



Universidad de la República  
Facultad de Ingeniería  
Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental



# MODELACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS Y SUS PRINCIPALES USOS EN LA CUENCA DE APORTE A RINCÓN DEL BONETE

EVALUACIÓN ECONÓMICA COMPARATIVA



TRABAJO DE TESIS

MAESTRÍA EN INGENIERÍA – MECÁNICA DE LOS FLUIDOS APLICADA

Diciembre de 2011

Magdalena Crisci

Tutor: Dr. Ing. Rafael Terra



---

# AGRADECIMIENTOS

A Rafael Terra. Por su dedicación y compromiso. Por transferirme su interés en estos temas y compartir su amplia visión en lo que respecta a la gestión de los recursos hídricos del país. Por ser una gran fuente de motivación. Otra vez, gracias Rafa!

A Ruben Chaer. Por su gran disposición y su enorme ayuda en todo lo que respecta al SimSEE y al sistema eléctrico uruguayo.

A Luis Silveira. Por la libertad y el apoyo brindados para hacer esta tesis.

A la Agencia Nacional de Investigación en Innovación, por la beca otorgada para realizar la maestría.

A la Acción de Coordinación VIAGUA de CYTED, por el apoyo en la realización de esta tesis.

A mi familia. Por la infinita confianza en mí y por el inmenso cariño y afecto de siempre, motor esencial en mi camino.

A la Negra. Por su incondicional apoyo. Por estar siempre pendiente. Por simplificarme y ayudarme en lo que este a su alcance.

Al GPCC. Por el aliento y por estar siempre unido, aunque sea a distancia.

Especialmente a Gas. Por su aliento, su paciencia, su compañía y su confianza.

---



## ÍNDICE

<b>RESUMEN .....</b>	<b>3</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>7</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>11</b>
2.1. GENERALES.....	11
2.2. ESPECÍFICOS.....	11
<b>3. INFORMACIÓN UTILIZADA .....</b>	<b>13</b>
3.1. INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.....	13
3.2. INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA .....	13
3.2.1. Precipitación .....	13
3.2.2. Caudal.....	15
3.2.3. Evapotranspiración potencial .....	16
3.2.4. Evaporación Tanque A.....	16
3.2.5. Agua disponible del suelo .....	17
3.3. EMBALSES EXISTENTES .....	17
3.4. SUPERFICIE FORESTADA .....	19
<b>4. MODELACIÓN HIDROLÓGICA.....</b>	<b>21</b>
4.1. METODOLOGÍA.....	22
4.1.1. Caudal natural.....	23
4.1.2. Caudal afectado.....	29
4.1.3. Déficit de caudal.....	43
4.2. RESULTADOS .....	44
4.2.1. Caudal natural.....	44
4.2.2. Déficit de caudal.....	47
4.2.3. Comparación arroz - forestación .....	56
<b>5. PARAMETRIZACIONES DEL DÉFICIT DE CAUDAL.....</b>	<b>59</b>
5.1. RIEGO DE ARROZ .....	60
5.2. FORESTACIÓN .....	66
<b>6. MODELACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO .....</b>	<b>69</b>
6.1. MODELO SIMSEE .....	69
6.1.1. Generación de series sintéticas .....	71

6.2.	ESCENARIO ENERGÉTICO .....	72
6.2.1.	Demanda .....	72
6.2.2.	Generación .....	73
6.3.	OPTIMIZACIÓN .....	75
6.4.	SIMULACIÓN.....	77
<b>7.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>79</b>
7.1.	ARROZ – ENERGÍA.....	79
7.1.1.	Ciclo anual medio .....	80
7.1.2.	Acumulados anuales .....	83
7.2.	FORESTACIÓN – ENERGÍA.....	91
7.2.1.	Ciclo anual medio .....	92
7.2.2.	Acumulados anuales .....	95
7.3.	ARROZ – FORESTACIÓN – ENERGÍA.....	101
<b>8.</b>	<b>SÍNTESIS Y CONCLUSIONES .....</b>	<b>107</b>
8.1.	ARROZ – ENERGÍA .....	107
8.2.	FORESTACIÓN – ENERGÍA.....	111
8.3.	ARROZ – FORESTACIÓN – ENERGÍA.....	114
8.4.	COMENTARIOS FINALES Y LÍNEAS A FUTURO .....	116
<b>9.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>117</b>

# RESUMEN





# RESUMEN

La cuenca alta del río Negro ocupa aproximadamente una superficie de 40.000 km<sup>2</sup>, existiendo en su cierre la represa hidroeléctrica Gabriel Terra, aguas abajo de la cual se localizan consecutivamente las represas hidroeléctricas de Baygorria y Constitución. Este sistema conformado por las 3 represas hidroeléctricas del río Negro constituye, a la fecha, el 24% de la potencia total instalada del país y el 35% de la energía eléctrica total generada en el mismo.

Asimismo, existe dentro de la cuenca una demanda creciente de agua para el riego del cultivo de arroz, materializada en un gran número de embalses individuales, con un volumen total comprometido en la actualidad de aproximadamente 1000 Hm<sup>3</sup>. Dicho volumen se encuentra actualmente limitado (en 1000 Hm<sup>3</sup>) por el Decreto 160/980 y posteriores modificativos, condicionando con ello el potencial de expansión del sector arrocero en la región.

Por otro lado, la cuenca cuenta con un importante porcentaje de suelos de prioridad forestal (40%) en los cuales, a partir de la promulgación de la Ley Forestal N° 15.939 del año 1987, el área forestada ha aumentando exponencialmente año a año, alcanzando en la actualidad una superficie de aproximadamente 400.000 ha. Este cambio en el uso del suelo, de pasturas naturales a bosques forestales, genera una reducción en el escurrimiento, debido a que los árboles interceptan más precipitación y transpiran más agua que las pasturas naturales (Bosch, J.M. y Hewlett, J.D., 1982; Calder, 1992, 2005).

El aumento de la demanda de agua como consecuencia de nuevos escenarios de producción agrícola y forestal dentro de la cuenca y el aumento de la demanda de energía eléctrica que se viene registrando en los últimos años, ponen de manifiesto la necesidad de realizar estudios técnicos que permitan generar las herramientas necesarias para gestionar adecuadamente los recursos hídricos en la cuenca del río Negro.

En vistas a dicha necesidad, se planteó como objetivo del presente estudio, la conjunción y acople de herramientas de modelación hidrológica y simulación del sistema eléctrico que permitan realizar, entre otras cosas, un análisis económico comparativo de los principales usos del agua en la cuenca (agrícolas y energéticos). En particular se planteó estimar el impacto económico sobre el sector energético dado por:

- El déficit de caudal de aporte a la represa Gabriel Terra como consecuencia de la presencia de embalses para el riego del cultivo de arroz dentro de la cuenca, considerando distintos escenarios de expansión del cultivo.

- El déficit de caudal de aporte a la represa Gabriel Terra como consecuencia de la presencia de cobertura forestal dentro de la cuenca, para diferentes escenarios de expansión de la forestación.

La modelación hidrológica tuvo como objetivo simular el déficit de caudal de aporte a la represa Gabriel Terra dado por los diferentes escenarios de demanda de agua considerados dentro de la cuenca. Para ello fue implementado un modelo hidrológico conceptual de paso mensual (modelo de Temez), al que se le incorporaron las demandas de agua de los diferentes escenarios en forma independiente:

- La demanda de agua correspondiente al riego de arroz fue representada incorporando el efecto de cada uno de los embalses de riego existentes en la cuenca de aporte a la represa Gabriel Terra con sus características geográficas y geométricas.
- La demanda de agua correspondiente a la forestación fue modelada a través de tres metodologías diferentes, utilizando resultados obtenidos a nivel nacional (Silveira, L. y Alonso J., 2009) así como metodologías desarrolladas a nivel internacional (Zhang, L. et. al., 1999), con el objetivo adicional de comparar los resultados obtenidos por las mismas.

A partir de las series de déficit de caudal de aporte a la represa Gabriel Terra obtenidas se construyeron parametrizaciones de dicho déficit en función del caudal observado en la represa Gabriel Terra. Dichas parametrizaciones permitieron obtener el caudal de aporte a la represa Gabriel Terra correspondiente a los diferentes escenarios de demanda de agua considerados dentro de la cuenca, a partir de la serie de caudales observados en el período 1909 – 1980, considerada como natural.

Las series de caudal de aporte así obtenidas fueron utilizadas para realizar la optimización y la simulación del sistema de energía eléctrica del país, con el objetivo de estimar el **incremento en el costo directo** de suministrar la demanda de energía eléctrica, como consecuencia del **déficit de caudal** de aporte a la represa Gabriel Terra dado por los diferentes escenarios de demanda de agua considerados dentro de la cuenca.

El modelo utilizado para optimizar y simular el sistema eléctrico fue el SimSEE, desarrollado por el Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería (Universidad de la República). El escenario energético (parque de generación y demanda eléctrica) considerado correspondió al proyectado para el año 2015.

Los resultados obtenidos para los escenarios de demanda de agua correspondientes al riego de arroz y a la forestación al año 2015, arrojaron en términos medios, un

incremento del costo directo anual del sistema eléctrico de 10.7 y de 11.6 millones de dólares, respectivamente.

En lo que respecta al incremento de costo directo anual medio para los diferentes escenarios de expansión considerados, el mismo presentó un comportamiento prácticamente lineal respecto a la reducción del caudal de aporte a la represa Gabriel Terra. Para los escenarios de riego de arroz, el aumento relativo de los costos directos resultó de casi un 50% de la reducción relativa del caudal de aporte, mientras que para los escenarios de forestación, la señal de los costos directos resultó de un 30% aproximadamente de la señal en el caudal de aporte.

Las distribuciones de probabilidad de dichos incrementos de costos demostraron que al aumentar la cantidad de embalses de riego de arroz o la superficie de cobertura forestal, aumenta la dispersión de dicho incremento así como la frecuencia de valores más elevados.

Sin embargo, al normalizar el incremento del costo directo anual por la superficie de arroz sembrada o por la superficie forestada para los diferentes escenarios, se obtuvo para ambos casos, que la distribución de probabilidades del incremento de costo directo por hectárea sembrada es muy similar al aumentar el escenario de expansión, sobre todo en lo que respecta a los valores de mayor frecuencia. Dichos valores resultaron de 150 USD/ha para el riego del cultivo de arroz y de 18 USD/ha para la forestación. El hecho de que el valor unitario del agua no varíe sustancialmente al aumentar el escenario de expansión, tanto para el arroz como para la forestación, es favorable desde el punto de vista de eventuales medidas de gestión de los recursos hídricos en la cuenca.

Por último, si se tiene en cuenta el porcentaje de área de cuenca aprovechada por los diferentes escenarios de demanda de agua considerados, siendo ésta la sumatoria de las subcuencas de aporte a todos los embalses de riego para los escenarios de riego de arroz y la superficie forestada para los escenarios de forestación, se obtiene que a igual porcentaje de cuenca aprovechada, los embalses de riego de arroz generan un mayor impacto económico respecto a la forestación.



# 1. INTRODUCCIÓN

---





# 1. INTRODUCCIÓN

La cuenca alta del río Negro ocupa aproximadamente una superficie de 40.000 km<sup>2</sup>, existiendo en su cierre la represa hidroeléctrica Gabriel Terra (en adelante G. Terra), aguas abajo de la cual se localizan consecutivamente las represas hidroeléctricas de Baygorria y Constitución. Este sistema conformado por las 3 represas hidroeléctricas del río Negro constituye, a la fecha, el 24% de la potencia total instalada del país y el 35%<sup>1</sup> de la energía eléctrica total generada en el mismo. En la Tabla siguiente se presentan las características de dichas represas, en la que puede observarse que la represa G. Terra es la que tiene mayor capacidad de regulación.

**Tabla 1-1: Sistema hidroeléctrico del río Negro**

Central	Potencia instalada (MW)	Volumen máximo (Hm <sup>3</sup> )
Gabriel Terra	155	8800
Baygorria	108	570
Constitución	333	2854

Asimismo, existe dentro de la cuenca una demanda creciente de agua para el riego del cultivo de arroz, materializada en un gran número de embalses individuales (Cuadro 1-1), con un volumen total comprometido en la actualidad de aproximadamente 1000 Hm<sup>3</sup>. Dicho volumen se encuentra actualmente limitado (en 1000 Hm<sup>3</sup>) por el Decreto 160/980 y posteriores modificativos<sup>2</sup>, condicionando con ello el potencial de expansión del sector arrocero.

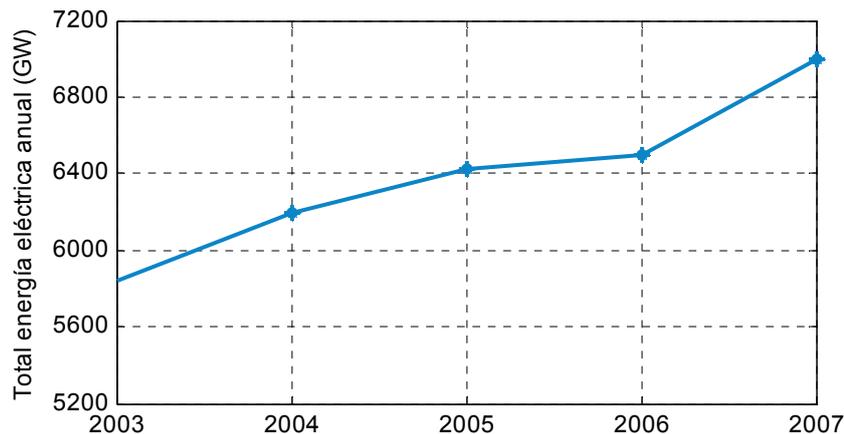
Por otro lado, la cuenca cuenta con un importante porcentaje de suelos de prioridad forestal (40%) en los cuales, a partir de la promulgación de la Ley Forestal N° 15.939 del año 1987, el área forestada ha aumentando exponencialmente año a año (Cuadro 1-2), alcanzando en la actualidad una superficie de aproximadamente 400.000 ha. Este cambio en el uso del suelo, de pasturas naturales a bosques forestales, genera una reducción en el escurrimiento aguas abajo, debido a que los árboles interceptan más precipitación y transpiran más agua que las pasturas naturales (Bosch, J.M. y Hewlett, J.D., 1982; Calder, 1992, 2005).

<sup>1</sup> Promedio en el período 2000-2010 según datos publicados por la Dirección Nacional de Energía.

<sup>2</sup> El Decreto 160/980 del año 1980 limitaba la extracción de tomas directas en la cuenca del río Negro en 20.000 l/s. El mismo fue ampliado en el año 1998 (Decreto N° 212/998) estableciéndose como segunda limitante un volumen máximo a retener en los embalses de riego de 700 Hm<sup>3</sup>. Finalmente, tras la presión del sector arrocero, en el año 2010 fue realizada una nueva modificación, ampliando el límite del volumen máximo de almacenamiento a 1000 Hm<sup>3</sup>.

El aumento de la demanda de agua como consecuencia de nuevos escenarios de producción agrícola y forestal dentro de la cuenca y el aumento de la demanda de energía eléctrica que se viene registrando en los últimos años (Figura 1-1), ponen de manifiesto la necesidad de realizar estudios técnicos que permitan generar las herramientas necesarias para gestionar adecuadamente los recursos hídricos en la cuenca del río Negro.

**Figura 1-1: Evolución de la demanda de energía eléctrica del país 2003-2007**



Al respecto, cabe mencionar que la Resolución 26/011 del Ministerio de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (en adelante MVOTMA) considera, entre otras cosas, que:

- “Es necesario **rever el Decreto 160/980 a los efectos de compatibilizar las competencias de la Autoridad de Agua** de acuerdo a las Políticas de Agua establecidas en la Ley N° 18.610.”
- “Resulta necesario **establecer criterios técnicos para regular el otorgamiento de permisos y concesiones**, según los casos, vinculados a la extracción de aguas públicas con destino a riego y otros usos privativos.”
- “Se estima conveniente disponer de un ámbito de coordinación interministerial que permita discutir y **acordar políticas de planificación y gestión para la Cuenca estratégica del Río Negro, asegurando el manejo integrado de los recursos hídricos.**”

### Cuadro 1-1 El arroz en Uruguay y su demanda de agua

El arroz es plantado en Uruguay desde inicios del siglo XX, abarcando una superficie sembrada de 162.000 hectáreas y una producción de aproximadamente 1.15 millones de toneladas en la zafra 09/10 (ACA, 2011). Dicha producción constituye el 4% del arroz que se comercializa en el mundo, ocupando el sexto lugar como país exportador.

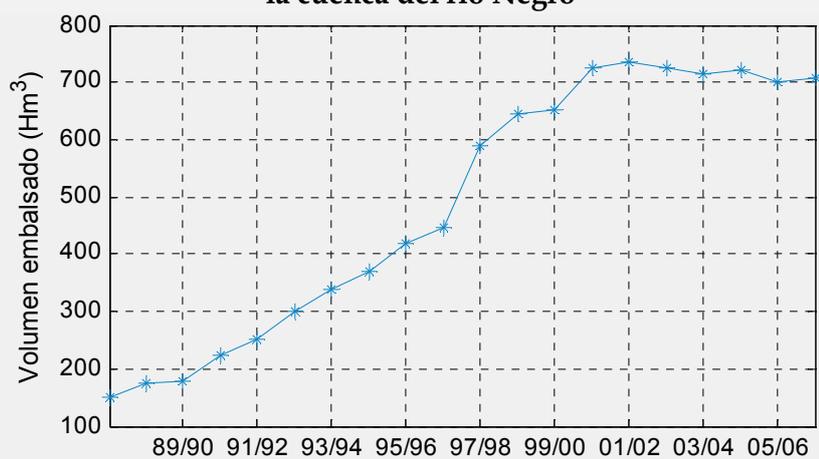
Tradicionalmente el área sembrada se ha localizado en la región este del país. Sin embargo, en la última década la expansión del cultivo abarcó las zonas norte y centro. La zona centro, correspondiente a la cuenca del río Negro, aporta un 24% de la superficie total sembrada en el país. Los rendimientos alcanzados en el país se han ubicado en las últimas zafras entre 7 y 8 toneladas de arroz por hectárea.

En Uruguay la totalidad del arroz se cultiva bajo riego por inundación, siendo la dotación de agua utilizada de aproximadamente 14.000 m<sup>3</sup>/ha, con variantes por región. El agua utilizada para ello en la cuenca alta del río Negro se almacena en un 77% en represas construidas para dicho fin. En líneas generales la temporada de riego comienza en noviembre y finaliza en febrero, acompañando el ciclo del cultivo. Generalmente el agua de riego se distribuye equitativamente durante estos 4 meses.

Debido a que la mayoría del riego del cultivo se realiza a través de embalses que deben ser registrados y autorizados por la Dirección Nacional de Aguas, la demanda de agua del sector arrocero es fácilmente cuantificable.

A continuación se presenta la evolución del volumen de agua embalsada para riego de arroz en la cuenca del río Negro en el período 1987-2007.

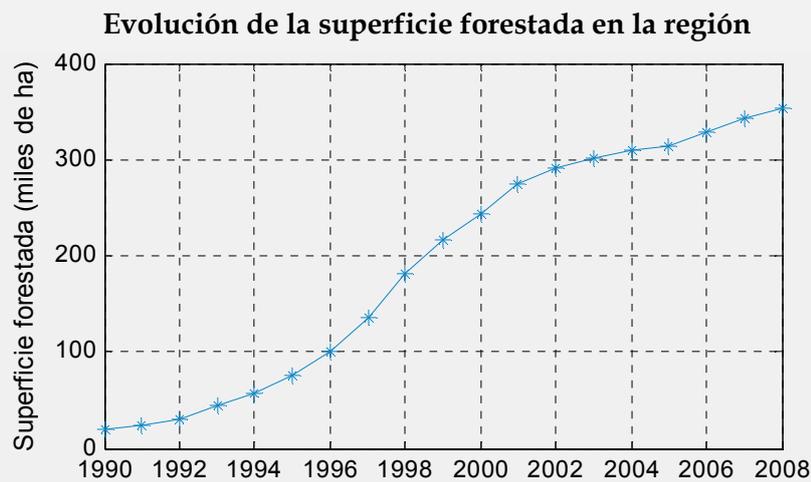
**Evolución del volumen embalsado para el riego de arroz en la cuenca del río Negro**



Fuente: Dirección Nacional de Hidrografía (2007)

### Cuadro 1-2 La forestación en Uruguay y su demanda de agua

La forestación industrial se desarrolla en Uruguay a partir de la promulgación de la "Ley Forestal N° 15.939, en diciembre de 1987. Desde entonces el área plantada, principalmente *Eucalyptus* y *Pinus*, en sustitución de pasturas naturales, ha aumentado exponencialmente, alcanzando una superficie total de 1 millón de hectáreas en el año 2009, de las cuales cerca de un 40% se encuentran en la cuenca del río Negro.



Fuente: Dirección General Forestal (2011)

Debido a que los suelos de prioridad forestal abarcan una extensión de 3.6 millones de hectáreas, se espera que la superficie plantada continúe creciendo en los próximos años.

El cambio de uso del suelo, de pasturas naturales a bosques forestales, supone una reducción en el escurrimiento aguas abajo, debido principalmente a los siguientes procesos hidrológicos:

- Intercepción de la precipitación. Una parte del agua que precipita sobre los bosques forestales, es retenida por las copas y troncos de los árboles (intercepción del dosel) para luego ser reintegrada a la atmósfera por evaporación. Existe así, una reducción de la precipitación que efectivamente llega al suelo y participa del balance de agua en el mismo.
- Transpiración incremental respecto a las pasturas naturales, como consecuencia de una mayor profundidad de exploración radicular de los árboles.

Dicha reducción del escurrimiento supone una demanda de agua que no es fácilmente cuantificable (a diferencia del riego de arroz).

Por su parte, la Universidad de la República, a través de las Facultades de Ingeniería y Agronomía, cuenta con un programa de investigación y monitoreo, a partir del cual se van obteniendo algunos resultados. Sin embargo, aún existen grandes incertidumbres respecto a la cuantificación de los efectos de la forestación en el ciclo hidrológico.

## 2. OBJETIVOS

---



## 2. OBJETIVOS

A continuación se presentan los objetivos generales y específicos planteados en la presente tesis de maestría.

### 2.1. GENERALES

En vistas a la necesidad de generar herramientas de gestión y planificación de los recursos hídricos en la cuenca del río Negro, se planteó como objetivo del presente estudio, la conjunción y acople de herramientas de modelación hidrológica y simulación del sistema eléctrico que permitan realizar, entre otras cosas, un análisis económico comparativo de los principales usos del agua en la cuenca (agrícolas y energéticos).

En particular se planteó estimar el impacto económico sobre el sector energético dado por:

- El déficit de caudal de aporte a la represa Gabriel Terra como consecuencia de la presencia de embalses para el riego del cultivo de arroz dentro de la cuenca, considerando distintos escenarios de expansión del cultivo.
- El déficit de caudal de aporte a la represa Gabriel Terra como consecuencia de la presencia de cobertura forestal dentro de la cuenca, para diferentes escenarios de expansión de la forestación.

### 2.2. ESPECÍFICOS

Para cumplir con los objetivos generales, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Modelar hidrológicamente el déficit de caudal de aporte a la represa G. Terra dado por diferentes escenarios de demanda de agua dentro de la cuenca, correspondientes al riego del cultivo de arroz y a la forestación, en forma independiente.
- Construir, a partir de las salidas de la modelación hidrológica, parametrizaciones del déficit de caudal de aporte a la represa G. Terra en función del caudal observado en la misma, para los diferentes escenarios de demanda de agua considerados dentro de la cuenca.

- Simular, utilizando el Simulador de Sistemas de Energía Eléctrica SimSEE, el impacto económico en el sector energético del país dado por los diferentes escenarios de demanda de agua considerados dentro de la cuenca de aporte a la represa G. Terra, para el escenario energético (parque de generación y demanda eléctrica) proyectado al año 2015.
- Analizar, interpretar y discutir los resultados obtenidos respecto al impacto económico en el sector energético, en términos medios y en función de la variabilidad del caudal de aporte en la represa G. Terra:
  - ⇒ Comparando los diferentes escenarios de demanda de agua considerados dentro de la cuenca.
  - ⇒ Contrastándolos con la producción de arroz y con la superficie forestada asociada a dicho impacto.

# 3. INFORMACIÓN UTILIZADA

---



## 3. INFORMACIÓN UTILIZADA

A continuación se describe la información geográfica, hidrometeorológica, de demanda de agua y de superficie forestada de la cuenca alta del río Negro utilizada para el desarrollo del presente estudio, así como una breve descripción de la misma.

### 3.1. INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Se contó con la siguiente información geográfica de la cuenca alta del río Negro con cierre en la represa G. Terra, a partir de la cual se generó un sistema de información geográfica que se utilizó como plataforma de trabajo para la realización de los cálculos de superficie, de agrupamiento y el trazado de cuencas:

- Límites departamentales.
- Modelo Digital de Elevaciones del SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 90 x 90 m.
- Cursos y cuerpos de agua.
- Estaciones pluviométricas con influencia en la cuenca.
- Estaciones meteorológicas con influencia en la cuenca.
- Embalses existentes en la cuenca al año 2007.
- Carta de reconocimiento del Uruguay a escala 1:1.000.000.

### 3.2. INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA

A continuación se presenta la información utilizada en lo que respecta a precipitación, caudal, evapotranspiración potencial, evaporación en tanque y agua disponible en el suelo de la cuenca alta del río Negro.

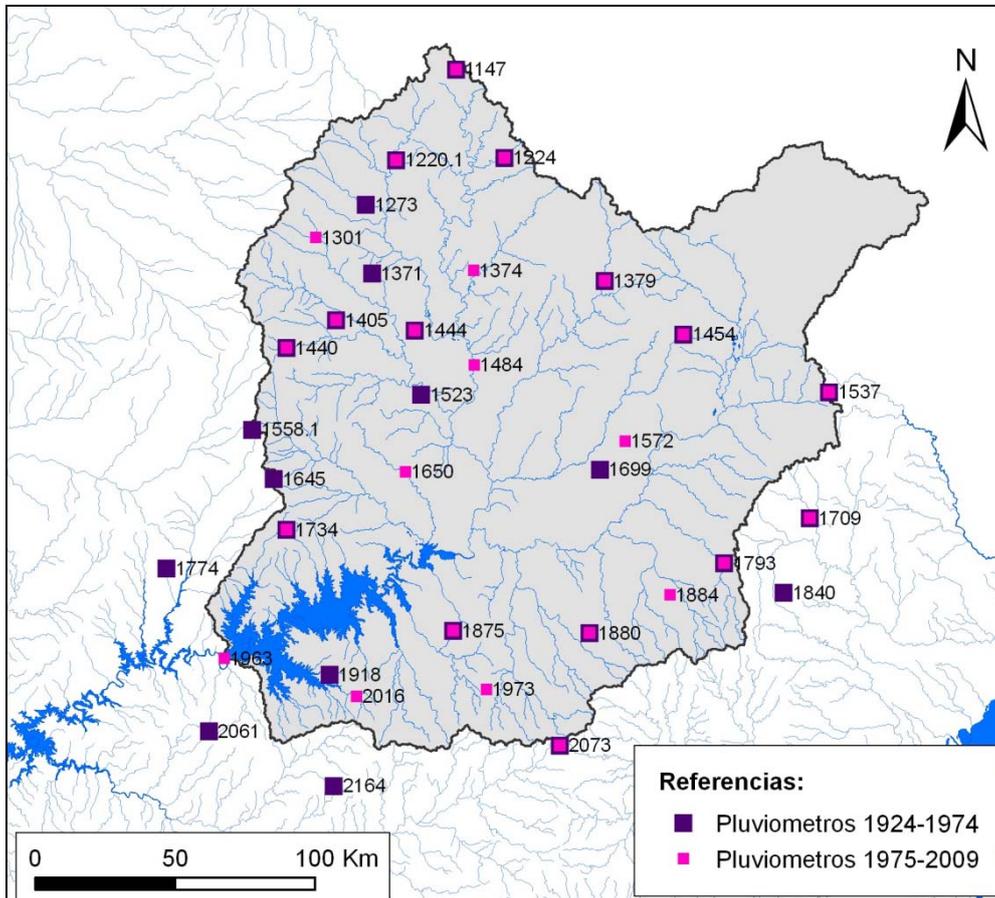
#### 3.2.1. Precipitación

Se dispuso de información pluviométrica mensual de un total de 38 pluviómetros de influencia en la cuenca de aporte a la represa G. Terra pertenecientes a la DNM y a UTE, con período de registro variable entre 1914 y 2009.

En función de la variabilidad del período de registro, se identificaron dos períodos con información pluviométrica homogénea: 1924 - 1974 y 1975 - 2009.

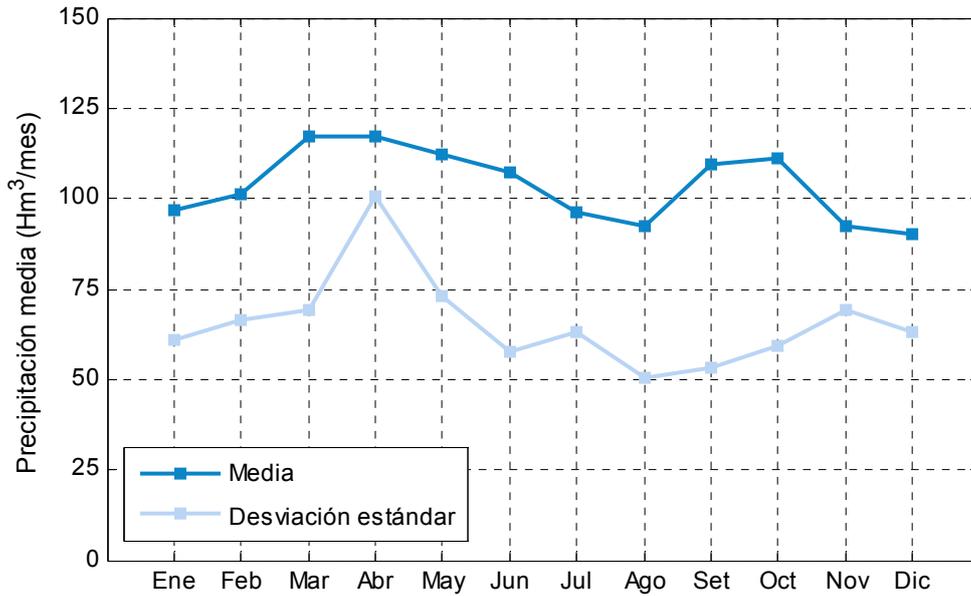
Una vez realizado un análisis de consistencia de los registros de los diferentes pluviómetros en cada período, se seleccionaron para la realización de este trabajo los pluviómetros que se presentan en la figura siguiente para los dos períodos identificados.

**Figura 3-1: Pluviómetros con datos disponibles en la cuenca**



La precipitación media anual en la cuenca es 1240 mm con una desviación estándar del 23%, caracterizándose por una alta variabilidad interanual. En la Figura 3-2 se presenta el ciclo anual mensual de la precipitación media en la cuenca, en donde se refleja dicha variabilidad interanual a través de la desviación estándar.

**Figura 3-2 Ciclo anual de la precipitación media en la cuenca – Período 1924-2009**

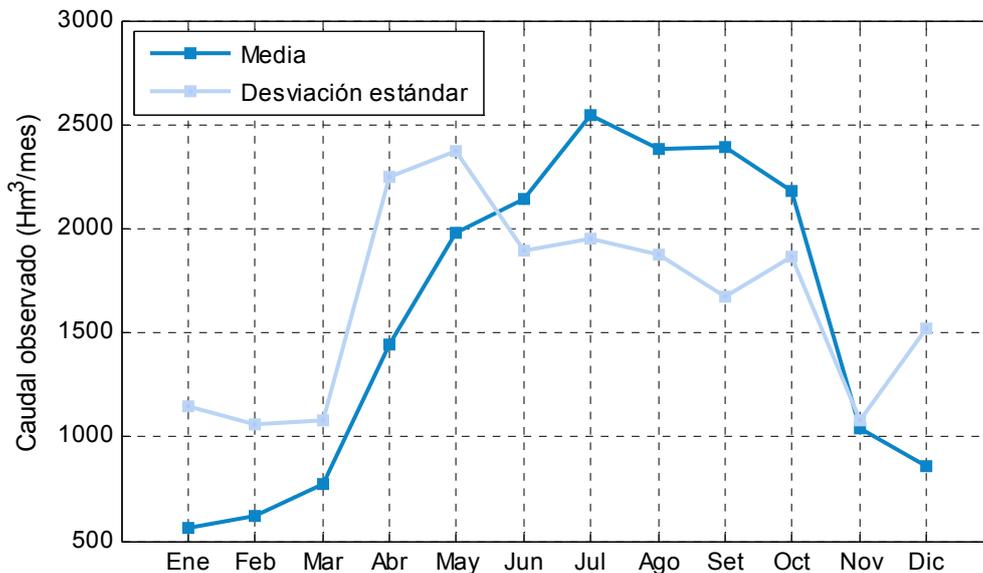


### 3.2.2. Caudal

Se contó con datos de caudal instantáneo medio semanal de aporte a la Represa G. Terra en el período 1909 - 2009, registrados por UTE.

El caudal medio anual de aporte a la represa G. Terra en dicho período es de 18.900 Hm³/año, con una desviación estándar del 54%. A continuación se presenta el ciclo anual mensual del caudal en dicho período, en el cual también se observa una alta variabilidad interanual, producto de la alta variabilidad interanual de la precipitación.

**Figura 3-3 Ciclo anual mensual del caudal de aporte a la represa G. Terra**



### 3.2.3. Evapotranspiración potencial

Fue utilizada la información de las curvas de evapotranspiración potencial media anual mensual del Uruguay calibradas a través del modelo de Penmann sobre la estación de “La Estanzuela”. A partir de las mismas se obtuvo un valor medio para la cuenca de estudio de evapotranspiración potencial media anual mensual de 100 mm/mes.

Para transformar dicho valor medio mensual en un ciclo anual medio de evapotranspiración potencial se lo multiplica por los coeficientes de distribución del ciclo anual medio calibrados para el Uruguay (Tabla 3-1).

**Tabla 3-1: Coeficientes del ciclo anual medio de evapotranspiración potencial (ETPi/ETPm)**

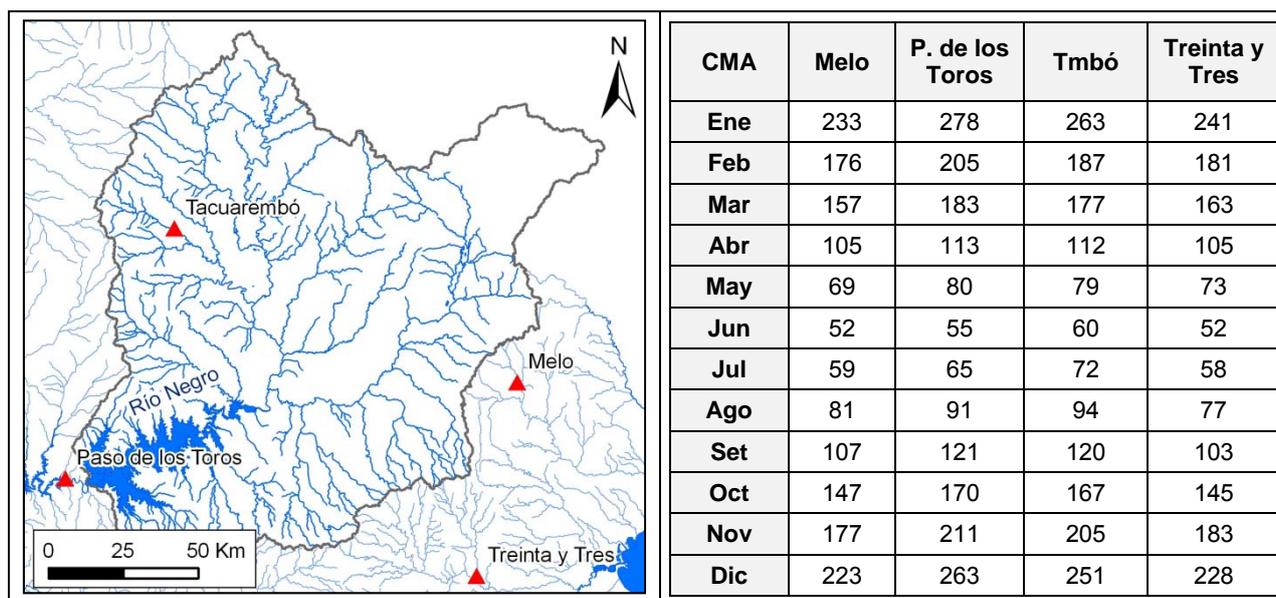
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
1,88	1,56	1,37	0,88	0,58	0,36	0,37	0,47	0,61	0,94	1,25	1,72

Fuente: “Balances Hídricos Superficiales en Cuencas del Uruguay”.

### 3.2.4. Evaporación Tanque A

Se dispuso de datos mensuales de Tanque A registrados en las estaciones meteorológicas de Melo, Paso de los Toros, Tacuarembó y Treinta y Tres en el período 1960-2000, pertenecientes a la Dirección Nacional de Meteorología. En la figura siguiente se presenta el ciclo anual correspondiente a cada estación.

**Figura 3-4: Evaporación en Tanque A (mm/mes) - Estaciones meteorológicas con datos disponibles**

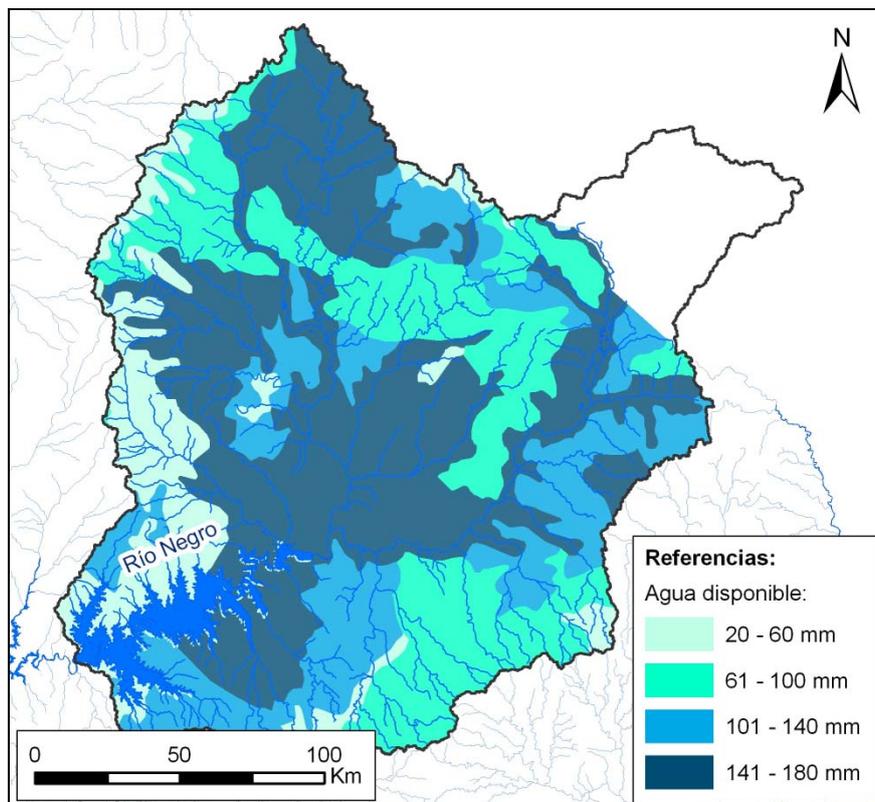


### 3.2.5. Agua disponible del suelo

Se dispuso de la información del Compendio Actualizado de Información de Suelos del Uruguay (CAISU) escala 1:1.000.000 publicado por el MGAP, RENARE, División Suelos y Aguas, versión digital.

De acuerdo a la misma, existen en la cuenca 41 unidades de suelos con diferentes valores de agua disponible. En la figura siguiente se presenta la distribución espacial del agua disponible, agregada en 4 clases.

Figura 3-5 Agua disponible de los suelos presentes en la cuenca

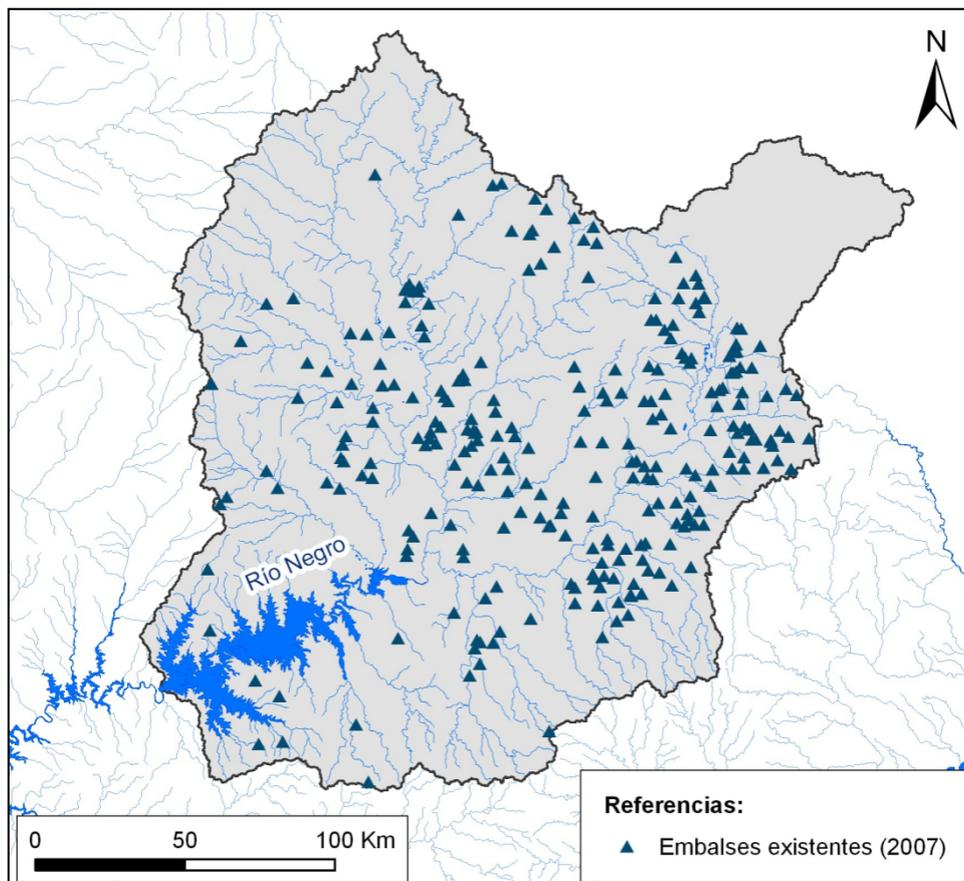


### 3.3. EMBALSES EXISTENTES

Se recabaron los datos de los embalses registrados en la Dirección Nacional de Hidrografía en el año 2007 (Figura 3-6) con la siguiente información:

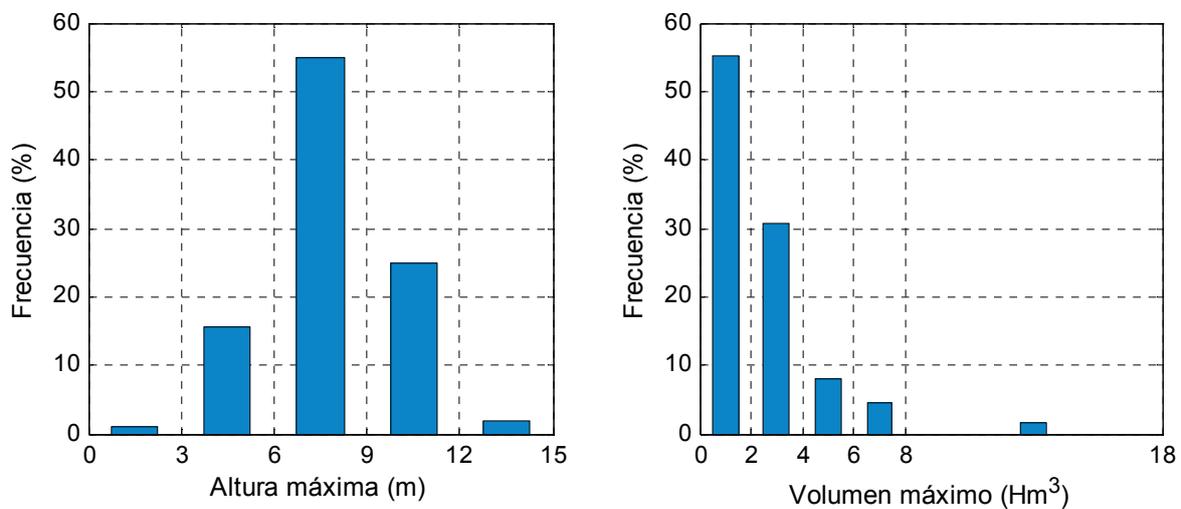
- Localización (coordenadas X,Y).
- Área de la cuenca de aporte.
- Altura máxima del embalse.
- Volumen máximo almacenado en el embalse.
- Destino del agua embalsada.

**Figura 3-6 Embalses en la cuenca de Rincón del Bonete registrados en el año 2007**



En la Figura 3-7 se presenta la distribución de altura y volumen máximo de dichos embalses, siendo el volumen total embalsado al año 2007 de 638.4 Hm<sup>3</sup>. El destino del agua almacenada corresponde en la gran mayoría de los casos al riego del cultivo de arroz.

**Figura 3-7: Distribución de la altura y volumen máximo de los embalses existentes en la cuenca en el año 2007**



### 3.4. SUPERFICIE FORESTADA

Se utilizaron los datos de superficie forestada por departamento en los años 2007 y 2008 (Tabla 3-2), obtenidos de la Dirección General Forestal del Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca (MGAP).

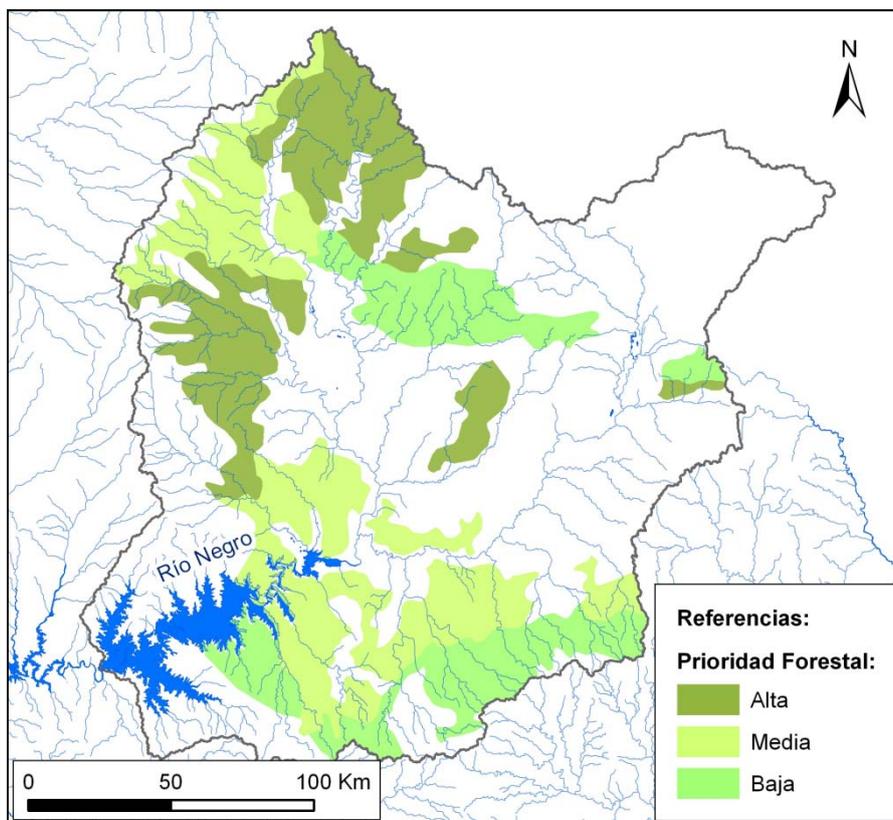
**Tabla 3-2: Superficie forestada (miles de ha) por departamento**

Departamento	2007	2008
Cerro Largo	34,3	38,9
Durazno	41,9	44,9
Rivera	151,5	154,6
Tacuarembó	114,5	115,4
<b>Total</b>	<b>342.2</b>	<b>353.9</b>

Fuente: Dirección General Forestal (MGAP)

Por otro lado, se contó con la información geográfica de los suelos de prioridad forestal dentro de la cuenca, los que corresponden a un 40% de la superficie total de la misma (Figura 3-8).

**Figura 3-8: Superficie de prioridad forestal en la cuenca de aporte a la represa G. Terra**



De lo anterior se desprende, que la superficie con cobertura forestal al año 2007 corresponde al 22% del total de la superficie de prioridad forestal dentro de la cuenca.



# 4. MODELACIÓN HIDROLÓGICA

A decorative graphic consisting of a thick horizontal teal line. Above the line, there are four small squares of varying shades of teal and blue, arranged in a slightly curved pattern. Below the line, there are two more small squares of similar colors, also arranged in a curved pattern.



## 4. MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Como fue mencionado anteriormente (sección 2.2), el objetivo de la modelación hidrológica fue simular el **déficit** del caudal de aporte a la represa de G. Terra dado por:

- La presencia de embalses dentro de la cuenca, cuya agua almacenada es destinada al riego del cultivo de arroz.
- La presencia de plantaciones forestales dentro de la cuenca.

Para ello fueron considerados los siguientes escenarios de demanda de agua dentro de la cuenca, correspondientes al riego del cultivo de arroz (caracterizados directamente por los embalses de riego) y a la forestación (caracterizados por la superficie forestada).

**Tabla 4-1: Escenarios de expansión del cultivo de arroz dentro de la cuenca**

Escenario	Nº de embalses	Volumen embalsado (Hm <sup>3</sup> )
A1	268	640
A1.5	402	960
A2	536	1280
A2.5	670	1600
A3	804	1920
A4	1072	2560
A5	1340	3200

**Tabla 4-2: Escenarios de expansión de la superficie forestada dentro de la cuenca**

Escenario	Superficie forestada (Km <sup>2</sup> )	Porcentaje de la cuenca	Porcentaje de la superficie de prioridad forestal
F1	3422.2	8.7%	21.8%
F1.5	5133.3	13.0%	32.6%
F2	6844.3	17.3%	43.5%
F3	10266.5	26.0%	65.3%

Los escenarios de expansión del cultivo de arroz surgen de multiplicar los embalses existentes en el año 2007 (con sus mismas características geométricas) por diferentes factores, cuyo valor se indica con el número seguido a la letra A.

Asimismo, los escenarios de expansión de la superficie forestada surgen de multiplicar la superficie correspondiente al año 2007 por diferentes factores, cuyo valor se indica seguido a la letra F.

Cabe mencionar que las cuencas de aporte a los embalses de riego de arroz suman, para el escenario A1, una superficie total de 197,252 ha correspondiente a un 5% de la superficie total de la cuenca, alcanzando un 25% de la misma para el escenario A5.

Por otro lado, en la Tabla 4-2 puede observarse que el escenario de mayor expansión de superficie forestada no supera el 65.3% de la superficie de prioridad forestal de la cuenca, lo que se considera razonable dadas las importantes superficies muertas que supone este tipo de plantación.

Los escenarios A1.5 y F1.5 corresponden a buenas estimaciones del escenario de demanda de agua en la cuenca al año 2015.

A continuación se describe la metodología utilizada para simular el déficit de caudal de aporte a la represa G. Terra para los diferentes escenarios de demanda de agua considerados dentro de la cuenca, así como los resultados obtenidos.

## 4.1. METODOLOGÍA

La afectación del caudal de aporte a la represa de G. Terra debido a los distintos escenarios de demanda de agua considerados dentro de la cuenca surge de la alteración del escurrimiento por el almacenamiento del agua (descontado posterior vertimiento) en los embalses de riego de arroz y por cambios en el uso del suelo (en la superficie forestada y, en menor proporción, en el espejo de agua de los embalses). Son éstos los procesos que fueron modelados explícitamente a través balances a los embalses por un lado y modificaciones en la evapotranspiración y el escurrimiento por otro.

Si bien conceptualmente lo que se está modelando es el déficit de caudal, en la práctica se calcula el caudal afectado por un lado y el caudal no afectado -o caudal natural- por otro, ambos acumulado en el punto de cierre en la represa de G. Terra, y de allí se computa la serie temporal del déficit en la cuenca. Los pasos entonces son:

- Simulación hidrológica del caudal mensual de aporte a la represa G. Terra en el período 1924-2007, sin considerar ningún tipo de demanda de agua dentro de la cuenca. El caudal asociado a esta simulación, se denominará de aquí en más caudal *natural*.
- Simulación hidrológica del caudal mensual de aporte a la represa G. Terra en el período 1924-2007, modelando explícitamente el déficit debido a los diferentes escenarios de demanda de agua considerados dentro de la cuenca, en forma independiente. El caudal asociado a esta simulación, se denominará de aquí en más caudal *afectado*.

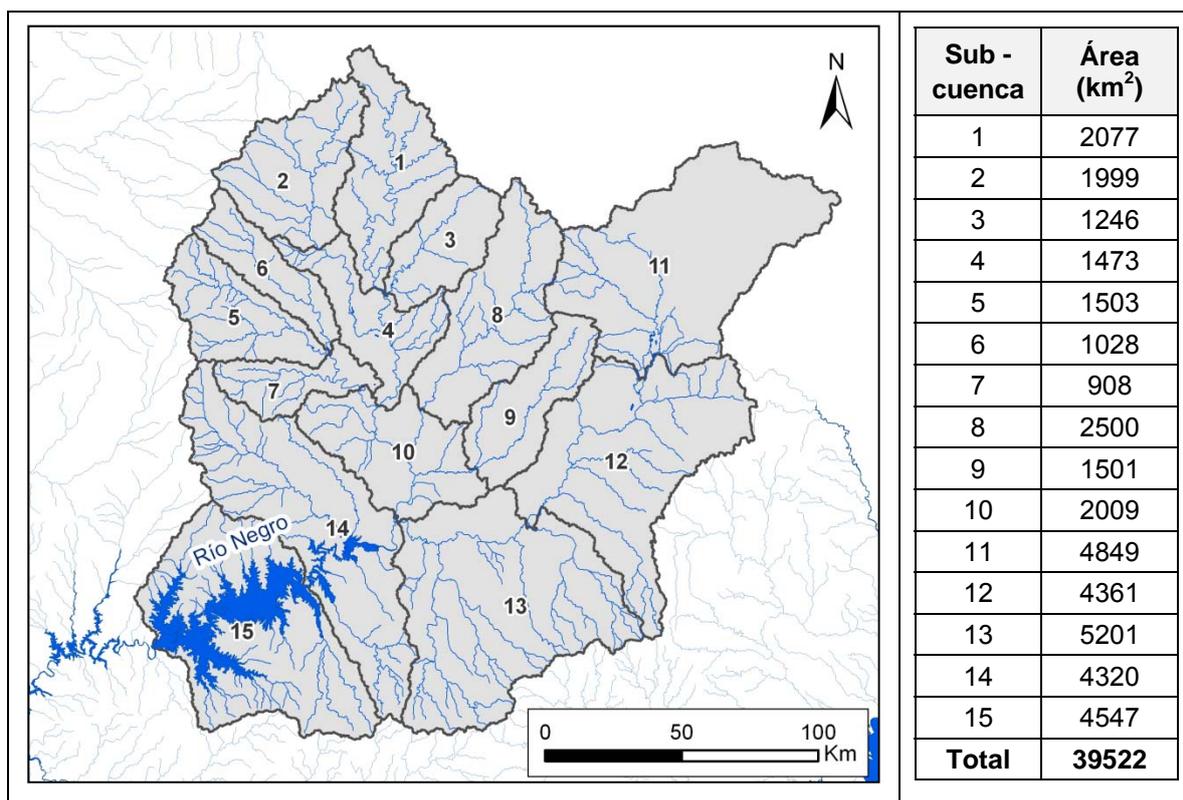
- Determinación del déficit de caudal mensual de aporte a la represa G. Terra dado por los distintos escenarios de demanda de agua considerados dentro de la cuenca, como la diferencia entre la serie de caudal *natural* modelado y las series de caudal *afectado* modelado.

A continuación se describe la metodología utilizada en cada paso, la que fue implementada en la plataforma MATLAB 7.0.4.

#### 4.1.1. Caudal natural

Para realizar la modelación hidrológica del caudal *natural* de aporte a la represa G. Terra, se subdividió su cuenca de aporte en 15 subcuencas (Figura 4-1), para cada una de las cuales se implementó el modelo precipitación – escurrimiento de Temez de paso mensual (Temez, 1977) en el período 1924-2007.

Figura 4-1 Subcuencas definidas de la cuenca de Rincón del Bonete



Una vez obtenido el escurrimiento de cada una de las subcuencas de aporte, se obtuvo la serie de caudal *natural* de aporte a la represa G. Terra como:

$$Q_{\text{natural}}^t = \sum Q_{\text{natural}_i}^t = \sum E_{\text{sc}_i}^t \cdot A_i$$

Siendo:  $Q_{\text{natural}}^t$  el caudal *natural* de aporte a la represa G. Terra en el paso de tiempo t.

$Q_{\text{natural}_i}^t$  el caudal *natural* de aporte de la subcuenca i en el paso de tiempo t.

$E_{\text{sc}_i}^t$  el escurrimiento de la subcuenca i en el paso de tiempo t, determinado a través del modelo de Temez.

$A_i$  el área de la subcuenca i.

A continuación se realiza una descripción del modelo de Temez y su implementación.

#### 4.1.1.1. Modelo de Temez

El modelo de Temez fue propuesto en el manual “Directivas de diseño hidrológico – hidráulico de pequeñas represas” elaborado por el IMFIA en el año 2002 por encargo de la Dirección Nacional de Hidrografía, y se encuentra ampliamente difundido en Uruguay.

Este modelo reproduce el ciclo hidrológico de manera continua en el tiempo de una manera simple y conceptual, considerando ecuaciones con sentido físico. Es un modelo de balance hídrico concentrado y de pocos parámetros.

En lo que sigue se describen las variables de entrada, la estructura de cálculo y los parámetros del modelo.

##### a) **Variables de entrada**

Las variables de entrada al modelo y la forma en que fueron estimadas se presentan a continuación:

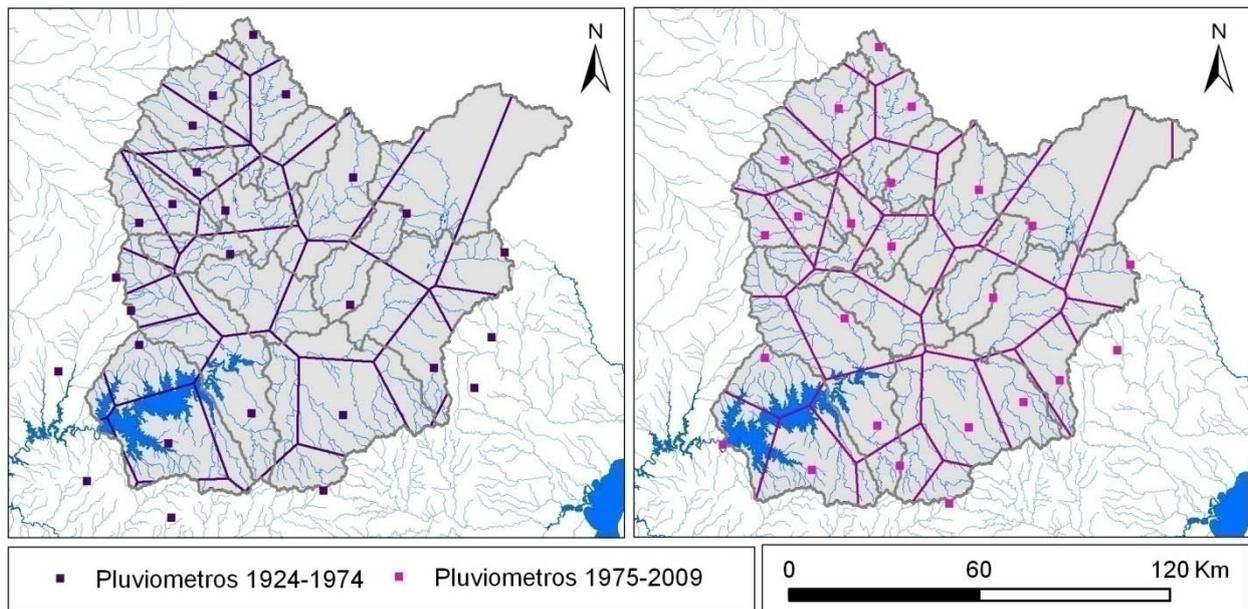
- Área de la cuenca (A)

El área de cada subcuenca fue determinada utilizando el software ArcGis10.

- Precipitación (P)

La serie de precipitación media mensual de cada subcuenca fue determinada a través del método de Thiessen para cada período de datos de precipitación disponible (Figura 4-2).

**Figura 4-2 Polígonos de Thiessen para los dos períodos de datos pluviométricos considerados**



- Evapotranspiración potencial (ETP)

A partir del mapa de isolíneas de evapotranspiración potencial media anual mensual del Uruguay presentado en la sección 3.2.3, se obtuvo el ciclo medio anual de evapotranspiración potencial para la cuenca de estudio que se presenta en la Tabla 4-3. El mismo fue utilizado uniformemente para todas las subcuencas y para todos los años del período de modelación.

**Tabla 4-3: Ciclo medio anual de evapotranspiración potencial utilizado en la modelación hidrológica**

Evapotranspiración potencial (mm)											
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
188	156	137	88	58	36	37	47	61	94	125	172

- Agua disponible del suelo (AD)

El valor medio de agua disponible para cada subcuenca fue calculado a través de una ponderación por área ocupada por cada unidad de suelo existente dentro de la misma, de acuerdo a la información del CAISU. En la cuenca 11, se extrapoló al territorio brasilero el valor medio de agua disponible correspondiente al territorio uruguayo.

En la tabla siguiente se presenta el valor de AD media asociado a cada subcuenca, variando el mismo entre 84 mm y 156 mm.

**Tabla 4-4: Agua Disponible media asociada a cada subcuenca**

Subcuenca														
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
156	111	114	125	112	114	130	104	127	144	112	122	104	111	84

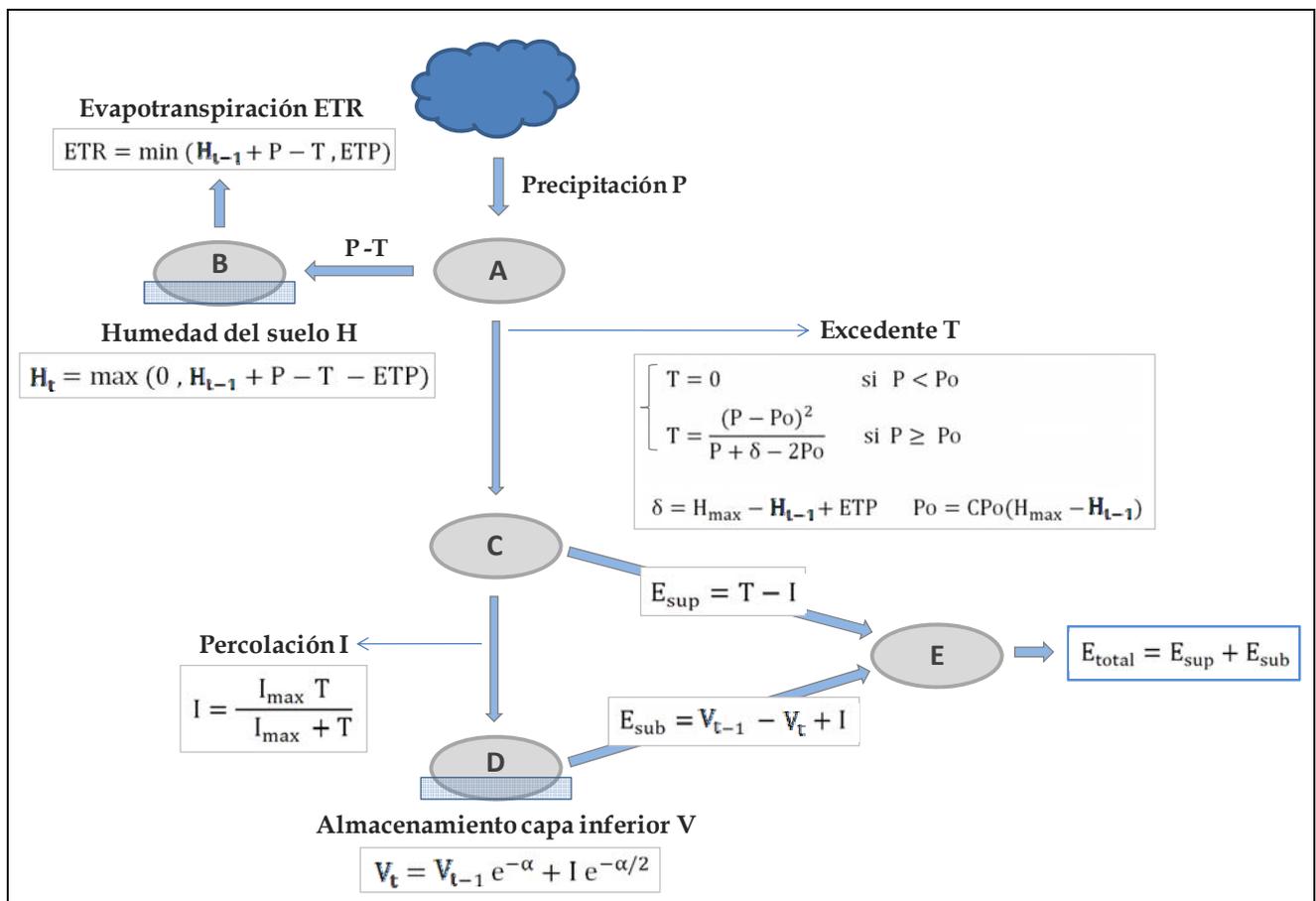
**b) Estructura de cálculo del modelo**

El modelo de Temez vincula el escurrimiento mensual de una cuenca de drenaje con las características fisiográficas de la cuenca y las condiciones climáticas que predominan sobre la misma.

El modelo considera dos almacenamientos de agua subterráneos: uno en la capa superior del suelo (generador de un flujo rápido) y otro en la capa inferior del mismo (generador de un flujo diferido o flujo base).

Las ecuaciones del modelo resultan de aplicar un balance hídrico a cinco volúmenes de control que se presentan en la Figura 4-3 A continuación se formulan y describen los balances realizados en cada volumen de control.

**Figura 4-3: Estructura del modelo de Temez**



Fuente: Elaboración propia con información tomada de Genta et. al., 2004

- Volumen de control A

Como se observa en la Figura anterior, una parte del agua que precipita ( $P_t$ ), potencialmente puede escurrir (excedente:  $T_t$ ) y la diferencia ( $P_t - T_t$ ) es almacenada en la capa superior del suelo constituyendo la humedad del suelo ( $H_i$ ). El agua almacenada en esta capa de suelo participará de la evapotranspiración.

En la determinación del excedente se utilizan las ecuaciones propuestas por Temez en las que se incorporan dos de los parámetros del modelo:  $CP_o$  y  $H_{max}$ :

$$\left\{ \begin{array}{ll} T = 0 & \text{si } P < P_o \\ T = \frac{(P - P_o)^2}{(P + \delta - P_o)} & \text{si } P \geq P_o \end{array} \right. \quad \left| \quad \begin{array}{l} \delta = H_{max} - H_{t-1} + ETP_t \\ P_o = CP_o \cdot (H_{max} - H_{t-1}) \end{array} \right.$$

- Volumen de control B

Este volumen de control representa la capa superficial del suelo. Realizando un balance hídrico elemental en el mismo se determina la humedad del suelo al final del período, considerando como ingreso el valor  $P_t - T_t$  y jerarquizando el cumplimiento de la demanda de evapotranspiración potencial ( $ETP_t$ , límite superior de la evapotranspiración real  $ETR_t$ ).

$$H_t = \max \left\{ 0, -H_{t-1} + (P_t - T_t) - ETP_t \right\}$$

- Volumen de control C

Del total de agua que potencialmente puede escurrir ( $T_t$ ), una parte participa del fenómeno de percolación ( $I_t$ ) hacia un segundo almacenamiento del suelo (capa inferior). El escurrimiento superficial drenado directamente por el cauce queda determinado entonces por la siguiente expresión:

$$E_{sup_t} = T_t - I_t$$

Para determinar  $I_t$  el modelo adopta una ley de percolación en la que se incorpora un nuevo parámetro:  $I_{max}$ .

$$I_t = \frac{I_{max} \cdot T_t}{T_t + I_{max}}$$

Esta ley asegura que la percolación aumenta con el excedente, pero tiene como asíntota horizontal  $I_t = I_{max}$ .

- Volumen de control D

Este volumen de control representa el funcionamiento de la capa de suelo inferior. Esta segunda capa de suelo permite regular el agua que pasa de un mes a los siguientes, generando escurrimientos lentos o diferidos. El volumen almacenado en esta capa se determina considerando que el caudal de aporte al escurrimiento total ( $Q_t$ ) es proporcional al volumen almacenado. El coeficiente de proporcionalidad se denomina alfa y es el cuarto parámetro del modelo:

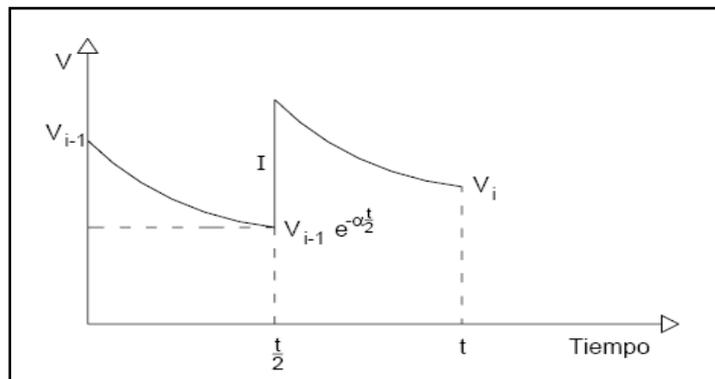
$$Q_t = \alpha \cdot V_t$$

$$\frac{dV_t}{dt} = -Q_t = -\alpha \cdot V_t \quad \rightarrow \quad V_t = V_{t-1} \cdot e^{-\alpha \cdot t}$$

Se asume además que la percolación ( $I_t$ ) ingresa en la mitad del período de cálculo (Figura 4-4) obteniendo la siguiente expresión para el cálculo del volumen de agua almacenado en la capa de suelo inferior:

$$V_t = V_{t-1} \cdot e^{-\alpha \cdot t} + I_t \cdot e^{-\alpha \cdot t/2}$$

**Figura 4-4: Ingreso de la percolación a la capa inferior del suelo en la mitad del periodo de cálculo (t=1mes)**



Fuente: Genta et al, 2004.

Finalmente el aporte de la capa inferior del suelo se calcula como:

$$E_{sub_t} = V_{t-1} - V_t + I_t$$

- Volumen de control E

El volumen de escurrimiento total se calcula como la suma del aporte superficial ( $E_{sup}$ ) y el aporte de la capa inferior del suelo ( $E_{sub}$ ):

$$E_{total_t} = E_{sup_t} + E_{sub_t} = T_t + V_{t-1} - V_t$$

### c) Parámetros del modelo

Como fue presentado recientemente, el modelo de Temez consta de 4 parámetros:  $\alpha$ ,  $I_{max}$ ,  $CPo$  y  $H_{max}$ . De estos cuatro parámetros,  $H_{max}$  es el único que tiene un significado físico ya que representa la capacidad máxima de almacenamiento del suelo a través de la siguiente expresión:  $H_{max}=CAD*AD$ , siendo  $AD$  el agua disponible en el suelo utilizable por el cultivo y  $CAD$  un coeficiente que se ajusta en la calibración.

Los valores de los parámetros se consideraron, para todas las subcuencas, iguales a los obtenidos en la calibración realizada a nivel regional a partir de los datos de escurrimiento mensual registrados en 12 subcuencas aforadas de Uruguay (Failache et al., 2006). Dichos valores se presentan en la tabla siguiente.

**Tabla 4-5 Parámetros del modelo de Temez calibrados para Uruguay**

Parámetro	Valor
$\alpha$	0.0775 1/día
$I_{max}$	386 mm
$CPo$	0.3
$H_{max}$	$0.916*AD$

## 4.1.2. Caudal afectado

A continuación se presenta la metodología utilizada para determinar los caudales *afectados* correspondientes a los diferentes escenarios de demanda de agua considerados dentro de la cuenca.

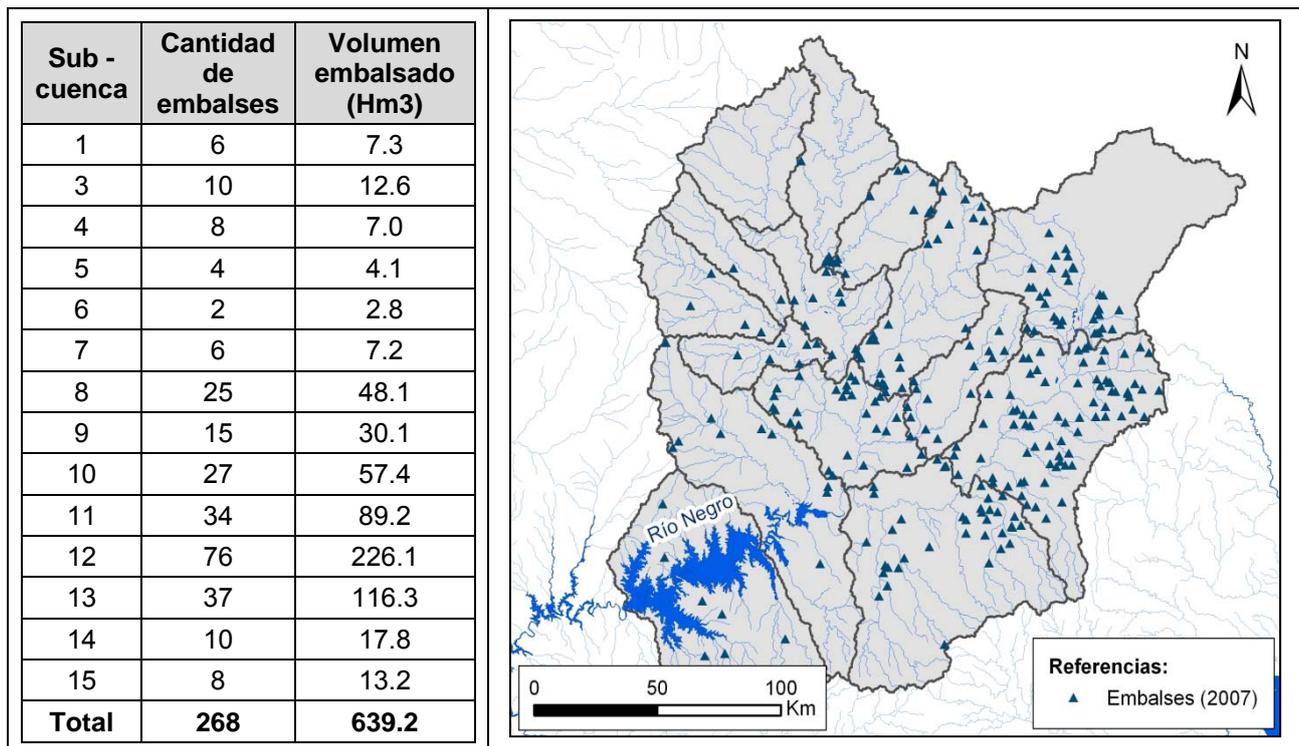
### 4.1.2.1. Riego de arroz

Para determinar la serie de caudales de aporte a la represa G. Terra considerando la presencia de embalses para el riego del cultivo de arroz dentro de la cuenca, se definió como escenario base al escenario A1 (correspondiente al año 2007), para el cual se dispone de datos disgregados de los embalses de riego existentes y sus características (ver sección 3.3).

Para dicho escenario base se realizó una modelación hidrológica del caudal de aporte a la represa G. Terra, la cual consistió en incorporar a la modelación del caudal *natural* de cada subcuenca de aporte, el efecto de cada uno de los embalses existentes dentro de la misma al año 2007 con sus características geográficas y geométricas.

En la Figura 4-5 se presenta la cantidad de embalses existentes en cada subcuenca (incorporados en la modelación del escenario A1) así como el volumen total embalsado.

Figura 4-5: Embalses incorporados en el escenario A1 (2007) en cada subcuenca



En dicha modelación se determinó entonces el caudal *afectado* de cada subcuenca para cada mes del período de modelación, como la sumatoria de:

- El caudal *natural* correspondiente a la superficie de aporte no interceptada por los embalses de riego existentes.
- El caudal de vertido de los embalses de riego existentes, cuyas cuencas de aporte sí son interceptadas.

El caudal de vertido de cada embalse de riego, se calculó a través de una modelación mensual de su balance, en la cual se consideró: el caudal de aporte al mismo (obtenido a partir del escurrimiento *natural* de la subcuenca en la cual se encuentra), la precipitación y evaporación directa del lago; y la demanda de riego. Esta última se define en cada año no calendario (noviembre - octubre) del período de modelación como el volumen almacenado en el embalse al mes de octubre y se distribuye en partes iguales durante los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero (zafra de riego).

Determinada así la serie de caudal *afectado* de cada subcuenca en el período de modelación para el escenario A1, se obtuvo la serie de caudal *afectado* de aporte a la represa G. Terra para dicho escenario por sumatoria directa.

A continuación se describen más detalladamente los pasos de cálculo del procedimiento descrito.

**Cuadro 4-1: Cálculo del caudal afectado de aporte a la represa G. Terra para el escenario A1**

El *caudal afectado* de aporte a la represa G. Terra, se obtuvo para cada mes del período de modelación, como:

$$Q_{A1}^t = \sum Q_{A1_i}^t$$

Siendo:  $Q_{A1}^t$  el *caudal afectado* de aporte a la represa G. Terra, en el paso de tiempo t, para el escenario A1.

$Q_{A1_i}^t$  el *caudal afectado* de la subcuenca i en el paso de tiempo t, para el escenario A1.

El *caudal afectado* de cada subcuenca i fue determinado a través de la siguiente expresión:

$$Q_{A1_i}^t = Q_{natural_i}^t \frac{(A_i - \sum_j A_{ap_j})}{A_i} + \sum_j Q_{v_j}^t$$

Siendo:  $Q_{natural_i}^t$  el *caudal natural* de la subcuenca i en el paso de tiempo t.

$A_i$  el área de la subcuenca i.

$A_{ap_j}$  el área de aporte del embalse j incluido en la subcuenca i.

$Q_{v_j}^t$  el caudal de vertido del embalse j incluido en la subcuenca i, en el paso de tiempo t.

Estimado el caudal de vertido de cada embalse j en cada paso de tiempo como:

$$\begin{cases} Q_{v_j}^t = V_{emb_j}^t - V_{max_j} & \text{si } V_{emb_j}^t > V_{max_j} \\ Q_{v_j}^t = 0 & \text{si } V_{emb_j}^t \leq V_{max_j} \end{cases}$$

Siendo:  $V_{emb_j}^t$  el volumen de agua en el embalse j en el paso de tiempo t.

$V_{max_j}$  el volumen máximo del embalse j.

Para determinar el volumen de agua en cada embalse en cada paso de tiempo t, se realizó un balance hídrico en cada embalse, obteniendo:

$$V_{emb_j}^t = V_{emb_j}^{t-1} + Esc^t (A_{ap_j} - A_{lago_j}^{t-1}) + A_{lago_j}^{t-1} (P_j^t - E_j^t) - V_{riego_j}^t$$

**Continuación Cuadro 4-1: Cálculo del caudal de aporte a la represa G. Terra para el escenario A1**

Siendo:  $V_{emb_j}^{t-1}$  el volumen de agua en el embalse j en el paso de tiempo t-1.

$E_{sc}^t$  el escurrimiento “natural” de la subcuenca a la cual pertenece el embalse j en el paso de tiempo t.

$A_{ap_j}$  el área de aporte del embalse j.

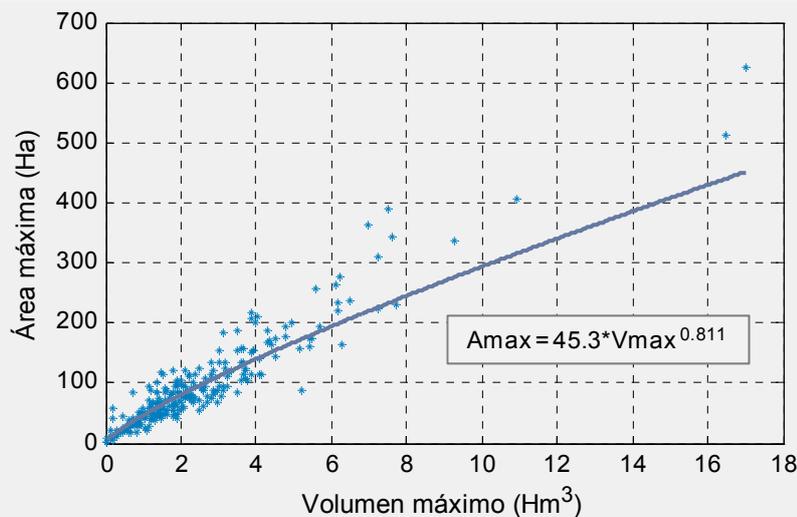
$A_{lago_j}^{t-1}$  el área del lago del embalse j en el paso de tiempo t-1.

$P_j^t$  la precipitación del pluviómetro más cercano al embalse j en el paso de tiempo t.

$E_j^t$  la evaporación estimada como  $0.7 * E_{TanqueA}$  de la estación meteorológica más cercana al embalse j.

$V_{riego_j}^t$  el volumen de riego del embalse j en el paso de tiempo t.

El área del lago de cada embalse en cada paso de tiempo, se determinó a partir del volumen del mismo utilizando la relación área-volumen obtenida de ajustar los datos de área máxima y volumen máximo de todos los embalses existentes en la cuenca al año 2007:



El volumen de riego fue calculado, en cada paso de tiempo, considerando que el cultivo de arroz se riega durante los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero en forma equitativa y con un volumen total de riego en cada zafra correspondiente al volumen embalsado al mes de octubre previo. Esto es:

$$V_{riego_j}^t = \begin{cases} 1/4 V_{emb_j}^{Oct} & \text{en nov, dic, ene y feb} \\ 0 & \text{en los restantes meses} \end{cases}$$

La metodología descrita para determinar el *caudal afectado* de aporte a la represa G. Terra del escenario A1, fue reproducida para los restantes escenarios de expansión, multiplicando los embalses existentes en el escenario A1 por el factor correspondiente. Es decir, considerando que los embalses incorporados en cada escenario de expansión tienen las mismas características y se localizan en las mismas subcuencas de aporte que los del escenario A1.

Se obtiene así una familia de series de caudales *afectados* de aporte a la represa G. Terra, correspondientes a los diferentes escenarios de expansión del cultivo de arroz considerados.

Cabe mencionar que además, se implementó en la modelación, la posibilidad de incorporar un porcentaje de retorno del volumen de riego, el que se reincorporaría al caudal de aporte de cada subcuenca durante los meses correspondientes a la zafra de riego. Sin embargo, dicho porcentaje fue considerado nulo en todas las simulaciones realizadas en el presente estudio.

#### 4.1.2.2. Forestación

Para estimar el caudal *afectado* de aporte a la represa G. Terra correspondiente a los escenarios con la existencia de cobertura forestal dentro de la cuenca, se implementaron 3 metodologías diferentes.

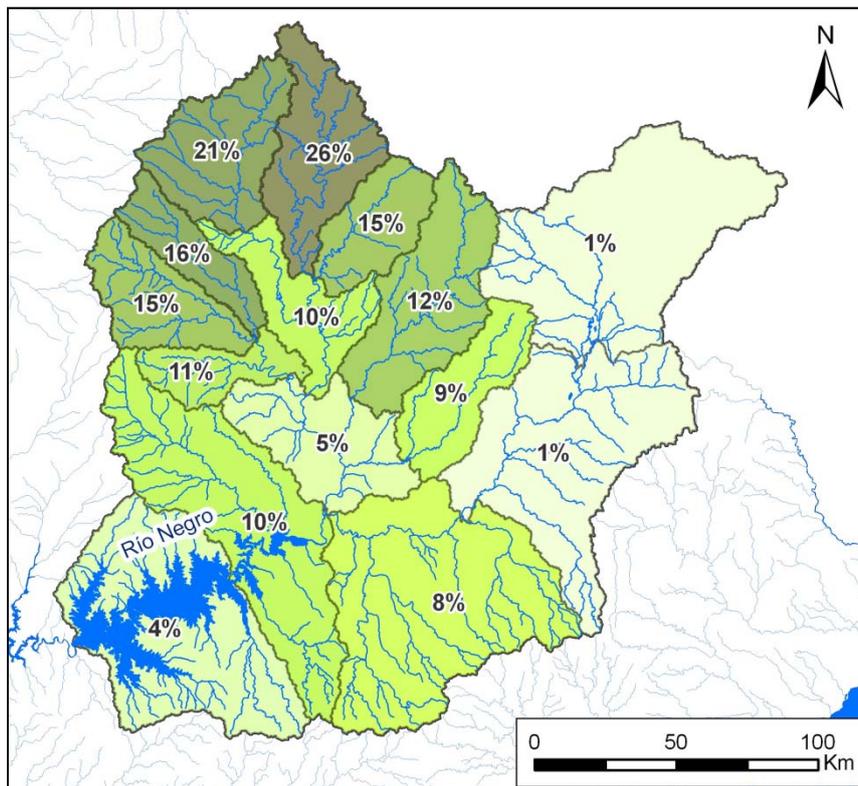
La primera metodología consistió en extrapolar a las subcuencas de aporte a la represa G. Terra los resultados de reducción del caudal estacional obtenidos a nivel nacional a partir del monitoreo de la cuenca Manuel Díaz (coincidente con la cuenca 1 del presente estudio), antes y después de haber sido forestada (Silveira, L y Alonso, J., 2009).

Luego, las otras dos metodologías consistieron en incorporar en la modelación hidrológica de cada subcuenca, los principales procesos hidrológicos que caracterizan a las plantaciones forestales (intercepción e incremento de la transpiración respecto a las pasturas naturales), diferenciándose las mismas en la forma en que fue realizada dicha incorporación.

Cabe mencionar que si bien los resultados obtenidos por Silveira, L. y Alonso, J. son robustos para la cuenca monitoreada (Manuel Díaz), los mismos aún no han sido regionalizados para otras cuencas con diferentes características y diferentes porcentajes de superficie forestada. Es por este motivo que se optó por implementar además otras metodologías, con el objetivo adicional de comparar los resultados obtenidos por las mismas.

Para aplicar dichas metodologías fue necesario determinar el porcentaje de superficie forestada correspondiente a cada subcuenca y a cada escenario. Dicho porcentaje se calculó en primer lugar para al escenario F1 ponderando los datos de superficie forestada por departamento (correspondientes al año 2007), en función del porcentaje de suelos de prioridad forestal de cada subcuenca. Luego, para los restantes escenarios, se multiplicó el porcentaje de cobertura forestal obtenido para el escenario F1 (Figura 4-6) por el factor correspondiente.

**Figura 4-6: Porcentaje de superficie forestada por subcuenca - Escenario F1**



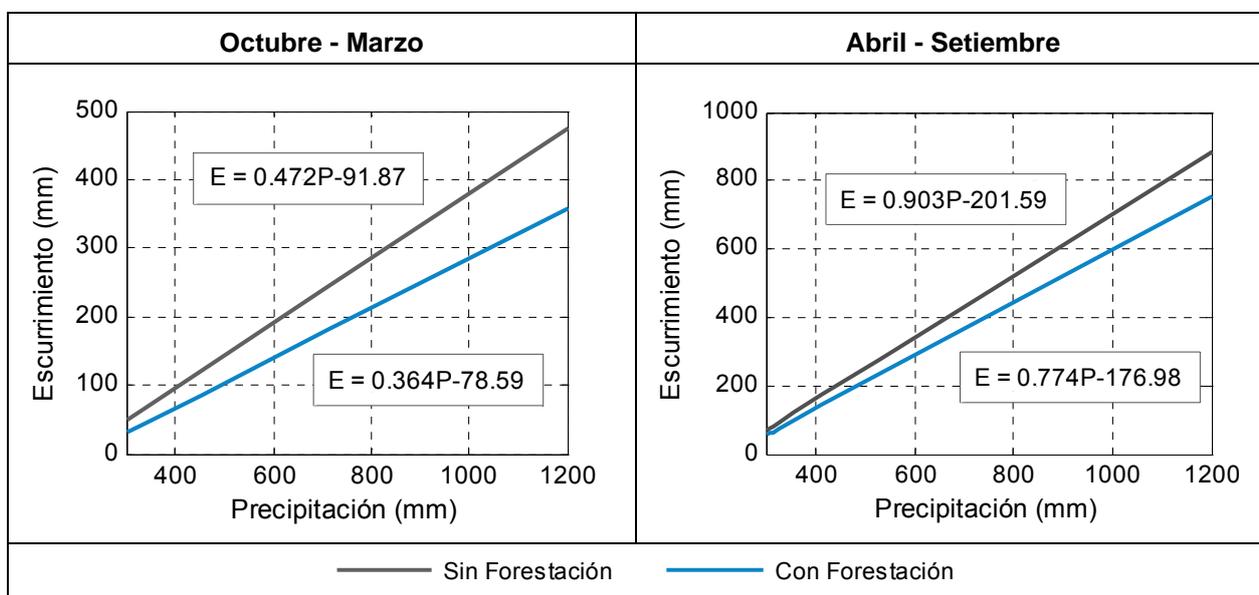
A continuación se describen las 3 metodologías implementadas para determinar el caudal *afectado* de aporte a la represa G. Terra dado por la presencia de forestación dentro de la cuenca.

**a) Metodología 1**

En esta metodología se reduce el caudal *natural* de cada subcuenca de aporte a la represa G. Terra a través de un coeficiente de reducción dependiente de la precipitación estacional (octubre-marzo y abril-setiembre) y del porcentaje de superficie con cobertura forestal.

Dicho coeficiente fue estimado, para cada subcuenca y para cada semestre del período de simulación, a partir de las relaciones precipitación-escorrentía estacional obtenidos por Silveira, L. y Alonso, J. (2009) en la cuenca Manuel Díaz (coincidente con la subcuenca 1 del presente estudio) antes y después de haber sido forestada (Figura 4-7).

**Figura 4-7: Relaciones precipitación - escorrentía semestrales obtenidas por Silveira et. al. para la subcuenca Manuel Diaz antes y después de haber sido forestada**



Fuente: Elaboración propia en base a los resultados publicados por Silveira, L. y Alonso, J. (2009)

Una vez reducido el *caudal natural* mensual de cada subcuenca para cada mes del período de simulación y para cada escenario de cobertura forestal considerado, se determinó el caudal de aporte a la represa G. Terra por sumatoria directa.

En el cuadro siguiente se describe detalladamente el procedimiento de cálculo realizado.

**Cuadro 4-2: Cálculo del caudal de aporte a la represa G. Terra: Escenarios F – Metodología 1**

El caudal de aporte a la represa G. Terra, se obtuvo para cada mes del período de simulación, como:

$$Q_F^t = \sum Q_{F_i}^t$$

Siendo:  $Q_F^t$  el caudal *afectado* de aporte a la represa G. Terra, en el paso de tiempo  $t$ , para el escenario F.

$Q_{F_i}^t$  el caudal *afectado* de la subcuenca  $i$  en el paso de tiempo  $t$ , para el escenario F.

El caudal *afectado* de la subcuenca  $i$  fue determinado a través de la siguiente expresión:

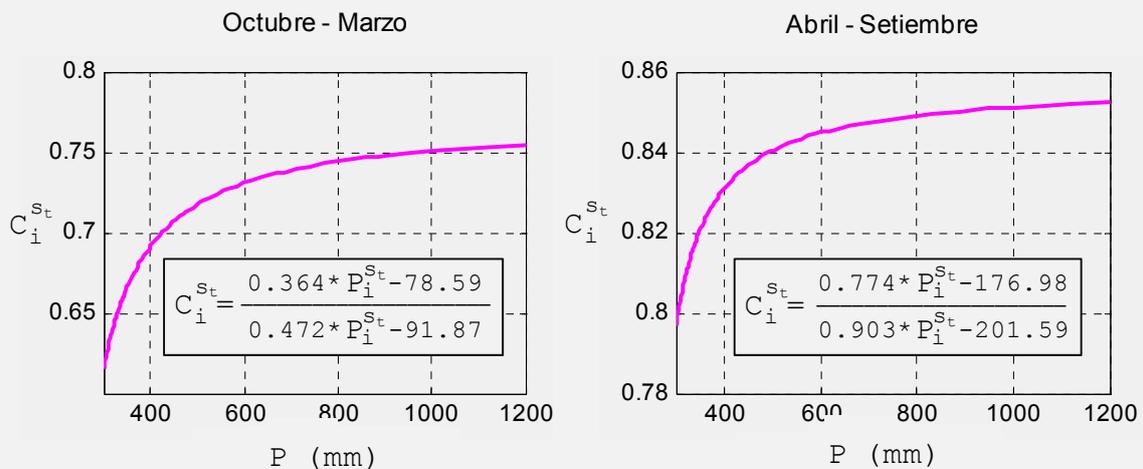
$$Q_{F_i}^t = \frac{f_i}{f_{MD}} \cdot C_i^{S_t} \cdot Q_{natural_i}^t$$

Siendo:  $f_i$  y  $f_{MD}$  el porcentaje de cobertura forestal de la subcuenca  $i$  correspondiente al escenario F y de la cuenca Manuel Diaz (26%), respectivamente.

$C_i^{S_t}$  el coeficiente de reducción de caudal de la subcuenca  $i$  en el semestre que contiene al mes  $t$ , correspondiente a un porcentaje de cobertura forestal de 26%.

$Q_{natural_i}^t$  el *caudal natural* de la subcuenca  $i$  en el paso de tiempo  $t$ .

$C_i^{S_t}$  se calcula a partir de alguna de las siguientes expresiones, según el semestre correspondiente (octubre-marzo o abril-setiembre), las que fueron obtenidas de dividir las relaciones precipitación-escurrimiento presentadas en la Figura 4-7:



Siendo:  $P_i^{S_t}$  la precipitación media acumulada de la subcuenca  $i$  en el semestre que contiene al mes  $t$ .

Notar que el coeficiente de reducción de caudal obtenido para la cuenca Manuel Díaz fue extrapolado a las restantes subcuencas, tomando como hipótesis que el mismo es proporcional al porcentaje de superficie con cobertura forestal.

Por otro lado, puede observarse que el coeficiente de reducción de caudal correspondiente a un porcentaje de cobertura forestal de 26% varía entre 0.62 y 0.75 en primavera-verano y entre 0.80 y 0.85 en otoño-invierno aproximadamente, dependiendo de la precipitación estacional.

## b) Metodología 2

Esta metodología consistió en modelar, para cada subcuenca de aporte a la represa G. Terra, el escurrimiento de la superficie cubierta con pasturas y el escurrimiento de la superficie cubierta con forestación en forma independiente.

El escurrimiento mensual de la superficie cubierta con pasturas corresponde al escurrimiento *natural* ya modelado anteriormente (sección 4.1.1).

El escurrimiento mensual de la superficie con cobertura forestal, fue modelado a través del modelo de Temez ya implementado para obtener el escurrimiento *natural*, modificando dentro del mismo: el ciclo medio anual de ETP. Para ello fueron utilizadas las siguientes expresiones de precipitación-*evapotranspiración* anual propuestas por Zhang, L. et. al. (1999):

$$ET_f = \left[ \frac{1 + w_f \cdot E_o}{1 + w_f \cdot \frac{E_o}{P} + \frac{P}{E_o}} \right] \cdot P \quad \text{y} \quad ET_p = \left[ \frac{1 + w_p \cdot E_o}{1 + w_p \cdot \frac{E_o}{P} + \frac{P}{E_o}} \right] \cdot P$$

Siendo:  $ET_f$  y  $ET_p$  la *evapotranspiración* anual correspondiente a la forestación y a la pastura natural, respectivamente.

$w_f$  y  $w_p$  coeficientes dependientes de la profundidad de exploración radicular de los árboles y de la pastura natural, tomando valores de 2 y 0.5, respectivamente.

$E_o$  la *evapotranspiración* potencial anual del cultivo de referencia.

$P$  la precipitación anual.

En dichas expresiones puede observarse que la *evapotranspiración* anual depende únicamente de la *evapotranspiración* potencial del cultivo de referencia y de la profundidad de exploración radicular, no estando incorporado conceptualmente el proceso de *intercepción*.

Los valores de  $E_o$ ,  $w_f$  y  $w_p$  utilizados en esta metodología, corresponden a los calibrados por Zhang a través del ajuste de la evapotranspiración total de un gran número de cuencas aforadas. Los registros de evapotranspiración utilizados para realizar dicho ajuste fueron determinados en su gran mayoría como la diferencia entre los datos registrados de precipitación total y de caudal aforado. Esto sugiere que si bien la expresión precipitación-evapotranspiración propuesta por Zhang en su concepción teórica no incorpora conceptualmente el proceso de intercepción, el valor de los parámetros ajustados por dicho autor, sí incluiría indirectamente dicho proceso. Es decir que en esta metodología, los procesos de intercepción y de evapotranspiración incremental, pueden considerarse ambos incorporados a través de este último.

Una vez obtenido el escurrimiento asociado a cada tipo de cobertura, se determinó el caudal *afectado* de cada subcuenca multiplicando cada escurrimiento por la superficie correspondiente. Luego se determinó el caudal *afectado* de aporte a la represa G. Terra como la sumatoria del caudal *afectado* de todas las subcuencas.

En el cuadro siguiente se presentan detalladamente los cálculos realizados para determinar el caudal *afectado* de aporte a la represa G. Terra a través de esta segunda metodología.

**Cuadro 4-3: Cálculo del caudal de aporte a la represa G. Terra: Escenarios F – Metodología 2**

El caudal *afectado* de aporte a la represa G. Terra, se obtuvo para cada mes del período de simulación, como:

$$Q_F^t = \sum Q_{F_i}^t$$

Siendo:  $Q_F^t$  el caudal *afectado* de aporte a la represa G. Terra, en el paso de tiempo  $t$ , para el escenario F.

$Q_{F_i}^t$  el caudal *afectado* de la subcuenca  $i$  en el paso de tiempo  $t$ , para el escenario F.

El caudal *afectado* de cada subcuenca fue determinado a través de la siguiente expresión:

$$Q_{F_i}^t = A_i \cdot (f_i \cdot Esc_{forestal_i}^t + (1-f_i) \cdot Esc_{natural_i}^t)$$

Siendo:  $A_i$  el área de la subcuenca  $i$ .

$f_i$  el porcentaje de cobertura forestal de la subcuenca  $i$  correspondiente al escenario F.

$Esc_{natural_i}^t$  el escurrimiento *natural* de la subcuenca  $i$  en el paso de tiempo  $t$ .

$Esc_{forestal_i}^t$  el escurrimiento de la superficie con cobertura forestal de la subcuenca  $i$  en el paso de tiempo  $t$ .

El escurrimiento de la superficie con cobertura forestal de cada subcuenca  $i$  en cada paso de tiempo  $t$  fue determinado a través del modelo de Temez utilizado para obtener el *escurrimiento natural*, modificando el ciclo medio anual de ETP en cada año del período de modelación de la siguiente forma:

$$CA_i^a (ETP_f) = \frac{ETf_i^a}{ETp_i^a} \cdot CMA (ETP)$$

Siendo:  $CA_i^a (ETP_f)$  el ciclo anual de ETP de la superficie con cobertura forestal de la subcuenca  $i$  en el año  $a$ .

$CMA (ETP)$  el ciclo medio anual de ETP de la superficie cubierta con pasturas.

$ETf_i^a$  y  $ETp_i^a$  la evapotranspiración anual de la superficie con cobertura forestal y con pasturas respectivamente de la subcuenca  $i$  en el año  $a$ .

$ETf_i^a$  y  $ETp_i^a$  se calcularon con las expresiones propuestas y calibradas por Zhang:

$$ETf_i^a = \left[ \frac{1+2 \cdot 1410}{1+2 \cdot \frac{1410}{P_i^a} + \frac{P_i^a}{1410}} \right] \cdot P_i^a \quad \text{y} \quad ETp_i^a = \left[ \frac{1+0.5 \cdot 1100}{1+0.5 \cdot \frac{1100}{P_i^a} + \frac{P_i^a}{1100}} \right] \cdot P_i^a$$

Siendo:  $P_i^a$  la precipitación total anual de la subcuenca  $i$  en el año  $a$ .

### c) Metodología 3

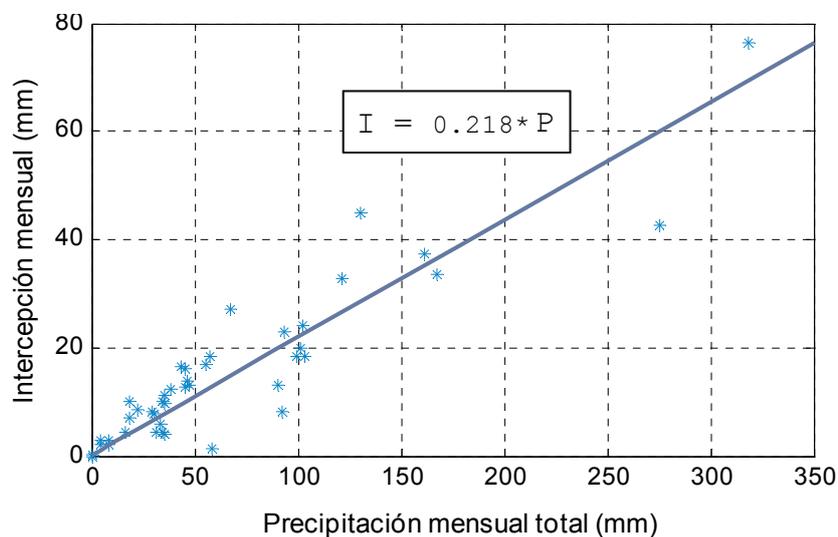
Al igual que la metodología 2, esta metodología consistió en modelar para cada subcuenca de aporte a la represa G. Terra, el escurrimiento de la superficie cubierta con pasturas y el escurrimiento de la superficie cubierta con forestación en forma independiente.

El escurrimiento mensual de la superficie cubierta con pasturas corresponde al escurrimiento *natural* ya modelado anteriormente (sección 4.1.1).

El escurrimiento mensual de la superficie con cobertura forestal fue modelado a través del modelo de Temez ya implementado para obtener el escurrimiento *natural*, modificando dentro el mismo:

- La precipitación que participa del balance de agua en el suelo, deduciéndole a la precipitación total incidente un porcentaje correspondiente a la intercepción. Dicha intercepción fue estimada a partir de los datos de precipitación total e intercepción registrados en una microcuenca forestal localizada en el litoral del país, monitoreada en el marco del proyecto INIA FPTA 210 ejecutado por el IMFIA (Figura 4-8).

**Figura 4-8: Relación precipitación intercepción mensual obtenida de los datos registrados en una microcuenca forestal localizada en el litoral del país (datos brindados por el IMFIA)**



La precipitación obtenida como la diferencia entre la precipitación total y la intercepción, se denomina precipitación efectiva.

- El ciclo medio anual de ETP. Para ello fueron utilizadas nuevamente las expresiones de precipitación-*evapotranspiración* anual propuestas por Zhang, L. et. al. (1999), recurriendo esta vez únicamente a su concepción teórica. Es decir que fueron evaluadas con la precipitación efectiva (en lugar de la precipitación total), considerando un valor de  $E_0$  correspondiente a la cuenca de estudio (1200 mm). Los valores de  $w_f$  y  $w_p$  utilizados fueron los mismos que para la metodología 2.

Al igual que en la Metodología 2, una vez obtenido el escurrimiento asociado a cada tipo de cobertura, se determinó el caudal *afectado* de cada subcuenca multiplicando cada escurrimiento por la superficie correspondiente. Luego se determinó el caudal *afectado* de aporte a la represa G. Terra como la sumatoria del caudal *afectado* de todas las subcuencas.

En el cuadro siguiente se presentan detalladamente los cálculos realizados para determinar el caudal *afectado* de aporte a la represa G. Terra a través de esta tercera metodología.

#### Cuadro 4-4: Cálculo del caudal de aporte a la represa G. Terra: Escenarios F - Metodología 3

El caudal *afectado* de aporte a la represa G. Terra, se obtuvo para cada mes del período de simulación, como:

$$Q_F^t = \sum Q_{F_i}^t$$

Siendo:  $Q_F^t$  el caudal *afectado* de aporte a la represa G. Terra, en el paso de tiempo  $t$ , para el escenario F.

$Q_{F_i}^t$  el caudal *afectado* de la subcuenca  $i$  en el paso de tiempo  $t$ , para el escenario F.

El caudal *afectado* de cada subcuenca fue determinado a través de la siguiente expresión:

$$Q_{F_i}^t = A_i \cdot (f_i \cdot Esc_{forestal_i}^t + (1-f_i) \cdot Esc_{natural_i}^t)$$

Siendo:  $A_i$  el área de la subcuenca  $i$ .

$f_i$  el porcentaje de cobertura forestal de la subcuenca  $i$  correspondiente al escenario F.

$Esc_{natural_i}^t$  el escurrimiento *natural* de la subcuenca  $i$  en el paso de tiempo  $t$ .

$Esc_{forestal_i}^t$  el escurrimiento de la superficie con cobertura forestal de la subcuenca  $i$  en el paso de tiempo  $t$ .

### Continuación Cuadro 4-4: Cálculo del caudal de aporte a la represa G. Terra: Escenarios F - Metodología 3

El escurrimiento de la superficie con cobertura forestal de cada subcuenca  $i$  en cada paso de tiempo  $t$  fue determinado a través del modelo de Temez utilizado para obtener el *escurrimiento natural*, modificando dentro del mismo las siguientes variables:

- Precipitación que participa del balance de agua en el suelo (precipitación efectiva):

$$Pe_i^t = P_i^t - 0.218 \cdot P_i^t$$

Siendo:  $P_i^t$  y  $Pe_i^t$  la precipitación total y la precipitación efectiva de la subcuenca  $i$  en el paso de tiempo  $t$ , respectivamente.

- Ciclo medio anual de ETP:

$$CA_i^a (ETP_f) = \frac{ETf_i^a}{ETp_i^a} \cdot CMA (ETP)$$

Siendo:  $CA_i^a (ETP_f)$  el ciclo anual de ETP de la superficie con cobertura forestal de la subcuenca  $i$  en el año  $a$ .

$CMA (ETP)$  el ciclo medio anual de ETP de la superficie cubierta con pasturas.

$ETf_i^a$  y  $ETp_i^a$  la evapotranspiración anual de la superficie con cobertura forestal y con pasturas respectivamente de la subcuenca  $i$  en el año  $a$ .

$ETf_i^a$  y  $ETp_i^a$  se calcularon a partir de las expresiones teóricas propuestas por Zhang (1999):

$$ETf_i^a = \left[ \frac{1+2 \cdot 1200}{1+2 \cdot \frac{1200}{Pe_i^a} + \frac{Pe_i^a}{1200}} \right] \cdot Pe_i^a \quad \text{y} \quad ETp_i^a = \left[ \frac{1+0.5 \cdot 1200}{1+0.5 \cdot \frac{1200}{Pe_i^a} + \frac{Pe_i^a}{1200}} \right] \cdot Pe_i^a$$

Siendo:  $Pe_i^a$  la precipitación efectiva anual de la subcuenca  $i$  en el año  $a$ .

### 4.1.3. Déficit de caudal

Una vez obtenidas las series de caudal *natural* de aporte a la represa G. Terra en el período de simulación (1924-2007) y las series de caudal *afectado* correspondientes a los diferentes escenarios de expansión del cultivo de arroz y de forestación considerados dentro de la cuenca, se rescata la serie de déficit de caudal por simple resta. Se tiene entonces:

- El déficit de caudal de aporte a la represa G. Terra dado por la existencia de embalses para el riego de arroz dentro de la misma como:

$$\Delta Q_A^t = Q_{\text{natural}}^t - Q_A^t$$

Siendo:  $\Delta Q_A^t$  el déficit de caudal de aporte a la represa G. Terra dado por la presencia de embalses para el riego de arroz dentro de la cuenca para algún escenario A, en el paso de tiempo t.

$Q_{\text{natural}}^t$  el caudal *natural* de aporte a la represa G. Terra en el paso de tiempo t.

$Q_A^t$  el caudal *afectado* de aporte a la represa G. Terra correspondiente a algún escenario A, en el paso de tiempo t.

En resumen se obtiene una familia de series de déficit de caudal de aporte a la represa G. Terra, en donde cada serie corresponde a un escenario diferente de expansión del cultivo de arroz.

- El déficit de caudal de aporte a la represa G. Terra dado por la existencia de cobertura forestal dentro de la misma como:

$$\Delta Q_F^t = Q_{\text{natural}}^t - Q_F^t$$

Siendo:  $\Delta Q_F^t$  el déficit de caudal de aporte a la represa G. Terra dado por la presencia de forestación dentro de la cuenca para algún escenario F, en el paso de tiempo t.

$Q_{\text{natural}}^t$  el caudal *natural* de aporte a la represa G. Terra en el paso de tiempo t.

$Q_F^t$  el caudal *afectado* de aporte a la represa G. Terra correspondiente a algún escenario F, en el paso de tiempo t.

En este caso se obtienen 3 familias de series de déficit de caudal de aporte a la represa G. Terra, correspondientes a las 3 metodologías utilizadas.

## 4.2. RESULTADOS

Con el fin de ilustrar la idoneidad del modelo hidrológico utilizado, se presentan inicialmente resultados de la simulación hidrológica del caudal *natural* de aporte a la represa G. Terra en comparación con los datos de caudal observado en la misma.

Luego, como resultado principal de la sección, se presenta el déficit de caudal de aporte a la represa G. Terra obtenido para los diferentes escenarios de demanda de agua considerados dentro de la cuenca. En el caso de los escenarios F se presenta una comparación previa entre los resultados arrojados por las diferentes metodologías utilizadas.

Se hace notar que los resultados anuales presentados en todos los casos corresponden al año no calendario noviembre-octubre, por ser el año que caracteriza al ciclo de los embalses de riego de arroz.

### 4.2.1. Caudal natural

La serie de caudales *naturales* de aporte a la represa G. Terra modelada es comparable con la serie de caudales registrada en la misma en el período 1925 – 1980, en el cual casi no existían embalses ni bosques forestales de gran extensión dentro de la cuenca. A continuación se presentan los resultados obtenidos de realizar dicha comparación, tanto para la serie de caudal mensual como para la acumulada anual.

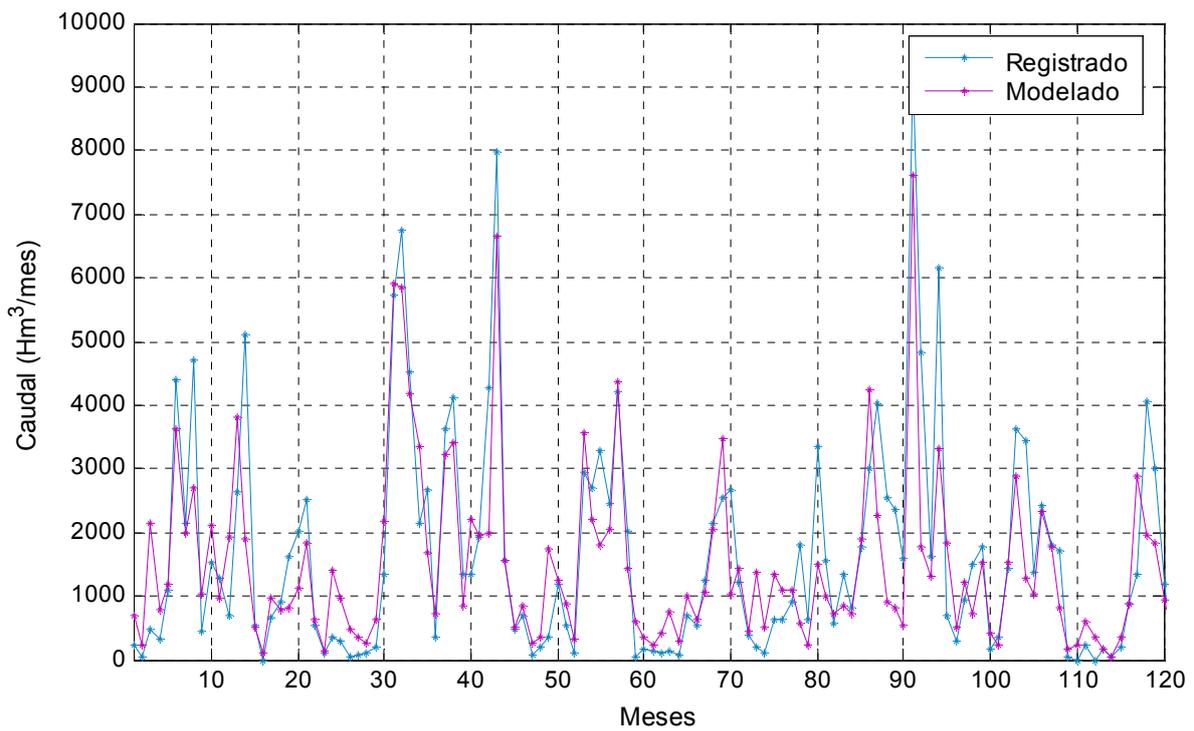
**Tabla 4-6 Estadísticos series de caudales mensuales naturales simulados y observados 1925-1980**

Estadístico (Hm <sup>3</sup> )	Serie mensual		Serie anual	
	Simulado	Observado	Simulado	Observado
Media	1486	1453	17805	17361
Desviación estándar	1520	1808	8018	9081
Mediana	1044	733.5	15844	16035
Máximo	16590	17335	49619	43610
Mínimo	0	0	4521.7	1858

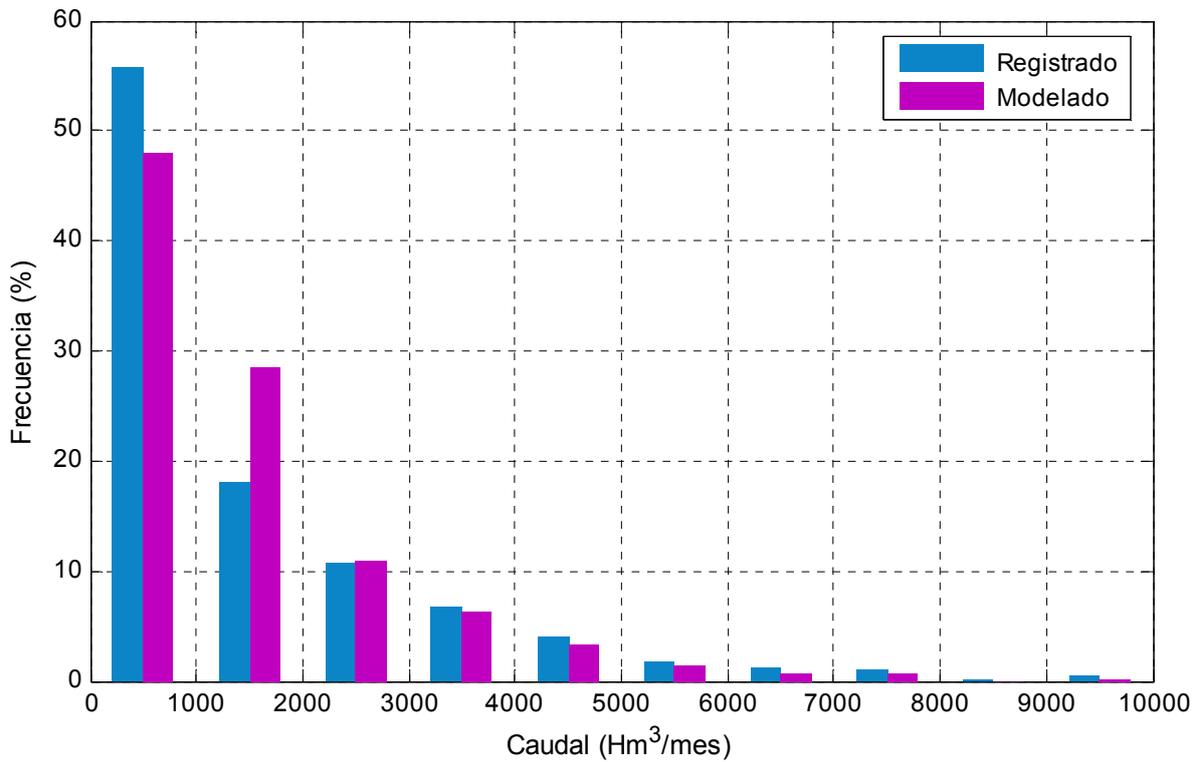
**Tabla 4-7 Medidas de error /ajuste de la serie de caudal simulado respecto a la observada en el período 1925-1980**

Error / Ajuste	Serie mensual	Serie anual
Sesgo (Bias)	1453	444.7
Raíz de los errores medios cuadráticos	32.8	3842.8
Coefficiente de correlación de Pearson (R2)	0.83	0.9
Coefficiente de Nash-Sutcliffe (NS)	0.70	0.82

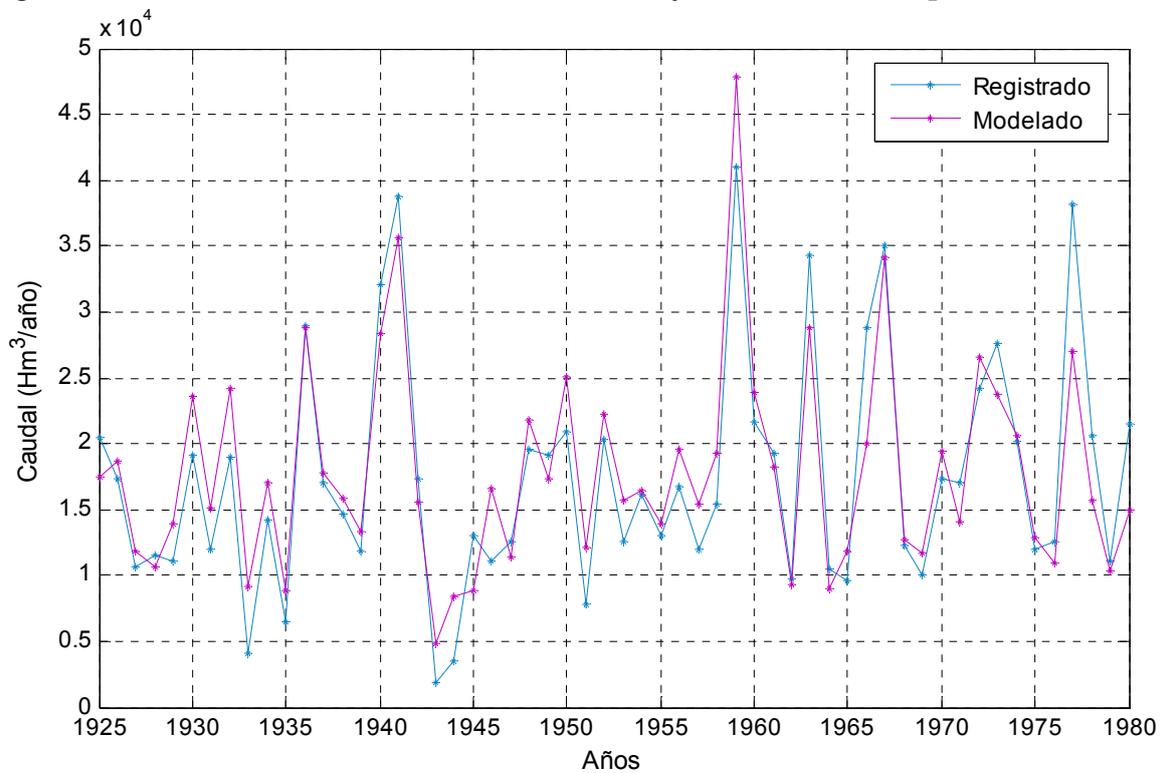
**Figura 4-9 Caudales mensuales naturales simulados y observados en el período 1970 - 1980**



**Figura 4-10 Histograma de caudales mensuales naturales simulados y observados en el período 1925 - 1980**



**Figura 4-11 Caudales anuales naturales simulados y observados en el período 1925 - 1980**



Puede observarse que, en líneas generales, la serie de caudales simulada representa correctamente la variación temporal y la magnitud del caudal observado. Sin embargo, si se comparan los caudales mes a mes, se identifican algunas diferencias considerables, sobre todo en lo que respecta a los caudales bajos.

Al respecto cabe mencionar que si bien existen, dentro de la cuenca, estaciones y curvas de aforo a partir de cuyos datos se podría haber realizado una calibración más exhaustiva del modelo de Temez en cada subcuenca, no se considera que dicho ajuste aporte resultados significativamente diferentes, teniendo en cuenta que el objetivo de la modelación hidrológica fue determinar el déficit de caudal de aporte a la represa G. Terra para los diferentes escenarios de demanda de agua dentro de la cuenca y no modelar el caudal absoluto de aporte a la misma.

Por otro lado, respecto a los caudales bajos, cabe mencionar que la medición de caudales mínimos en el país presenta grandes dificultades desde el punto de vista técnico, conduciendo a valores de caudal observados con errores relativos muy significativos (cercaos al 100%).

## 4.2.2. Déficit de caudal

A continuación se presentan los resultados obtenidos del déficit de caudal de aporte a la represa G. Terra para los escenarios A y F, para luego realizar una comparación entre ambos. En particular se destacan los resultados de los escenarios A1.5 y F1.5 ya que se consideran los más representativos del año 2015, para el cual, como se verá más adelante, fue simulado el sistema de energía eléctrica.

### 4.2.2.1. Riego de arroz

En la Tabla 4-8 se presentan los resultados del déficit de caudal de aporte a la represa G. Terra dado por la existencia de embalses para riego de arroz dentro de la cuenca, el volumen de riego y la evaporación neta correspondientes, en términos medios.

La denominada evaporación neta corresponde a la diferencia entre la evaporación y la precipitación directa en la superficie de los embalses de riego.

**Tabla 4-8: Déficit de caudal medio anual de aporte a la represa G. Terra dado por la existencia de embalses para riego de arroz dentro de la cuenca – diferentes escenarios de expansión**

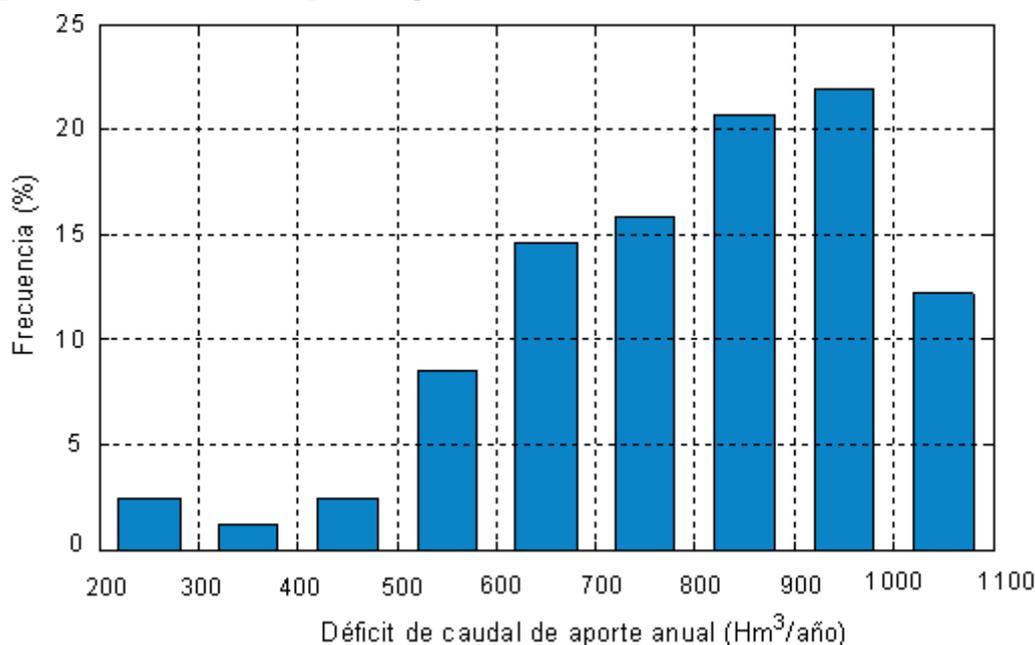
Escenario	Déficit de caudal (Hm <sup>3</sup> )	Volumen de riego (Hm <sup>3</sup> )	Evaporación neta (Hm <sup>3</sup> )
A1	527.6	468.8	57
A1.5	791.3	703.2	85.6
A2	1055.1	937.6	114.1
A2.5	1318.9	1172	142.5
A3	1582.7	1406.4	171
A4	2110.3	1875.2	228
A5	2637.8	2344.1	285.1

En dicha tabla se observa que el déficit de caudal de aporte a la represa G. Terra es utilizado en su gran mayoría para el riego del cultivo de arroz (en un 90% en términos medios), perdiéndose el 10% del mismo en evaporación de los embalses de riego.

Observando el déficit de caudal del escenario A1.5, para el cual el volumen máximo embalsado en los embalses de riego es de 960 Hm<sup>3</sup>, puede concluirse que en la simulación realizada, los embalses de riego no alcanzan su volumen máximo el 100% de los años simulados.

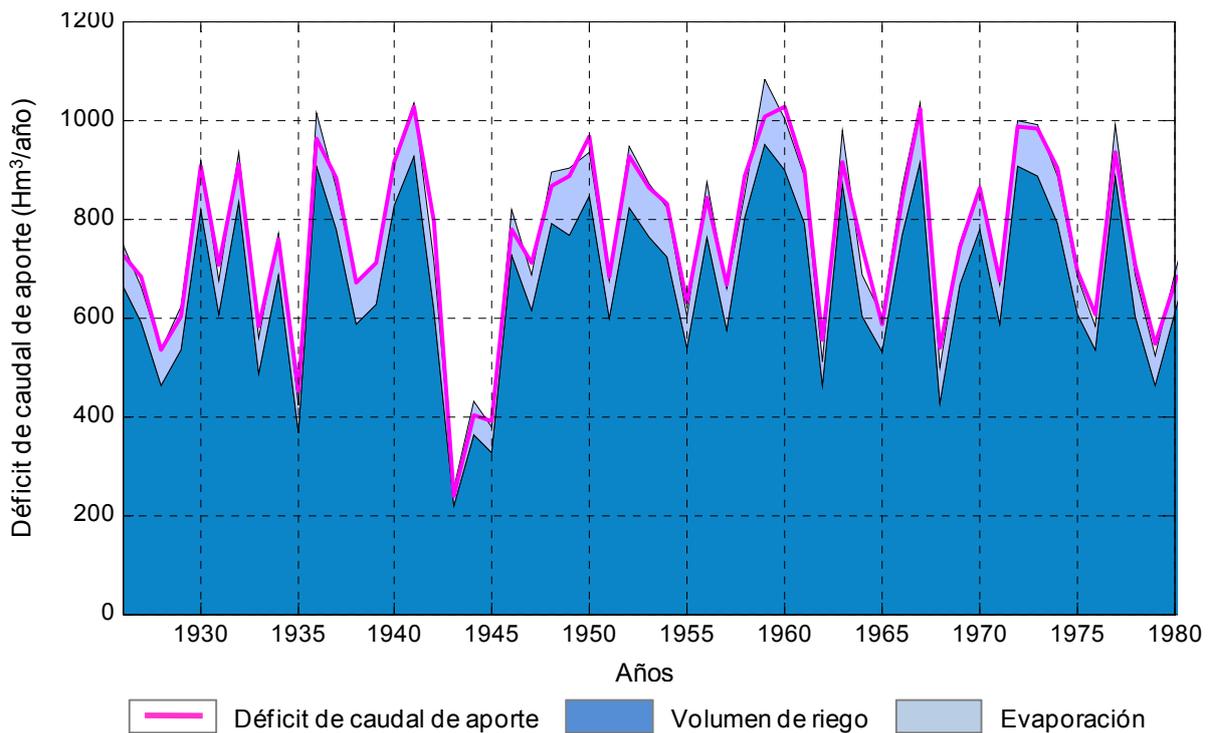
En la Figura 4-12 se presenta un histograma de frecuencias del déficit de caudal anual de aporte para el escenario A1.5, en donde se observa que casi un 75% de los años el déficit de caudal anual ronda entre los 600 y los 1000 Hm<sup>3</sup>, distribuyéndose bastante uniformemente entre dichos valores.

**Figura 4-12: Histograma del déficit de caudal anual de aporte a la represa G. Terra dado por la presencia de embalses para riego de arroz dentro de la cuenca – Escenario A1.5**



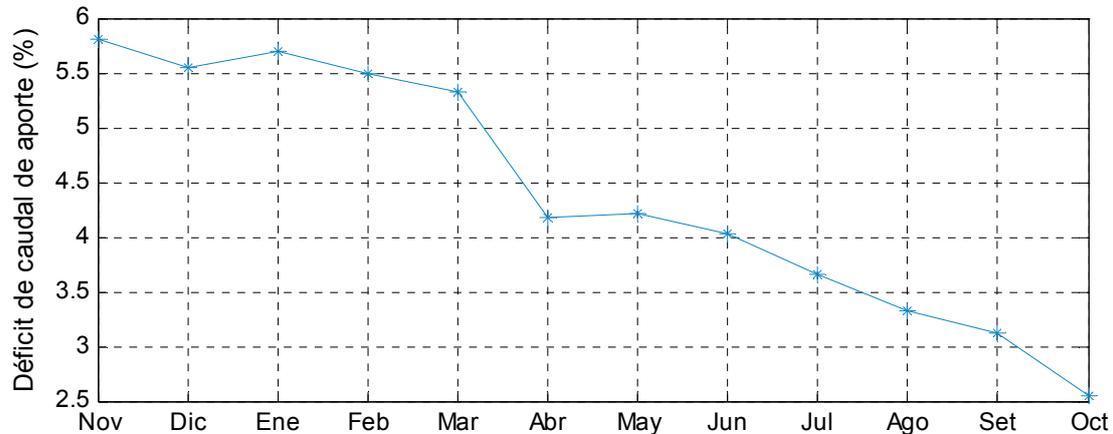
En la Figura 4-13 se presenta la evolución del déficit de caudal anual de aporte a la represa G. Terra, así como la distribución del mismo en riego y evaporación neta, estos últimos desfasados un año. El déficit de caudal generado en un año, asociado al volumen almacenado en los embalses de riego en dicho año, es utilizado para riego al año siguiente y también se correlaciona mayormente con la evaporación del año siguiente.

**Figura 4-13: Distribución del déficit de caudal de aporte a la represa G. Terra dado por la presencia de embalses para riego de arroz dentro de la cuenca – Escenario A1.5**



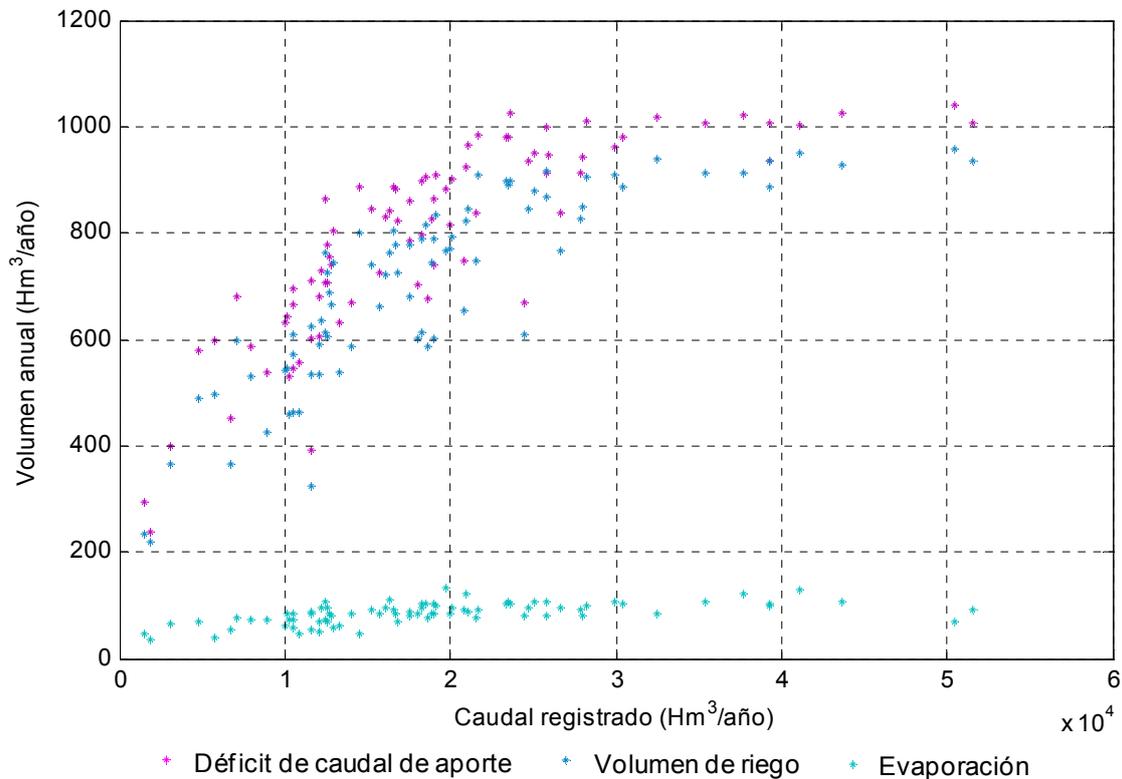
En la Figura 4-14 se presenta el ciclo medio anual del déficit de caudal de aporte a la represa G. Terra, en que se refleja claramente el ciclo anual de llenado y vaciado de los embalses de riego. En dicho ciclo, durante los meses de Noviembre a Febrero, correspondientes a la zafra de riego, los embalses se vacían equitativamente durante los 4 meses, mientras que el resto del año (de marzo a octubre) correspondiente al período de llenado de los embalses, el déficit de caudal de aporte a la represa G. Terra va disminuyendo a medida que se va alcanzando el volumen máximo de los diferentes embalses (y por lo tanto comienzan a verter).

**Figura 4-14: Ciclo medio anual mensual del déficit de caudal de aporte a la represa G. Terra dado por la presencia de embalses para riego de arroz dentro de la cuenca – Escenario E 1.5**



Finalmente, en la Figura 4-15, se presenta el déficit de caudal de aporte a la represa G. Terra en relación a los caudales observados simultáneos y el volumen de riego y la evaporación neta anual en relación a los caudales observado el año previo. De este modo vincula el déficit, en cuya modelación participa fuertemente la precipitación, con los caudales de aportes observados. En dicha figura puede notarse cómo para caudales observados altos (años húmedos) todas las variables tienden a una asíntota correspondiente a la situación en que todos los embalses de riego existentes dentro de la cuenca alcanzan su volumen máximo, es decir que se satura la capacidad de almacenamiento del sistema de riego.

**Figura 4-15: Déficit de caudal, volumen de riego y evaporación neta anual en función del caudal anual observado – Escenario A 1.5**



#### 4.2.2.2. Forestación

En esta sección se presenta, en primer lugar, una comparación de los resultados del déficit de caudal dado por la presencia de forestación, obtenidos a partir de las diferentes metodologías utilizadas. Luego, se presentan los resultados de déficit de caudal de aporte a la represa G. Terra con los que se seguirá adelante en este estudio, seleccionados en función de las conclusiones extraídas de realizar dicha comparación.

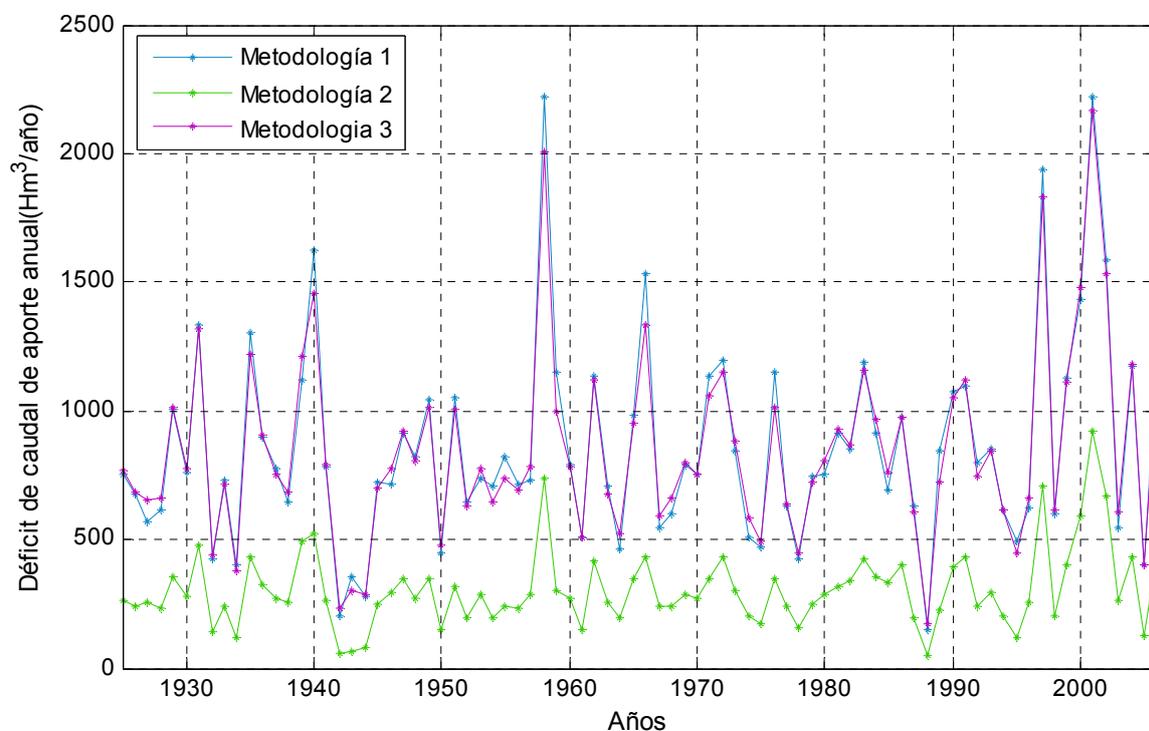
A continuación se comparan los resultados del déficit de caudal anual para el escenario F1, dados por las 3 metodologías utilizadas. Dicha comparación se realiza tanto para la cuenca total de aporte a la represa G. Terra como para la subcuenca 1 (Manuel Díaz).

La primera tiene como objetivo evaluar las diferencias obtenidas en el déficit de caudal que efectivamente se quiere representar.

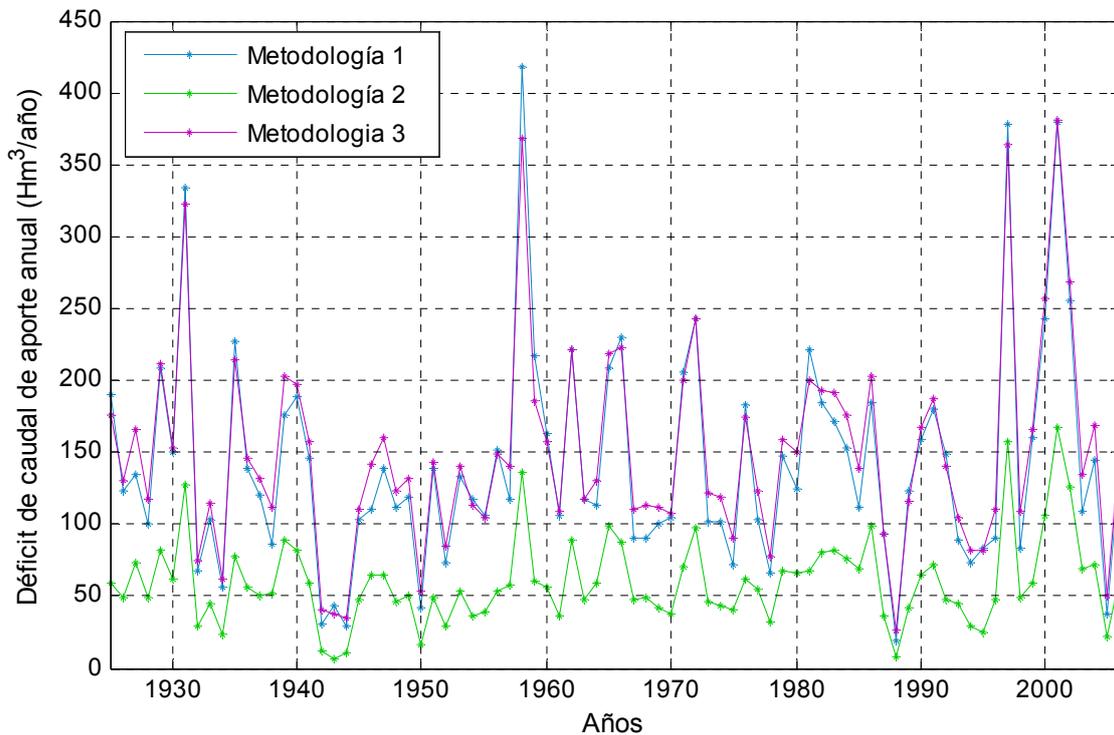
Por su parte, la segunda comparación tiene como objetivo evaluar los resultados de las metodologías 2 y 3 respecto a la metodología 1, ya que esta última corresponde para la cuenca 1 y el escenario F1 a la aplicación directa de los resultados experimentales obtenidos por Silveira, L. y Alonso, J., pudiendo considerarse como representativa de la realidad.

En las Figuras 4-16 y 4-17 puede observarse la gran similitud que presentan los resultados obtenidos con las metodologías 1 y 3, tanto para la cuenca de aporte a la represa G. Terra como para la subcuenca 1, mientras que los resultados obtenidos con la metodología 2 resultan considerablemente inferiores. Puede observarse también que en el caso de caudales altos, las tres metodologías suelen alejarse, reportando la metodología 1 los mayores déficits, seguida de la metodología 3.

**Figura 4-16: Evolución del déficit de caudal anual de aporte a la represa G. Terra dado por la presencia de forestación dentro de la cuenca en el período 1925 - 2007- Escenario F1**



**Figura 4-17: Evolución del déficit de caudal anual de aporte de la cuenca 1 dado por la presencia de forestación en el período 1925 - 2007 - Escenario F1**



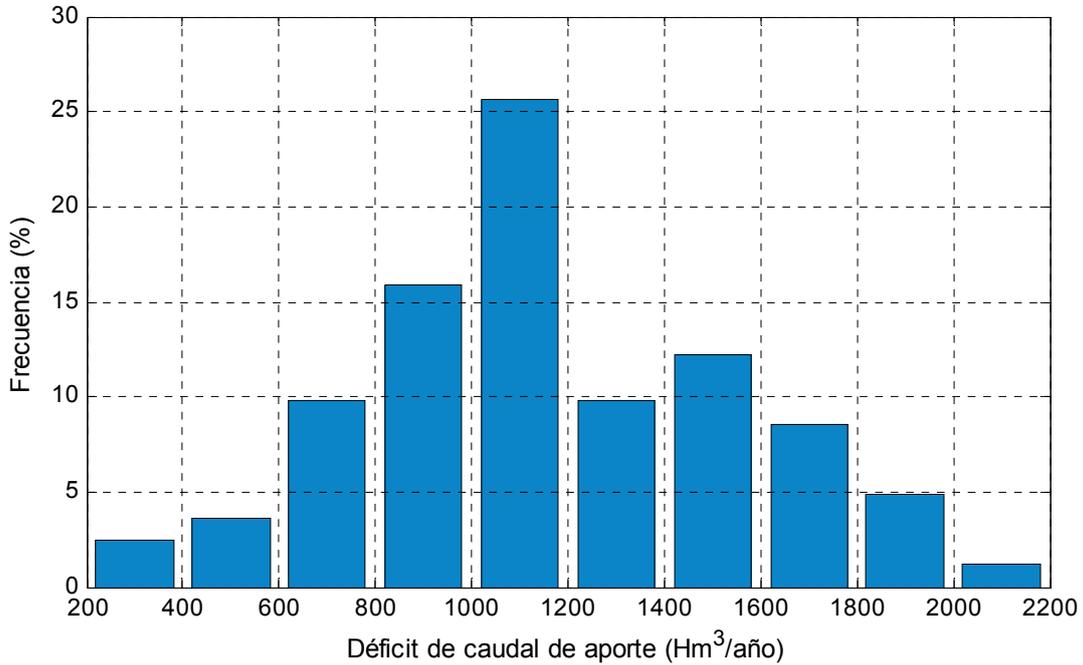
En función de los resultados obtenidos, se optó por seleccionar, para seguir adelante en este estudio, los resultados correspondientes a la metodología 3, por considerarse una de las más consistentes (dada su similitud con otra de las metodologías, de muy distinta naturaleza), por ser una metodología más global y más flexible que la metodología 1 y por situarse en un punto intermedio en lo que respecta al déficit de caudal dados para caudales de aporte altos. Por lo tanto, de aquí en más, se seguirá únicamente con los resultados obtenidos por la metodología 3, habiéndose establecido la dispersión generada por variantes metodológicas.

En la Tabla 4-9 se presentan los resultados de déficit de caudal de aporte a la represa G. Terra para los diferentes escenarios de expansión considerados y en la Figura 4-18 se presenta un histograma de frecuencias del déficit de caudal anual de aporte a la represa G. Terra para el escenario F1.5.

**Tabla 4-9: Déficit de caudal medio anual de aporte a la represa G. Terra dado por la existencia de forestación dentro de la cuenca - diferentes escenarios de expansión**

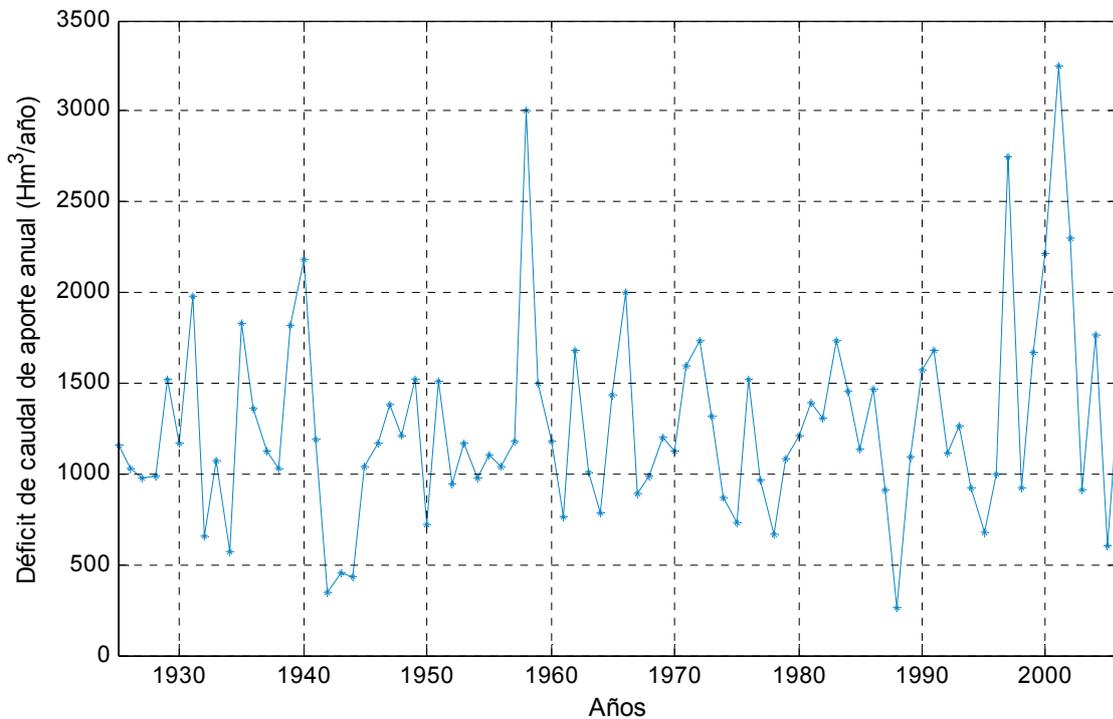
Escenario	Déficit de caudal (Hm³/año)
F1	846.7
F1.5	1270.0
F2	1693.4
F3	2540.1

**Figura 4-18: Histograma del déficit de caudal anual de aporte a la represa G. Terra dado por la presencia de forestación dentro de la cuenca – Escenario F 1.5**



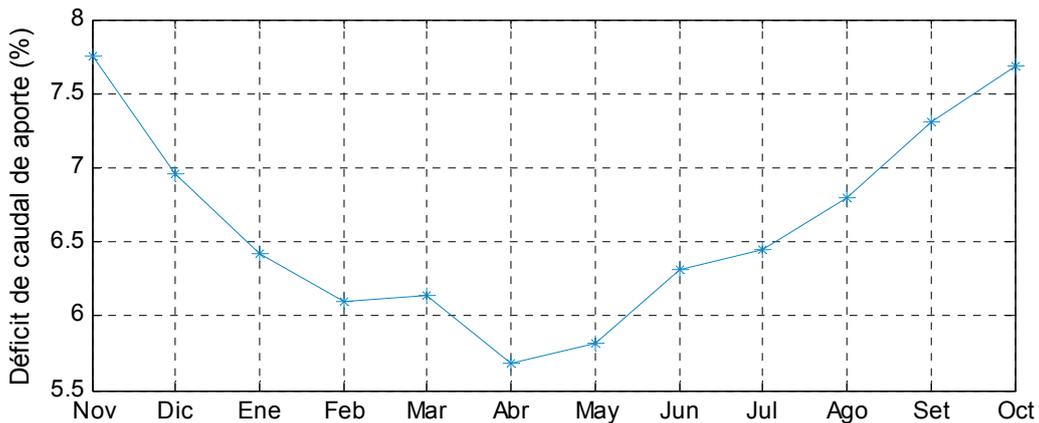
Asimismo, en la figura siguiente se presenta la evolución del déficit de caudal anual de aporte a la represa G. Terra dado por el escenario F1.5.

**Figura 4-19: Evolución del déficit de caudal anual de aporte a la represa G. Terra dado por la presencia de forestación dentro de la cuenca en el período 1925 - 2007- Escenario F1.5**



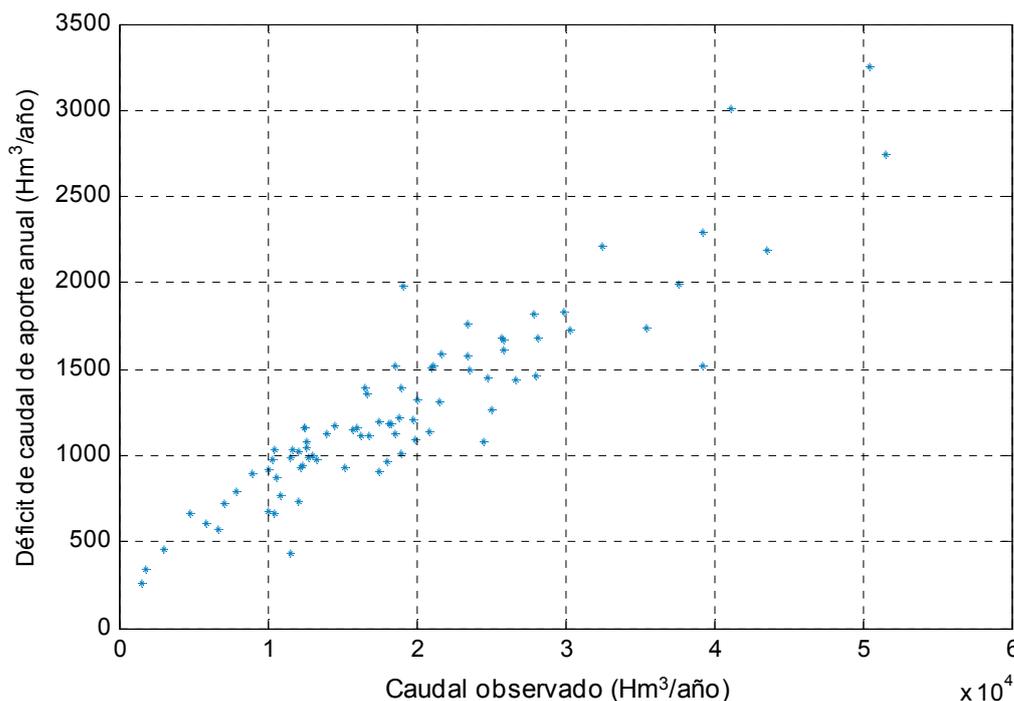
En la Figura 4-20 se presenta el ciclo medio anual del déficit de caudal de aporte a la represa G. Terra, relativo al caudal *natural* modelado para el mismo escenario F1.5. Puede observarse un comportamiento bastante gradual del déficit de caudal a lo largo del año, con un mínimo en los meses de abril y mayo.

**Figura 4-20: Ciclo medio anual mensual del déficit de caudal de aporte a la represa G. Terra dado por la presencia de forestación dentro de la cuenca – Escenario F 1.5.**



Finalmente, en la Figura 4-21 se presenta el déficit de caudal de aporte a la represa G. Terra correspondiente al escenario F1.5, en relación al caudal observado en la misma. En dicha Figura puede observarse cómo el déficit de caudal aumenta en forma aproximadamente lineal con el caudal observado, contrariamente a lo que sucede en el caso de los embalses de riego de arroz.

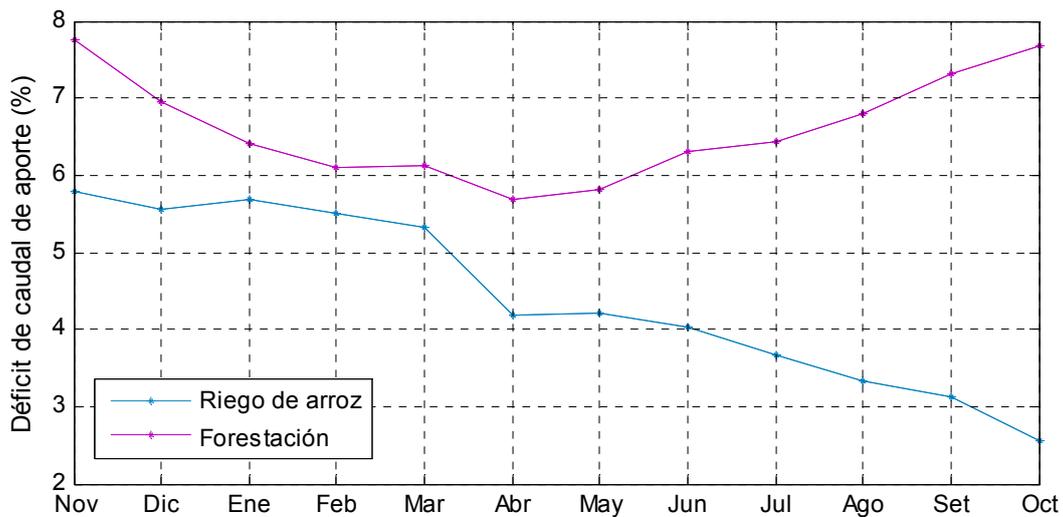
**Figura 4-21: Déficit de caudal anual de aporte a la represa G. Terra en función del caudal anual observado – Escenario F 1.5**



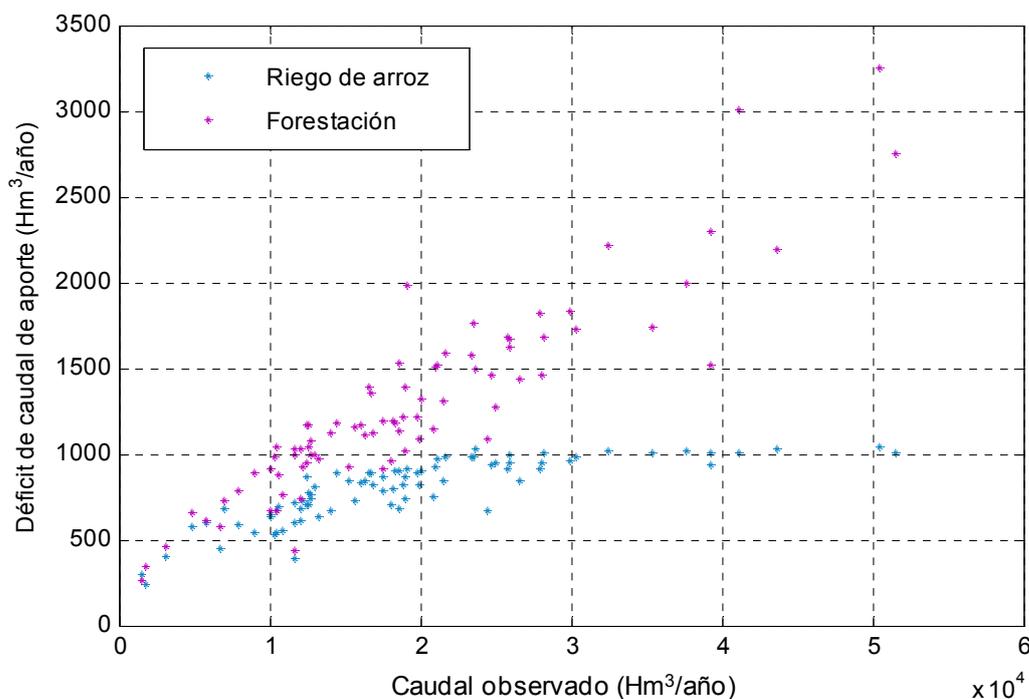
### 4.2.3. Comparación arroz - forestación

A continuación se comparan algunos de los resultados ya presentados del déficit de caudal de aporte a la represa G. Terra dado por la presencia de embalses para riego de arroz (escenario A1.5) y por la presencia de cobertura forestal (escenario F1.5) dentro de la cuenca.

**Figura 4-22: Ciclo medio anual mensual del déficit de caudal de aporte a la represa G. Terra - Escenarios A1.5 y F1.5**



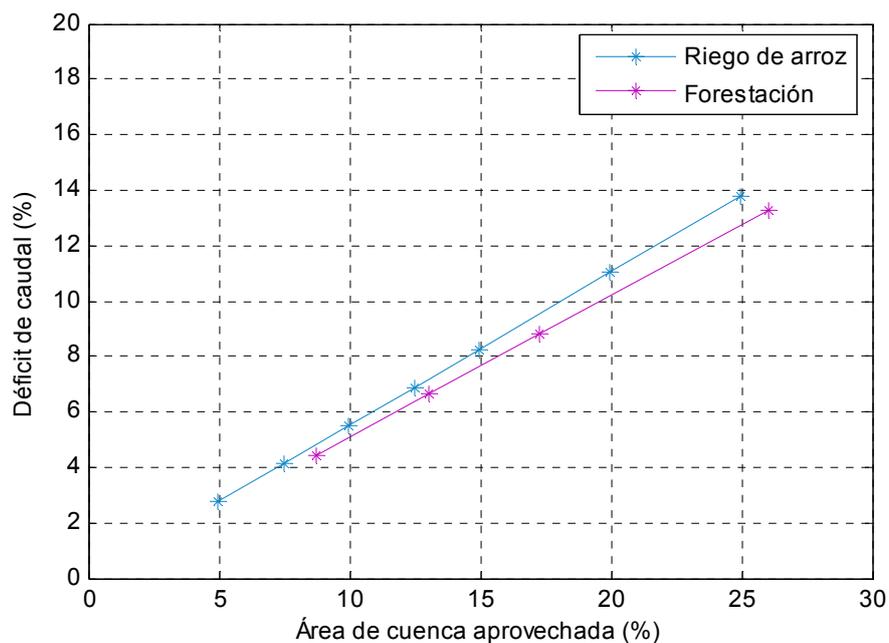
**Figura 4-23: Déficit de caudal anual de aporte a la represa G. Terra en función del caudal anual observado - Escenarios A1.5 y F 1.5**



Luego, en la Figura 4-24 se grafica el déficit de caudal anual medio de aporte a la represa G. Terra (en % respecto al caudal total de aporte) en función del área de cuenca aprovechada (en % respecto al área total de la cuenca) por los diferentes escenarios de demanda considerados. El área de cuenca aprovechada corresponde, en los escenarios de riego de arroz a la sumatoria del área de las cuencas de aporte de todos los embalses de riego, mientras que en los escenarios de forestación está dada directamente por la superficie total con cobertura forestal.

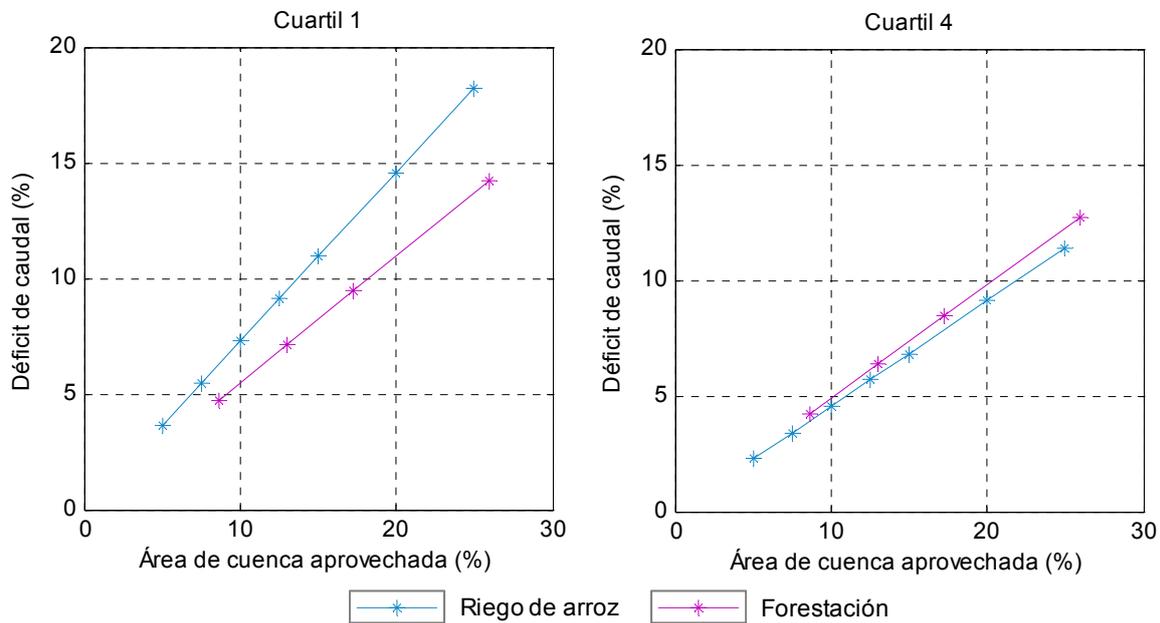
En dicha figura puede observarse que en términos medios, a igual porcentaje de área de cuenca aprovechada, el déficit de caudal dado por la presencia de embalses de riego de arroz es algo mayor al dado por la presencia de cobertura forestal, acentuándose dicha diferencia a medida que aumenta el área de cuenca aprovechada (o la demanda de agua).

**Figura 4-24: Déficit de caudal medio anual de aporte a la represa G. Terra (%) dado por la presencia de embalses de riego de arroz y por la forestación en función del área de cuenca aprovechada (%)**



Por último, en la Figura 4-25 se gráfica lo mismo que en la Figura anterior pero para los cuartiles 1 y 4 del caudal total de aporte a la represa G. Terra, correspondiendo el cuartil 1 a los años más secos y el cuartil 4 a los años más húmedos.

**Figura 4-25: Déficit de caudal medio anual de aporte a la represa G. Terra (%) dado por la presencia de embalses de riego de arroz y por la forestación en función del área de cuenca aprovechada (%) – Cuartil 1 y 4 del caudal de aporte**



En dicha figura puede observarse que en los años más secos la diferencia entre el déficit de caudal dado por la presencia de embalses de riego de arroz y por la presencia de cobertura forestal se acentúa respecto al promedio, mientras que en los años más húmedos dicha diferencia se invierte, generando la forestación un déficit de caudal de aporte algo mayor a igual área de cuenca aprovechada.

# 5. PARAMETRIZACIONES DEL DÉFICIT DE CAUDAL

---



## 5. PARAMETRIZACIONES DEL DÉFICIT DE CAUDAL

Como fue desarrollado en el capítulo anterior, a partir de la simulación hidrológica se obtuvieron las series de déficit mensual de caudal de aporte a la represa G. Terra para las precipitaciones ocurridas en el período 1925-2007, correspondientes a los diferentes escenarios de demanda de agua considerados dentro de la cuenca.

En este capítulo se presenta la forma en que fue utilizado dicho trabajo, conjuntamente con el caudal observado en la represa G. Terra, para obtener las series de caudal de aporte a G. Terra correspondientes a los diferentes escenarios.

El procedimiento realizado para ello consistió en relacionar las series de déficit de caudal simuladas en el período 1925-2007 con el caudal observado en la represa G. Terra en el mismo período. De esta forma se vincula, a través de la cronología, el déficit modelado y el caudal observado, ambos directamente dependientes de la precipitación.

Las series de caudales de aporte a la represa G. Terra así obtenidas serán utilizadas, como se verá más adelante, para realizar las simulaciones del sistema eléctrico uruguayo correspondientes a los diferentes escenarios.

## 5.1. RIEGO DE ARROZ

Para los escenarios correspondientes al riego del cultivo de arroz se encontró una relación, para cada mes del año, entre el déficit de caudal acumulado desde el noviembre previo al mes en cuestión, en función del caudal observado acumulado en el mismo período. Dicha relación, además de verificar al mejor ajuste encontrado, acompaña la dinámica de los embalses de riego.

Los ajustes encontrados corresponden a curvas arco tangentes, las cuales fueron parametrizadas para cada mes del año y para cada escenario de expansión del cultivo de arroz, obteniendo:

$$\Delta Q_A^{\text{nov:k}} = M \cdot a(k) \cdot \arctg [b(k) \cdot Q_{\text{obs}}^{\text{nov:k}}], \text{ para } k=1, \dots, 12$$

$$\text{Con: } a(k) = 166.9 \cdot \text{Log}(k) + 66.1$$

$$b(k) = 0.534 \cdot k^{-0.47}$$

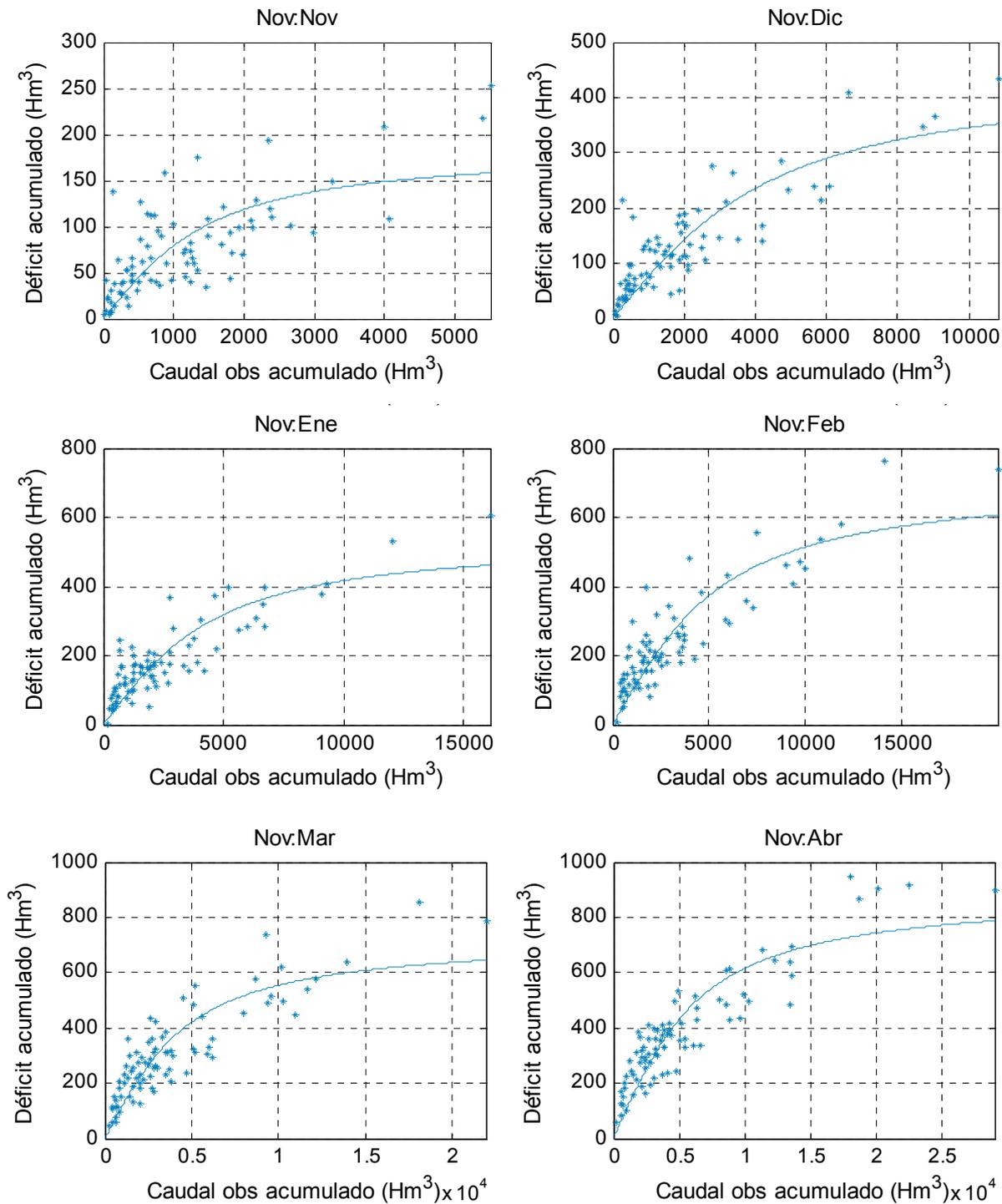
Siendo:  $\Delta Q_A^{\text{nov:k}}$  el déficit de caudal acumulado desde el mes de noviembre al mes k, correspondiente a algún escenario A.

M el multiplicador que define al escenario A (1,1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4 ó 5)

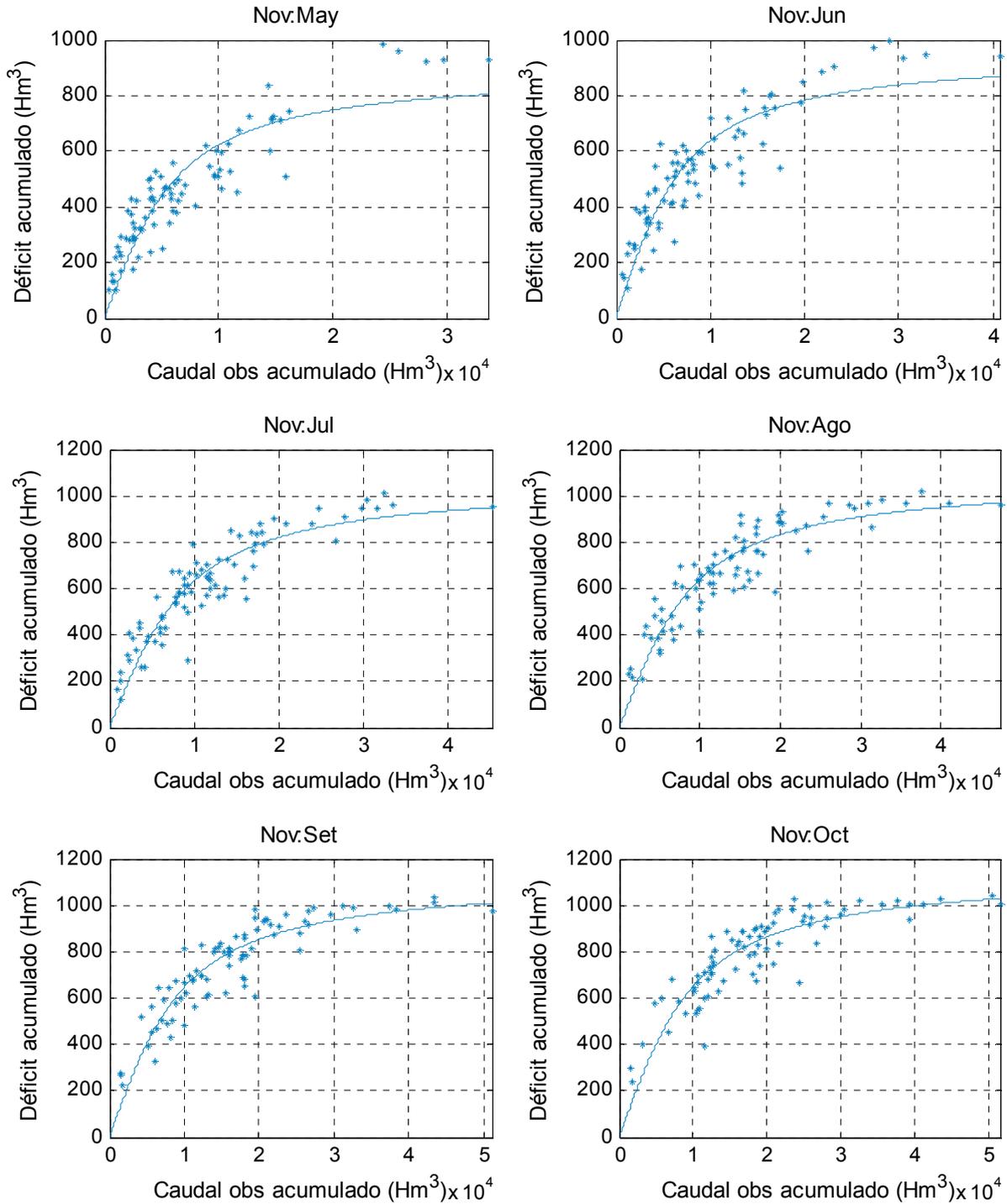
$Q_{\text{obs}}^{\text{nov:k}}$  el caudal observado en la represa G. Terra acumulado desde el mes de noviembre al mes k.

En las figuras siguientes se presentan dichas relaciones para el escenario A1.5 así como los ajustes obtenidos. En dichas figuras puede observarse que a medida que se avanza en el año (noviembre-octubre) la dispersión del ajuste se va reduciendo, alcanzando la menor dispersión para los acumulados anuales. Los valores del coeficiente de correlación varían entre 0.7 y 0.84.

**Figura 5-1: Relaciones déficit de caudal acumulado – caudal observado acumulado Escenario A1.5**

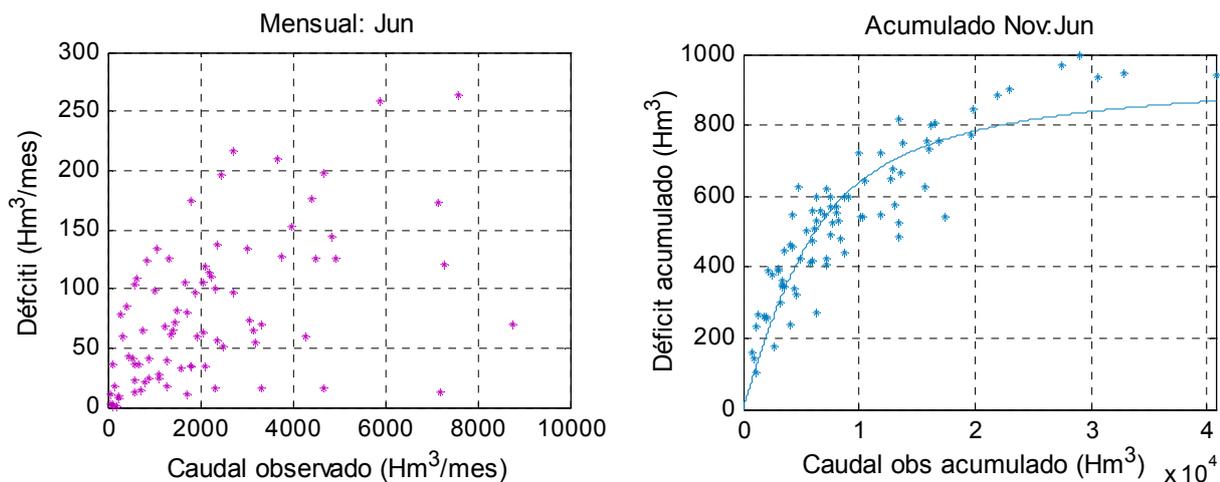


**Continuación Figura 5-1: Relaciones déficit de caudal acumulado - caudal observado acumulado Escenario A1.5**



Cabe mencionar que el ajuste presentado fue seleccionado luego de explorar diferentes relaciones entre el déficit de caudal en función del caudal observado. Entre ellas, la relación directa mes a mes, la relación directa y acumulada por cuartil, etc. A modo de ejemplo, en la Figura 5-2 se presenta la relación directa entre el déficit de caudal y el caudal observado para el mes junio en comparación con la seleccionada para realizar el ajuste, observándose en la primera una dispersión mucho mayor.

**Figura 5-2: Comparación diferentes relaciones déficit de caudal – caudal observado Escenario A1.5**



Por otro lado, también se obtuvo un ajuste entre el volumen anual de riego de arroz obtenido de la modelación hidrológica y el caudal anual observado en la represa G. Terra el año previo, obteniendo la siguiente parametrización:

$$V_{\text{riego}} = M \cdot 458.1 \cdot \arctg [105 \cdot 10^{-6} \cdot Q_{\text{obs}}]$$

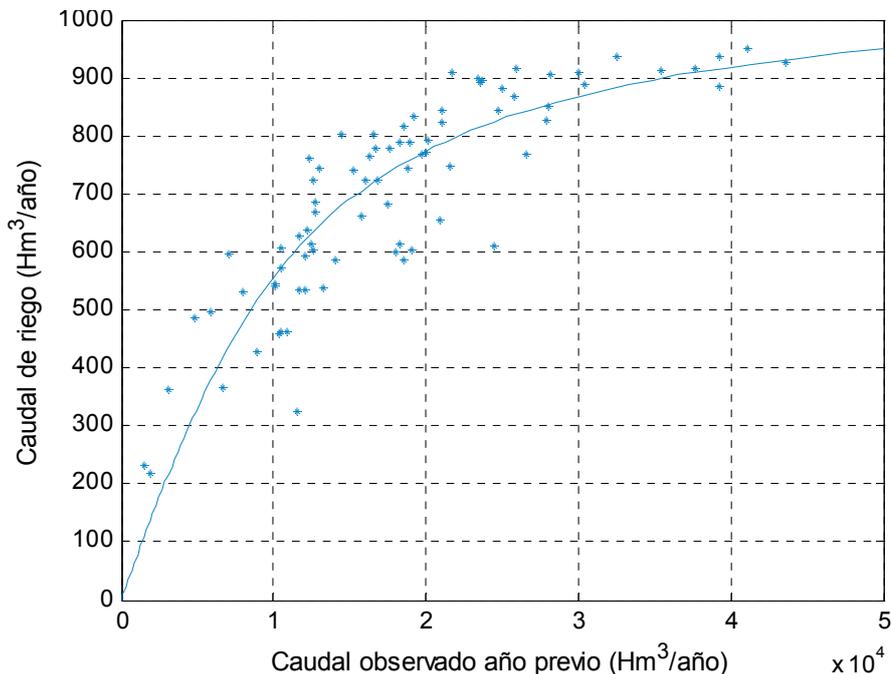
Siendo:  $V_{\text{riego}}$  el volumen de riego de arroz anual, correspondiente a algún escenario A.

M el multiplicador que define al escenario A (1,1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4 ó 5)

$Q_{\text{obs}}$  el caudal anual (noviembre-octubre) observado en la represa G. Terra el año previo.

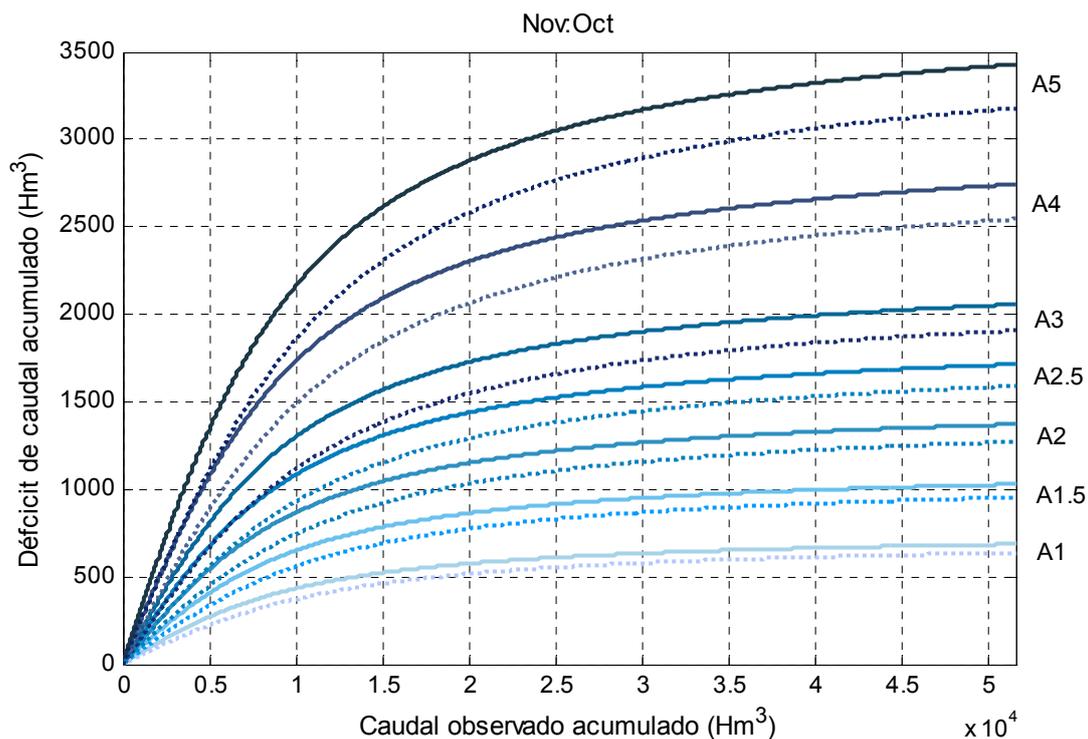
En la Figura 5-3 se presenta dicho ajuste para el escenario A1.5.

**Figura 5-3: Relación volumen de riego anual – caudal observado anual (año previo)**  
**Escenario A1.5**



Por último en la figura siguiente, se presentan las curvas de déficit de caudal anual (noviembre-octubre) y de volumen de riego resultantes para los distintos escenarios. La brecha que se observa entre dichas curvas correspondería a la pérdida de agua por evaporación en los embalses de riego.

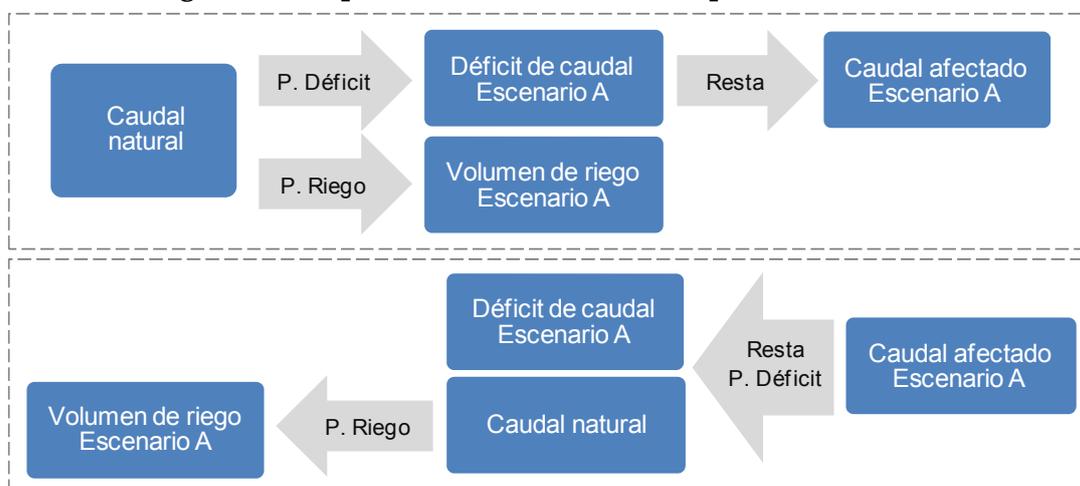
**Figura 5-4: Ajustes déficit de caudal anual y volumen de riego en función del – caudal observado – Distintos escenarios**



Utilizando las curvas parametrizadas es posible estimar, a partir de una serie de caudal mensual observado en la represa G. Terra, la serie de caudal mensual afectado de aporte a la misma y la serie de volumen de riego anual correspondientes a cualquiera de los escenarios de expansión del cultivo de arroz. Para ello se calcula en primer lugar el caudal observado acumulado en cada mes como la suma de los caudales mensuales desde el mes de noviembre previo hasta dicho mes. Luego, con dicha serie de caudales acumulados, se calcula la serie de déficit de caudal mensual acumulado utilizando las curvas parametrizadas correspondientes a cada mes y al escenario en cuestión. Finalmente, se desacumula dicha serie de déficit de caudal acumulado, restándole a cada mes el acumulado del mes anterior. Obtenido el déficit de caudal mensual, simplemente se lo deduce a la serie de caudal observado para obtener la serie de caudal afectado asociada. Por otro lado, con la serie de caudal observado anual (noviembre-octubre) también es posible estimar la serie de volumen de riego asociada, utilizando directamente la curva de volumen de riego correspondiente (Figura 5-4).

Asimismo, también es posible realizar el procedimiento inverso, es decir, determinar la serie de caudal natural a partir de una serie de caudal afectado correspondiente a alguno de los escenarios de riego de arroz considerados. Teniendo en cuenta que la serie de déficit de caudal no es más que la resta entre la serie de caudal observado y la serie de caudal afectado, se tiene entre dicha relación y la parametrización correspondiente al escenario en cuestión un sistema de 2 ecuaciones, del cual se puede calcular numéricamente (no es despejable analíticamente) el déficit de caudal y el caudal observado. Luego, a partir de dicho caudal observado, puede estimarse también la serie de volumen de riego correspondiente al mismo escenario (Figura 5-4). Este procedimiento será útil a la hora de estimar el volumen de riego a partir de series sintéticas de caudal afectado, las que como se verá más adelante, son generadas para simular el sistema de energía eléctrica.

**Figura 5-5: Esquema de utilización de las parametrizaciones**



*P. Déficit: parametrizaciones del déficit de caudal. P. Riego: parametrización del volumen de riego de arroz. Resta: Caudal afectado = Caudal natural – Déficit de caudal.*

## 5.2. FORESTACIÓN

Para los escenarios correspondientes a la forestación se encontró la siguiente relación lineal entre el déficit de caudal acumulado anual y el caudal anual observado:

$$\Delta Q_F = M \cdot (0.033 \cdot Q_{obs} + 215.3)$$

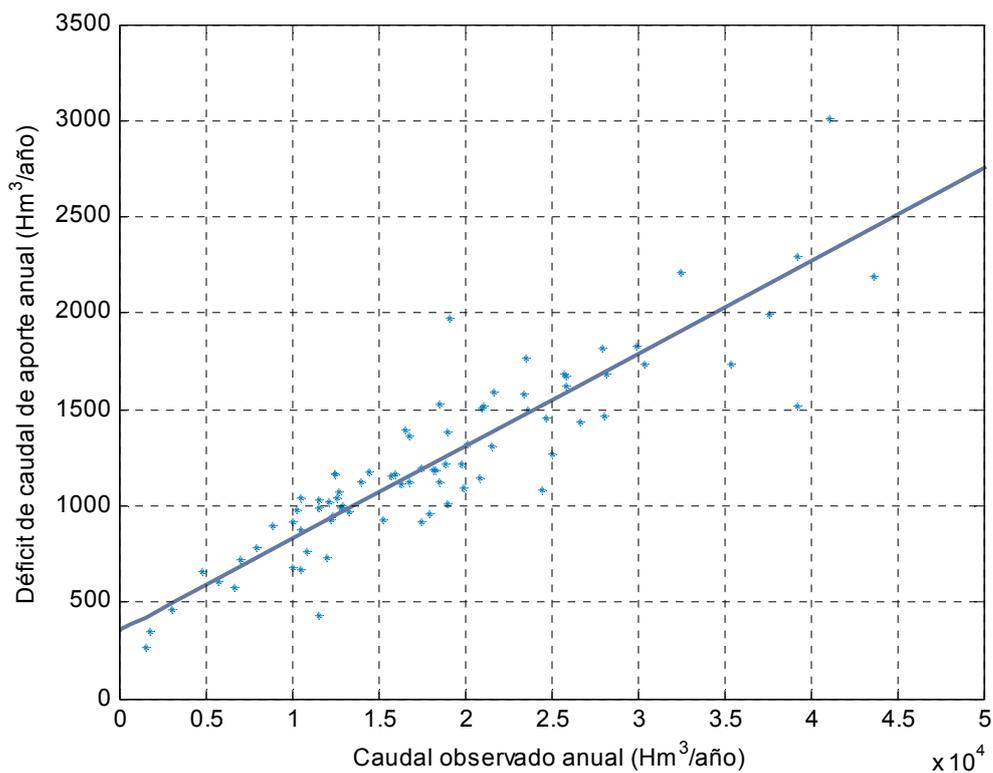
Siendo:  $\Delta Q_F$  el déficit de caudal anual correspondiente a algún escenario F.

M el multiplicador que define al escenario F (1, 1.5, 2, ó 3)

$Q_{obs}$  el caudal anual observado en la represa G. Terra.

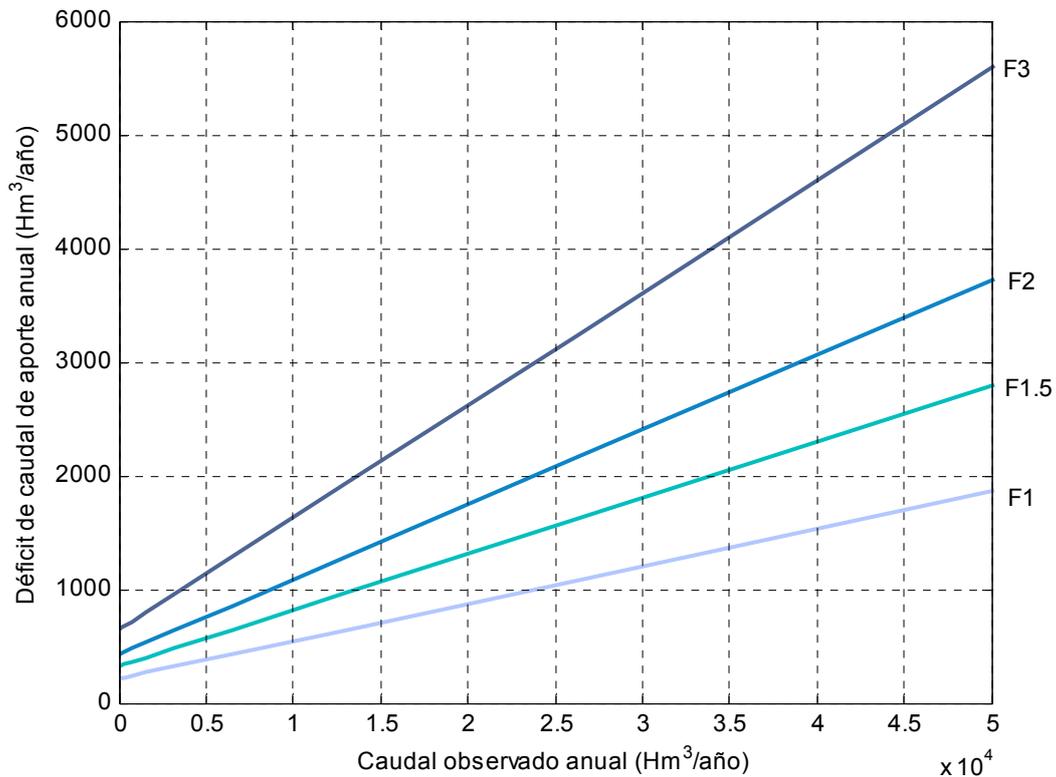
En la Figura 5-6 se presenta el ajuste para el escenario F1.5, siendo el coeficiente de correlación de 0.9.

**Figura 5-6 Relación déficit de caudal anual – caudal observado anual  
Escenario F1.5**



En la Figura 5-7 se presentan las rectas ajustadas de déficit de caudal anual en función del caudal anual observado en la represa G. Terra, para los diferentes escenarios de expansión de cobertura forestal considerados.

**Figura 5-7 Ajustes déficit de caudal anual – caudal observado anual  
Distintos escenarios**



En este caso, para determinar la serie de caudal afectado para algún escenario F asociada a la serie de caudal observado en la represa G. Terra, se calcula en primer lugar el déficit de caudal anual utilizando la parametrización correspondiente a partir de la serie anual de caudal observado. Luego, la distribución mensual del déficit se realiza asignándole a cada mes la misma proporción en función del caudal mensual observado.



# 6. MODELACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO

---





## 6. MODELACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO

El objetivo de la modelación del sistema eléctrico fue estimar el **incremento en el costo directo** de suministrar la demanda de energía eléctrica, como consecuencia del **déficit de caudal** de aporte a la represa G. Terra dado por los diferentes escenarios de demanda de agua considerados dentro de la cuenca.

Para ello se optimizó y se simuló el sistema eléctrico uruguayo considerando los aportes hidráulicos a la represa G. Terra correspondientes a un escenario no afectado y a los diferentes escenarios de demanda de agua considerados dentro de la cuenca.

A continuación se describe el modelo de simulación del sistema eléctrico utilizado (SimSEE) así como el escenario energético considerado y las simulaciones realizadas. Los resultados obtenidos, así como su interpretación y análisis se presentan en los capítulos 7 y 8.

### 6.1. MODELO SIMSEE

El modelo SimSEE (Simulador de Sistemas de Energía Eléctrica) fue desarrollado en el año 2007 por el Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, en el marco de del proyecto de desarrollo tecnológico PDT-47-12 financiado por el BID.

El SimSEE permite realizar simulaciones de operación óptima de sistemas de generación eléctrica en la que participan centrales de generación hidroeléctrica, centrales de generación en base a combustibles fósiles, parques eólicos e interconexiones eléctricas.

La operación óptima del sistema de generación eléctrica consiste en disponer de una política de operación, que no es otra cosa que la valorización de los recursos almacenables del sistema, de forma tal de poder evaluar en todo momento la conveniencia o no de usar cada recurso. El recurso almacenable de mayor importancia en este caso es al agua en las represas hidroeléctricas, en particular en la represa G. Terra por ser la que tiene mayor capacidad de regulación.

La obtención de dicha política de operación se logra en SimSEE, a través de una etapa de optimización con el objetivo de minimizar el valor esperado del costo total del sistema en el horizonte de tiempo de estudio (costo futuro) para todas las realizaciones

posibles de las variables aleatorias que intervienen (entre las que se encuentran los aportes hidráulicos de las represas).

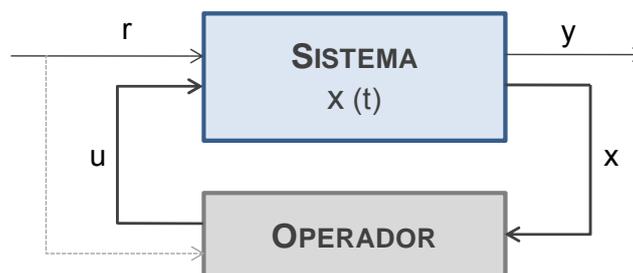
Es posible definir el costo futuro (CF) como el costo de operar el sistema desde un paso de tiempo  $k$  hasta el infinito, de la siguiente manera:

$$CF(x, U_k, R_k, k) = \sum_{i=k}^{\infty} q^{j-k} \cdot CE(x, u_j, r_j, i)$$

Donde  $x$  corresponde al estado del sistema al inicio de la etapa  $k$ ;  $U_k = \{u_k, u_{k+1}, \dots\}$  y  $R_k = \{r_k, r_{k+1}, \dots\}$  son realizaciones de las entradas controlables y no controlables del sistema, desde el paso de tiempo  $k$  en adelante, respectivamente;  $CE$  es el costo del sistema en la etapa  $k$ ; y  $q$  es un actualizador para tener en cuenta la tasa de oportunidad del capital.

Las entradas controlables corresponden a las variables de decisión que se utilizan para operar el sistema (potencia generada en cada una de las unidades de generación o caudales turbinados en las centrales hidroeléctricas), mientras que las entradas no controlables corresponden a variables externas (aportes hidráulicos a las represas, precios de los combustibles, etc.). Por último, el costo del sistema en la etapa  $k$  corresponde a la sumatoria del costo variable de operación en las centrales (combustible y otros costos operativos) más el costo de no suministro de la demanda (en caso de que se produzca un déficit) más el costo de la energía que se necesite importar y menos los ingresos que se obtengan por la exportación de energía hacia otros sistemas.

**Figura 6-1 Esquema de la operación del sistema de simulación del sistema de energía eléctrica**



El SimSEE minimiza el valor esperado de  $CF$  mediante el procedimiento conocido como “Programación Dinámica Estocástica”. El procedimiento consiste en asumir conocido el valor del  $CF$  en la última etapa del horizonte de tiempo y calcular, en cada etapa desde el futuro hacia el presente, el mínimo valor esperado del costo futuro para cada estado del sistema ( $x$ ), para todas las realizaciones posibles de las variables aleatorias.

Para ello se utiliza la siguiente expresión recursiva del CF:

$$CF(x, U_k, R_k, k) = CE(x, u_k, r_k, k) + q \cdot CF(x', U_{k+1}, R_{k+1}, k+1)$$

Siendo  $x' = f(x, u_k, r_k, k)$  el estado del sistema al final de la etapa  $k$ , partiendo del estado  $x$  y dadas las realizaciones  $u_k$  y  $r_k$  de las entradas.

El valor de los recursos almacenables del sistema en función del estado del mismo en cada etapa (lo que constituye a la política de operación del sistema) estará dado por la derivada del CF obtenido respecto al estado del sistema.

Para realizar las distintas realizaciones de las variables aleatorias adecuadamente es necesario tener un proceso estocástico que genere caudales de aporte que describan apropiadamente la incertidumbre asociada a dicha variable mediante sorteos sucesivos. Asimismo, de dicho generador estocástico, es posible obtener series sintéticas de aportes de caudal a las represas hidroeléctricas para ser utilizadas en la etapa de simulación. A continuación se realiza una breve descripción de cómo se realiza esto en SimSEE.

### 6.1.1. Generación de series sintéticas

La generación de series sintéticas de las variables aleatorias se realiza en SimSEE a partir de la identificación de un modelo que represente al conjunto de series reales manteniendo algunas características importantes de las mismas, tales como su histograma de frecuencias y coeficientes de auto-correlación.

Dicho modelo consiste en construir un conjunto de funciones de deformación (una para cada semana del año) que transformen las series de datos (aportes hidráulicos) en series gaussianas de media cero y varianza uno.

Luego, en el espacio gaussiano, las series de datos transformadas son reproducidas a través de la salida de un filtro lineal alimentado por una fuente de ruido blanco gaussiano, cuyos coeficientes son estimados utilizando las series originales transformadas (garantizando que se mantengan los coeficientes de auto-correlación de las series).

Una vez determinadas las series sintéticas transformadas (a partir del filtro lineal) las mismas se antitransforman a través de la inversa de la función de deformación correspondiente a cada semana, para obtener las series sintéticas en el espacio real.

El modelo mencionado se denomina CEGH (Correlaciones en Espacio Gaussiano con Histograma) y se ejecuta a través del módulo AnalisisSerial del SimSEE.

## 6.2. ESCENARIO ENERGÉTICO

A continuación se describe el escenario de demanda y generación de energía eléctrica que fue considerado en todas las simulaciones realizadas. El mismo corresponde al año 2015.

### 6.2.1. Demanda

Fue considerada una demanda de energía eléctrica para el año 2015 de 10030 GWh, con la siguiente distribución semanal.

**Figura 6-2 Ciclo anual semanal de la demanda de energía eléctrica del país**



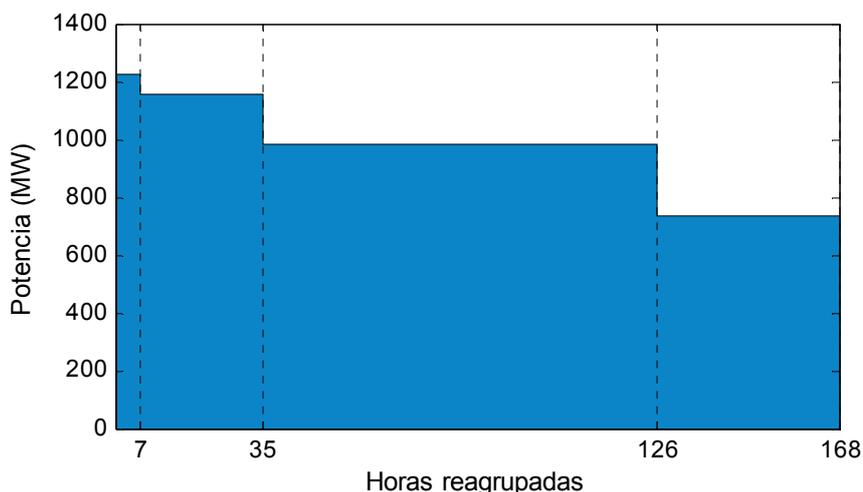
Para representar las variaciones horarias de la potencia demandada dentro de cada semana, se utiliza el concepto de poste o banda horaria. Para ello se desordena el tiempo en sub pasos horarios, agrupándolos por niveles similares de demanda. Se definen así las bandas en las cuales el nivel de demanda puede representarse por el promedio de la potencia de la demanda en los sub-pasos agrupados en la misma banda.

En las simulaciones realizadas fueron considerados 4 postes con la siguiente duración horaria:

Poste	1	2	3	4
Duración (h)	7	28	91	42

En la Figura 6-3 se presenta, a modo de ejemplo, la potencia demandada en una semana (correspondiente a mediados de marzo), las cuales se construyen ordenando la demanda horaria de dicha semana de mayor a menor y agrupando las mismas en 4 bandas de demanda similar.

**Figura 6-3 Potencia demandada por poste en una semana del mes de marzo**



## 6.2.2. Generación

A continuación se describen las centrales de generación eléctrica y las interconexiones consideradas.

### a) Centrales térmicas

Las centrales térmicas y sus correspondientes costos de generación consideradas en el presente estudio se presentan en la tabla siguiente:

**Tabla 6-1: Centrales térmicas consideradas en el sistema eléctrico**

Central	Potencia instalada (MW)	Costo variable (USD/MWh)	Unidades disponibles	Coefficiente de disponibilidad
José Batlle y Ordoñez	10	146.7	8	84.5 %
La Tablada	100	194.1	2	84.5 %
Punta del Tigre	49	151.1	6	84.5 %

Las máquinas de la central José Batlle y Ordoñez son turbo-vapor que utilizan fuel oíl pesado como combustible, mientras que las máquinas de la central La Tablada y Punta del Tigre corresponden a turbinas aero-derivativas a gasoil.

El costo variable de las máquinas corresponde a un precio del petróleo de 110 USD/barril.

## b) Centrales hidráulicas

Respecto a las centrales hidráulicas, fueron consideradas las 3 represas hidroeléctricas localizadas en el Río Negro (G. Terra, Baygorria y Constitución) y la represa hidroeléctrica de Salto Grande localizada en el Río Uruguay. En la tabla siguiente se presentan las principales características de las mismas.

**Tabla 6-2: Centrales hidráulicas del el sistema eléctrico**

Característica / Central	G. Terra	Baygorria	Constitución	Salto - Uruguay
Cota mínima del lago (m)	70	53	36	30
Cota máxima del lago(m)	81	56	44	35.5
Volumen máximo (Hm <sup>3</sup> )	8800	570	2854	3058 (*)
Potencia instalada (MW)	155	108	333	945 (*)

Notas: Los niveles están referidos al cero Oficial: nivel medio del mar en el puerto de Montevideo. (\*) Valores correspondientes al 50% de la planta, de propiedad uruguaya.

De dichas centrales, G. Terra fue la única considerada como una central con embalse, representándose a Baygorria, Constitución y Salto Grande como centrales de pasada (sin variable de estado). Es decir que el costo variable correspondiente al costo del agua de estas últimas es nulo, mientras que en la central G. Terra dependerá de la política de operación determinada mediante la optimización (sección 6.3).

## c) Biomasa

Fue considerada una potencia total instalada de 200 MW en biomasa, con las siguientes características:

**Tabla 6-3: Unidades de biomasa consideradas en el sistema eléctrico**

Biomasa	Potencia instalada (MW)	Costo variable (USD/MWh)	Unidades disponibles	Coefficiente de disponibilidad
Autodespachable	4	1.2	20	80 %
Convocable	12	58.3	10	80 %

## d) Eólica

Los parques eólicos fueron representados como un único parque con 225 unidades disponibles y una potencia instalada de 2 MW por unidad. El costo variable asociado a la generación eólica es naturalmente nulo.

## e) Interconexiones

Fue considerada únicamente la exportación de excedentes a un costo variable de 10 USD/MWh.

## f) Costo de falla

El costo de falla corresponde al costo de no suministro de la demanda, en caso de que se produzca un déficit o bien en caso de que satisfacer la demanda le resulte más caro al sistema que fallar.

El costo de falla se representa a través de escalones de falla, dependientes del porcentaje de energía demandada no suministrada:

<b>Profundidad (%)</b>	5%	7.50%	7.50%	80%
<b>Costo (USD/MWh)</b>	250	400	1200	2400

## 6.3. OPTIMIZACIÓN

Con el objetivo de simular el sistema eléctrico uruguayo para los diferentes escenarios de demanda de agua considerados dentro de la cuenca de aporte a la represa G. Terra, se realizó en primer lugar la optimización del sistema eléctrico en un período de 25 años (noviembre-octubre) con paso semanal. El escenario energético considerado fue el correspondiente al año 2015 en todos los años de la optimización.

Para ello se utilizó, en cada escenario, una serie diferente de caudales de aporte a la represa G. Terra, las que serán utilizadas para generar los sorteos necesarios para realizar la optimización.

Para el escenario natural se utilizó la serie de caudal semanal observado en la represa G. Terra en el período 1910-1980, mientras que para los restantes escenarios se utilizaron las series obtenidas de aplicarle a dicha serie observada, las parametrizaciones presentadas en el capítulo 5. A estas últimas series se las denominará de aquí en más *series observadas afectadas*. Por otro lado, para representar los aportes hidráulicos de las represas de Baygorria, Constitución y Salto Grande, se utilizaron las series de caudal semanal observado en las mismas durante el período 1910-1980. Las mismas fueron utilizadas por igual en todos los escenarios.

Se obtuvo así una política de operación del sistema eléctrico diferente para cada escenario de demanda de agua considerado, ya que la optimización se realizó utilizando un modelo de generación de series sintéticas diferente en cada caso.

Como ya fue mencionado, la política de operación del sistema corresponde a la valorización de los recursos almacenables en el mismo, para cada estado del sistema y para cada etapa. En este caso, en el cual el único recurso almacenable corresponde al agua en la represa G. Terra, la política de operación se reduce al valor de dicho recurso para cada estado del embalse (nivel del lago) y para cada etapa.

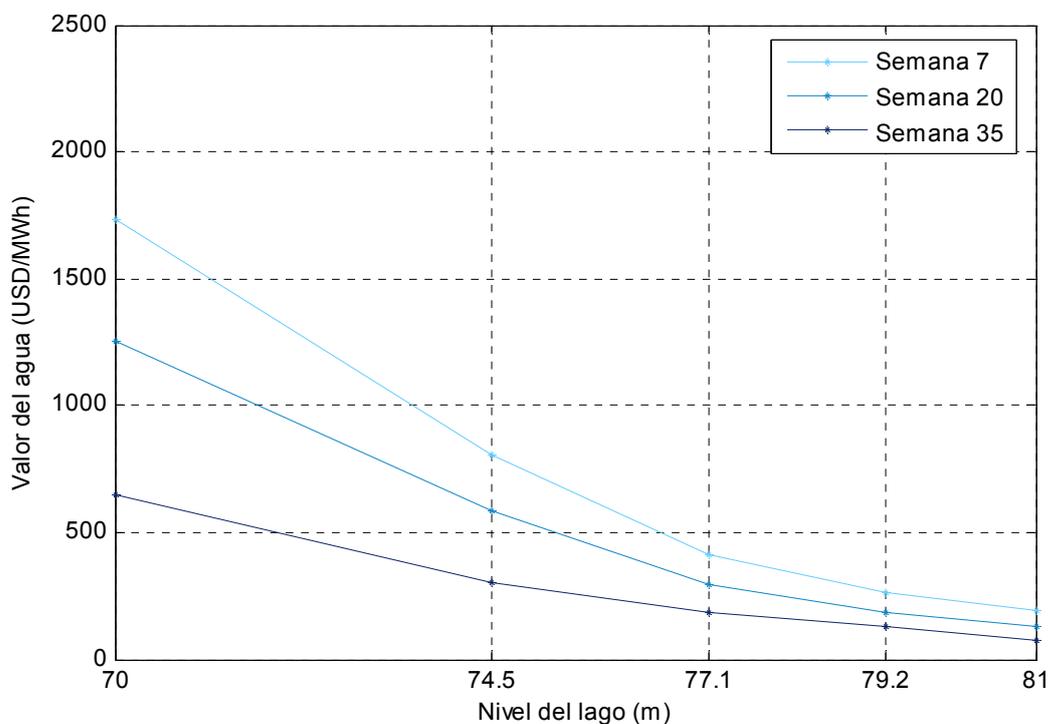
Dado que, durante el período de optimización, el parque de generación y la demanda de energía eléctrica anual se consideraron constantes (correspondientes al 2015), se tiene para todos los años una política de operación esencialmente igual.

A modo de ejemplo, en la Figura 6-4 se presenta la política de operación obtenida para el escenario natural en tres semanas diferentes. La semana 7 corresponde a mediados de diciembre, la semana 20 a mediados de marzo y la semana 35 a mediados de julio.

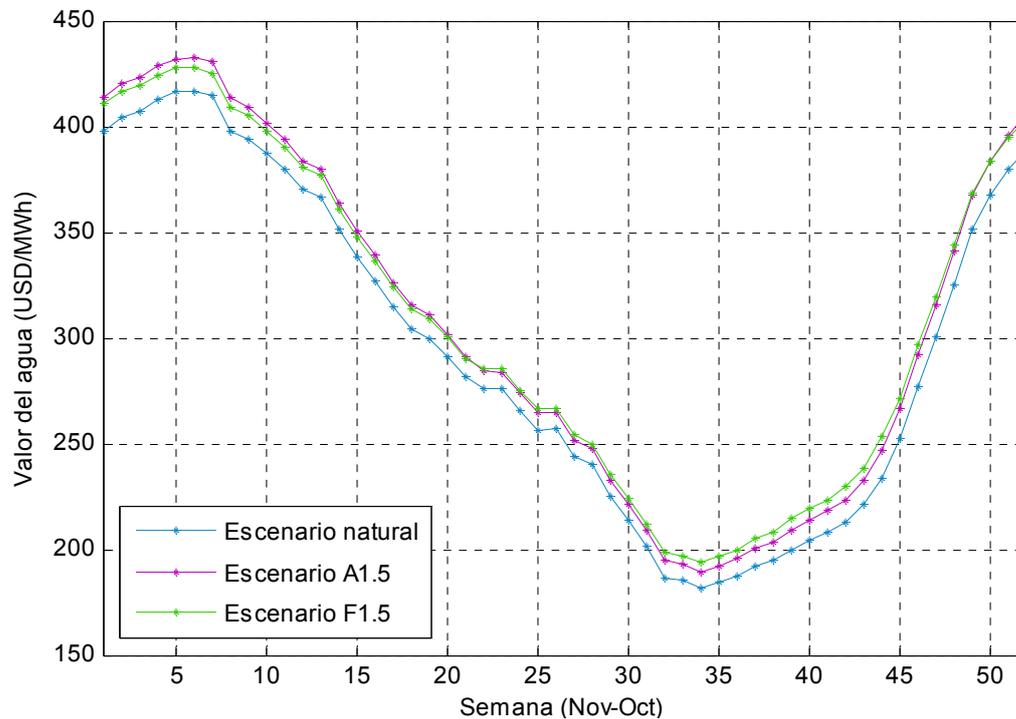
Luego, en la Figura 6-5, se presenta el valor del agua para cada semana del año correspondiente a un nivel del lago de 77 m, para el escenario natural y para los escenarios A1.5 y F1.5.

En todos los casos, el nivel del lago se encuentra referido al cero oficial.

**Figura 6-4 Valor del agua en función del estado del sistema (nivel del lago) para el escenario natural - Semanas 7, 20 y 35**



**Figura 6-5 Valor del agua correspondiente a un nivel del lago de 77 m – Escenarios natural, A1.5 y F.15**



En dichas figuras puede observarse que, a igual nivel del lago, el valor del agua es menor en invierno que en verano, debido a que en invierno se esperan mayores caudales. Asimismo, para una semana dada, lógicamente a mayor nivel del lago, menor valor del agua.

Luego, el valor del agua es mayor en los escenarios A1.5 y F1.5 que en el escenario natural, en función de la menor disponibilidad esperada del recurso. Las diferencias son levemente mayores para el escenario A1.5 que para el escenario F1.5 en las primeras semanas del año (noviembre-octubre), invirtiéndose dicha relación en el resto del año. Esto se debe a que en el escenario A1.5, el mayor déficit se da en las primeras semanas correspondientes al inicio del año de llenado del embalse durante zafra de riego del arroz.

## 6.4. SIMULACIÓN

Una vez realizada la optimización del sistema eléctrico para todos los escenarios hidrológicos considerados, se procedió a realizar las simulaciones del mismo utilizando las políticas de operación allí determinadas.

Se realizaron simulaciones en dos modalidades:

- Utilizando las series históricas de caudal de aporte a la represa G. Terra.
- Utilizando series sintéticas de caudal de aporte a la represa G. Terra.

En todos los casos el paso de tiempo de simulación fue de 1 semana y el escenario energético considerado correspondió al del año 2015.

A continuación se realiza una descripción de dichas modalidades de simulación.

#### **a) Series históricas**

En esta modalidad, se simula el sistema eléctrico utilizando series temporales de caudales de aporte a las represas hidroeléctricas determinadas, que pueden ser registradas, estimadas o construidas de alguna forma. Es decir, que se simula lo que le sucedería al sistema eléctrico para determinada secuencia temporal de caudales de aporte a las represas.

Los escenarios simulados bajo esta modalidad fueron el natural, el A1.5 y el F1.5.

Para el escenario natural fue utilizada la serie de caudal de aporte a la represa G. Terra registrada en el período 1910-1980, mientras que para los escenarios A1.5 y F1.5 fueron utilizadas las *series observadas afectadas* correspondientes al mismo período.

El objetivo de realizar estas simulaciones fue evaluar los sobrecostos del sistema eléctrico correspondientes a los escenarios A1.5 y F1.5 respecto al escenario natural, si se dieran exactamente las mismas condiciones climáticas del pasado.

#### **b) Series sintéticas**

En esta modalidad, las series de caudales de aporte a las represas hidroeléctricas utilizadas en la simulación son generadas en forma sintética, utilizando los mismos modelos de generación que en la etapa de optimización. De esta forma es posible realizar un gran número de simulaciones del sistema (denominadas crónicas) a partir de las cuales obtener una representación estadística más densa de todas las variables.

Se simularon de esta forma 100 crónicas de 25 años para el escenario natural y para todos los escenarios de demanda de agua considerados dentro de la cuenca de aporte a la represa G. Terra. Descartando los resultados correspondientes a los primeros 5 años de cada crónica para eliminar la influencia de las condiciones iniciales, se obtuvo una muestra de 2000 años para cada escenario (20 años x 100 crónicas).

# 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A decorative graphic consisting of several small teal squares of varying shades, arranged in a scattered pattern around the title. One square is dark teal, while others are lighter shades of teal. They are positioned to the right and below the main text.



## 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas del sistema eléctrico uruguayo en los diferentes escenarios. Se analizan los costos directos del sistema y las variables asociadas a la operación la represa G. Terra: caudales de aporte, caudales turbinados, caudales vertidos, nivel del lago y valor del agua.

Se presenta primero un análisis detallado de los resultados para los escenarios A1.5 y F1.5, estimativos de la situación en el año 2015, para luego extender en el capítulo 8 los resultados principales a los demás escenarios.

En todos los casos los resultados presentados (tanto en ciclos anuales como en acumulados anuales) corresponden al año noviembre-octubre, coincidente con el ciclo de llenado de los embalses para el riego de arroz.

### 7.1. ARROZ – ENERGÍA

En la Tabla 7-1 se presentan los resultados obtenidos, en términos medios anuales (promedio de todas las crónicas), del caudal de aporte, caudal turbinado y caudal vertido en la represa G. Terra; y del costo directo anual del sistema de generación de energía eléctrica para todos los escenarios de demanda de agua para riego de arroz considerados dentro de la cuenca. Luego, en la Tabla 7-2 se presentan las diferencias porcentuales de dichas variables para los diferentes escenarios respecto al escenario natural.

**Tabla 7-1: Resultados medios anuales – Diferentes escenarios**

Escenario	Caudal de aporte (Hm <sup>3</sup> /año)	Caudal turbinado (Hm <sup>3</sup> /año)	Caudal vertido (Mm <sup>3</sup> /año)	Costo directo (MUSD/año)
Natural	17215	10951	5884	526.4
A1	16642	10657	5607	533.1
A1.5	16360	10498	5484	537.1
A2	16073	10349	5350	540.3
A2.5	15787	10180	5233	544.3
A3	15505	10014	5119	548.3
A4	14941	9694.6	4877	555.8
A5	14372	9376.5	4629	563

**Tabla 7-2: Diferencias porcentuales de los valores medios anuales respecto al escenario natural – Diferentes escenarios**

Escenario	Reducción del caudal de aporte	Reducción del caudal turbinado	Reducción del caudal vertido	Incremento del costo directo
A1	3.3%	2.7%	4.7%	1.3%
A1.5	5.0%	4.1%	6.8%	2.0%
A2	6.6%	5.5%	9.1%	2.6%
A2.5	8.3%	7.0%	11.1%	3.4%
A3	9.9%	8.6%	13.0%	4.2%
A4	13.2%	11.5%	17.1%	5.6%
A5	16.5%	14.4%	21.3%	7.0%

En lo que respecta al incremento medio del costo directo de los diferentes escenarios, el mismo tiene un comportamiento prácticamente lineal respecto a la reducción del caudal de aporte a la represa G. Terra, siendo la señal en los costos directos algo menor a un 50% de la señal directa del caudal de aporte.

A continuación se presenta la distribución de las diferentes variables de interés a lo largo del año (en un año medio) así como un análisis de la distribución de los valores anuales para el escenario A1.5.

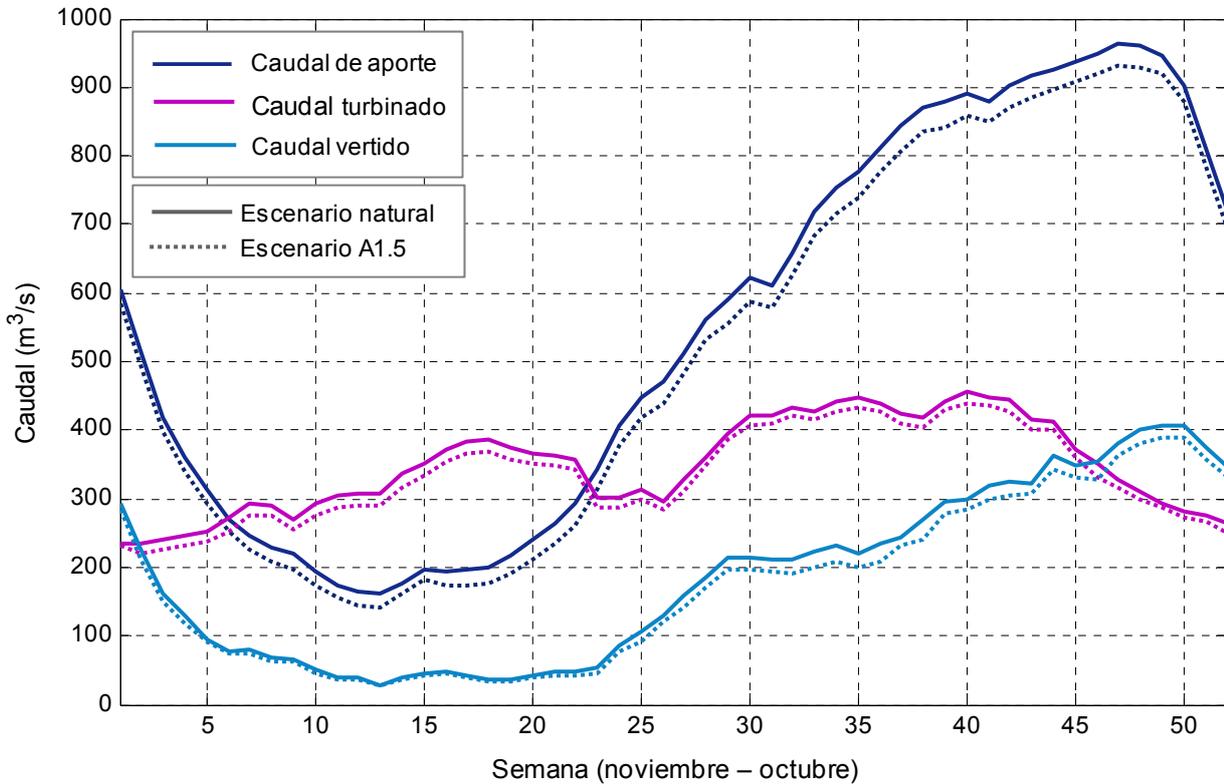
### 7.1.1. Ciclo anual medio

En la Figura 7-1 se presenta el ciclo medio anual de los caudales de aporte, turbinados y vertidos en la represa G. Terra para el escenario natural y para el escenario A1.5 y en la Figura 7-2 se presenta el ciclo medio anual de la disminución de dichas variables al pasar del escenario natural al escenario A1.5.

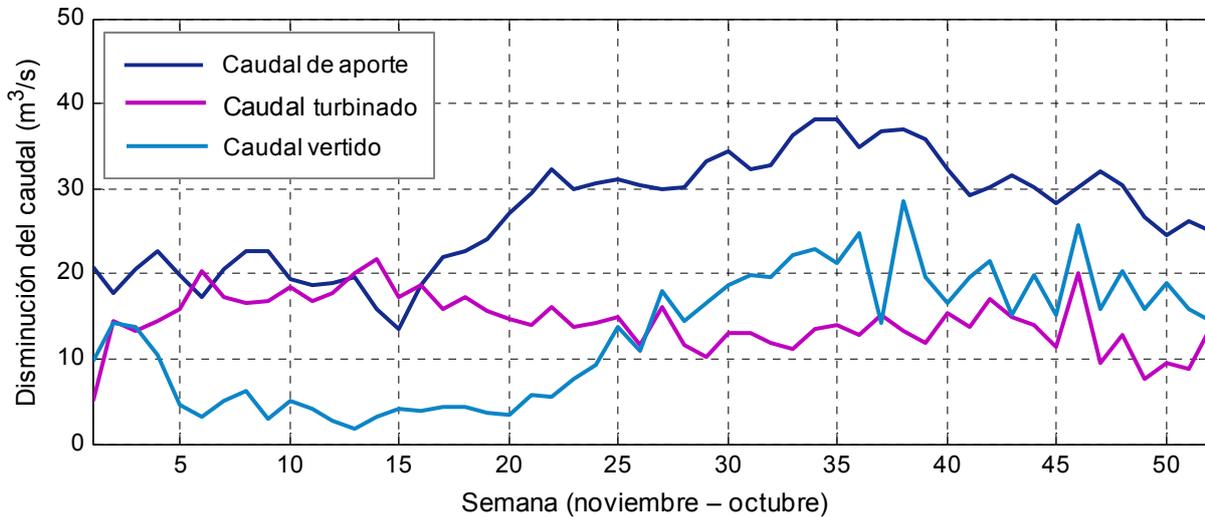
En la Figura 7-3 se presenta el ciclo medio anual del nivel del lago en la represa G. Terra (referido al cero oficial) para dichos escenarios, así como la diferencia entre ambos.

Luego, en la Figura 7-4 se presenta el ciclo medio anual del costo directo total del sistema eléctrico y del valor del agua de la represa G. Terra para ambos escenarios. Se recuerda que esta última variable depende no solo del nivel del lago sino también de la política de operación, que es diferente para los diferentes escenarios.

**Figura 7-1: Ciclo medio anual semanal del caudal de aporte, caudal turbinado y caudal vertido en la represa G. Terra – Escenarios natural y A1.5**

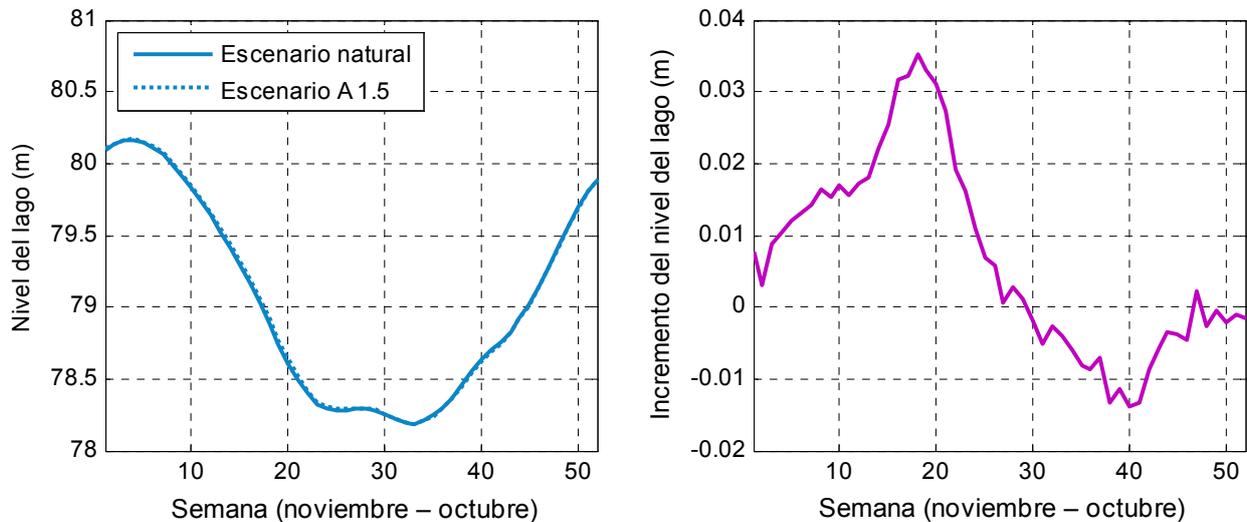


**Figura 7-2: Ciclo medio anual semanal de la disminución del caudal de aporte, caudal turbinado y caudal vertido en la represa G. Terra – Escenarios A1.5 respecto al natural**



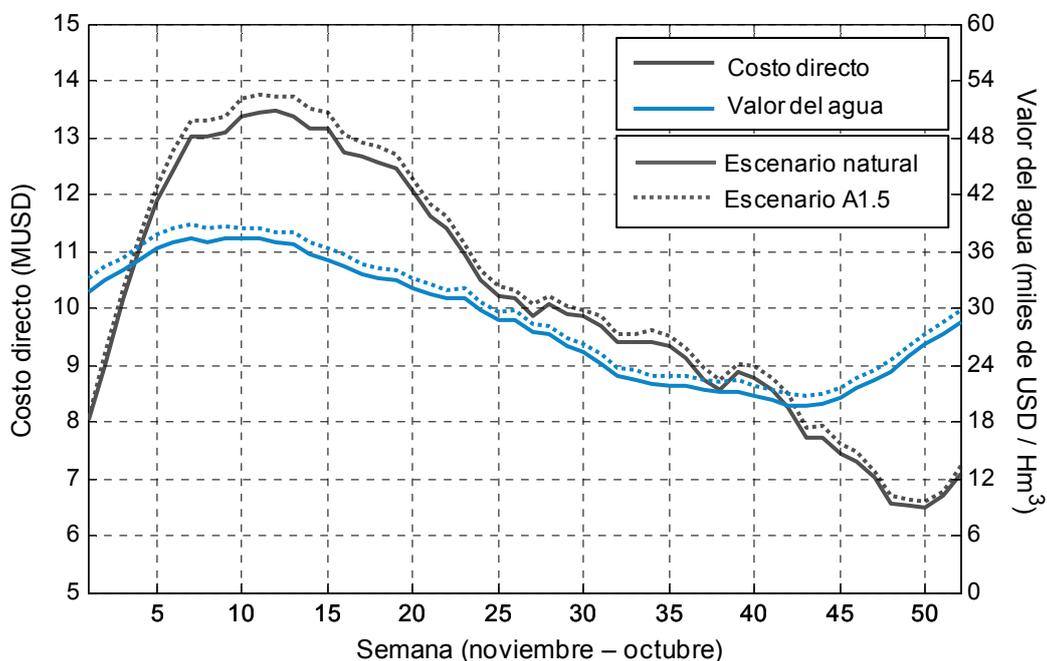
Puede observarse que la disminución del caudal de aporte y del caudal vertido acompaña el comportamiento del ciclo medio anual del caudal de aporte a la represa G. Terra, mientras que el caudal turbinado presenta una disminución levemente mayor en la primera mitad del año respecto a la segunda.

**Figura 7-3: Ciclo medio anual semanal del nivel del lago en la represa G. Terra – Escenarios natural y A1.5 y diferencia entre ambos (sobreelevación con el escenario A1.5)**



En lo que respecta al nivel del lago, la diferencia entre los dos escenarios es mínima, observándose un incremento del nivel del lago en la primera mitad del año y una disminución del mismo en la segunda mitad del año.

**Figura 7-4: Ciclo medio anual semanal del costo directo total del sistema eléctrico y del valor del agua en la represa G. Terra – Escenarios natural y A1.5**



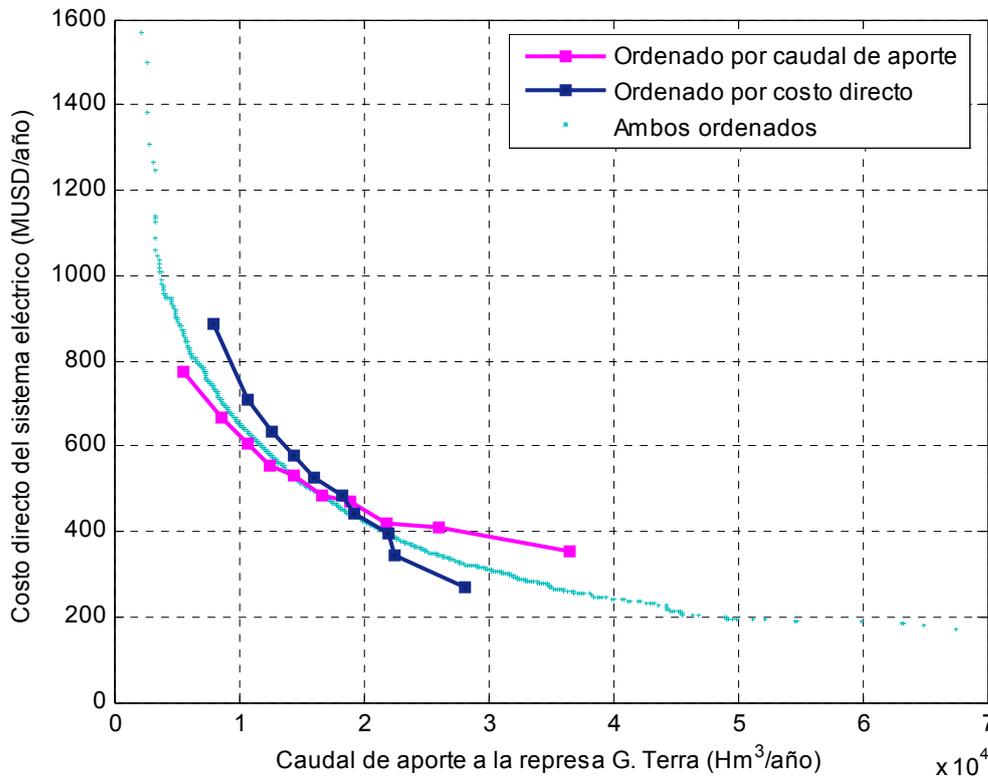
El costo directo es mayor en los meses de verano, en donde se registran los menores caudales aporte a las represas hidroeléctricas, observándose además los mayores incrementos del costo directo en dicha época del año.

## 7.1.2. Acumulados anuales

En esta sección se presentan las distribuciones del incremento del costo directo anual y de la disminución de los caudales anuales de aporte, turbinados y vertidos en la represa G. Terra del escenario A.15 respecto al escenario natural. Dichas distribuciones se presentan en función del caudal de aporte a la represa G. Terra por un lado y en función del costo directo del sistema por otro, ambos correspondientes al escenario natural.

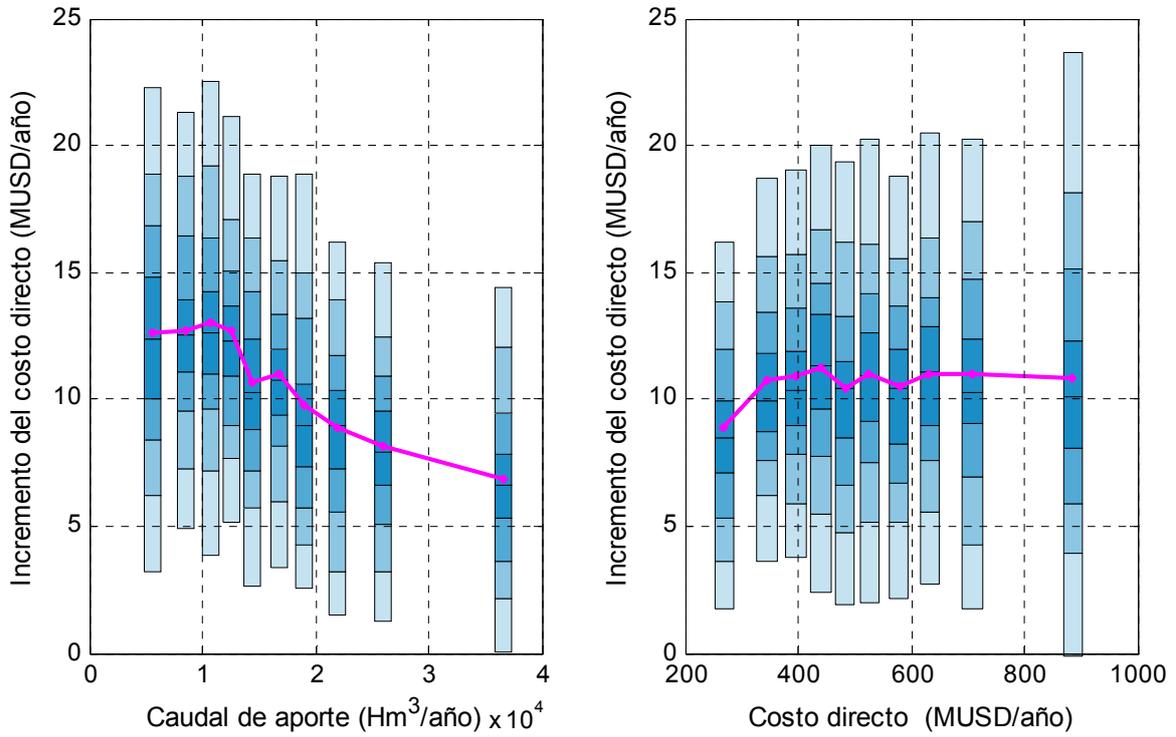
Si bien el caudal de aporte a la represa G. Terra y el costo directo del sistema eléctrico están fuertemente anti-correlacionados (los años más caros están asociados a los años más secos y viceversa), no se ordenan exactamente en forma inversa pues la distribución de aportes en el año y la situación del embalse al comienzo del mismo también inciden en los costos totales. En la Figura 7-5 se presenta el promedio de costos directos por intervalo inter-decil en los aportes y el promedio de aportes por intervalo inter-decil de costos, todo para el escenario natural. Se agrega además la relación del costo directo en función del caudal de aporte, previo ordenamiento de cada variable (perdiendo por tanto la simultaneidad) a los efectos de visualizar la relación entre dichas magnitudes. En los deciles intermedios, las tres gráficas son muy semejantes, señalando la robusta relación inversa entre las variables en los años “normales”. Sin embargo, al promediar una variable en los deciles extremos de la otra, se disimulan los años extremos de la variable promediada, lo cual indica que en años extremos la coyuntura de distribución de aportes en el año es importante. Es por esto que se mantiene en adelante el doble análisis según totales anuales de aportes y costos directos como formas complementarios de examinar los resultados.

**Figura 7-5: Costo directo en función del caudal de aporte a la represa G. Terra por decil ordenados según cada variable y según ambas variables – Escenario natural**

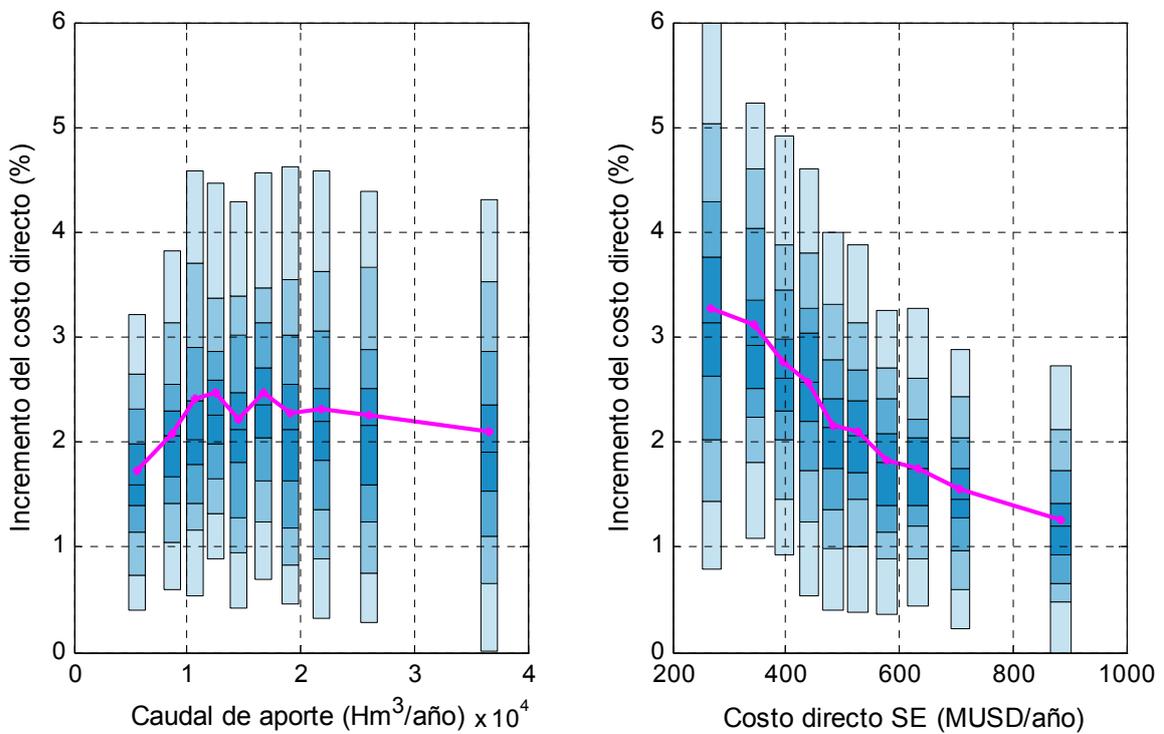


En las figuras siguientes se presenta: en magenta la media de los años correspondientes a cada intervalo inter-decil de caudal de aporte o de costo directo y en celeste la dispersión de dichos valores (percentiles 10 al 90) según el caudal de aporte y el costo directo respectivamente. Cabe mencionar que cada intervalo inter-decil de caudal de aporte y de costo directo está compuesto por 200 años simulados y que, por tanto, hay 200 años por encima y por debajo de la barras celestes.

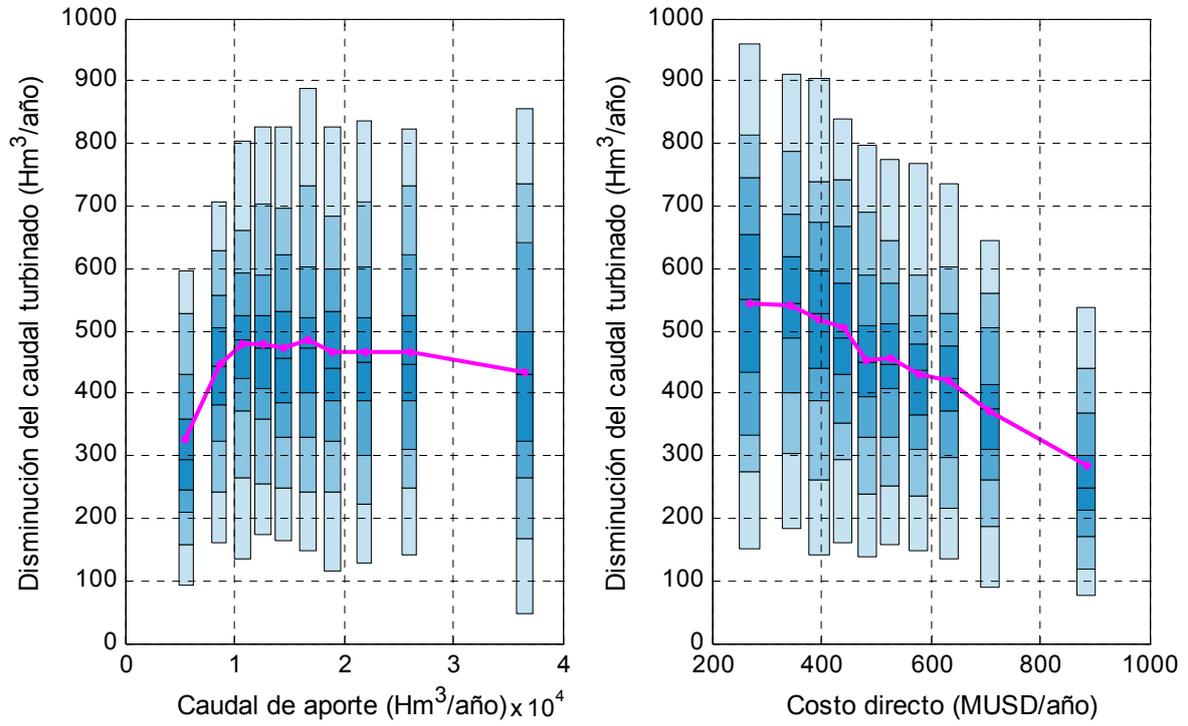
**Figura 7-6: Incremento del costo directo del escenario A1.5 respecto al escenario natural en función del caudal de aporte y del costo directo del escenario natural**



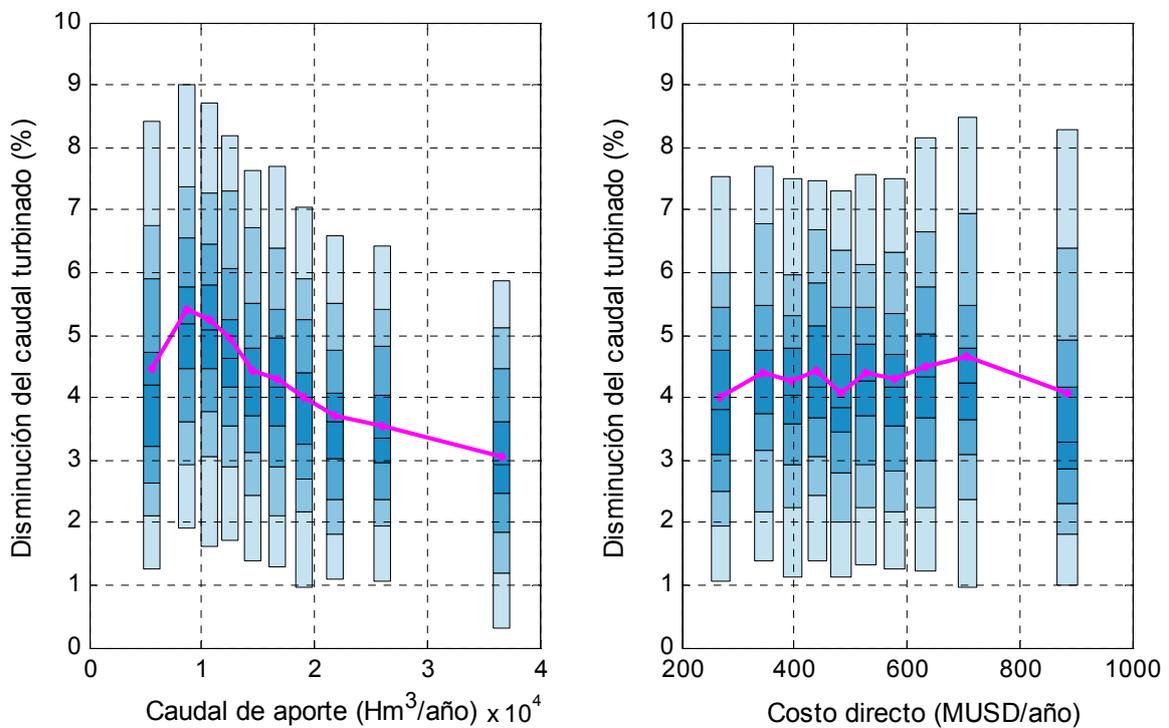
**Figura 7-7: Incremento porcentual del costo directo del escenario A1.5 respecto al escenario natural en función del caudal de aporte y del costo directo del escenario natural**



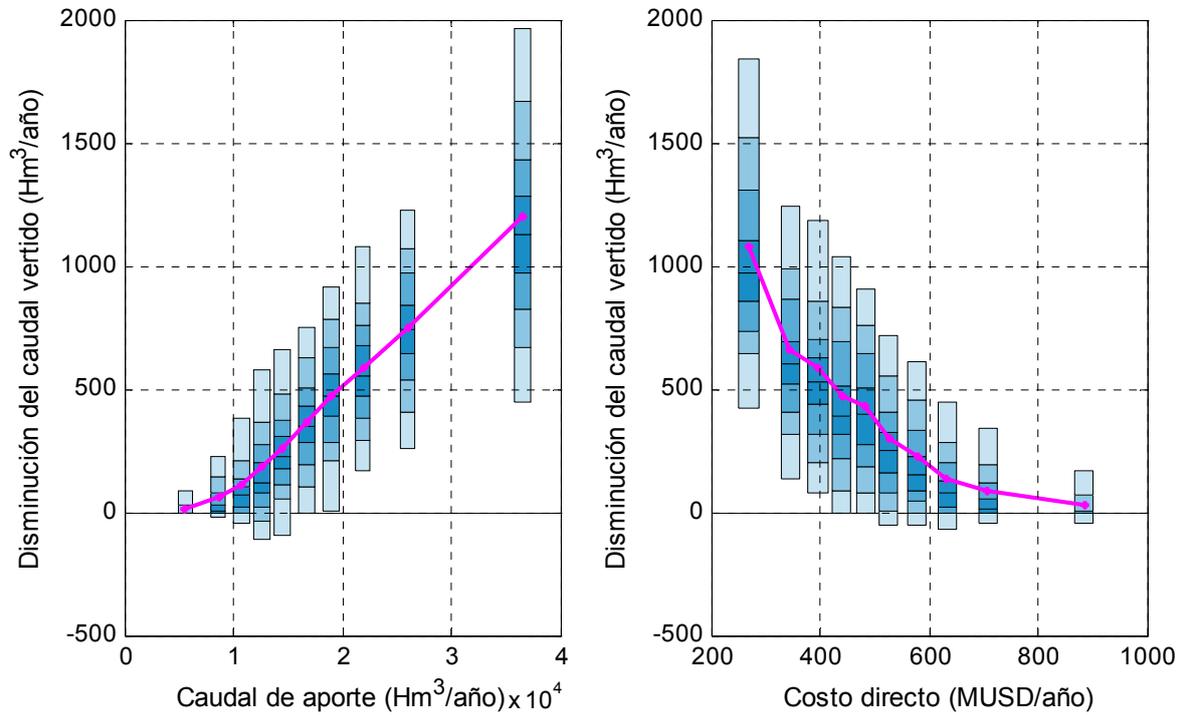
**Figura 7-8: Disminución del caudal turbinado del escenario A1.5 respecto al escenario natural en función del caudal de aporte y del costo directo del escenario natural**



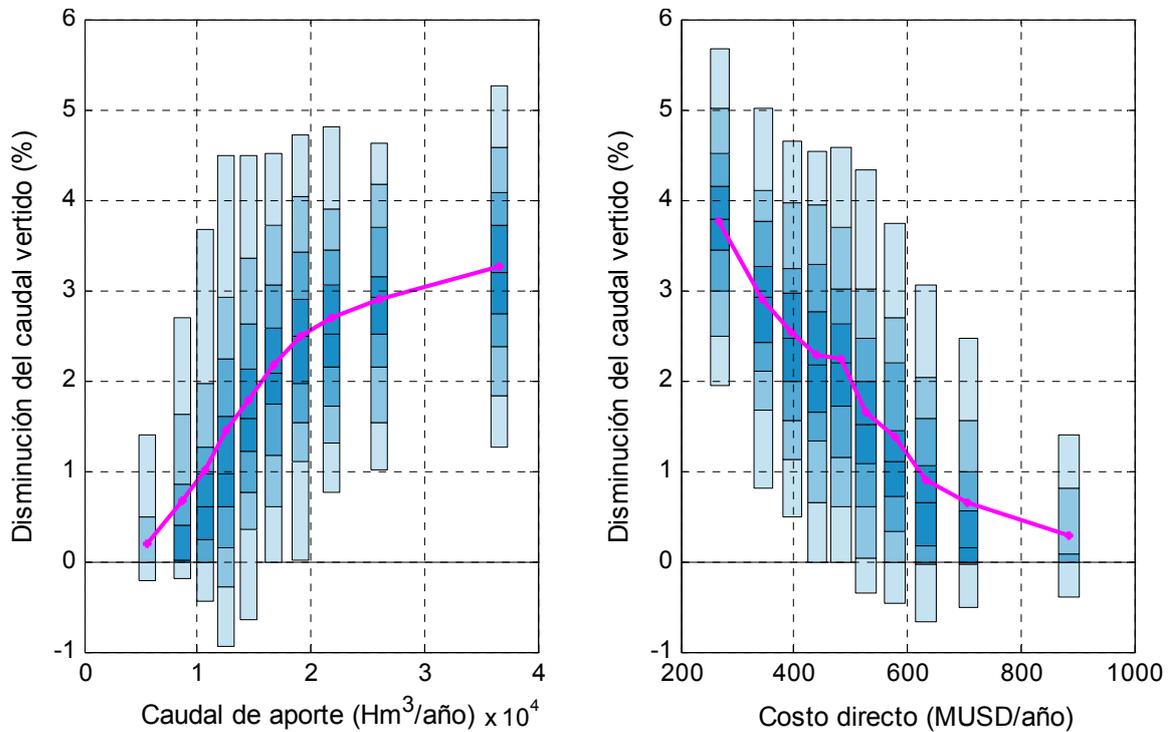
**Figura 7-9: Disminución porcentual del caudal turbinado del escenario A1.5 respecto al escenario natural, en función del caudal de aporte y del costo directo del escenario natural**



**Figura 7-10: Disminución del caudal vertido del escenario A1.5 respecto al escenario natural, en función del caudal de aporte y del costo directo del escenario natural**



**Figura 7-11: Disminución del caudal vertido (como porcentaje de los aportes) del escenario A1.5 respecto al escenario natural, en función del caudal de aporte y del costo directo del escenario natural**



De lo que se observa en las figuras anteriores, se destaca la existencia de un máximo relativo en el incremento del costo directo en función del caudal de aporte, dado por un pequeño crecimiento del mismo en los primeros deciles para luego decrecer al aumentar el caudal de aporte. La existencia de dicho máximo relativo puede explicarse a través del siguiente razonamiento: en años muy secos, en los que hay extrema escasez de agua para todos los usos (los embales de riego no tienen agua) el impacto económico en el sector energético dado por la presencia de los embalses de riego tendería a ser nulo; y en años muy húmedos, en los que hay exceso de agua para todos, el impacto económico en el sector energético debido a los embalses también tendería a ser nulo. El comportamiento en ambos extremos conduce a la necesidad de un máximo relativo que se verifica en el tercer decil, aunque con diferencias mínimas con los dos deciles más secos. Dicho máximo relativo es más marcado si se miran los sobrecostos porcentuales relativos.

Sin embargo, en lo que respecta al incremento del costo directo en función del costo directo, se observa un pequeño crecimiento del mismo en los primeros deciles, para luego mantenerse prácticamente constante al aumentar el costo directo.

Las gráficas de disminución de caudal turbinado (absoluto o en términos porcentuales relativos) no muestran la misma estructura que la de sobrecostos lo cual señala la importancia del costo oportunidad del agua turbinada y no solo los volúmenes totales turbinados para calcular los costos totales incurridos.

Respecto a la disminución del caudal vertido, se observa –tal cual es esperado– un crecimiento, tanto en términos absolutos como porcentuales, al aumentar el caudal de aporte a la represa G. Terra y un decrecimiento, tanto en términos absolutos como porcentuales, al aumentar el costo directo. En varios casos se verifica que los deciles inferiores son negativos, es decir que vierte más en el escenario A1.5 con embalses de riego, aún cuando los aportes son menores. Esto se explica porque la política de operación es distinta, más conservadora en el caso del escenario A1.5, por esperar menores aportes.

Por otro lado, cabe destacar la importante dispersión que se observa en todos los casos. De hecho, en varias de las figuras la amplitud de la dispersión y la poca variación de la media no hacen más que mostrar que la variable de agrupación en el eje horizontal no estratifica bien la variable analizada en el eje vertical.

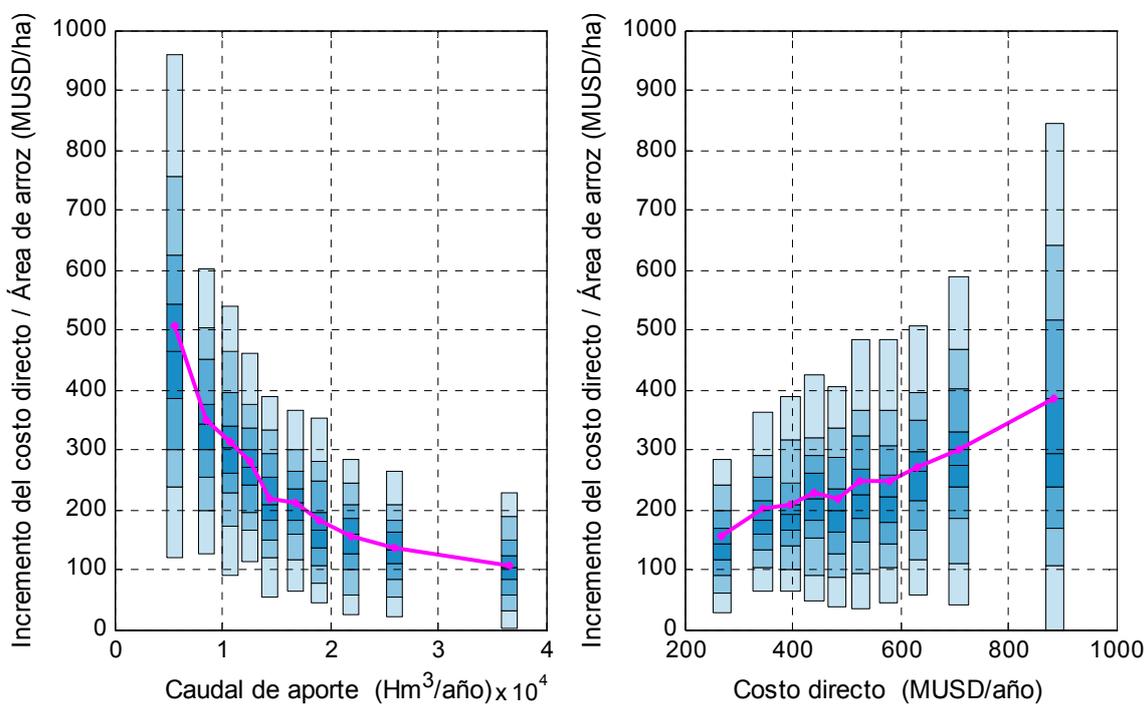
En la Figura 7-12 se presenta el mismo tipo de distribución para el incremento del costo directo del escenario A1.5 respecto al escenario natural, por hectárea de arroz sembrada. Para determinar el área de arroz sembrada del escenario A1.5 en cada año de simulación del sistema eléctrico, se utilizaron las parametrizaciones de déficit de caudal y del volumen de riego en función del caudal natural (presentadas en el

capítulo 5), a partir de las series sintéticas de caudales afectados generadas en el SimSEE.

En dicha Figura se observa:

- Un decrecimiento del incremento del costo directo por hectárea de arroz sembrada al aumentar el caudal de aporte, acompañado de una reducción de la dispersión.
- Un crecimiento del costo directo por hectárea de arroz sembrada al aumentar el costo directo.

**Figura 7-12: Incremento del costo directo del escenario A1.5 respecto al escenario natural por área de arroz sembrada en función del caudal de aporte y del costo directo del escenario natural**



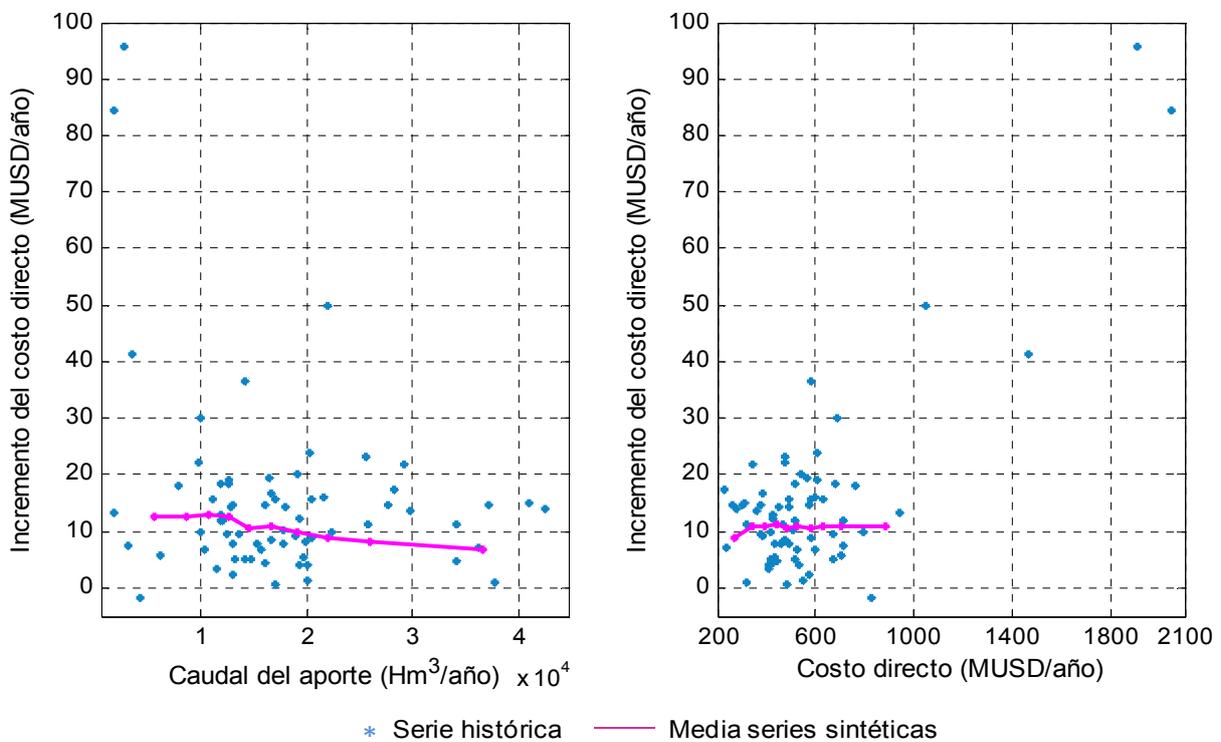
Cabe destacar que los percentiles presentados en las barras celestes de las figuras anteriores, no incluyen los valores extremos de las distribuciones. Dichos valores alcanzan en los extremos superiores incrementos del costo directo de hasta 80 MUSD/año, así como valores negativos en los extremos inferiores. Esto último puede explicarse si se tiene en cuenta que la política de operación de los escenarios natural y A1.5 son diferentes, siendo la correspondiente al escenario A1.5 más conservadora (ya que espera menores caudales de aporte a la represa G. Terra). Por lo tanto, un año seco puede impactar más fuertemente sobre el costo directo en el escenario natural que en el escenario A1.5, incurriendo el primero en mayores costos directos.

Todos los resultados presentados corresponden a la simulación del sistema eléctrico utilizando series sintéticas de caudales de aporte a las represas hidroeléctricas. Con el objetivo de comparar dichos resultados con los obtenidos al simular el sistema eléctrico utilizando series históricas de caudales de aporte (a pesar de tener una cantidad de

años de datos significativamente menor) se realizaron las gráficas que se presentan en las Figuras 7-13 y 7-14.

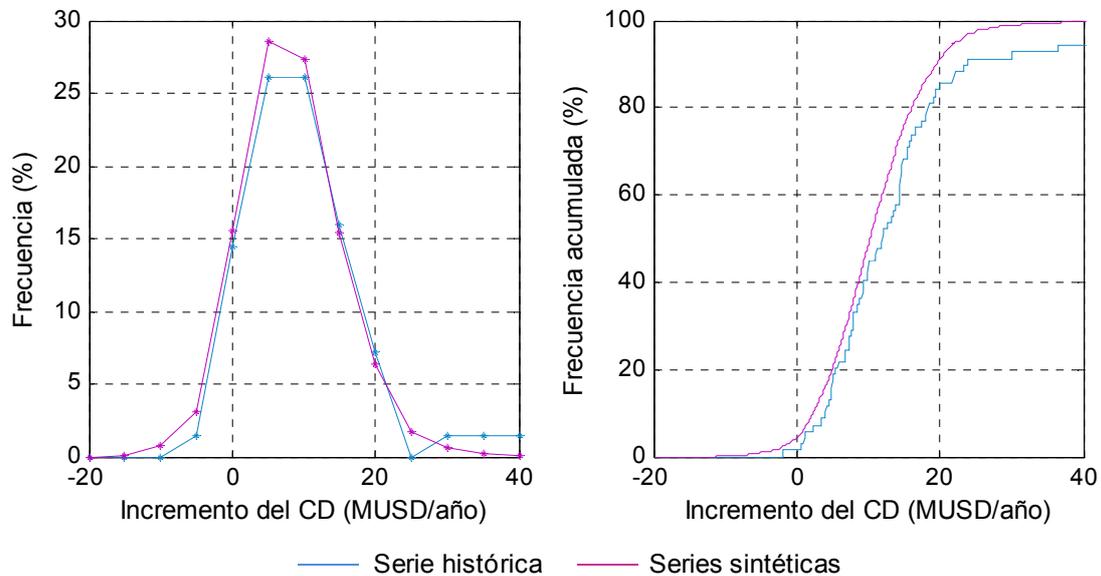
En la Figura 7-13 se presenta la media del incremento del costo directo en cada intervalo inter-decil de caudal de aporte y de costo directo (como en la Figura 7-6), así como el incremento del costo directo de cada año simulado con las series históricas en función de dichas variables. En general, a pesar de la relativa poca densidad de puntos a partir de las simulaciones históricas, se puede decir que se reproducen los resultados obtenidos con el sintetizador de series. Las mayores desviaciones parecen observarse en los casos extremos, de aportes pequeños y costos directos elevados, en donde las simulaciones históricas reflejan un incremento de costo sensiblemente mayor.

**Figura 7-13: Incremento del costo directo del escenario A1.5 respecto al escenario natural utilizando series sintéticas y series históricas**



Sin separar en deciles, tomando los histogramas de frecuencias del incremento del costo directo para todos los años juntos para ambas modalidades de simulación (Figura 7-14), se observa una gran similitud entre los resultados.

**Figura 7-14: Histogramas de frecuencias del incremento del costo directo del escenario A1.5 respecto al escenario natural, utilizando series sintéticas y series históricas**



## 7.2. FORESTACIÓN – ENERGÍA

En la Tabla 7-3 se presentan los resultados obtenidos, en términos medios anuales (promedio de todas las crónicas), del caudal de aporte, caudal turbinado y caudal vertido en la represa G. Terra; y del costo directo anual del sistema de generación de energía eléctrica para todos los escenarios de forestación considerados dentro de la cuenca. Luego, en la Tabla 7-4 se presentan las diferencias porcentuales de dichas variables para los diferentes escenarios respecto al escenario natural.

**Tabla 7-2: Resultados medios anuales – Diferentes escenarios**

Escenario	Caudal de aporte (Hm3/año)	Caudal turbinado (Hm3/año)	Caudal vertido (Mm3/año)	Costo directo (MUSD/año)
Natural	17215	10951	5884	526
F1	16434	10613	5446	534
F1.5	16043	10439	5231	538
F2	15652	10263	5018	542
F3	14871	9915	4591	551

**Tabla 7-3: Diferencias porcentuales de los valores medios anuales respecto al escenario natural – Diferentes escenarios**

Escenario	Reducción del caudal de aporte	Reducción del caudal turbinado	Reducción del caudal vertido	Incremento del costo directo
F1	4.5%	3.1%	7.4%	1.5%
F1.5	6.8%	4.7%	11.1%	2.2%
F2	9.1%	6.3%	14.7%	3.0%
F3	13.6%	9.5%	22.0%	4.6%

En lo que respecta al incremento medio del costo directo de los diferentes escenarios, el mismo tiene un comportamiento prácticamente lineal respecto a la reducción del caudal de aporte a la represa G. Terra, siendo la señal en los costos directos de un 30% de la señal directa del caudal de aporte aproximadamente.

A continuación se presenta la distribución de las distintas variables de interés a lo largo del año (en un año medio) así como un análisis de la distribución de los valores anuales para el escenario F1.5.

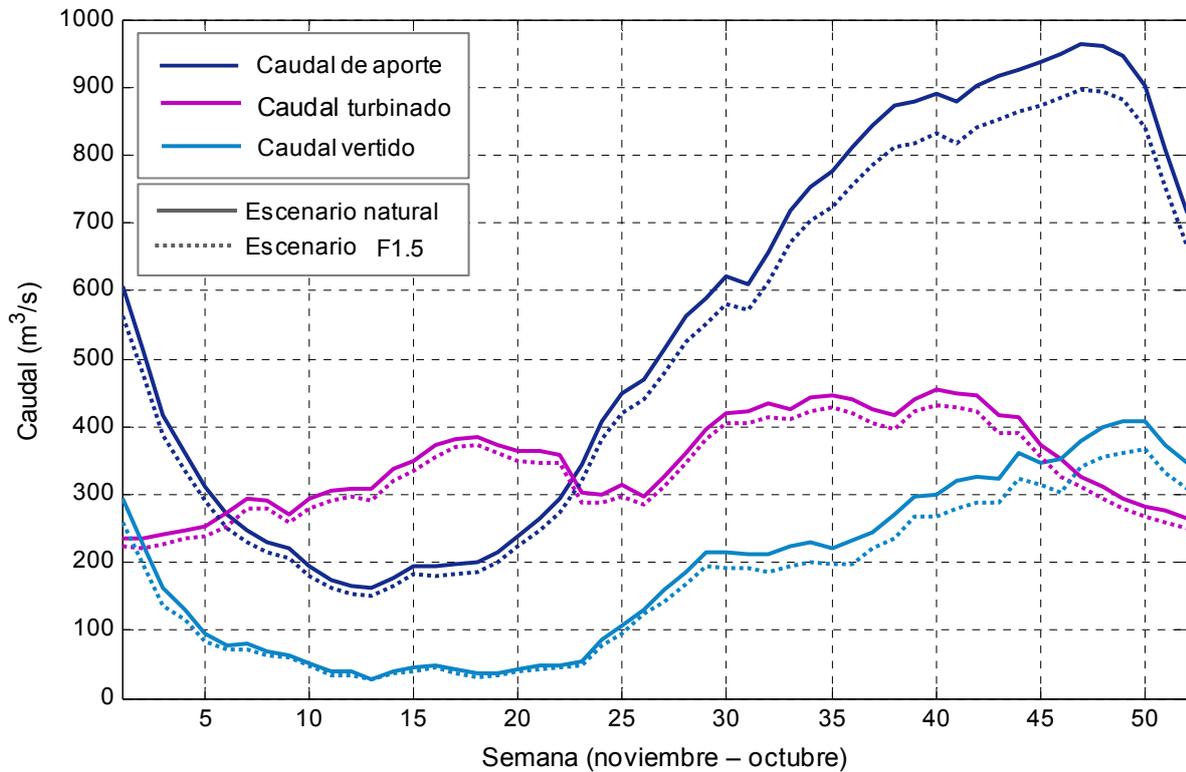
### 7.2.1. Ciclo anual medio

En la Figura 7-15 se presenta el ciclo medio anual de los caudales de aporte, turbinados y vertidos en la represa G. Terra para el escenario natural y para el escenario F1.5 y en la Figura 7-16 se presenta el ciclo medio anual de la disminución de dichas variables al pasar del escenario natural al escenario F1.5.

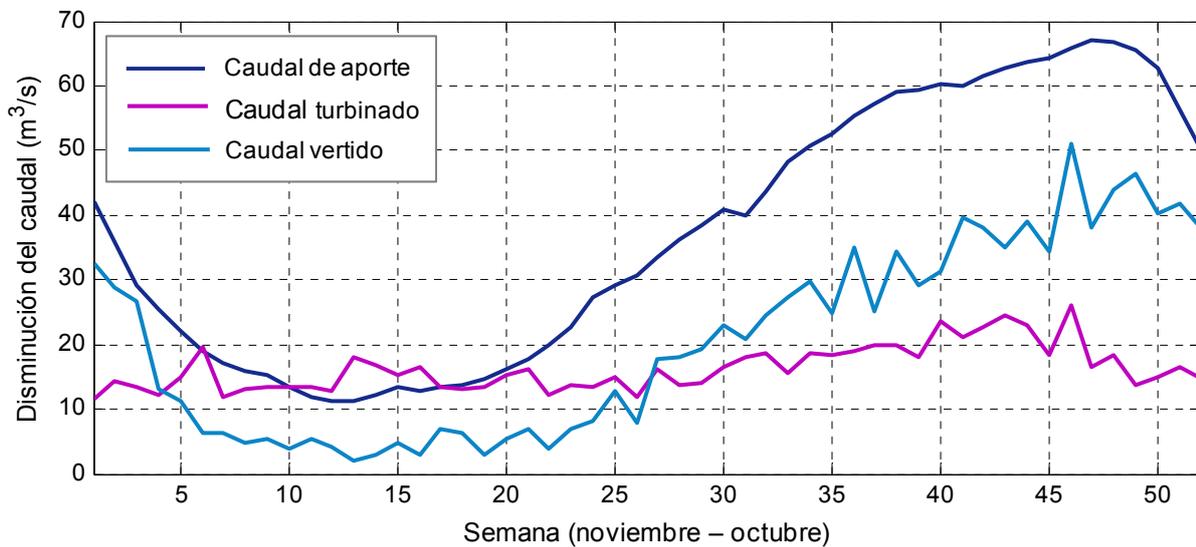
En la Figura 7-17 se presenta el ciclo medio anual del nivel del lago en la represa G. Terra (referido al cero oficial) para dichos escenarios, así como la diferencia entre ambos.

Luego, en la Figura 7-18 se presenta el ciclo medio anual del costo directo total del sistema eléctrico y del valor del agua de la represa G. Terra para ambos escenarios. Se recuerda que esta última variable depende no solo del nivel de lago sino también de la política de operación, que es diferente para los diferentes escenarios.

**Figura 7-15: Ciclo medio anual del caudal de aporte, caudal turbinado y caudal vertido en la represa G. Terra – Escenarios natural y F1.5**

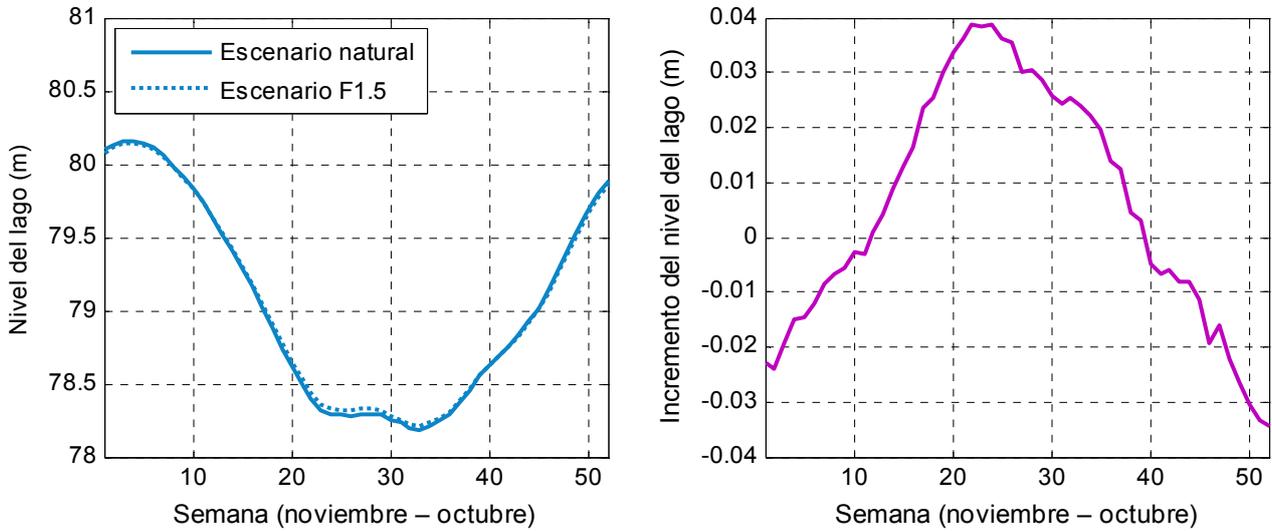


**Figura 7-16: Ciclo medio anual de la disminución del caudal de aporte, caudal turbinado y caudal vertido en la represa G. Terra – Escenarios F1.5 respecto al natural**



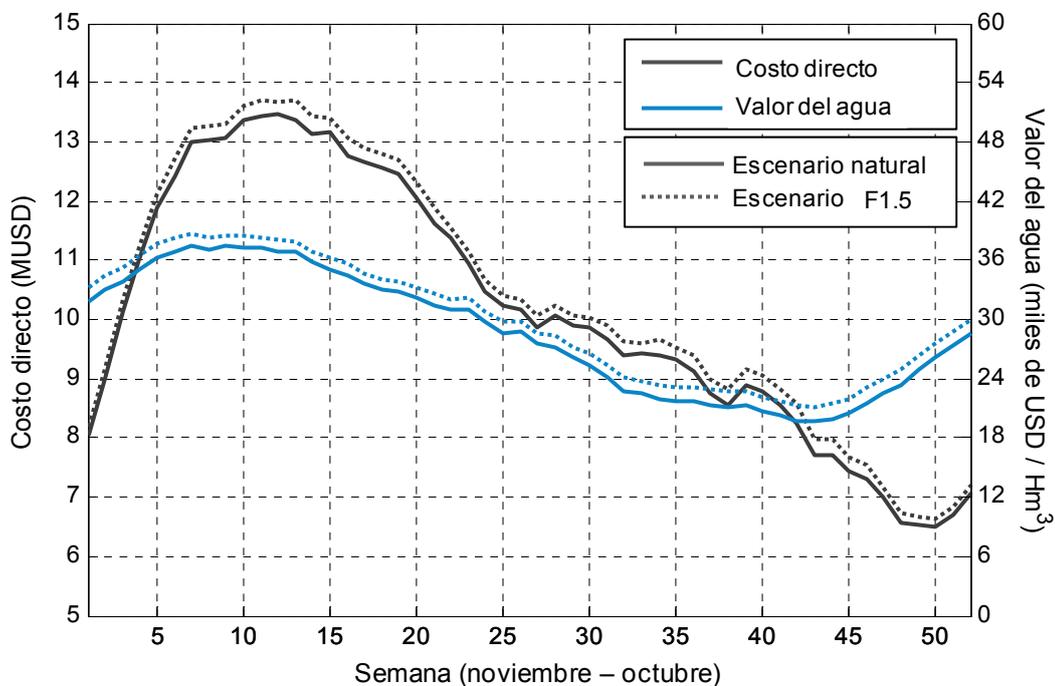
Puede observarse que la disminución del caudal de aporte y del caudal vertido acompaña el comportamiento del ciclo medio anual del caudal de aporte a la represa G. Terra. Asimismo, el caudal turbinado presenta una disminución levemente mayor en la segunda mitad del año respecto a la primera, a diferencia de lo que sucede para el escenario A1.5.

**Figura 7-17: Ciclo medio anual del nivel del lago en la represa G. Terra – Escenarios natural y F1.5 y diferencia entre ambos (sobreelevación con el escenario F1.5)**



En lo que respecta al nivel del lago, la diferencia entre los dos escenarios es mínima, observándose un incremento del nivel del lago entre las semanas 10 y 40 (aproximadamente correspondiente a los meses de enero y julio) y una disminución del mismo en el resto del año, a diferencia de lo que sucede para el escenario A1.5.

**Figura 7-18: Ciclo medio anual del costo directo total del sistema eléctrico y del valor del agua en la represa G. Terra – Escenarios natural y A1.5**



El costo directo es mayor en los meses de verano, en donde se registran los menores caudales aporte a las represas hidroeléctricas. Se observa en este caso, un incremento del costo directo más parejo a lo largo del año, respecto al escenario A1.5.

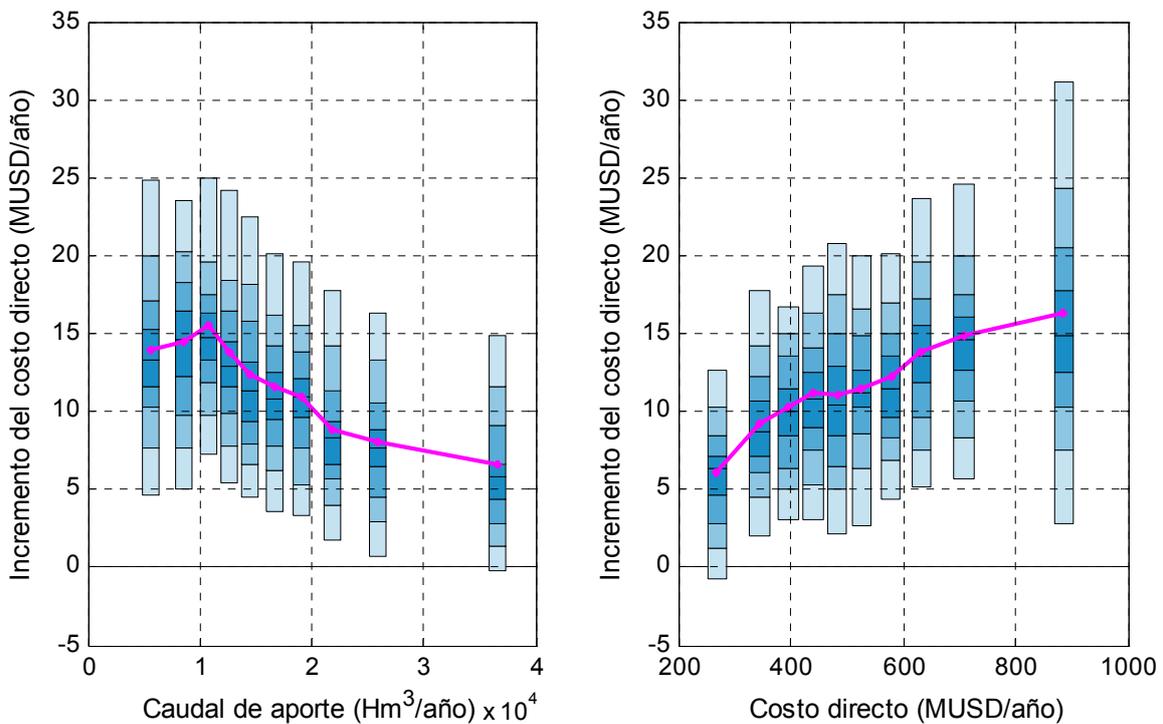
### 7.2.2. Acumulados anuales

Se presentan a continuación las distribuciones del incremento del costo directo anual y de la disminución de los caudales anuales de aporte, turbinados y vertidos en la represa G. Terra del escenario F1.5 respecto al escenario natural. Dichas distribuciones se presentan en función del caudal de aporte a la represa G. Terra por un lado y en función del costo directo del sistema por otro, ambos correspondientes al escenario natural. Para una más fácil comparación con el caso del arroz, se mantiene el año noviembre – octubre como período de análisis.

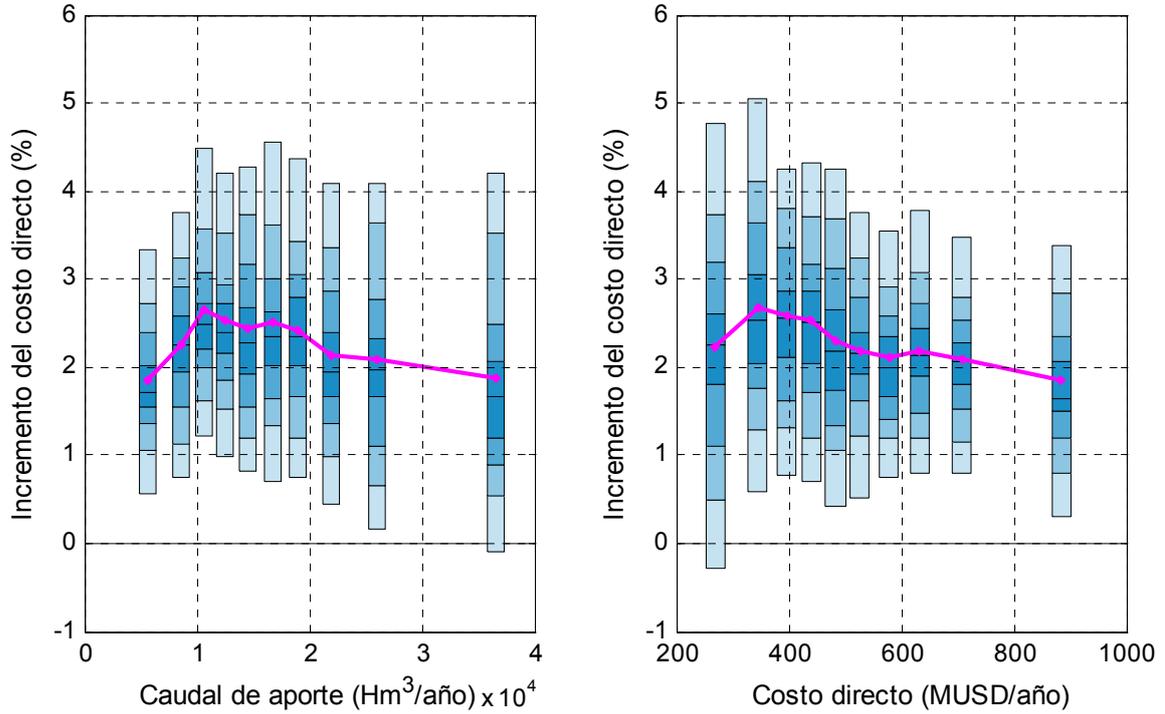
Recordar que el caudal de aporte a la represa G. Terra y costo directo del sistema eléctrico, si bien están fuertemente anti-correlacionados, no se ordenan exactamente en forma inversa pues la distribución de aportes en el año también incide en los costos totales (Figura 7-5).

En las figuras siguientes se presenta: en magenta la media de los años correspondientes a cada intervalo inter-decil de caudal de aporte o de costo directo y en celeste la dispersión de dichos valores (percentiles 10 al 90) según los aportes y los costos respectivamente. Cabe mencionar que cada intervalo inter-decil de caudal de aporte y de costo directo está compuesto por 200 años simulados y que, por tanto, hay 200 años por encima y por debajo de la barritas celestes.

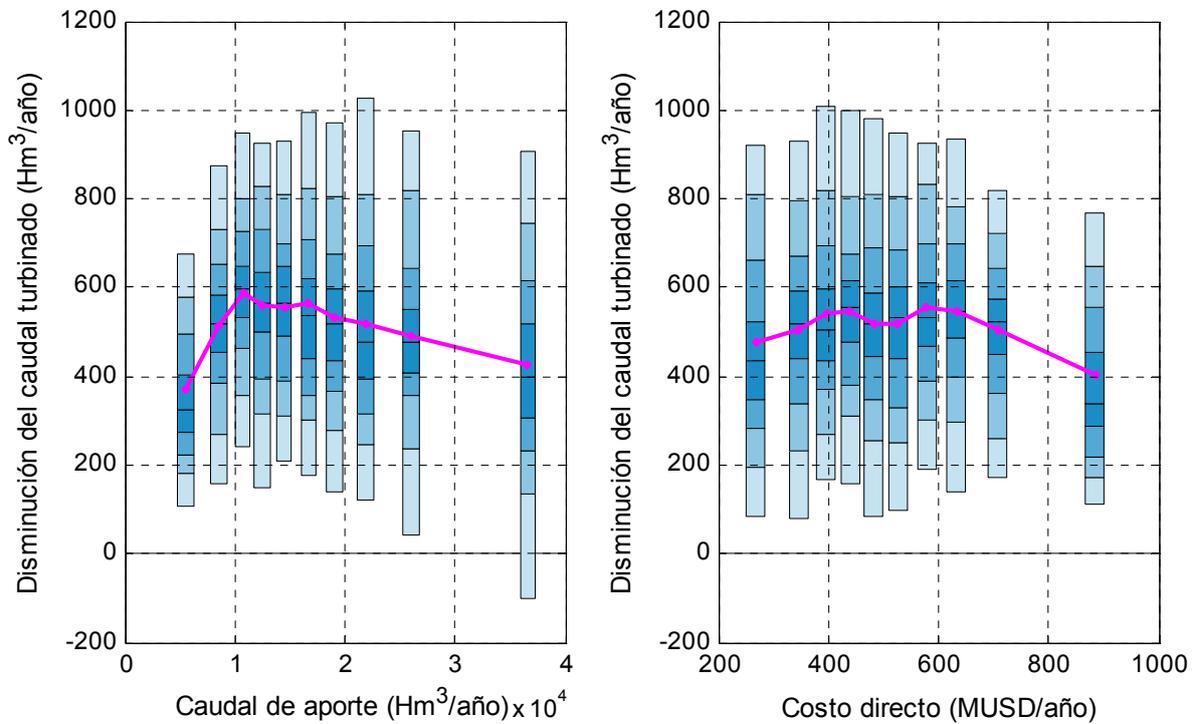
**Figura 7-19: Incremento del costo directo del escenario F1.5 respecto al escenario natural en función del caudal de aporte y del costo directo del escenario natural**



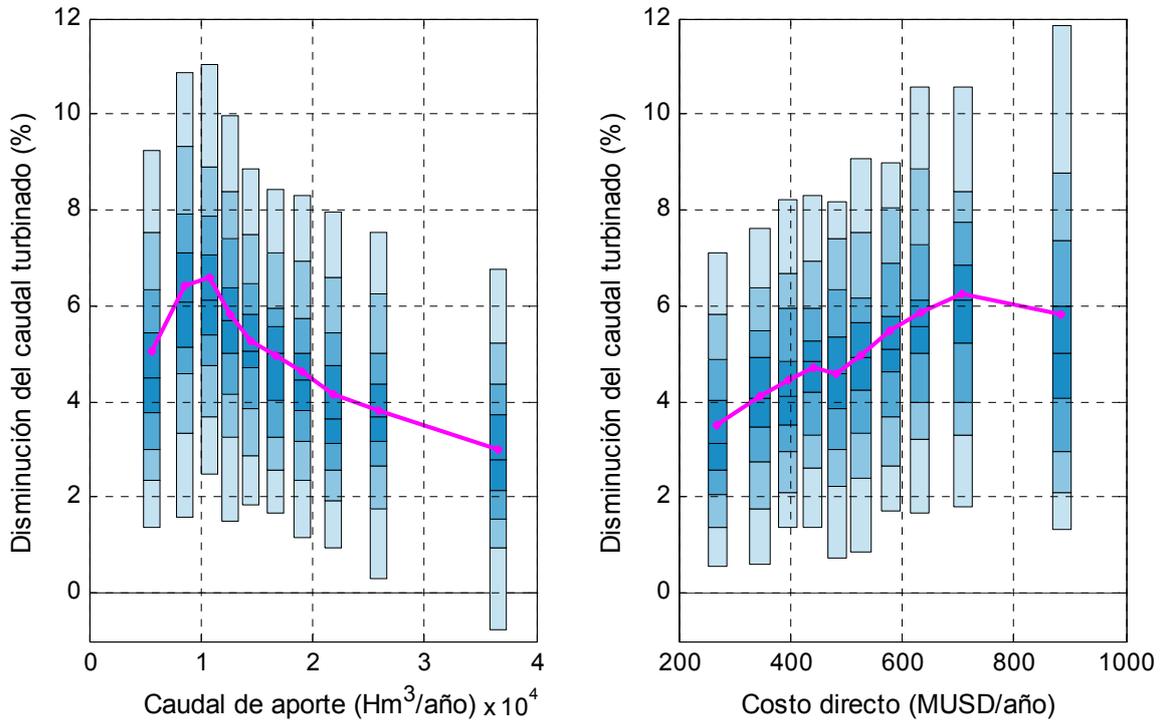
**Figura 7-20: Incremento porcentual del costo directo del escenario F1.5 respecto al escenario natural en función del caudal de aporte y del costo directo del escenario natural**



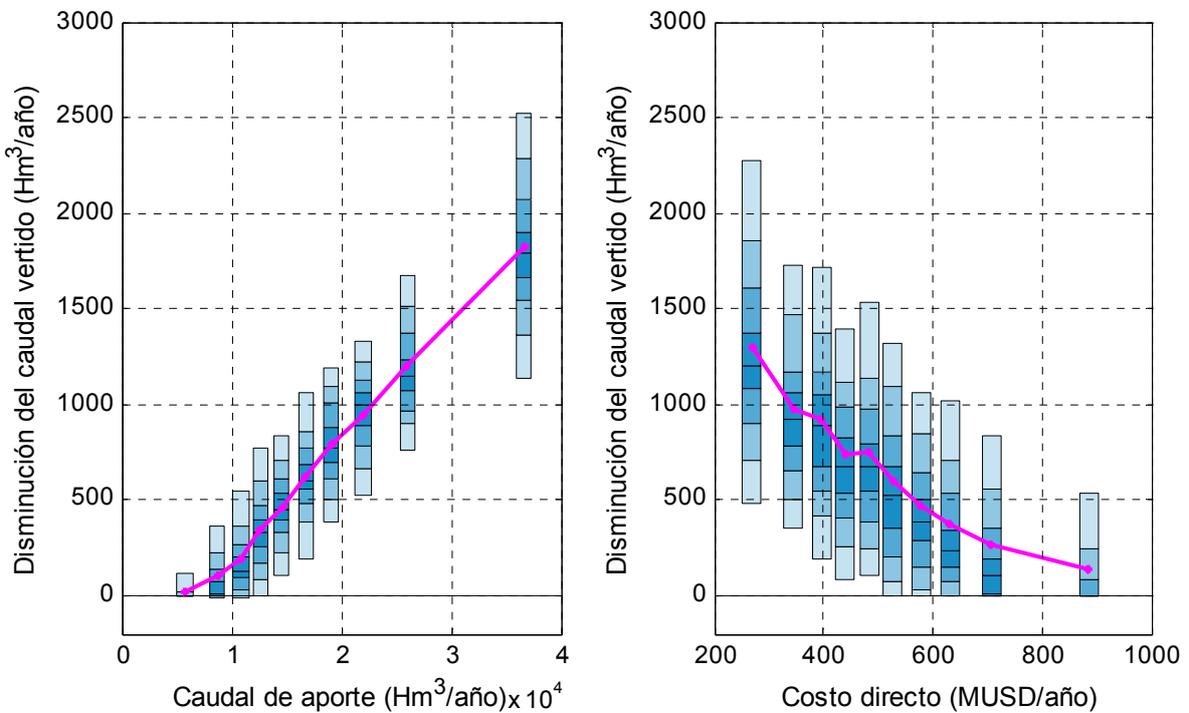
**Figura 7-21: Incremento del caudal turbinado del escenario F1.5 respecto al escenario natural en función del caudal de aporte y del costo directo del escenario natural**



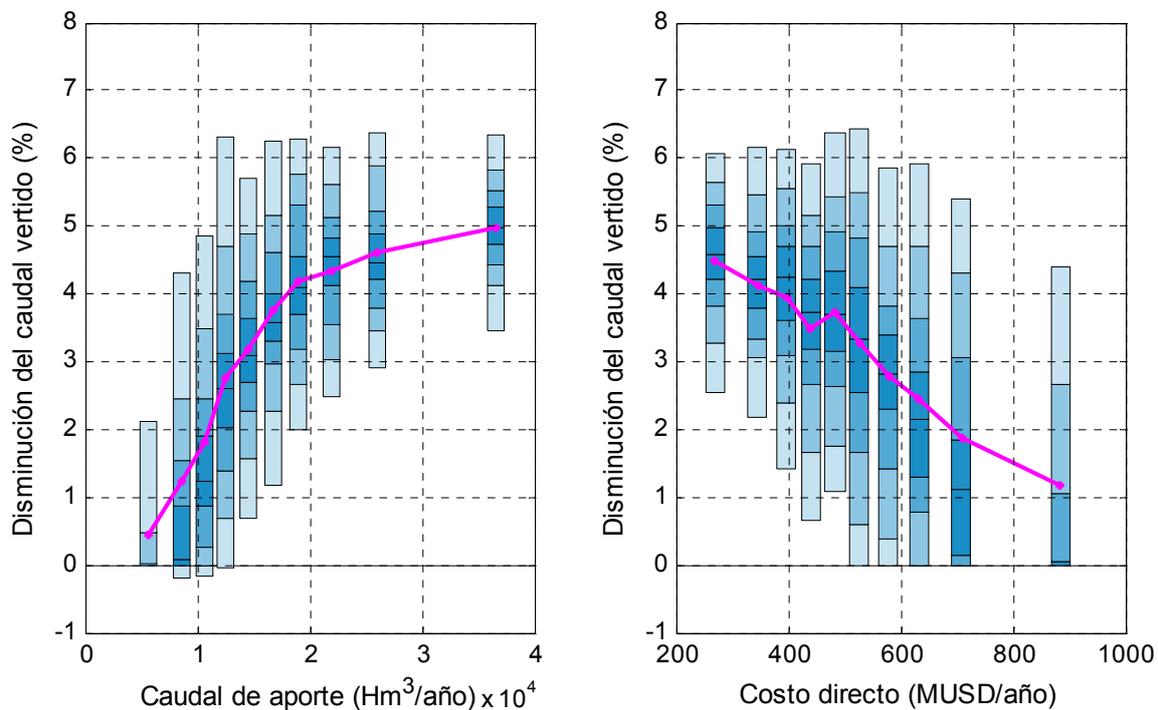
**Figura 7-22: Incremento porcentual del caudal turbinado del escenario F1.5 respecto al escenario natural en función del caudal de aporte y del costo directo del escenario natural**



**Figura 7-23: Incremento del caudal vertido del escenario F1.5 respecto al escenario natural en función del caudal de aporte y del costo directo del escenario natural**



**Figura 7-24: Incremento del caudal vertido (como porcentaje de los aportes) del escenario F1.5 respecto al escenario natural en función del caudal de aporte y del costo directo del escenario natural**



De las figuras anteriores se destaca nuevamente la existencia de un máximo relativo en el incremento del costo directo en función del caudal de aporte, que se verifica en el tercer decil. Más allá de las diferencias existentes, la existencia de dicho máximo puede explicarse con el mismo razonamiento que para los embalses de riego de arroz.

En lo que respecta al incremento del costo directo en función del costo directo, se observa en este caso un crecimiento del mismo al aumentar el costo directo. Es decir que años más caros registran un mayor incremento de costo directo en términos absolutos. Este comportamiento difiere del observado para los embalses de riego, lo que puede explicarse si se tiene en cuenta que la distribución del déficit de caudal de aporte en el año es diferente en ambos casos, reafirmando la incidencia de la distribución de los aportes en los costos totales.

Las gráficas de disminución de caudal turbinado (absoluto o en términos porcentuales relativos) no muestran la misma estructura que la de sobrecostos lo cual señala la importancia del costo oportunidad del agua turbinada y no solo los volúmenes totales turbinados para calcular los costos.

Respecto a la disminución del caudal vertido, se observa -tal cual es esperado- un crecimiento, tanto en términos absolutos como porcentuales, al aumentar el caudal de aporte a la represa G. Terra y un decrecimiento, tanto en términos absolutos como porcentuales, al aumentar el costo directo.

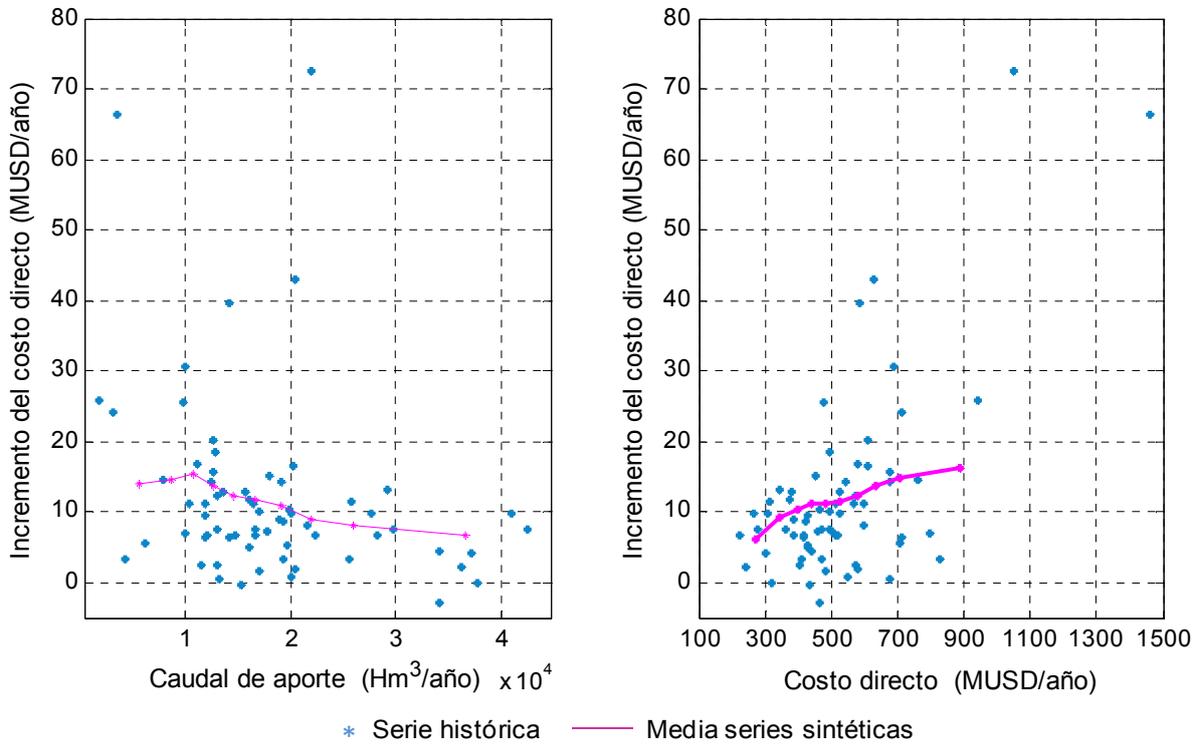
Por otro lado, y al igual que en el caso del arroz, cabe destacar la importante dispersión que se observa en todos los casos. De hecho, en varias de las figuras la amplitud de la dispersión y la poca variación de la media no hacen más que mostrar que la variable de agrupación en el eje horizontal no estratifica bien la variable analizada en el eje vertical.

Finalmente, se destaca que los percentiles presentados en las barras celestes de las figuras anteriores, no incluyen los valores extremos de las distribuciones. Dichos valores alcanzan en los extremos superiores incrementos del costo directo de hasta 85 MUSD/año, así como valores negativos en los extremos inferiores (los que también se observan en algunos de los deciles inferiores graficados). Como ya fue mencionado, esto puede explicarse si se tiene en cuenta que la política de operación de los escenarios natural y F1.5 son diferentes, siendo la correspondiente al escenario F1.5 más conservadora (ya que espera menores caudales de aporte a la represa G. Terra). Por lo tanto, un año seco puede impactar más fuertemente sobre el costo directo en el escenario natural que en el escenario F1.5, incurriendo el primero en mayores costos directos.

Todos los resultados presentados corresponden a la simulación del sistema eléctrico utilizando series sintéticas de caudales de aporte a las represas hidroeléctricas. Con el objetivo de comparar dichos resultados con los obtenidos al simular el sistema eléctrico utilizando series históricas de caudales de aporte (a pesar de tener una cantidad de años de datos significativamente menor) se realizaron las gráficas que se presentan en Figuras 7-25 y 7-26.

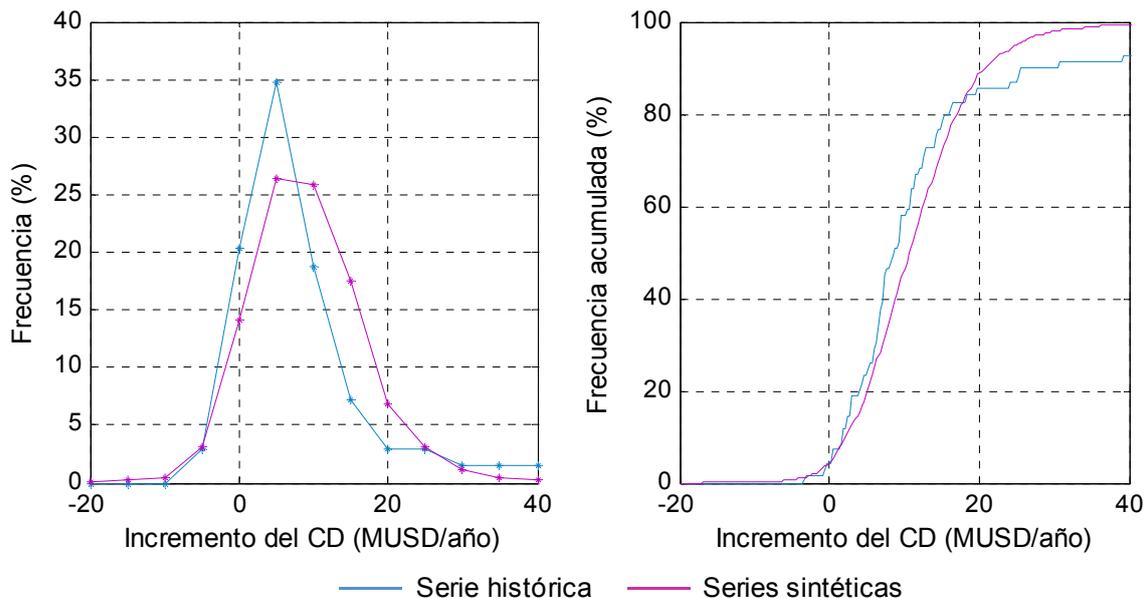
En la Figura 7-25 se presenta la media del incremento del costo directo en cada intervalo inter-decil de caudal de aporte y de costo directo (como en la Figura 7-19), así como el incremento del costo directo de cada año simulado con las series históricas en función de dichas variables. En general, a pesar de la relativa poca densidad de puntos a partir de las simulaciones históricas, se puede decir que se reproducen los resultados obtenidos con el sintetizador de series. Las mayores desviaciones parecen observarse en el caso extremo de costos directos elevados en donde las simulaciones históricas reflejan un incremento de costo sensiblemente mayor.

**Figura 7-25: Incremento del costo directo del escenario F1.5 respecto al escenario natural utilizando series sintéticas y series históricas**



Sin separar en deciles, tomando los histogramas de frecuencias del incremento del costo directo para todos los años juntos para ambas modalidades de simulación (Figura 7-26), se observa una gran similitud entre los resultados.

**Figura 7-26: Histogramas de frecuencias del incremento del costo directo del escenario F1.5 respecto al escenario natural, utilizando series sintéticas y series históricas**



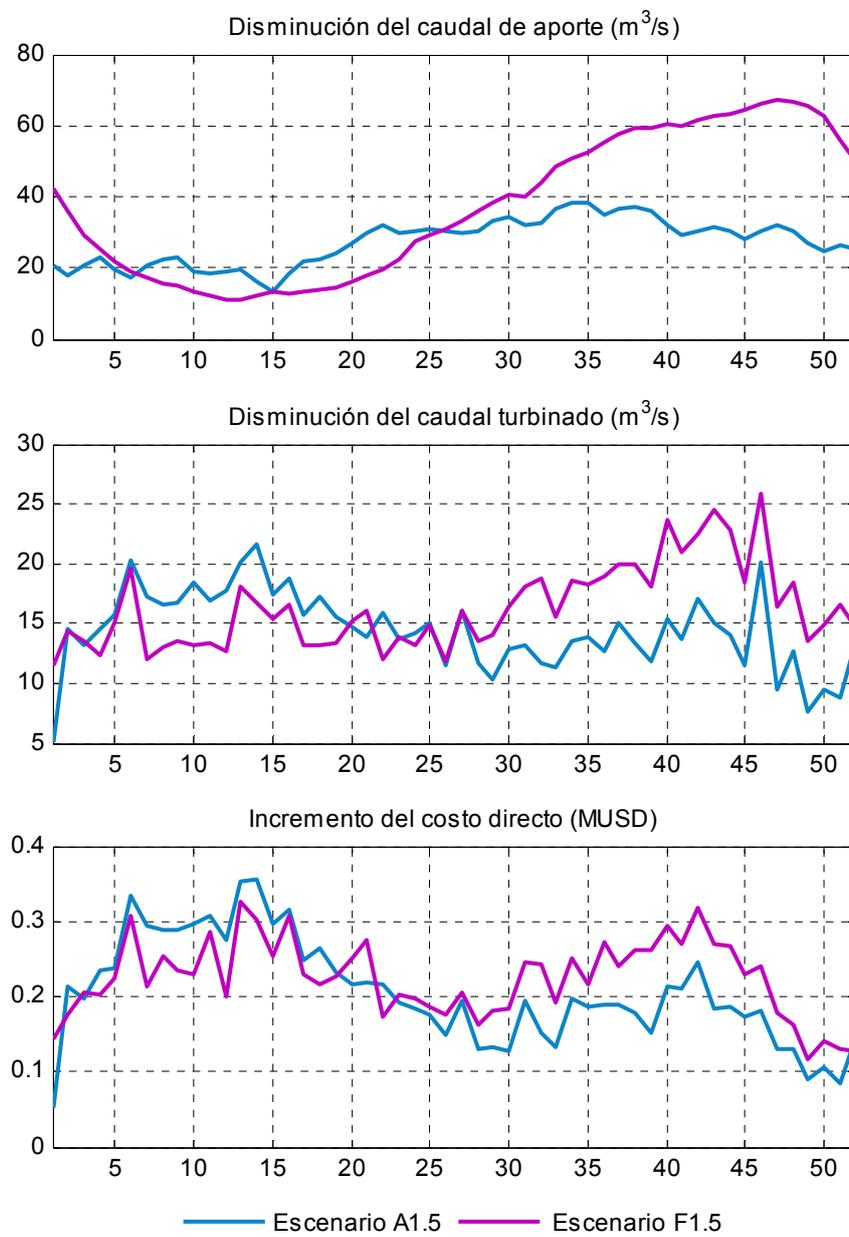
## 7.3. ARROZ – FORESTACIÓN – ENERGÍA

En esta sección se realiza una comparación del ciclo anual de la disminución de los caudales de aporte y turbinados en la represa G. Terra así como del incremento en el costo directo de los escenarios A1.5 y F1.5 respecto al escenario natural, para: un año medio (promedio de todos los años), un año muy seco (promedio de los años correspondientes al decil 1 de caudal de aporte), un año muy húmedo (promedio de los años correspondientes al decil 10 de caudal de aporte), un año con costos directos muy bajos (promedio de los años correspondientes al decil 1 de costo directo) y un año con costos directos muy elevados (promedio de los años correspondientes al decil 10 de costo directo).

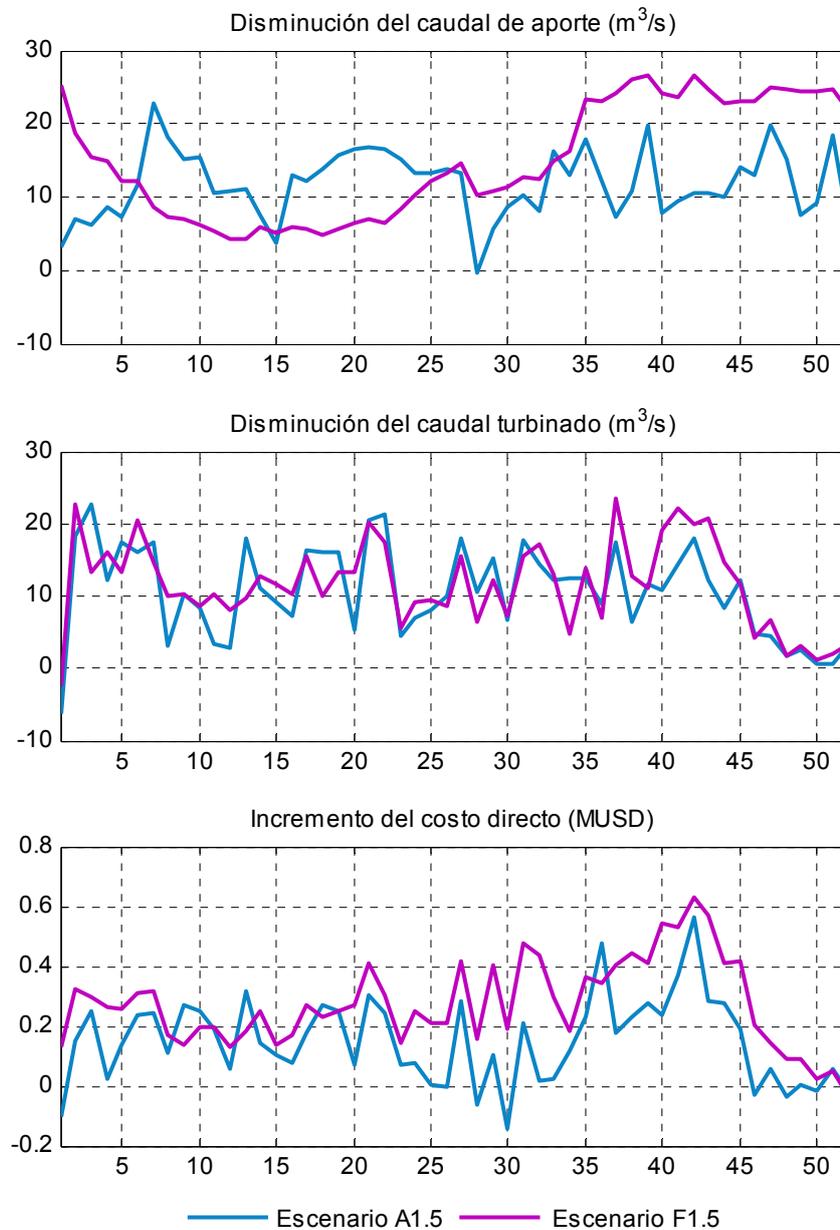
De lo que se observa en las siguientes figuras se destaca:

- Para el año medio, se verifica una mayor disminución del caudal de aporte y turbinado del escenario A1.5 respecto al escenario F1.5 en la primera mitad del año, invirtiéndose y acentuándose dicha relación en la segunda mitad del año. Dicho comportamiento del caudal de aporte se mantiene para los deciles extremos de años (aunque en forma menos marcada y más ruidosa).
- Para el año medio, un incremento algo mayor del costo directo del escenario A1.5 respecto al escenario F1.5 en la primera mitad del año, invirtiéndose y acentuándose dicha relación en la segunda mitad del año. Dicho comportamiento se pierde en los deciles extremos.

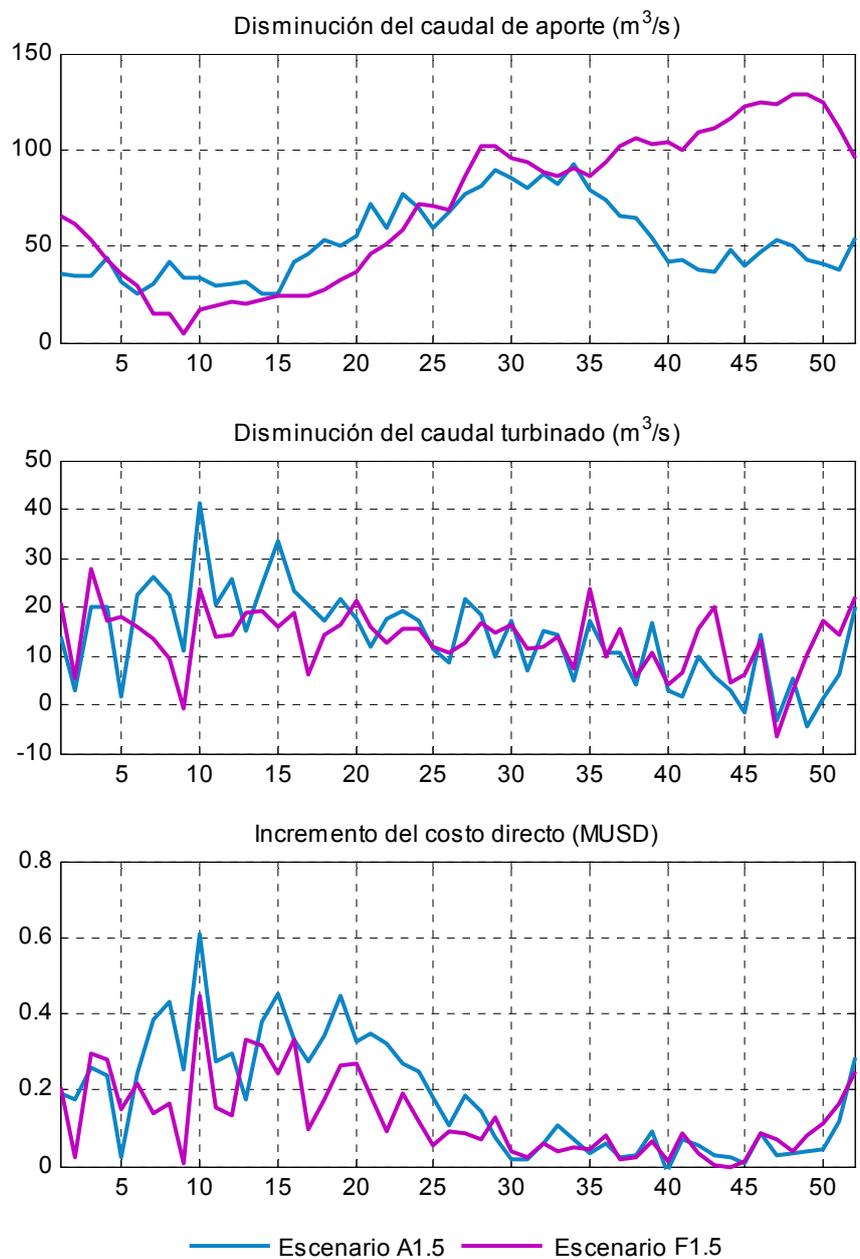
**Figura 7-27: Ciclo medio anual de la disminución de los caudales de aporte y turbinados y del incremento del costo directo - Escenarios A1.5 y F1.5 - Año medio**



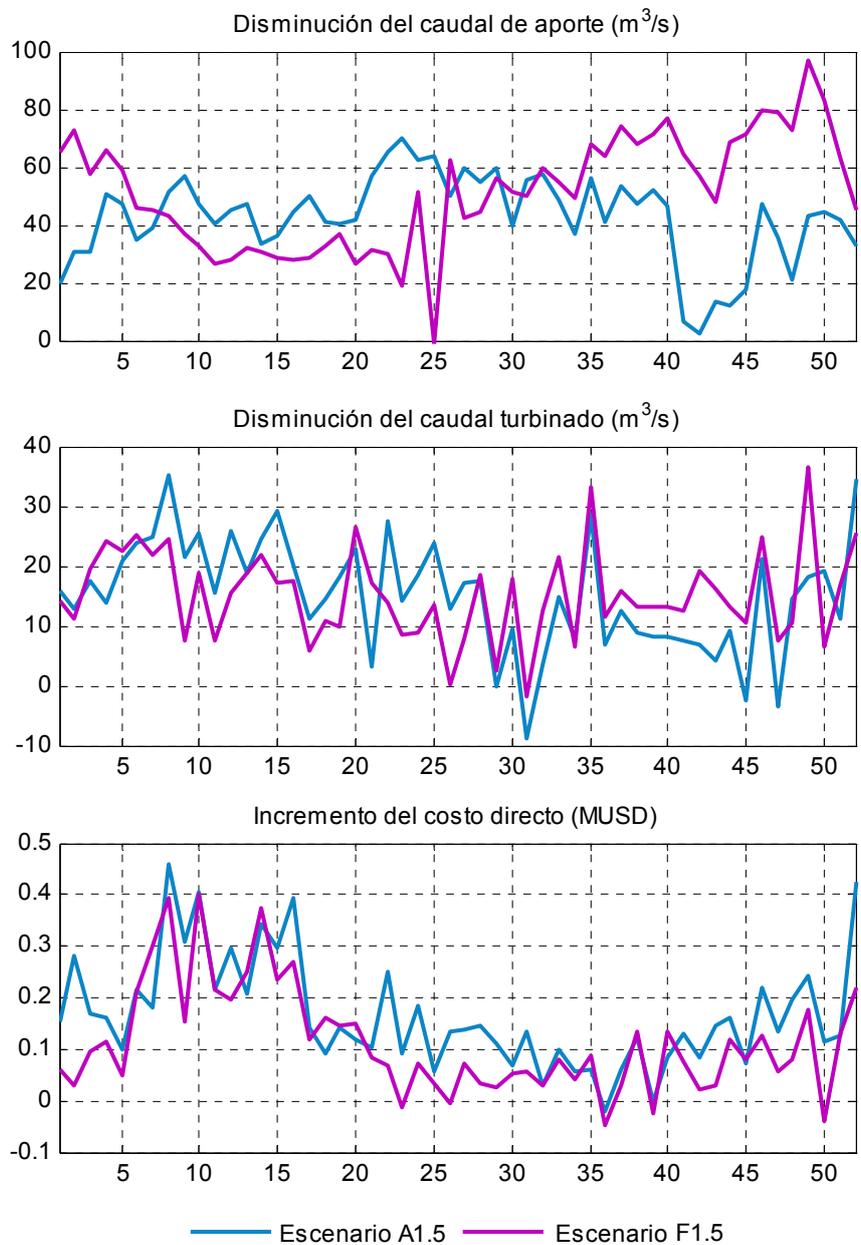
**Figura 7-28: Ciclo medio anual de la disminución de los caudales de aporte y turbinados y del incremento del costo directo - Escenarios A1.5 y F1.5 – Decil 1 de caudal de aporte**



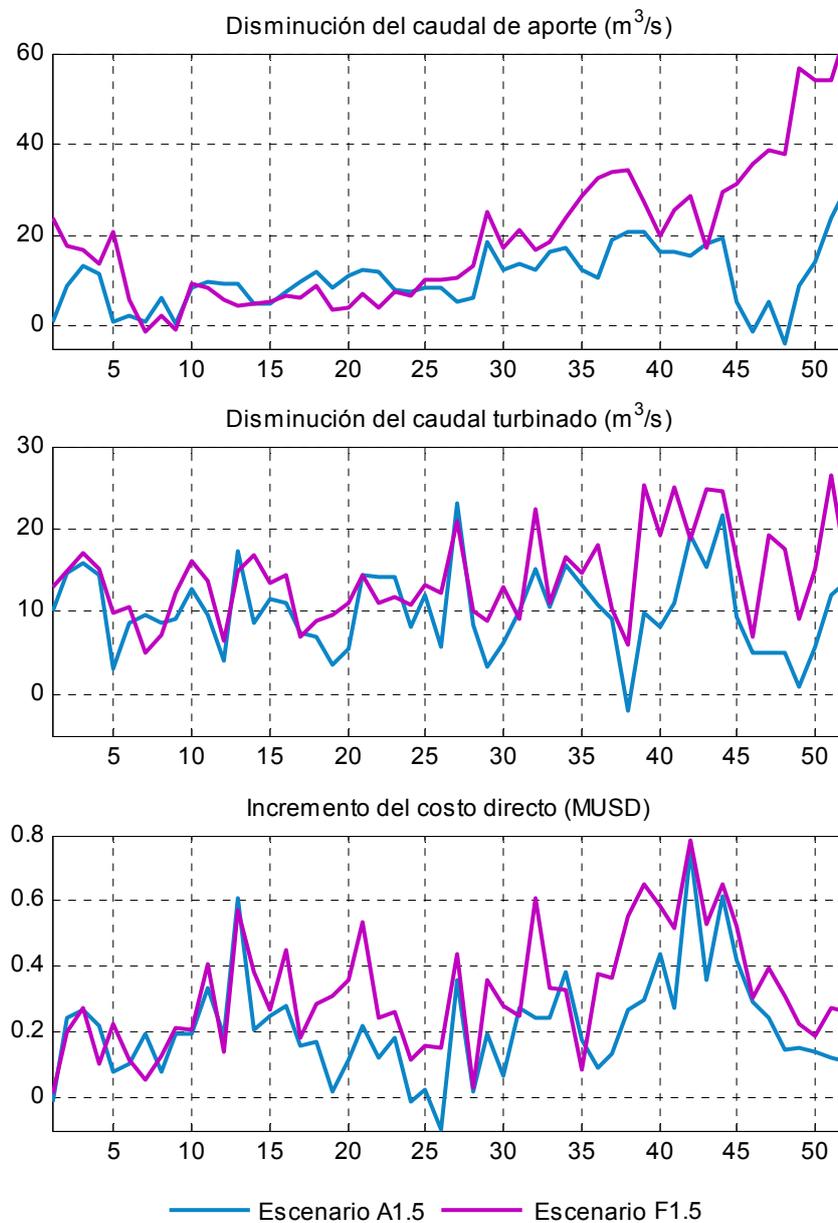
**Figura 7-29: Ciclo medio anual de la disminución de los caudales de aporte y turbinados y del incremento del costo directo - Escenarios A1.5 y F1.5 - Decil 10 de caudal de aporte**



**Figura 7-30: Ciclo medio anual de la disminución de los caudales de aporte y turbinados y del incremento del costo directo - Escenarios A1.5 y F1.5 - Decil 1 de costo directo**



**Figura 7-31: Ciclo medio anual de la disminución de los caudales de aporte y turbinados y del incremento del costo directo - Escenarios A1.5 y F1.5 - Decil 10 de costo directo**



# 8. SÍNTESIS Y CONCLUSIONES

A cluster of four small squares in shades of blue and teal, arranged in a loose pattern to the right of the title.



## 8. SÍNTESIS Y CONCLUSIONES

En este capítulo se presentan los principales resultados obtenidos del impacto económico en el sector energético dado por la presencia de embalses para riego de arroz y por la presencia de forestación dentro de la cuenca de aporte a la represa G. Terra, para todos los escenarios de expansión considerados.

### 8.1. ARROZ – ENERGÍA

En la Tabla 8-1 se presenta el incremento medio del costo directo anual del sistema eléctrico dado por la presencia de embalses para riego de arroz en la cuenca de aporte a la represa G. Terra, expresado en millones de dólares anuales y en unidades de energía equivalente. El incremento de costo directo expresado en unidades de energía equivalente fue determinado de dos formas distintas: considerando el costo directo medio anual por unidad de demanda; y considerando el costo marginal medio del sistema eléctrico.

El costo directo medio anual por unidad de demanda fue calculado simplemente como el cociente entre el costo directo anual medio del escenario A1.5 y la demanda estimada al 2015, resultando el mismo en 49.3 USD/MWh.

El costo marginal del sistema eléctrico corresponde al costo que le representaría satisfacer una unidad adicional de demanda en determinado paso de tiempo. El valor medio del mismo, en el período de simulación, resultó de 167.0 USD/MWh para el escenario A1.5.

Dichos valores fueron considerados fijos para todos los escenarios, ya que el escenario A1.5 es el que se considera más representativo del año 2015, para el cual fue simulado el sistema eléctrico. De todas formas lo mismos casi no varían con el escenario.

**Tabla 8-1: Incremento medio del costo directo anual del sistema eléctrico - Diferentes escenarios de expansión del cultivo de arroz**

Escenario	Incremento del CD (MUSD/año)	Incremento del CD - (GWh promedio/año)	Incremento del CD (GWh marginal/año)
A1	6.7	136.7	40.4
A1.5	10.7	216.2	63.8
A2	13.9	281.8	83.2
A2.5	17.9	363.3	107.3
A3	21.9	444.7	131.3
A4	29.4	595.6	175.8
A5	36.6	742.2	219.1

La expresión del costo directo en energía equivalente permite independizar los resultados de incremento de costo directo obtenidos, del escenario energético considerado (parque de generación y demanda eléctrica). Si se quiere estimar el incremento medio del costo directo anual para cualquiera de los escenarios de expansión del cultivo de arroz considerados pero para un escenario energético diferente, basta con multiplicar los valores de las dos últimas columnas de la Tabla 8-1 por el costo por unidad de demanda o por el costo marginal correspondiente a dicho escenario energético, respectivamente.

En la Tabla 8-2 se presenta el incremento del costo directo normalizado por el área de arroz sembrada, expresado el primero en las mismas unidades que en la Tabla 8-1.

**Tabla 8-2: Incremento medio del costo directo anual por área de arroz sembrada del sistema eléctrico- Diferentes escenarios de expansión del cultivo de arroz**

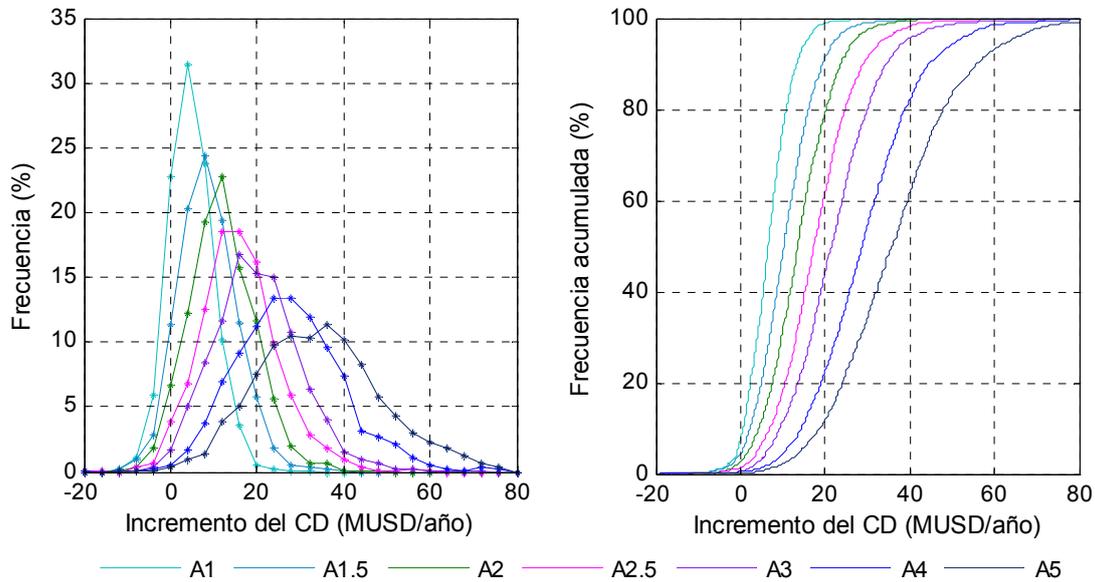
Escenario	Incremento del CD / Área de arroz (USD/ha/año)	Incremento del CD / Área de arroz (MWh promedio/ha/año)	Incremento del CD / Área de arroz (MWh marginal/ha/año)
A1	230.9	4.7	1.4
A1.5	246.3	5.0	1.5
A2	237.8	4.8	1.4
A2.5	243.5	4.9	1.5
A3	248.1	5.0	1.5
A4	246.4	5.0	1.5
A5	242.2	4.9	1.5

En la Tabla 8-2 puede observarse que el incremento medio del costo directo por hectárea de arroz sembrada se mantiene casi constante al aumentar la cantidad de embalses de riego, al menos en el rango considerado en que todo el sistema muestra un comportamiento cercano al lineal. Considerando el precio del arroz de 12.2 USD/bolsa de 50 kg correspondiente a la última zafra (ACA), se obtiene un incremento de costo directo de aproximadamente 20 bolsas de arroz por hectárea de arroz sembrada. Cabe mencionar que dicho costo es muy similar al valor con el cual se comercializa el agua entre los productores de arroz y los dueños de la infraestructura para embalsar el agua.

En la Figura 8-1 se presenta la distribución de probabilidades del costo directo para los diferentes escenarios de expansión del cultivo de arroz considerados, en donde puede observarse que al aumentar la cantidad de embalses de riego de arroz, aumenta la dispersión del incremento del costo directo, aumentando también la frecuencia de valores más elevados. Los valores negativos se explican, como ya fue mencionado anteriormente, por las diferentes políticas de operación del sistema eléctrico correspondientes a los diferentes escenarios, siendo las mismas más conservadoras

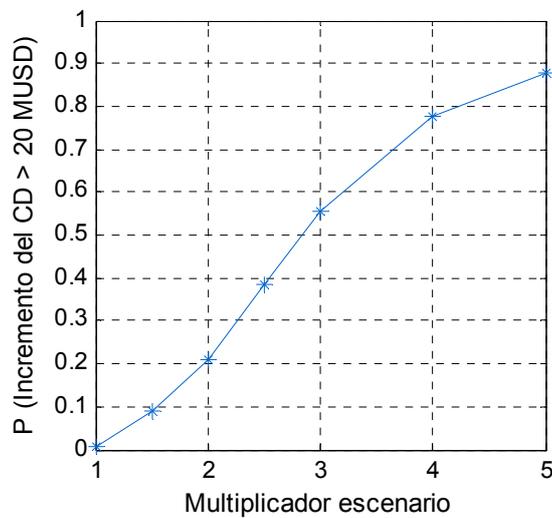
cuanto menor sea el aporte hidráulico a la represa G. Terra. Por lo tanto, un año seco puede impactar más fuertemente sobre el costo directo en el escenario natural que en cualquier escenario A, incurriendo el primero en mayores costos directos.

**Figura 8-1 Distribución de probabilidades del incremento del costo directo anual- Diferentes escenarios de expansión del cultivo de arroz**



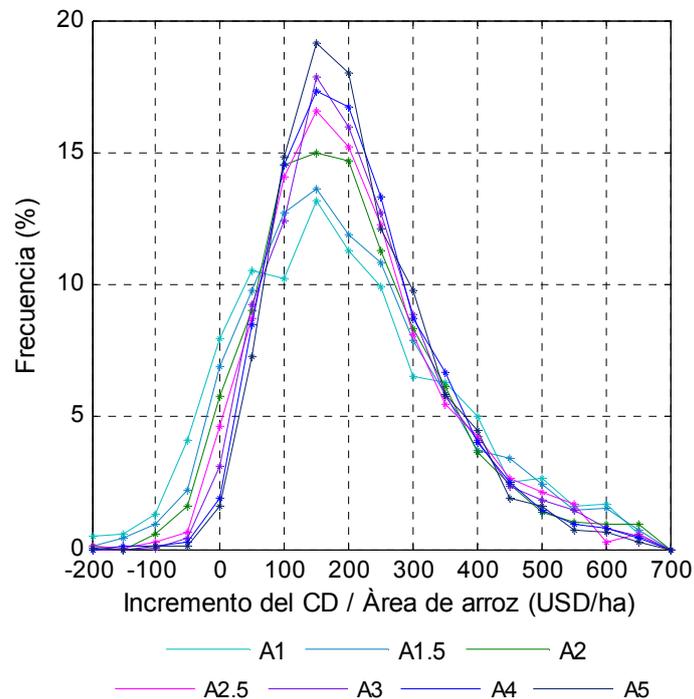
Luego, en la Figura 8-2 se grafica la probabilidad de que el incremento del costo directo del sistema eléctrico sea mayor a 20 MUSD/año en función del escenario de expansión del cultivo de arroz. Se observa que para el escenario A1.5 la probabilidad de incurrir en dicho incremento de costo es del 10 % mientras que para el escenario A5 ya es de 90%, no siendo el comportamiento lineal.

**Figura 8-2: Probabilidad de que el incremento del costo directo anual sea mayor a 20 MUSD**



Por último, en la Figura 8-3 se presenta la distribución de probabilidades del incremento del costo directo anual por área de arroz sembrada para los diferentes escenarios de expansión del cultivo de arroz considerados. Puede observarse que el incremento del costo directo en el que se concentra la mayor probabilidad de ocurrencia (moda) es muy similar para los diferentes escenarios, siendo el mismo de 150 USD/ha. Asimismo, puede observarse que al aumentar el área de arroz sembrada la distribución se afina levemente, disminuyendo la dispersión y aumentando la frecuencia de la moda.

**Figura 8-3: Distribución de probabilidades del incremento del costo directo anual por hectárea de arroz sembrada - Diferentes escenarios de expansión del cultivo de arroz**



El hecho de que las distribuciones de probabilidad sean similares para los diferentes escenarios de riego de arroz, sobre todo en lo que respecta a los valores de mayor frecuencia, es favorable desde el punto de vista de eventuales medidas de gestión de los recursos hídricos en la cuenca. El valor unitario del agua para riego de arroz no varía sustancialmente al expandirse el cultivo.

## 8.2. FORESTACIÓN – ENERGÍA

En la Tabla 8-3 se presenta el incremento medio del costo directo anual del sistema eléctrico dado por la presencia de forestación dentro de la cuenca de aporte a la represa G. Terra, expresado en millones de dólares anuales y en unidades de energía equivalente. Al igual que en el caso del arroz, el incremento de costo directo expresado en unidades de energía equivalente fue determinado de dos formas distintas: considerando el costo directo medio anual por unidad de demanda; y considerando el costo marginal medio del sistema eléctrico.

El costo directo medio anual por unidad de demanda para el escenario F1.5 resultó de 49.4 USD/MWh.

El costo marginal medio del sistema eléctrico para el escenario F1.5 resultó de 167.4 USD/MWh.

Dichos valores fueron considerados fijos para todos los escenarios, ya que el escenario F1.5 es el que se considera más representativo del año 2015, para el cual fue simulado el sistema eléctrico. De todas formas lo mismos casi no varían con el escenario.

**Tabla 8-3: Incremento medio del costo directo anual del sistema eléctrico- Diferentes escenarios de superficie forestada**

Escenario	Incremento del CD (MUSD/año)	Incremento del CD (GWh promedio/año)	Incremento del CD (GWh marginal/año)
F1	7.7	156.4	46.3
F1.5	11.6	235.7	69.7
F2	15.8	319.9	94.6
F3	24.3	491.1	145.3

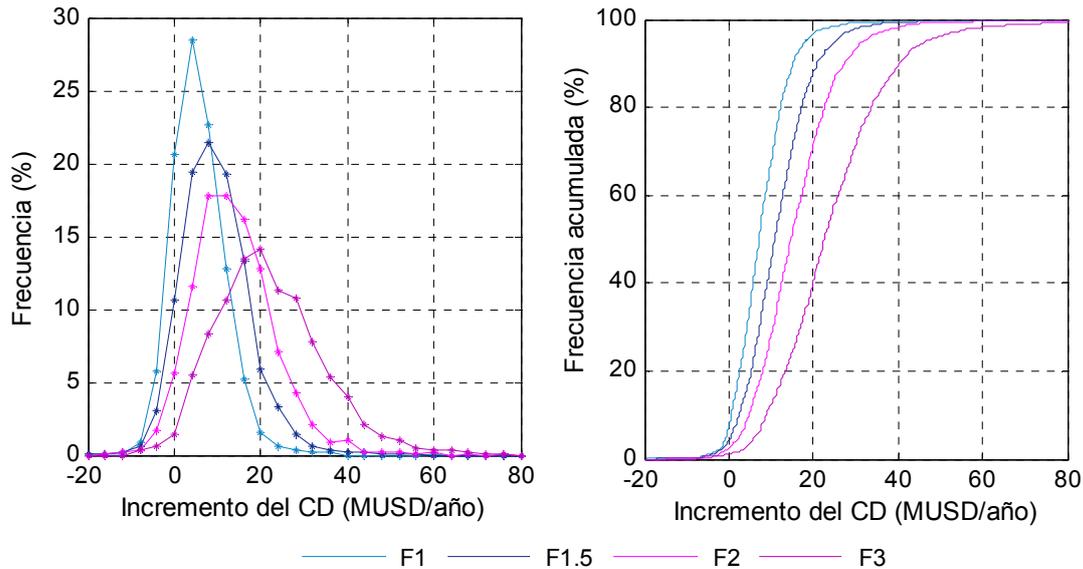
En la Tabla 8-4 se presenta el incremento del costo directo normalizado por el área forestada, expresado el primero en las mismas unidades que en la Tabla 8-3. Puede observarse que el incremento medio del costo directo por hectárea de superficie forestada se mantiene casi constante al aumentar esta última.

**Tabla 8-4: Incremento medio del costo directo anual por área forestada del sistema eléctrico - Diferentes escenarios de superficie forestada**

Escenario	Incremento del CD / Área forestada (USD/ha/año)	Incremento del CD / Área forestada (MWh promedio/ha/año)	Incremento del CD / Área forestada (MWh marginal/ha/año)
F1	22.6	0.46	0.13
F1.5	22.7	0.46	0.14
F2	23.1	0.47	0.14
F3	23.6	0.48	0.14

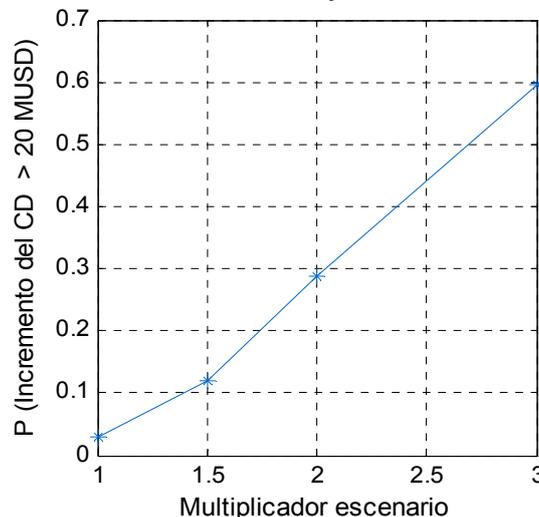
En la Figura 8-4 se presenta la distribución de probabilidades del costo directo para los diferentes escenarios de cobertura forestal considerados, en donde puede observarse que al aumentar esta última, aumenta la dispersión del incremento del costo directo y también la frecuencia de incrementos de costos más elevados. Los valores negativos se explican, cómo ya fue mencionado anteriormente, por las diferentes políticas de operación del sistema eléctrico correspondientes a los diferentes escenarios.

**Figura 8-4 Distribución de probabilidades del incremento del costo directo anual - Diferentes escenarios de superficie forestada**



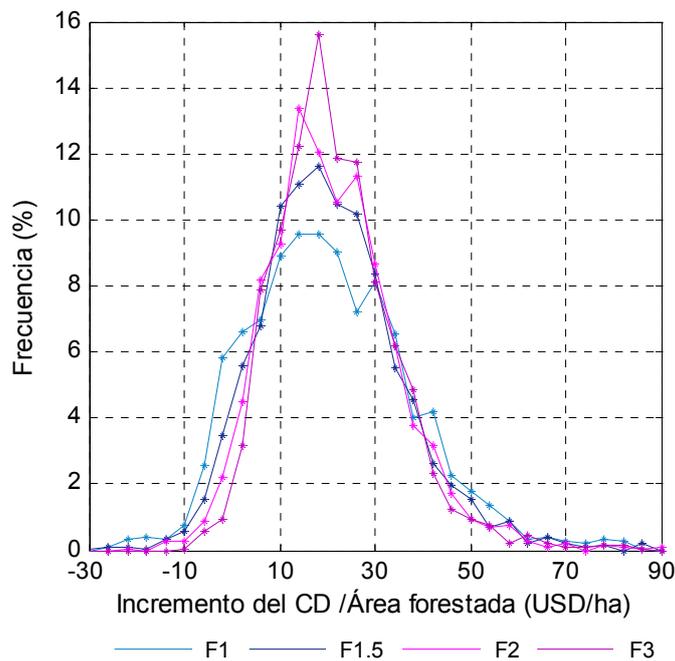
Luego, en la Figura 8-5 se grafica la probabilidad de que el incremento del costo directo del sistema eléctrico sea mayor a 20 MUSD/año en función del escenario de expansión de cobertura forestal dentro de la cuenca. Se observa que para el escenario F1.5 la probabilidad de incurrir en dicho incremento de costo es del 10 % mientras que para el escenario F3 es de 60%.

**Figura 8-5: Probabilidad de que el incremento del costo directo anual sea mayor a 20 MUSD**



Por último, en la Figura 8-6 se presenta la distribución de probabilidades del incremento del costo directo anual por área forestada para los diferentes escenarios considerados. Puede observarse que el incremento del costo directo en el que se concentra la mayor probabilidad de ocurrencia (moda) es muy similar para los diferentes escenarios, siendo el mismo de 18 USD/ha aproximadamente. Asimismo, puede observarse un que al aumentar la superficie forestada la distribución se afina levemente, disminuyendo la dispersión y aumentando la frecuencia de la moda.

**Figura 8-6: Distribución de probabilidades del incremento del costo directo anual por hectárea de superficie forestada- Diferentes escenarios de superficie forestada**



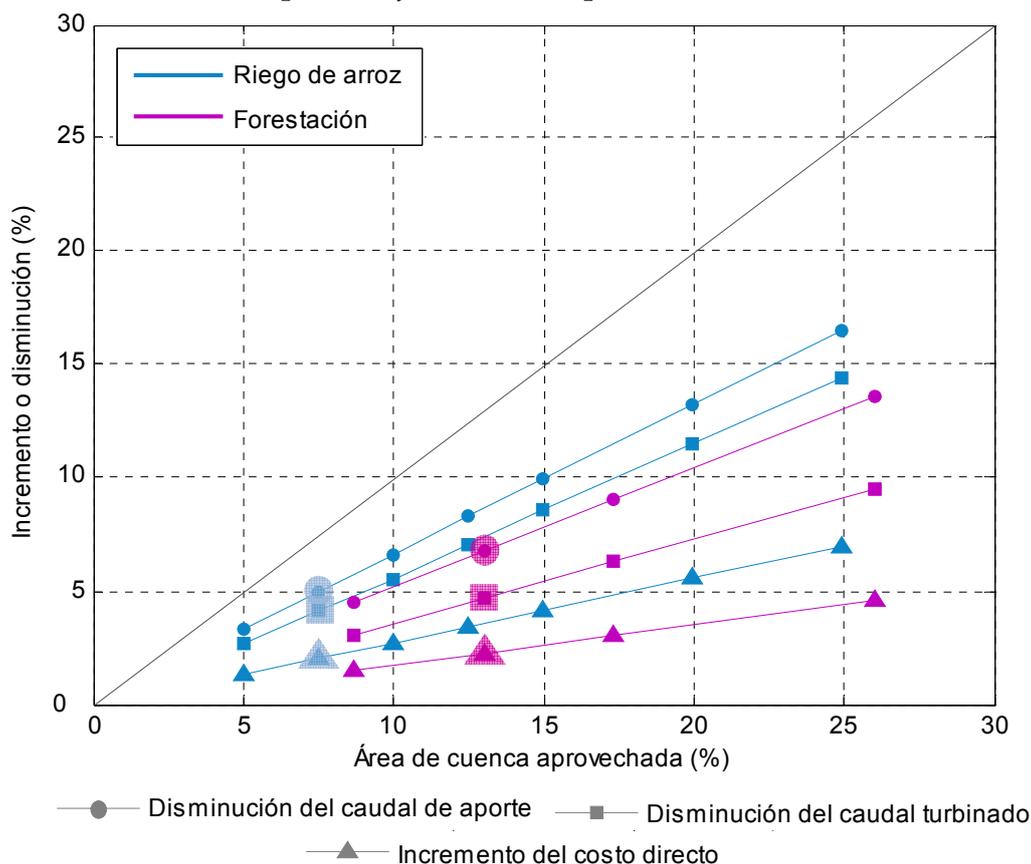
Nuevamente, el hecho de que las distribuciones de probabilidad sean similares para los diferentes escenarios de forestación, sobre todo en lo que respecta a los valores de mayor frecuencia, es favorable desde el punto de vista de la gestión de los recursos hídricos en la cuenca.

### 8.3. ARROZ – FORESTACIÓN – ENERGÍA

En esta sección se presenta una comparación de los principales resultados obtenidos para los escenarios de expansión del cultivo de arroz y de forestación.

En la figura siguiente se presenta la disminución media de los caudales de aporte y turbinados anuales en la represa G. Terra y el incremento medio del costo directo anual del sistema eléctrico (en porcentaje respecto al escenario natural) en función del porcentaje de área de cuenca aprovechada por los diferentes escenarios de demanda de agua considerados (resaltando los valores correspondientes a los escenarios A1.5 y F1.5). El área de cuenca aprovechada corresponde, en los escenarios de riego de arroz a la sumatoria del área de las cuencas de aporte a los embalses de riego, mientras que en los escenarios de forestación está dada directamente por la superficie forestada.

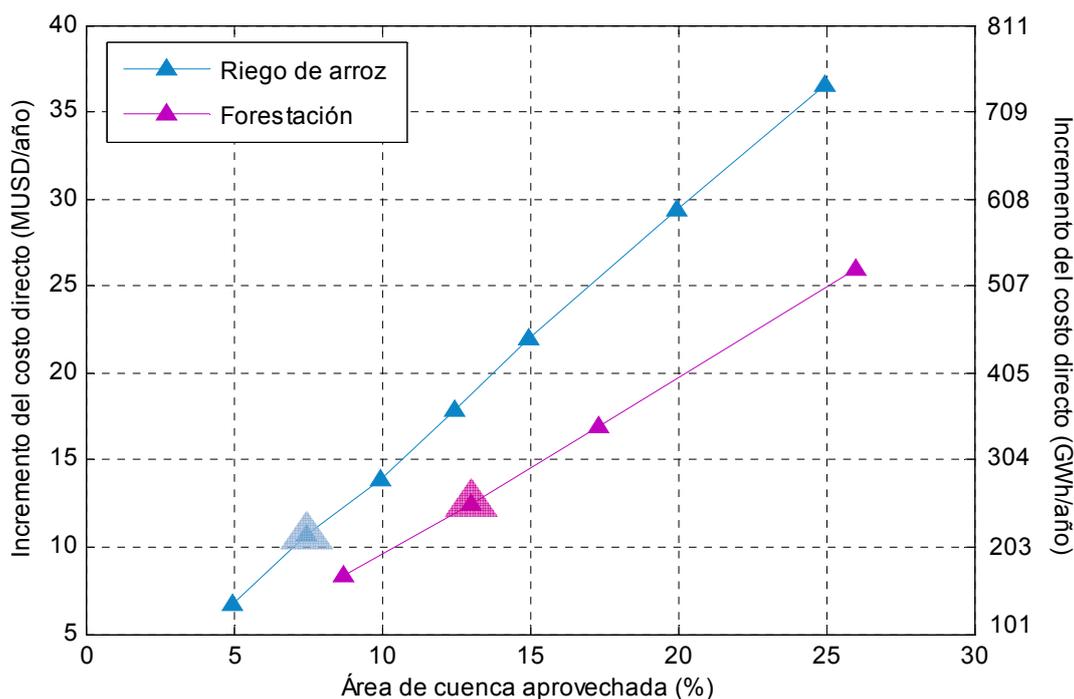
**Figura 8-7: Porcentajes de disminución de los caudales de aporte y turbinados anuales en la represa G. Terra e incremento del costo directo anual del sistema eléctrico en función del porcentaje de cuenca aprovechada**



En la figura anterior puede observarse la diferencia que existe entre la relación caudal de aporte – caudal turbinado – costo directo para el riego de arroz y para la forestación. A igual porcentaje de cuenca aprovechada, la disminución en el caudal de aporte es menor en el caso de la forestación y la diferencia se acentúa en el caso del caudal turbinado. Esto último se traduce en mayores incrementos del costo directo para el riego de arroz. Es decir que la señal en los costos directos respecto a la señal directa del caudal en el aporte es mayor en el riego de arroz que en la forestación.

Por último, en la Figura 8-8 se presenta el incremento de costo directo en términos absolutos, en unidades monetarias y de energía media, en función del área de cuenca aprovechada para los diferentes escenarios (resaltando los valores correspondientes a los escenarios A1.5 y F1.5). En dicha figura se observa nuevamente el mayor impacto económico dado por los embalses de riego de arroz que por la forestación para igual área afectada, aumentando dicha diferencia al aumentar el porcentaje de área de cuenca aprovechada.

**Figura 8-8: Incremento del costo directo del sistema eléctrico en función del porcentaje de cuenca aprovechada**



## 8.4. COMENTARIOS FINALES Y LÍNEAS A FUTURO

Como producto de la presente tesis de maestría, se obtuvo una herramienta de modelación hidrológica de la cuenca de aporte a la represa G. Terra acoplada con la modelación del sistema eléctrico del país, que puede ser utilizada para analizar e interpretar diversos aspectos del sistema.

La utilización de dicha herramienta permitió, en este estudio, realizar un análisis económico comparativo de los principales usos del agua en la cuenca de aporte a la represa G. Terra.

Los resultados obtenidos se consideran muy útiles desde el punto de vista de la gestión de los recursos hídricos en la cuenca de estudio.

A continuación se enumeran algunas líneas de interés a desarrollarse a futuro:

- Incorporar en la modelación hidrológica de los embalses de riego de arroz un porcentaje de retorno no nulo del caudal de riego.
- Considerar el impacto de los usos antrópicos del agua en los requerimientos de caudal ambiental en los cursos de agua de la cuenca.
- Analizar los resultados del sistema eléctrico considerando la expansión del escenario energético (parque de generación y demanda eléctrica).
- Analizar económicamente la incorporación de pequeñas centrales hidroeléctricas en los embalses de riego de arroz existentes dentro de la cuenca.
- Analizar el impacto conjunto y mutuo entre la forestación y el arroz.

# 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A decorative graphic consisting of several small squares in various shades of blue and teal, arranged in a scattered pattern around the text.



## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alonso, J. (2011). “Modelación de procesos hidrológicos asociados a la forestación e Eucaliptus en Uruguay”. Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica de los Fluidos Aplicada Facultad de Ingeniería Universidad de la República, Uruguay

“Análisis sobre la demanda y oferta de electricidad en el sistema eléctrico uruguayo en el período 2000-2007” (2008). Dirección Nacional de Energía, Ministerio de Industria, Energía y Minería, Uruguay.

“Anuario Estadístico Agropecuario 2011”(2011). Dirección de Estadísticas Agropecuarias, Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca, Uruguay.

“Aprovechamiento de los recursos hídricos superficiales. Cuenca del Río Negro” (2007). Dirección Nacional de Hidrografía. Ministerio de Transporte y Obras Públicas. Uruguay.

Bosch J. M. y Hewlett J. D. (1982). “A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yields and evapotranspiration”. Journal of Hydrology 55:3-23.

Calder, I.R. (2005). “The Blue Revolution: Integrated Land and Water Resource Management”. Earthscan Publications, Londres.

Calder, I.R. (1992). “The hydrological impact of land-use change (with especial reference to afforestation and deforestation”. Proceedings of the Conference of Priorities for Water Resources Allocation and Management, Natural Resources and Engineers Advicers Conference, Southampton, 91-101

Chaer, R. (2010) Notas del curso “Simulación de Sistemas de Energía Eléctrica”. Instituto de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay.

Chaer, R. (2009). “Simulación de granjas eólicas en el despacho óptimo del sistema hidrotérmico de generación de energía eléctrica del Uruguay”. Encuentro Latinoamericano de Economía de la Energía, Santiago, Chile.

Chaer, R. (2008). “Simulación de sistemas de energía eléctrica”. Tesis para optar al grado de Magister en Ingeniería Eléctrica. Montevideo, Uruguay.

Chaer, R. y Brandino, A. (2009). “Cotejamiento de la capacidad de generar condiciones hidrológicas de largo plazo del sintetizador de Correlaciones en Espacio Gaussiano con Histograma (CEGH) aplicado a la síntesis de series de aportes a las represas de Bonete, Palmar y Salto Grande”. Convenio SimSEE. FING-ADME. Montevideo, Uruguay.

Chaer, R., Terra, R. Díaz, A. y Brandino, A. (2008). “Aproximación al modelado de los aportes hidráulicos a las represas del Uruguay teniendo en cuenta el índice Niño 3.4”. 7º encuentro de Energía, Potencia, Instrumentación y Medidas. Montevideo, Uruguay.

Chaer, R. y Zeballos, R. (2006). “Modelo Simplificado de Central con Embalse con fines didácticos”. IEEE Latin America Transactions, Vol. 4, N° 3.

Failache, N et. al. (2006). “Calibración y regionalización de un modelo de balance hídrico mensual en cuencas uruguayas utilizando un algoritmo genético multiobjetivo” XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IHAR-LAD.

Genta J.L., Charbonnier, F. y Failache, N. (2001). “Modelo Regional de Balance Hídrico Mensual para Cuencas no Aforadas en Uruguay”. IV Congreso Internacional de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción, Chillán, Chile.

Genta, J.L., Failache, N., Alonso, J. y Bellón, D. (2001). Balances hídricos superficiales en cuencas del Uruguay. Universidad de la República - Ministerio de Transporte y Obras Públicas - PHI-UNESCO.

“Manual de diseño y construcción de pequeñas presas” (2001). Volumen 1: Diseño hidrológico e hidráulico. Versión 1.01. Ministerio de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, Uruguay.

Molfino J.H. y Califra A. (2001). “Agua Disponible de las Tierras del Uruguay”. División de Suelos y Aguas, Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca, Uruguay.

“Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH) en Uruguay” (2010). Consultoría del proyecto: Observatorio de Energías Renovables en Uruguay. Dirección Nacional de Energía, Ministerio de Energía y Minería, Uruguay.

Silveira, L.; Crisci, M.; Alonso, J.; Martinez, L.; Symonds, S. y Chreties, C. (2010). “Comparación del balance hídrico en dos microcuencas (pasturas - plantación de Eucaliptus) del Uruguay”. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Punta del Este, Uruguay.

Silveira, L y Alonso, J. (2009). "Runoff modifications due to the conversion of natural grasslands to forests in a large basin in Uruguay". *Hydrological Processes* 23, 320–329.

Silveira, L., Alonso, J. y Martínez, L. (2006). "Efecto de las plantaciones forestales sobre el recurso agua en el Uruguay". *Revista Agrociencia, Facultad de Agronomía*, Vol. X N° 2 pag. 75 – 93.

Silveira, L. En Prensa. Efectos de la actividad forestal sobre los recursos suelos y aguas, en microcuencas similares sometidas a distinto manejo. Serie Técnica INIA.

Zhang, L., Dawes, W.R. y Walker, G.R. (1999). "Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance". Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology CSIRO Land and Water. Technical report 99/12.

Páginas web:

- Plataforma de Simulación de Sistemas de Energía Eléctrica: <http://iie.fing.edu.uy/simsee>.
- Modelo digital de elevaciones del SRTM (Shuttle Radar Topography Mission): <http://glcf.umiacs.umd.edu/data>.
- Asociación de cultivadores de arroz: <http://www.aca.com.uy>.
- Ministerio de Ganadería Agricultura y pesca: <http://www.mgap.gub.uy>.
- Dirección nacional de Energía: [www.dnetn.gub.uy](http://www.dnetn.gub.uy).

