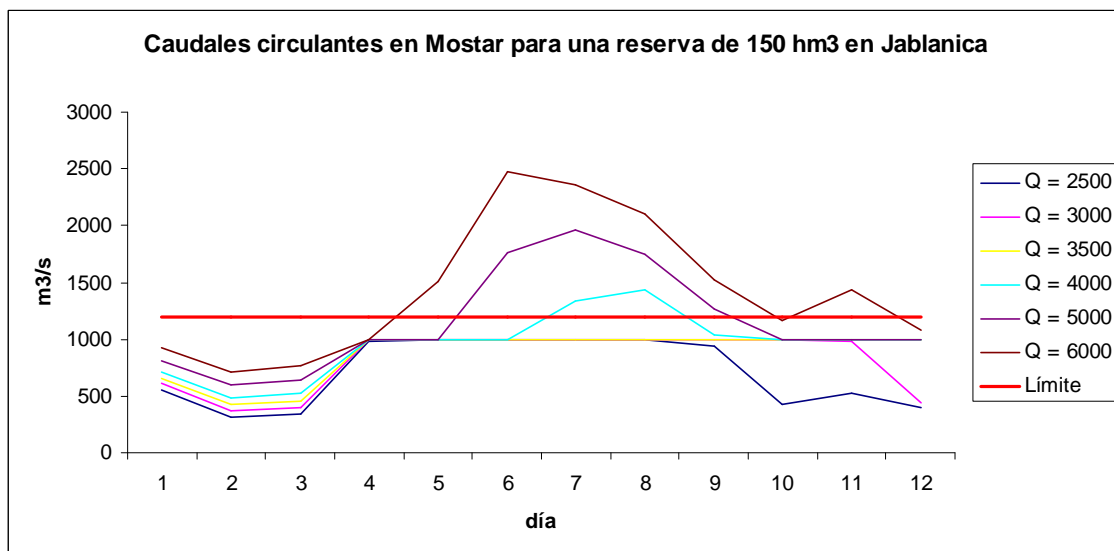


Figura 8.7: Caudales circulantes en Mostar para cada avenida considerada en el caso de establecer en el embalse de Jablanica un volumen límite de 150 hm³.

En este supuesto la seguridad del sistema se mantiene en los casos de avenidas de 2500, 3000 y 3500 m³/s de caudal máximo instantáneo. Para caudales máximos instantáneos superiores los caudales circulantes en Mostar dejan de cumplir la condición de seguridad. Puede afirmarse tras observar las gráficas que la seguridad del sistema si el volumen límite en el embalse de Jablanica es igual a 150 hm³ queda garantizada para avenidas cuyo caudal máximo instantáneo sea igual o inferior a 3500 m³/s. Esto supone una mejora respecto al caso en el que el volumen límite es igual a 245 hm³.

Los resultados para el supuesto de que el volumen límite en Jablanica sea de 100 hm³ se exponen a continuación.

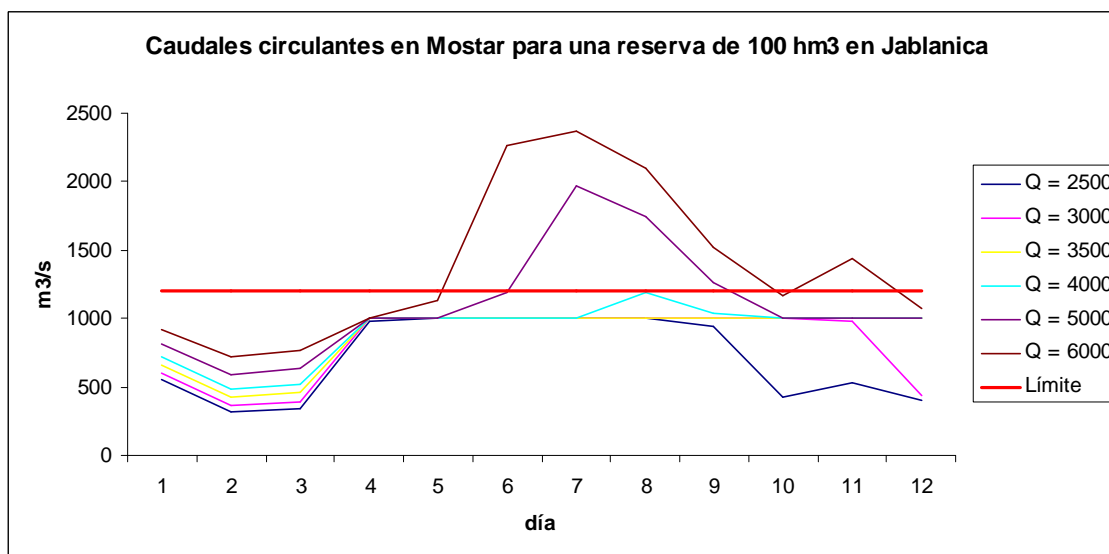


Figura 8.8: Caudales circulantes en Mostar para cada avenida considerada en el caso de establecer en el embalse de Jablanica un volumen límite de 100 hm³.

Se aprecia en este caso como la seguridad del sistema ante avenidas queda garantizada para todas las avenidas cuyo caudal máximo instantáneo sea inferior a 4000 m³/s. Puede por tanto realizarse la afirmación de que la seguridad del sistema para el caso de un volumen límite de 100 hm³ queda garantizada para avenidas cuyo caudal máximo instantáneo sea igual o inferior a 4000 m³/s.

Las simulaciones realizadas en este apartado pueden resumirse en la siguiente tabla.

Reserva	Caudal máximo instantáneo					
	Q = 2500	Q = 3000	Q = 3500	Q = 4000	Q = 5000	Q = 6000
245 hm ³	1000	1000	1418	1699	2061	2546
200 hm ³	1000	1000	1256	1622	2061	2477
150 hm ³	1000	1000	1000	1437	1968	2477
100 hm ³	1000	1000	1000	1196	1968	2366

Tabla 8.3: Tabla resumen de las simulaciones realizadas a escala diaria

En la tabla se observa como la seguridad del sistema frente a avenidas queda garantizada, para un volumen límite de 245 hm³ (el definido en los análisis anteriores) para avenidas de 3000 m³/s de caudal máximo instantáneo. Para un volumen límite de 150 hm³ la seguridad frente a avenidas se garantiza para caudales máximos instantáneos

iguales o inferiores a $3500 \text{ m}^3/\text{s}$. Si el volumen límite es de 100 hm^3 la seguridad frente a avenidas se consigue si el caudal máximo instantáneo es igual o inferior a $4000 \text{ m}^3/\text{s}$.

Debe tenerse en cuenta que a pesar de conseguir una mayor seguridad frente a avenidas (hasta $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ de caudal máximo instantáneo) establecer un volumen límite demasiado bajo es arriesgado, ya que puede poner en peligro la producción hidroeléctrica del sistema. Por lo tanto, antes de realizar un desembalse por debajo de 245 hm^3 , debe preverse con la suficiente exactitud la magnitud de la avenida próxima, con el fin de evitar un desembalse innecesario del embalse de Jablanica.

▪ **Escala horaria**

A escala horaria van a realizarse simulaciones para cada volumen límite teniendo en cuenta además el posible efecto que puedan tener los volúmenes iniciales de los embalses menores de la cuenca.

Para estos embalses van a establecerse dos opciones distintas. La primera consiste en mantener un volumen inicial igual al máximo en estos embalses. La segunda consiste en mantener un volumen en estos embalses igual a la cota mínima de turbinado. Al igual que en el análisis a escala diaria este volumen inicial no tiene el significado de volumen mínimo, pudiendo desembalsarse agua de estos embalses para completar el caudal de $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ si se cumplen las condiciones bajo las que debe establecerse este desembalse.

Por lo tanto para cada caso correspondiente a un volumen límite existen dos subcasos, en uno de los cuales el volumen inicial de estos embalses es el máximo y en otro de los cuales el volumen inicial es el correspondiente a la cota mínima de turbinado.

En este caso no se han simulado todas las avenidas para todos los volúmenes objetivo, con el fin de evitar realizar simulaciones innecesarias. Si para un caudal máximo instantáneo no se garantiza la seguridad, no se va a analizar ninguna avenida de caudal máximo instantáneo superior. Y si para un volumen límite y un caudal máximo instantáneo ya se cumple la seguridad, no se va a analizar la avenida del mismo caudal máximo instantáneo para un volumen límite inferior.

Para todas las avenidas simuladas se han obtenido los caudales circulantes en Mostar. Después se han agrupado para cada volumen objetivo los caudales circulantes para todas las avenidas simuladas.

Los resultados obtenidos para un volumen objetivo de 245 hm^3 se presentan a continuación.

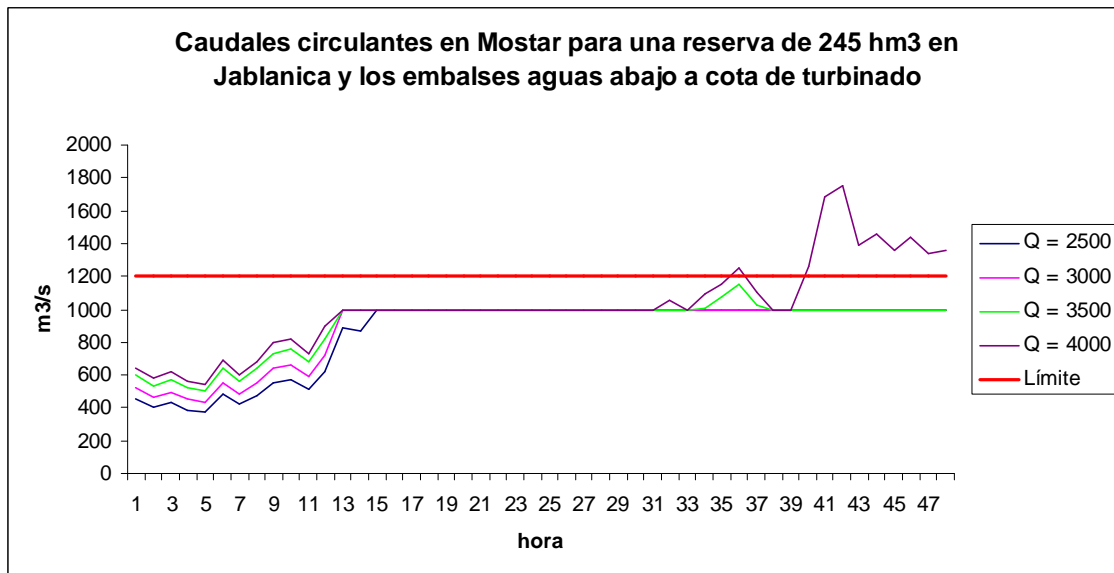
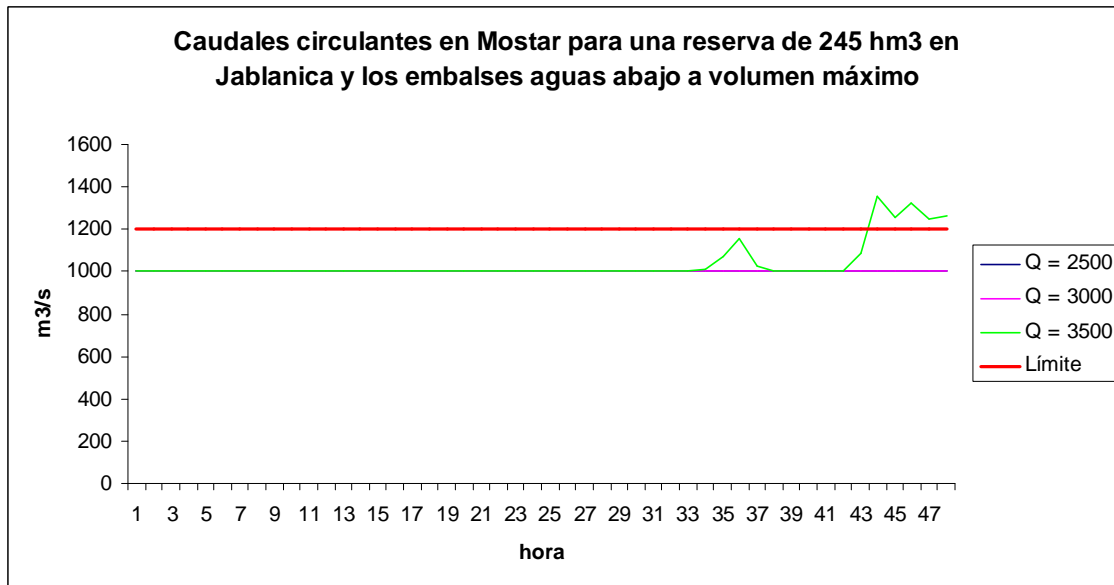


Figura 8.9: Caudales circulantes en Mostar para cada avenida considerada en el caso de establecer en el embalse de Jablanica un volumen límite de 245 hm^3 .

Se observa como para el caso en el que los embalses menores se encuentran con un volumen inicial máximo la seguridad del sistema queda garantizada para avenidas de caudal máximo instantáneo igual o inferior a $3000 \text{ m}^3/\text{s}$. Para el caso en el que los embalses menores se encuentran con un volumen igual al correspondiente a su cota mínima de turbinado el sistema mantiene la seguridad para avenidas de caudal máximo instantáneo igual o inferior a $3500 \text{ m}^3/\text{s}$.

En resumen la seguridad del sistema ante avenidas para un volumen límite de 245 hm^3 es de $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ de caudal máximo instantáneo, aumentando hasta los $3500 \text{ m}^3/\text{s}$ si al inicio de la avenida el volumen de los embalses menores de la cuenca es el correspondiente al de su cota mínima de turbinado.

Para un volumen límite en Jablanica igual a 200 hm^3 los resultados obtenidos son los que se exponen en las gráficas siguientes.

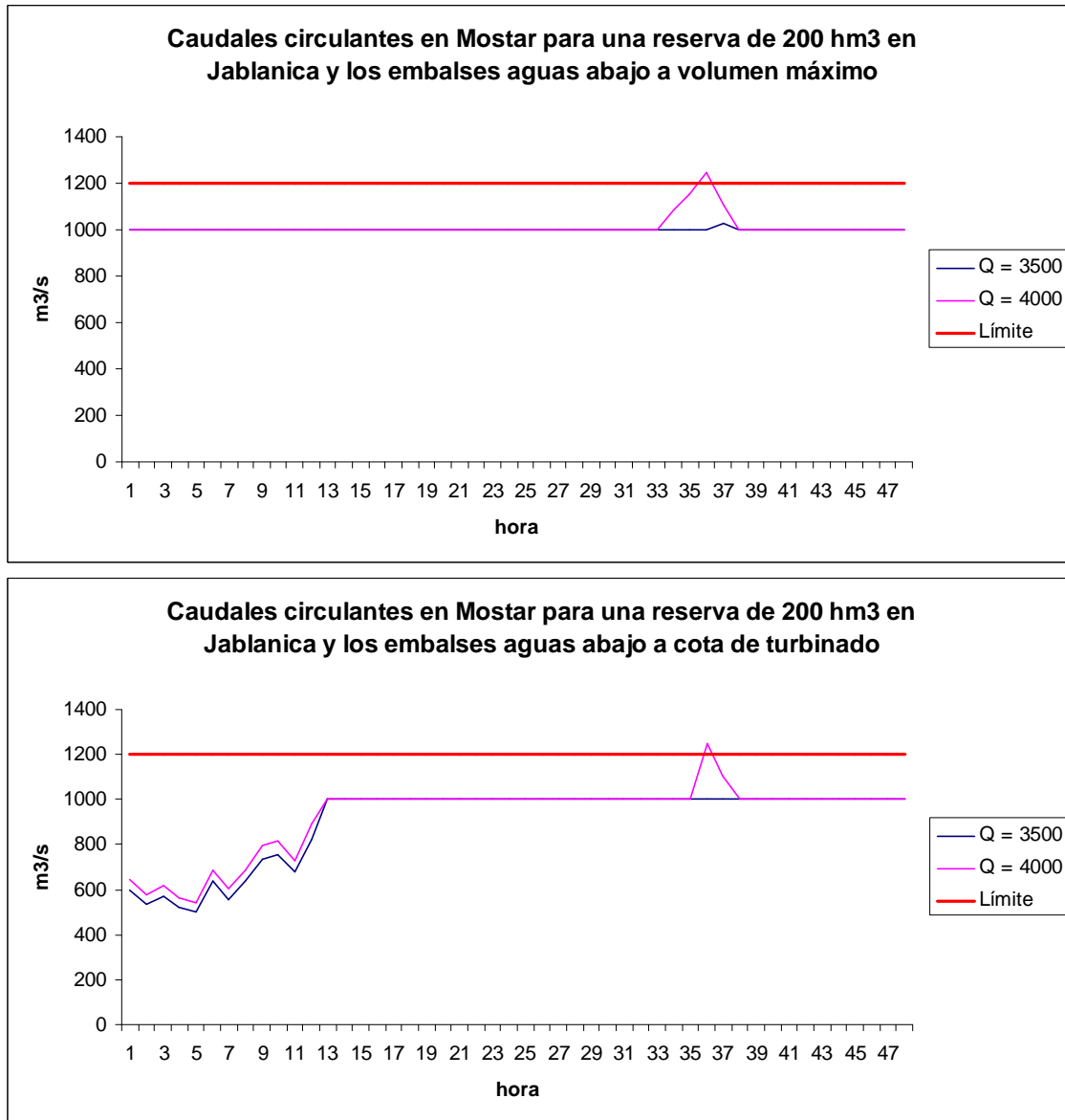


Figura 8.10: Caudales circulantes en Mostar para cada avenida considerada en el caso de establecer en el embalse de Jablanica un volumen límite de 200 hm³.

En este caso la seguridad del sistema ante avenidas es la misma para los dos posibles volúmenes iniciales establecidos en los embalses situados aguas abajo de Jablanica. Tanto si se encuentran a volumen máximo como si se encuentran a cota mínima de turbinado la seguridad del sistema frente a avenidas se consigue para avenidas cuyo caudal máximo instantáneo sea igual o inferior a 3500 m³/s.

Puede afirmarse que la seguridad del sistema frente a avenidas en el caso de que el volumen límite establecido en Jablanica sea de 200 hm³ se mantiene para avenidas de caudal máximo instantáneo igual o inferior a 3500 m³/s.

Los resultados que se han obtenido para el caso en el que el volumen límite de Jablanica sea igual a 150 hm³ son los que pueden observarse en las siguientes gráficas.

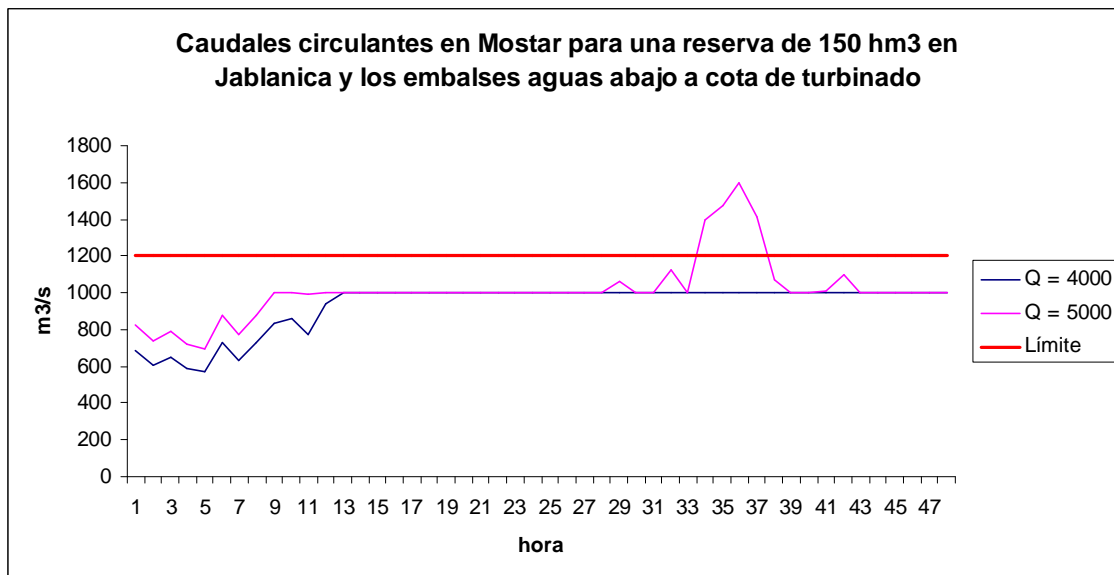
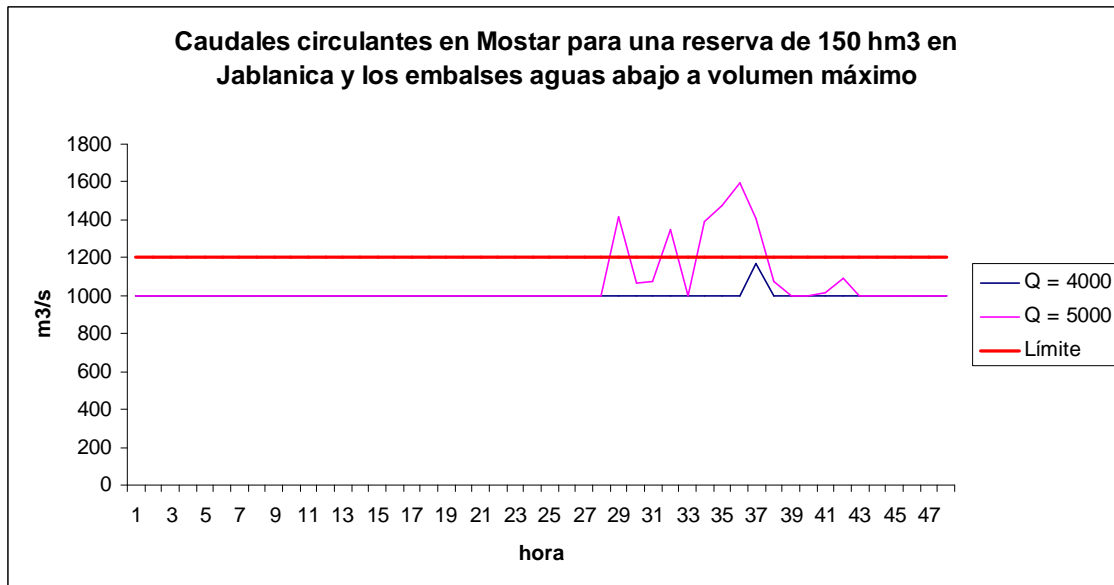


Figura 8.11: Caudales circulantes en Mostar para cada avenida considerada en el caso de establecer en el embalse de Jablanica un volumen límite de 150 hm³.

En este caso la seguridad frente a avenidas del sistema aumenta algo más. En ambos casos, independientemente de la cota de los embalses menores del sistema al inicio de la avenida, la seguridad del sistema queda garantizada para avenidas cuyo caudal máximo instantáneo sea igual o inferior a 4000 m³/s.

Por lo tanto la seguridad del sistema frente a avenidas en el caso en el que volumen límite en Jablanica sea igual a 150 hm³ se consigue para avenidas cuyo caudal máximo instantáneo sea igual o inferior a 4000 m³/s.

Los resultados correspondientes a un volumen límite de Jablanica igual a 100 hm³ son los expuestos a continuación.

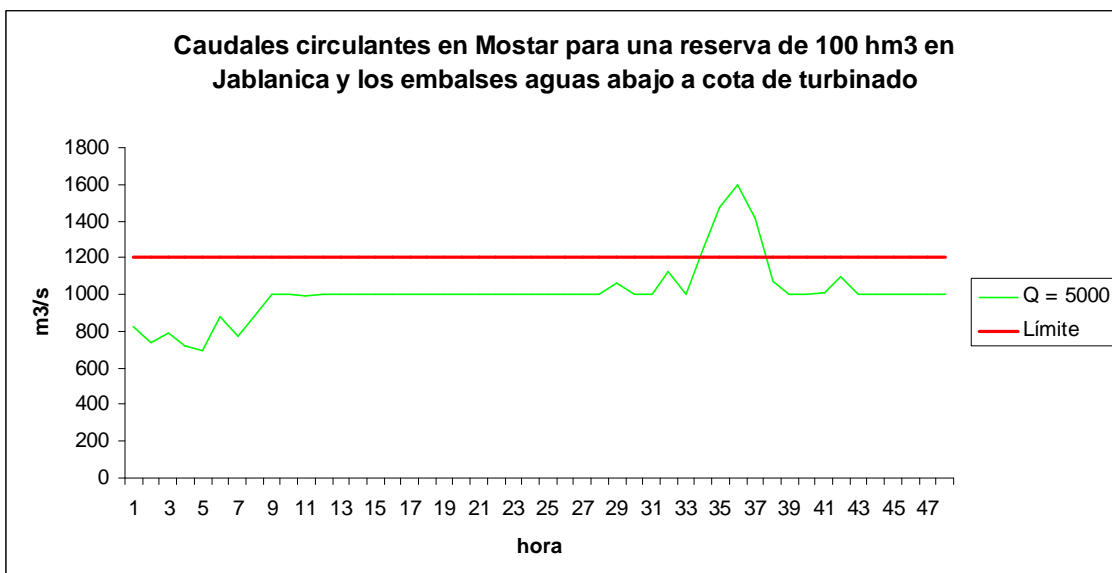
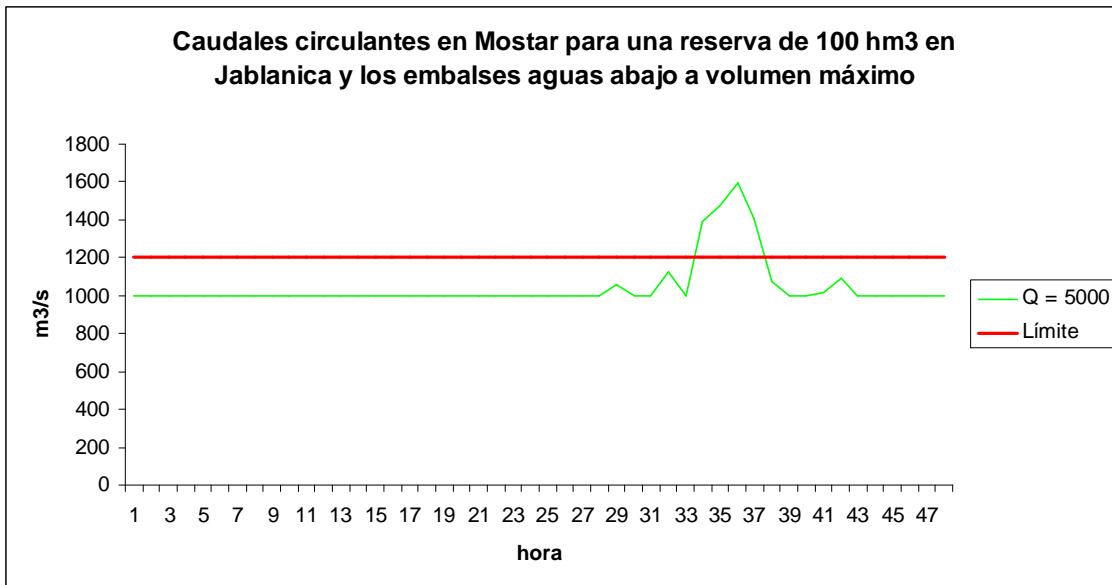


Figura 8.12: Caudales circulantes en Mostar para cada avenida considerada en el caso de establecer en el embalse de Jablanica un volumen límite de 100 hm³.

La seguridad frente a avenidas del sistema es la misma que en el caso anterior. Es decir, la seguridad del sistema cuando el volumen límite de Jablanica es igual a 100 hm³ queda garantizada para avenidas de caudal máximo instantáneo igual o inferior a 4000 m³/s.

Los resultados obtenidos en este apartado pueden resumirse en la siguiente tabla.

Reserva Jablanica	Resto embalses	Caudal máximo instantáneo				
		Q = 2500	Q = 3000	Q = 3500	Q = 4000	Q = 5000
245 hm ³	llenos	1000	1000	1353	No cumple	No cumple
245 hm ³	cota turbinado	1000	1000	1156	1750	No cumple
200 hm ³	llenos	Cumple	Cumple	1025	1247	No cumple
200 hm ³	cota turbinado	Cumple	Cumple	1000	1247	No cumple
150 hm ³	llenos	Cumple	Cumple	Cumple	1166.67	1594
150 hm ³	cota turbinado	Cumple	Cumple	Cumple	1000.00	1594
100 hm ³	llenos	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	1594
100 hm ³	cota turbinado	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	1594

Tabla 8.4: Tabla resumen de las simulaciones realizadas a escala horaria

Puede observarse en la tabla como la seguridad del sistema queda garantizada en todos los casos para avenidas cuyo caudal máximo instantáneo sea igual o inferior a 3000 m³/s de caudal máximo instantáneo (3500 m³/s si los embalses menores presentan un volumen inicial correspondiente a su cota mínima de turbinado). Pasa a 3500 m³/s en caso de que el volumen límite sea igual a 200 hm³ en Jablanica. Aumenta hasta los 4000 m³/s si el volumen límite es igual a 150 hm³, valor que se mantiene para el caso de 100 hm³ de volumen límite.

En resumen los resultados mejoran los obtenidos en el análisis diario. Ello es debido a que en las aportaciones horarias la avenida empieza varias horas después del inicio de las series, lo que da tiempo al sistema a prepararse para hacer frente a la avenida. Esta razón avala la necesidad de disponer en el sistema de unos protocolos de detección y actuación frente a avenidas que permitan anticiparse adecuadamente a la misma, ya que tal y como demuestran los resultados esto tiene un efecto notable sobre la seguridad del sistema.

Conclusiones

Se han tomado en el sistema varios caudales máximos instantáneos (2500, 3000, 3500, 4000, 5000 y 6000 m³/s) y se han relacionado con los caudales diarios y horarios en la cuenca mediante el método de Fuller para los diarios y de forma directa para los horarios. Esos caudales máximos se han empleado para conseguir avenidas con sus correspondientes caudales máximos horarios o diarios, partiendo de avenidas reales sufridas por el sistema que ya se han empleado como base en anteriores análisis.

Con estas avenidas se ha simulado el sistema a escala diaria y a escala horaria, para diferentes volúmenes límite en el embalse de Jablanica y con las actuaciones frente a avenidas definidas en los análisis realizados anteriormente. De estas simulaciones se han obtenido los caudales circulantes en Mostar, que han permitido establecer la seguridad frente a avenidas del sistema, para cada volumen inicial definido en Jablanica, en términos de caudal máximo instantáneo.

De los resultados obtenidos en las simulaciones pueden establecerse las siguientes conclusiones:

- Para un volumen límite en el embalse de Jablanica igual a 245 hm^3 , el definido en los análisis anteriores, puede garantizarse la seguridad del sistema frente a avenidas de caudal máximo instantáneo igual o inferior a $3000 \text{ m}^3/\text{s}$. Dicho volumen límite puede alcanzarse mediante un desembalse previo con una duración aproximada de 3 horas.
- Reducir el volumen límite hasta un valor igual a 150 hm^3 aumenta la seguridad del sistema hasta un caudal máximo instantáneo igual a $3500 \text{ m}^3/\text{s}$. Dicho volumen límite puede alcanzarse con un desembalse previo de 2 días de duración aproximada.
- Reducir el volumen hasta 100 hm^3 aumenta la seguridad hasta $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ de caudal máximo. Dicho volumen límite puede alcanzarse mediante un desembalse previo cuya duración aproximada es de 3 días.
- Efectuar un desembalse previo en los embalses de Grabovica, Salakovac y Mostar hasta alcanzar un volumen correspondiente a su cota mínima de turbinado permite aumentar la seguridad del sistema hasta en $500 \text{ m}^3/\text{s}$ de caudal máximo instantáneo. Este desembalse previo tiene una duración aproximada de 12 horas.

Recapitulando las conclusiones, la protección del sistema frente a avenidas que se alcanza con un volumen límite en el embalse de Jablanica igual a 245 hm^3 es de $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ de caudal máximo instantáneo. Puede aumentarse la protección bajando el volumen límite del embalse de Jablanica, pero esta reducción de volumen puede poner en peligro la producción hidroeléctrica. Por esta razón, antes de tomar la decisión de bajar el volumen límite por debajo de los 245 hm^3 , debe tenerse la completa seguridad de que la magnitud de la avenida prevista exige realizar semejante desembalse.

Es necesario por lo tanto establecer un sistema de predicción de avenidas que permita aproximar lo mejor posible la magnitud de las avenidas con la suficiente antelación para tomar la decisión de desembalsar y tener tiempo para el desembalse. Además debe prever con seguridad la proximidad de las avenidas, ya que si se realiza un desembalse excesivo y después no se presenta ninguna avenida se compromete la producción hidroeléctrica del sistema.

Como conclusión final, lo más adecuado en el sistema es mantener las actuaciones frente a avenidas definidas en análisis anteriores, consistentes en establecer un volumen límite en Jablanica igual a 245 hm^3 y un caudal forzado de $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ que se deberá desembalsar si el volumen en Jablanica supera este volumen límite y si el volumen en los embalses de Grabovica, Salakovac y Mostar está por encima de la cota mínima de turbinado. Estas actuaciones garantizan la seguridad frente a avenidas cuyo caudal máximo instantáneo sea igual o inferior a $3000 \text{ m}^3/\text{s}$. Es también conveniente desembalsar previamente los embalses aguas abajo de Jablanica para aumentar la seguridad del sistema. Sin embargo no es conveniente desembalsar de forma excesiva el embalse de Jablanica salvo si la magnitud de la avenida lo requiere.

Conclusiones generales sobre el sistema de explotación del río Neretva

En primer lugar se ha ensayado el sistema de explotación a escala mensual con el objetivo de analizar varias posibilidades de gestión para poder hallar la gestión de la cuenca que maximiza la producción energética sin suponer un perjuicio a la protección del sistema ante avenidas. Sobre este modelo pueden realizarse las siguientes conclusiones:

- La gestión debe realizarse principalmente desde el embalse de Jablanica, ya que es el segundo embalse en volumen y el que más aportaciones intermedias recibe.
- La regla de gestión que maximiza la demanda de energía eléctrica consiguiendo además una protección aceptable frente a avenidas consiste en lo siguiente:
 - Respecto al embalse de Rama, mantenerlo a su capacidad máxima (igual a 478 hm^3) los meses de Junio, Julio, Agosto y Septiembre; así como mantenerlo a 390 hm^3 de capacidad los restantes meses del año.
 - En lo que respecta al embalse de Jablanica, mantenerlo a su capacidad máxima (igual a 318 hm^3) los meses de Junio, Julio, Agosto y Septiembre; manteniéndolo los meses restantes a un volumen igual a 290 hm^3 .
 - En cuanto al resto de embalses del sistema, mantenerlos todo el año a su máxima capacidad posible (Grabovica a 19.8 hm^3 , Salakovac a 68 hm^3 y Mostar a 11 hm^3)

En segundo lugar se ha analizado la respuesta de la cuenca ante un episodio de avenidas, ensayado a escala diaria, con el objeto de establecer un conjunto de actuaciones que permitan garantizar la seguridad frente a avenidas del sistema. Las conclusiones establecidas de esta simulación son las siguientes:

- No es necesario tomar medida alguna si no hay prevista en los días siguientes una aportación en Jablanica superior a los $20 \text{ hm}^3/\text{día}$.
- Una vez detectado el riesgo deberá efectuarse un desembalse previo para que, el día de inicio de avenida (es decir, el primer día con una aportación superior a los $20 \text{ hm}^3/\text{día}$) el embalse de Jablanica cuente con un volumen de 245 hm^3 .
- Iniciada la avenida se deberá efectuar un desembalse desde Jablanica para establecer un caudal forzado en Mostar igual a $1000 \text{ m}^3/\text{s}$. Dicho desembalse solo deberá efectuarse cuando el volumen de Jablanica sea igual o superior a los 245 hm^3 .
- Si el embalse de Jablanica está por debajo de los 245 hm^3 no se tomará medida alguna.

Una vez realizado el análisis de la seguridad frente a avenidas se ha procedido a reformular la regla de gestión del sistema a escala diaria con el objetivo de comprobar la validez de la regla de operación definida a escala mensual y, en su caso, definir una nueva regla de operación. Del análisis pueden realizarse las siguientes conclusiones:

- Durante el periodo estival (que incluye los Meses de Junio, Julio, Agosto y Septiembre) el embalse de Jablanica debe mantenerse al máximo.
- Durante el periodo invernal (desde Octubre hasta Mayo) el embalse de Jablanica debe mantenerse con una reserva de 250 hm^3 .
- El resto de embalses se mantendrán con los volúmenes definidos en el análisis efectuado a escala mensual.

Tras el análisis de recursos a escala diaria se ha realizado un análisis de la seguridad del sistema frente a avenidas a escala horaria, con el objetivo de hallar la posible laminación de la avenida que se pueda efectuar desde los embalses de Grabovica, Salakovac y Mostar, y que no se apreciaba en el análisis a escala diaria. De este escenario pueden realizarse las siguientes conclusiones:

- Aumentar la reserva para laminación de avenidas en estos embalses hasta el máximo de espacio para laminación de avenidas disponible en ellos (igual a 24 hm^3) puede suponer entre 8 y 10 horas más de laminación de avenida.
- Es necesario definir un sistema de previsión que permita anticipar la avenida con antelación suficiente para poder efectuar un desembalse previo de Jablanica, Grabovica, Salakovac y Mostar.

Por último se ha ensayado la seguridad del sistema, en escalas diaria y horaria, empleando para ello avenidas asociadas a distintos caudales máximos instantáneos. Este análisis servirá para, una vez se disponga de datos en la cuenca para realizar un análisis estadístico de los caudales, poder determinar la seguridad del sistema en años de retorno. De estas simulaciones puede establecerse la siguiente conclusión:

- Lo más adecuado en el sistema es mantener las actuaciones frente a avenidas definidas en análisis anteriores, consistentes en establecer un volumen límite en Jablanica igual a 245 hm^3 y un caudal forzado de $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ que se deberá desembalsar si el volumen en Jablanica supera este volumen límite y si el volumen en los embalses de Grabovica, Salakovac y Mostar está por encima de la cota mínima de turbinado. Estas actuaciones garantizan la seguridad frente a avenidas cuyo caudal máximo instantáneo sea igual o inferior a $3000 \text{ m}^3/\text{s}$. Es también conveniente desembalsar previamente los embalses aguas abajo de Jablanica para aumentar la seguridad del sistema. Sin embargo no es conveniente desembalsar de forma excesiva el embalse de Jablanica salvo si la magnitud de la avenida lo requiere.