

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS FÍSICAS Y NATURALES

INGENIERÍA CIVIL

INFORME PRACTICA PROFESIONAL SUPERVISADA

**CALIBRACIÓN Y MODELACIÓN HIDROLÓGICA PRELIMINAR CON
ÉNFASIS EN EL ORDENAMIENTO Y CONTOL DE DATOS**

**Aplicación a las cuencas de los ríos San Antonio (Córdoba) y
Gualeguaychú (Entre Ríos)**

MARÍA JOSÉ MARTÍN

TUTOR DOCENTE: FACUNDO JOSE ALONSO

TUTOR EXTERNO: ERICA DIAZ

Calibración y modelación hidrológica preliminar con énfasis en el ordenamiento y control de datos

Aplicación a las cuencas de los ríos San Antonio (Córdoba) y Gualeguaychú (Entre Ríos)

Resumen

En este trabajo se presentan los avances realizados durante el periodo de Práctica Supervisada (PS) en las instalaciones del Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA) de la Universidad Nacional de Córdoba. Los trabajos estuvieron asociados, en primer lugar, a la recopilación de antecedentes hidrológicos históricos de las cuencas del río San Antonio (Provincia de Córdoba), y del arroyo Gualeguaychú (Entre Ríos). En segundo lugar, se realizó una revisión exhaustiva de dicha información, depurando las series de variables hidrológicas para lograr la consistencia real y atribuir a los datos la confiabilidad necesaria para su futura modelación. A posteriori, se llevó a cabo la calibración automática de un modelo hidrológico de origen francés, denominado Génie Rural (GR), a través de una metodología de optimización multi-objetivo, denominada MOCOM-UA. Dicha metodología permitió calibrar el modelo en modo simulación y en modo pronóstico. Finalmente, se verificó la calidad del ajuste en periodos reservados para tal fin. Los resultados indican una buena performance del modelo hidrológico y del algoritmo de optimización, pero una deficiente calidad de algunos tramos de la información incluso depurada.

Calibration and preliminary hydrologic modeling with emphasis on data organization and control

Application to the San Antonio (Córdoba) and Gualeguaychú (Entre Ríos) catchments

Abstract

This essay presents the progress made during Supervised Practice (PS) period at facilities of the Research and Water Technology Center (CETA) belonging to the National University of Córdoba. Firstly, the essay was focused on the collection of historical hydrological information of the San Antonio river basins (Province of Cordoba), and Gualeguaychú stream (Entre Ríos). Secondly, a detailed review of this information was completed by purifying series of hydrological variables to achieve real consistency and to attribute data reliability needed for future modeling. Afterwards, automatic calibration of a hydrological model (made in France, called Génie Rural -GR-) was carried out through a multi-objective optimization method, called MOCOM-UA. This methodology allows to calibrate the model in simulation and forecasting mode. Finally, the adjustment quality was verified within periods reserved for that purpose. Results indicate a good performance of the hydrological model and optimization algorithm, but poor quality of some sections even of refined information.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres, Jorge y María del Carmen, por su confianza en mí, porque a ellos les debo lo que soy, porque con su ejemplo me enseñaron a mantenerme fiel a mis ideales y contante en el esfuerzo.

A mi novio y mejor amigo, Manu, por su compañía e incondicional apoyo en todos los aspectos de mi vida. A mis hermanos, Car, Jor y Belu, quienes me acompañaron siempre a lo largo de mi vida. A mis cuñados y sobrinos, Santi, Ro, Tomi, Santi Jr. y Fran... Extendiendo el agradecimiento a mi gran familia compuesta por abuelos, tíos y primos, especialmente a mi abuelo Miguel, quien aún a sus 93 años, nos inspira con su pasión por el ejercicio de su tan amada profesión, la ingeniería civil.

En segundo lugar, agradezco especialmente a mis amigas quienes siempre estuvieron presentes y se ocuparon de recordarme que el estudio y el trabajo no son más que una parte de la vida. A mis compañeros y amigos de la facultad, especialmente a Bulli, Denu, Catu, Magui A, Magui L y Juli, quienes fueron pilares esenciales para la construcción de este logro, no solo por sus aportes académicos, sino también por el apoyo y compañía en los diferentes aspectos de la vida.

A mi director de Práctica Profesional Supervisada Mg. Ing. Facundo José Alonso, por su dedicación, paciencia, calidez y compañerismo. Sin su buena predisposición este trabajo jamás podría haber sido posible.

Al Ing. Carlos Marcelo García, director del Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA), quien por medio de éste me brindó al posibilidad de realizar la PS.

A las personas que facilitaron el acceso a información y conocimientos necesarios para el desarrollo de este trabajo, Mg. Ing. Facundo José Alonso, Ing. Laura Colladon (CIRSA-INA), Dr. Ing. César García, Dr. Juan Carlos Bertoni, Dr. Andrés Rodríguez, Ing. Agr. Nicolas Vaiman, Mg. Ing. Eduardo Zamanillo, Mg. Ing. Silvina San Miguel, Ing. Carlos Catalini, Ing. Antoine Patalano, Ing. Nicolas Guillen, Ing. Jose Manuel Díaz Losada, Ing.

Erica Diaz, Mg. Ing. Juan Weber, Ludovic Oudin, Nicolas Le Moine, Vazken Andréassian, Pierre Ribstein y Eduardo Diaz.

Extiendo un agradecimiento especial al Servicio Meteorológico Nacional y Subsecretaría de Recursos Hídricos por brindar gran cantidad de información, no solo a través de páginas webs, sino por la constante ayuda a través del Ing. Luis Lenzi (Santa Fe) y Lic. Ana Teresa Gómez y el Sr. Gonzalo Díaz.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	OBJETIVOS	4
2.1.	OBJETIVO GENERAL	4
2.2.	OBJETIVOS PARTICULARES	4
3.	REVISIÓN DE ANTECEDENTES	5
3.1.	MODELOS HIDROLÓGICOS	5
3.2.	SISTEMAS, CONCEPTOS Y CLASIFICACIÓN	7
3.3.	EL SISTEMA HIDROLÓGICO	8
3.4.	EL PROCESO DE TRANSFORMACIÓN LLUVIA-CAUDAL	10
3.5.	MODELOS, CONCEPTOS Y CLASIFICACIÓN	12
3.6.	EL MODELO LLUVIA-CAUDAL	16
3.7.	OPTIMIZACIÓN – CONCEPTOS GENERALES	17
3.7.1.	MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN	18
3.7.2.	GENERACIÓN DE NÚMEROS ALEATORIOS	19
3.8.	ALGORITMOS GENÉTICOS	22
3.8.1.	CONCEPTOS BÁSICO DE BIOLOGÍA	23
3.8.2.	LA TÉCNICA DE LOS ALGORITMOS GENÉTICOS	27
Codificación del dominio	.....	27
Adaptación	.....	28
Selección	.....	29
Cruzamiento	.....	30
Mutación	.....	30
3.9.	TÉCNICAS DE CALIBRACIÓN	31
3.9.1.	CLASIFICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE CALIBRACIÓN	32
Calibración automática y calibración manual	.....	32
Calibración con funciones mono y multi-objetivo	.....	33
Métodos de Calibración local y global	.....	35
3.10.	CALIBRACIÓN AUTOMÁTICA DE MODELOS P-Q	39
3.10.1.	LA FUNCIÓN OBJETIVO	40
Coeficiente de Nash Sutcliffe	.....	46
Coeficiente de Persistencia	.....	48
3.10.2.	ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN PARA MODELOS P-Q	51
3.10.3.	CRITERIO DE PARADA	53
3.10.3.1.	Limitaciones.....	55
3.10.4.	DATOS DE CALIBRACIÓN	55
4.	METODOLOGÍA.....	58
4.1.	DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO GR	58
4.1.1.	OBJETIVOS DE SU DESARROLLO	58
4.1.2.	PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS	58
4.1.3.	ESTRUCTURA DEL MODELO	59
4.1.3.1.	DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DEL MODELO GR4J.....	60
4.2.	EL ALGORITMO MOCOM-UA	66

4.2.1.	EVOLUCIÓN COMPETITIVA COMPLEJA	68
	Atribución de pesos.	68
	Selección de subcomplejos.....	68
	Evolución de los Subcomplejos.	69
	Ordenamiento de los puntos del Complejo.....	70
4.2.2.	ALGORITMO DE NELDER Y MEAD	70
	Organización del Subcomplejo.....	70
	Cálculo del centro de gravedad.....	70
	Cálculo del punto de reflexión.	71
	Evaluación del punto de reflexión.	71
	Cálculo del punto de contracción.....	72
	Evaluación del punto de contracción.....	72
4.2.3.	PASOS DEL MÉTODO	73
5.	RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS	78
5.1.	CONSIDERACIONES SOBRE EL PASO DE TIEMPO ADOPTADO	79
5.2.	CUENCA DEL RIO SAN ANTONIO	81
	5.2.1. DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA.....	81
	5.2.2. PRECIPITACIÓN.....	83
	5.2.3. DETERMINACIÓN DE LA CURVA H-Q.....	88
	5.2.4. NIVELES Y CAUDALES	100
	5.2.5. EVAPOTRANSPIRACIÓN	101
5.3.	CUENCA DEL ARROYO GUALEGUAYCHÚ	103
	5.3.1. DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA.....	103
	5.3.2. PRECIPITACIÓN.....	104
	5.3.3. CAUDAL	105
	5.3.4. EVAPOTRANSPIRACIÓN	107
5.4.	SÍNTESIS	108
6.	CONTROL ESTADÍSTICO DE LAS SERIES PROCESADAS	109
6.1.	INTRODUCCIÓN	109
6.2.	NIVEL DE SIGNIFICANCIA	109
6.3.	PRUEBA DE ESTACIONALIDAD (KENDALL)	111
	6.3.1. PRECIPITACIÓN.....	113
	6.3.2. CAUDAL	113
6.4.	PRUEBA DE HOMOGENEIDAD A ESCALA ANUAL (WILCOXON)	113
	6.4.1. PRECIPITACIÓN.....	114
	6.4.2. CAUDAL	115
7.	REVISIÓN FINAL DE LOS DATOS	116
8.	APLICACIÓN Y RESULTADOS	118
8.1.	INTRODUCCIÓN	118
8.2.	DESCRIPCIÓN GENERAL	118
	8.2.1. DATOS DE ENTRADA REQUERIDOS POR EL ALGORITMO MOCOM-UA.	123
	8.2.2. DATOS DE ENTRADA REQUERIDOS POR EL MODELO GR	123
8.3.	CALIBRACIÓN	124
8.4.	SIMULACIÓN	125
8.5.	PRONÓSTICO	128
9.	CONCLUSIONES	130

9.1. CONCLUSIONES SOBRE EL ORDENAMIENTO Y CONTROL DE DATOS.....	130
9.2. CONCLUSIONES SOBRE LA CALIBRACIÓN.....	131
10. BIBLIOGRAFÍA	133
10.1. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	133
11. ANEXO	139

LISTA DE TABLAS

Tabla 5.1. Pluviómetros de alta frecuencia instalados en la cuenca del río San Antonio, denominación, emplazamiento y altitud relativa, (INACIRSA).	84
Tabla 5.2. Síntesis de alternativas.	98
Tabla 5.3. Resumen información disponible.	108
Tabla 5.4. Resumen información disponible.	108
Tabla 6.1. Nivel de significancia, hipótesis de contrastación	110
Tabla 6.2.: Valores de K_{cri} para el test de Mann – Kendall	112
Tabla 8.1.: Parámetros algorítmicos propuestos.	124
Tabla 8.2.: Límites de los parámetros del modelo.	124
Tabla 8.3.: Parámetros obtenidos.	125

LISTA DE IMÁGENES

Figura 3.1. El ciclo hidrológico (CONICYT, 2007).	9
Figura 3.2.: Modelo hidrológico de transformación lluvia-caudal (HEC-HMS, 2000).	10
Figura 3.3.: Etapas de la meiosis (Kuri y Galaviz, 2002).	26
Figura 3.4.: Esquema de trabajo de la enzima ADN polimerasa (Kuti y Galaviz, 2002).	27
Figura 3.5.: Esquema de la Regio de Pareto para dos funciones objetivo.	33
Figura 3.6.: Proyección plana de la superficie de respuesta de una FO.	35
Figura 3.7. Coeficiente de Persistencia	49
Figura 4.1. Estructura del modelo GR4J (Perrin et al., 2003).	60
Figura 4.2. Modelo GR4J modo pronóstico.	65
Figura 4.3. Zona de validez de los parámetros del modelo, (Alonso, 2008).	73
Figura 4.4. Puntos válidos y no válidos (Alonso, 2008).	74
Figura 5.1. Cuenca hidrológica, (Mijares, 1992).	80
Figura 5.2. Hidrograma.	81
Figura 5.3. Ubicación de la cuenca del río San Antonio (CIRSA, 2003).	82
Figura 5.4. Perfil de la Cuenca y tributarios del Río San Antonio (CIRSA, 2003).	83
Figura 5.5. Cuenca del río San Antonio, red de estaciones hidrometeorológicas. Se representan además las isocotas 1.200 y 2.200 m de altitud sobre el nivel del mar. (Catalini et al., 2010).	84
Figura 5.6. Archivo de información base formato .txt.	85
Figura 5.7. Datos de precipitaciones ordenados.	86
Figura 5.8. Polígonos de Thiessen con 10 estaciones utilizadas para el análisis de precipitación del Río San Antonio.	87
Figura 5.9. Ejemplos de polígonos confeccionados.	88
Figura 5.10. Datos de aforos realizados.	89
Figura 5.11. Curva altura caudal, Alternativa N° 1.	90
Figura 5.12. Curva altura caudal, Alternativa N° 1.	91
Figura 5.13. Rango del 80% de los datos.	92

Figura 5.14. Comparación de alternativas.	92
Figura 5.15. Curva de transformación. Alternativa N°2.	93
Figura 5.16. Compatibilización de curvas en el punto de quiebre.	94
Figura 5.17. Alternativa N°2.	94
Figura 5.18. Curva de transformación. Alternativa N°3.	95
Figura 5.19. Curva de transformación. Alternativa N°3.	95
Figura 5.20. Compatibilización de curvas en el punto de quiebre.	96
Figura 5.21. Alternativa N°3.	96
Figura 5.22. Curva de transformación. Alternativa N°4.	97
Figura 5.23. Comparación de alternativas.	99
Figura 5.24. Ubicación Cuenca del Rio Gualaguaychú.	104
Figura 5.25. Curva de transformación niveles INA y Evarsa.	106
Figura 6.1. Funciones de frecuencia para la información de muestra y funciones de probabilidad para la población.	111
Figura 6.2. Función de frecuencia para la información de muestra y funciones de probabilidad para la población.	111
Figura 7.1. Figura matlab.	116
Figura 8.1. Carpetas y archivos utilizados.	118
Figura 8.2. Archivo de entrada de datos.	119
Figura 8.3. Archivo de entrada Ent_Main.txt.	120
Figura 8.4. Archivo Calibración.	121
Figura 8.5. Archivo salida modo simulación.	122
Figura 8.6. Archivo salida modo pronóstico.	122
Figura 8.7. Coeficientes de Calibración.	125
Figura 8.8. Resultados Simulación.	126
Figura 8.9. Resultados Simulación.	127
Figura 8.10. Resultados Simulación.	127
Figura 8.11. Resultados Pronóstico.	128
Figura 8.12. Resultados Pronóstico.	129

1. INTRODUCCIÓN

A pesar de que el agua constituye el recurso más elemental y necesario para la vida, todavía existen muchas incertidumbres en relación a los procesos que gobiernan su movimiento dentro de la hidrosfera. El sistema hidrológico global es sumamente complejo, debido a los múltiples ambientes en que el agua interacciona, pasando por los más diversos estados.

El hombre ha enfrentado este complejo problema del movimiento del agua en el planeta a través de modelos simplificados de la realidad. Los modelos matemáticos son una de las principales herramientas con que cuenta el hidrólogo para interpretar y simular el comportamiento de una cuenca hidrográfica.

Como indica Alonso (2008), la simulación hidrológica tiene aplicación en las tres principales funciones de la hidrología: la predicción, el proyecto y la planificación. En cuanto a la predicción, una de las principales aplicaciones se da en el campo del pronóstico de crecidas a tiempo real. En proyecto, los modelos se utilizan para estimar caudales de diseño de obras hidráulica. Mientras que en planificación, se utilizan para realizar una estimación de la disponibilidad del recurso hídrico a mediano y largo plazo, análisis de la variabilidad hidrológica o estudios sobre los cambios del uso de suelo, por ejemplo.

La bibliografía ha sido pródiga en publicaciones de modelos matemáticos aplicados a la hidrología. La filosofía de construcción de los modelos hidrológicos es variada, y su aplicabilidad está limitada a las condiciones para las cuales fue desarrollado, existiendo una amplia gama que varía en complejidad. La estructura del modelo matemático comprende un conjunto de valores constantes, denominados parámetros, que controlan los diversos procesos del modelo. Los valores de estos parámetros, varían dependiendo de la cuenca hidrográfica de aplicación.

Una de las etapas más críticas en la aplicación de modelos hidrológicos está asociada al proceso de calibración, es decir, la selección del juego de valores para los parámetros que mejor representen las condiciones locales de la cuenca hidrográfica.

Tradicionalmente, la calibración de un modelo matemático se ha venido realizando en forma manual. Pero en las últimas décadas se han desarrollado, a nivel mundial, nuevos

métodos de calibración automática de modelos hidrológicos, heredados del campo de la optimización. En esencia, la calibración automática consiste en minimizar una expresión matemática, denominada función objetivo, que cuantifica el error de simulación.

Desde el advenimiento de las computadoras, los métodos de calibración automática han ido progresando. Consisten básicamente en algoritmos desarrollados para encontrar el valor óptimo de la función objetivo.

Ahora bien, el éxito de la calibración automática no sólo depende del algoritmo empleado, y de la función objetivo elegida, sino también de la performance del modelo hidrológico empleado, y de la calidad de los datos disponibles.

En este trabajo se llevó adelante una recopilación exhaustiva de datos hidrológicos de dos cuencas hidrográficas argentinas bien distintas geográfica y climáticamente. Estas cuencas son las correspondientes al río San Antonio, de la Provincia de Córdoba, y al río Gualeguaychú, de la Provincia de Entre Ríos.

Los datos recopilados de dichas cuencas, fueron ordenados, analizados y evaluados en su confiabilidad. Además de las características generales de las cuencas, se trabajó con las series de datos de precipitación, evapotranspiración potencial, y caudal observado. Posteriormente, sólo para la cuenca del río San Antonio se llevó a cabo algunas prácticas de optimización multi-objetivo, tomando como funciones objetivo los coeficientes de Nash-Sutcliffe, y de Persistencia, como medidas de cuantificación de la calidad del ajuste del modelo trabajando en simulación y pronóstico respectivamente.

A los fines de llevar adelante los trabajos descriptos precedentemente, el presente informe está organizado de la siguiente manera:

En el capítulo 2, se presentan los objetivos generales y particulares del trabajo.

En el capítulo 3, se lleva a cabo una revisión de antecedentes respecto de modelos hidrológicos en general, metodologías de optimización, con una breve introducción a los algoritmos genéticos, presentación de la evolución de los métodos de calibración automática más destacados, y las funciones objetivo de mayor uso en hidrología.

En el capítulo 4, se presenta una descripción del modelo hidrológico de transformación lluvia-caudal Génie Rural (Perrin et al, 2007) y el método de calibración global multi-objetivo, basado en algoritmos genéticos, MOCOM-UA (Yapo et al., 1998).

En el capítulo 5, se realiza en primer lugar una descripción general de las cuencas de los ríos San Antonio y Gualeguaychú, luego el ordenamiento, procesamiento y control de los datos hidrológicos de las cuencas referidas, a los fines de prepararlos para su empleo en modelación. Se alcanza en la cuenca del río San Antonio la calidad de los datos para su modelación, pero no en la cuenca del río Gualeguaychú, en la cual se deja planteado el trabajo para concluirse en siguientes instancias.

En el capítulo 6, se realiza un control estadístico de los datos, sometiendo los mismos a pruebas de estacionalidad y homogeneidad.

En el capítulo 7, se presenta la revisión y el análisis final de los datos.

En el capítulo 8, se realiza una calibración automática multi-objetivo sobre el río San Antonio, y se presentan los resultados obtenidos.

Finalmente, en el capítulo 9 se presentan las conclusiones del trabajo.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Obtener una serie de datos confiables de entrada al modelo hidrológico GR, para realizar la modelación sobre dos cuencas hidrográficas argentinas comparables.

2.2. OBJETIVOS PARTICULARES

- Recopilar información histórica de lluvia, temperatura y niveles de las cuencas de los ríos San Antonio y Gualeguaychú.
- Determinar valores promedios horarios de las variables analizadas.
- Determinar la curva H-Q de las cuencas analizadas en la sección de aforo.
- Estimar la serie de Caudales horarios para cada cuenca en la sección de aforo.
- Estimar la serie de Evapotranspiración potencial para cada cuenca.
- Analizar la confiabilidad de las series de datos obtenidas.
- Identificar los rangos confiables dentro de las series obtenidas.
- Realizar la calibración multi-objetivo del modelo Génie Rural.
- Evaluar la performance de la modelación a partir de las funciones objetivo.

3. REVISIÓN DE ANTECEDENTES

Durante esta práctica se llevó a cabo un importante proceso de adecuación de datos para luego efectuar la calibración automática de un modelo hidrológico empírico de transformación lluvia-caudal en una cuenca argentina. En consecuencia, como parte de la revisión del estado del arte, se aborda inicialmente una introducción a la teoría de modelos matemáticos.

El proceso de calibración automática de un modelo hidrológico es un problema de la optimización de modelos. Existe una gran variedad de métodos de optimización que se han ido desarrollando para distintos problemas a optimizar. La Investigación de Operaciones ha incursionado en el campo de la optimización para un gran número de casos particulares. Por esta razón, se presenta en esta tesis una introducción de los conceptos básicos que gobiernan el problema de la optimización de modelos.

Entre los métodos desarrollados para resolver problemas de optimización uno de los que mayormente se adapta a los problemas de optimización de modelos hidrológicos son los Algoritmos Genéticos (AG). Dado que se trabajó con un algoritmo de calibración automática basado en los AG, resulta necesario presentar una revisión general de los conceptos asociados a los AG.

En este capítulo se encuentran numerosos extractos de la tesis de maestría del Mg. Ing. Facundo José Alonso (2008).

3.1. MODELOS HIDROLÓGICOS

Un sistema es un conjunto de elementos que interactúan entre sí. Un modelo es una representación simplificada de un sistema real. Esta representación puede hacerse en forma física (modelo físico), o bien, a través de una expresión matemática (modelo matemático) de mayor o menor complejidad. De acuerdo a la Sociedad de Investigación de Operaciones de Gran Bretaña y de Estados Unidos (Zoraida Omaña, 2006), la esencia de la Investigación de Operaciones es el uso de modelos.

Independientemente del origen o estructura del modelo, se entiende que el mismo funciona correctamente si dado un conjunto de variables de entrada, genera la misma salida que el sistema al cual representa. El proceso por el cual un modelo imita al sistema se denomina simulación. Se dice que el modelo simula un proceso que ocurre en el

sistema. Un modelo captura características selectas de un sistema, proceso o realidad, y luego las combina en una representación abstracta del original.

El conjunto de cantidades fijas que caracteriza al sistema recibe el nombre de parámetros del sistema (Tucci, 2006). Los parámetros de un sistema, normalmente no pueden medirse, razón por la cual deben estimarse. Por el contrario, las variables del sistema en general son cantidades que pueden ser medidas, al menos en forma aproximada, y además, como su nombre lo indica, varían durante el proceso. Existen tres tipos de variables: las variables de entrada, las de salida y las de estado. Estas últimas, definen el estado del sistema (Bertoni, 2003).

A los fines de ejemplificar los conceptos anteriores, bastaría considerar la cuenca hidrográfica como el sistema en el cual ocurre el proceso de transformación lluvia a caudal. Este proceso, a su vez, involucra principalmente los procesos de retención, infiltración, evaporación, escurrimiento superficial y flujo en canales. El modo de ocurrencia de cada uno de estos procesos estará gobernado por ciertos parámetros de la cuenca, como son el coeficiente de rugosidad, la permeabilidad del suelo, la pendiente de la cuenca, etc.

En consecuencia, el hidrograma generado a la salida de la cuenca (salida del sistema), depende de las variables de entrada a la cuenca (entrada al sistema), que es la *precipitación*, y de los parámetros que caracterizan al sistema. Por esta razón, todo modelo debería involucrar en su estructura, al menos los parámetros más significativos numéricamente que caracterizan el sistema que representa. La lluvia puede ser medida y también el caudal escurrido, aunque sea en forma aproximada. Sin embargo, los parámetros no pueden medirse en forma directa. Normalmente se procede a estimar estos parámetros en función de ciertas características observables. El gran desafío en la modelación matemática de un sistema se basa en la estimación de los parámetros que lo caracterizan.

Estos parámetros estimados y las variables de entrada medidas, se agregan al modelo y se simula el proceso que ocurre en el sistema, obteniendo, como resultado, las variables de salida. Las variables simuladas de salida deberían coincidir con las medidas, al menos dentro del rango de aplicación del modelo. En general, no se logra tal coincidencia, por lo cual es necesario modificar sensiblemente los valores de los parámetros hasta lograr un resultado aceptablemente cercano al buscado. Esta técnica de ajustar los parámetros

del modelo recibe el nombre de calibración del modelo matemático (Bertoni, 2003). El éxito de un modelo hidrológico conceptual de transformación lluvia-caudal depende en gran medida de la bondad de su calibración (Duan et al., 1992).

El error cuantitativo de la simulación puede medirse pues con una función que dependa de la diferencia numérica entre el hidrograma simulado y el observado. A esta función se la denomina función objetivo (FO). De la mano de los objetivos, aparecen las restricciones, que consisten básicamente en las limitaciones asociadas a la aplicación misma del modelo, normalmente representado por un intervalo de validez de las diversas variables y parámetros que intervienen en el problema. Sin embargo, existen ciertas variables que no están sujetas a restricciones.

En síntesis, las FO son expresiones matemáticas que cuantifican el error de simulación de un modelo, como la diferencia entre los valores medidos y los simulados por el modelo. El proceso de calibración de un modelo consiste en estimar los valores de los parámetros que minimiza el valor de la función objetivo, dentro del límite definido por las restricciones. Debido al papel protagónico que desempeña la función objetivo en el proceso de calibración automática de modelos matemáticos, más adelante se presenta una sección dedicada a las funciones objetivo.

3.2. SISTEMAS, CONCEPTOS Y CLASIFICACIÓN

Se entiende por sistema a toda estructura, esquema o procedimiento real o abstracto que, en un tiempo de referencia dado interrelaciona una entrada, causa o estímulo de energía, materia o información con una salida, efecto, o respuesta de energía, materia o información (Bertoni, 2003).

Matemáticamente se puede representar un sistema como:

$$y(t) = \mu(t)\psi x(t) \tag{3-1}$$

Donde :

$y(t)$ es la función de salida

$\mu(t)$ es la función que representa el proceso

$x(t)$ es la función de entrada

y ψ vincula la función de entrada con la del proceso

Los distintos tipos de problemas derivados del análisis de sistemas se asocian principalmente a la incógnita planteada. Según este criterio, los problemas pueden clasificarse en (Bertoni, 2003):

- a- de predicción, en los cuales la incógnita es la salida $y(t)$
- b- de identificación, cuya incógnita es la función que representa el proceso $m(t)$.
- c- de detección, que tienen por incógnita la entrada $x(t)$.
- d- de síntesis, donde la incógnita es el sistema mismo.

El problema de síntesis es poco común y el más difícil de imaginar. En este tipo de problemas, se presenta el desafío de diseñar el sistema mismo, con el objetivo de que para una cierta entrada se obtenga una determinada salida, conociendo la función de los procesos que ocurren en el sistema. Por ejemplo, el proyectista de un sistema de drenaje urbano, que debe modelar una cuenca, con sus materiales, pendientes, etc., se enfrenta a un auténtico problema de síntesis.

Los sistemas pueden clasificarse como Lineales, cuando la salida de un proceso es lineal a la entrada, o No lineales, cuando no lo sea. Los lineales cumplen con las propiedades de proporcionalidad y superposición.

Pueden ser Concentrados o Distribuidos, de acuerdo a que las variables que intervienen en el proceso que ocurre en el sistema, no varíen en el espacio, o sí lo hagan, respectivamente.

También pueden clasificarse entre Continuos y Discretos. Siendo los primeros aquellos sistemas cuyos procesos incluyen variables de variación continua, y los segundos, cuyos procesos incluyen variables de variación discreta.

Finalmente, se habla de los sistemas Causales y No causales. Siendo los causales aquellos sistemas en los cuales el efecto ocurre en un tiempo posterior o en el mismo tiempo que la causa que le dio origen. No causales son aquellos en los cuales lo hacen en un tiempo anterior.

3.3. EL SISTEMA HIDROLÓGICO

De los innumerables sistemas que ofrece la naturaleza, en particular nos interesa el denominado: ciclo hidrológico (Figura 3.1.), considerado el concepto fundamental de la hidrología. De acuerdo con la clasificación mencionada anteriormente, se puede decir que el Ciclo Hidrológico, constituye un sistema de tipo no lineal, distribuido, continuo y casual. Como se verá posteriormente, las limitaciones inherentes al hombre obligan a representar el alto grado de complejidad que propone la naturaleza mediante un modelo lineal, concentrado y discreto.

Como todo ciclo, no tiene principio ni fin, y su descripción puede comenzar en cualquier punto, se elige arbitrariamente un punto de comienzo para su explicación.

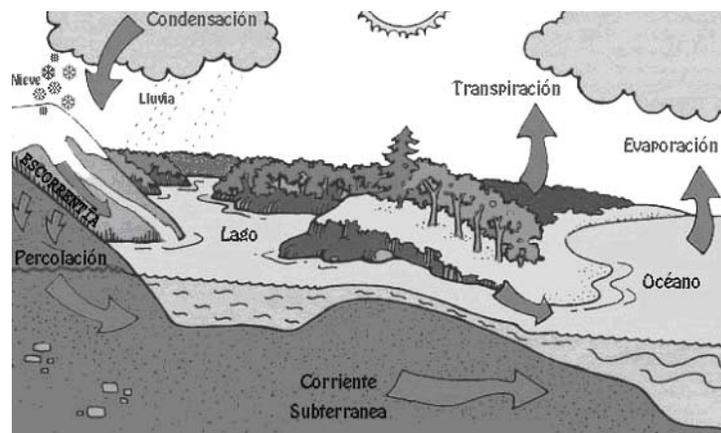


Figura 3.1. El ciclo hidrológico (CONICYT, 2007)

El agua que se encuentra sobre la superficie terrestre o muy cerca de ella se evapora bajo el efecto de la radiación solar y el viento. El vapor de agua, que así se forma, se eleva y se transporta por la atmósfera en forma de nubes hasta que se condensa y cae hacia la tierra en forma de precipitación. Durante su trayecto hacia la superficie de la tierra, el agua precipitada puede volver a evaporarse o ser interceptada por las plantas o las construcciones, luego fluye por la superficie hasta las corrientes o se infiltra. El agua interceptada, más una parte de la infiltrada y de la que corre por la superficie se evapora nuevamente. De la precipitación que llega a las corrientes, una parte se infiltra y otra llega hasta los océanos y otros grandes cuerpos de agua, como embalses y lagos. Del agua infiltrada, una fracción es absorbida por las plantas y posteriormente es transpirada, casi en su totalidad, hacia la atmósfera, y otra fluye bajo la superficie de la tierra hacia las corrientes, el mar u otros cuerpos de agua, o bien hacia zonas profundas del suelo (percolación) para ser almacenada como agua subterránea y después aflorar

en manantiales, ríos o el mar. Una parte de esta agua es nuevamente evaporada, y así comienza nuevamente el ciclo hidrológico.

3.4. EL PROCESO DE TRANSFORMACIÓN LLUVIA-CAUDAL

El ciclo hidrológico descrito anteriormente, se desarrolla a nivel global, alimentado por una innumerable cantidad de subprocesos que ocurren en forma simultánea en todo el planeta. En la ingeniería hidrológica, rara vez interesa un estudio global del ciclo hidrológico. En cambio tiene mucha aplicación el estudio hidrológico de cuencas, dentro de las cuales ocurre el proceso de transformación lluvia-caudal. En otras palabras, la ingeniería hidrológica, prefiere estudiar el proceso por el cual el agua de lluvia que cae sobre la cuenca, se mueve sobre y dentro de ella, generando hidrogramas de flujo subterráneo y superficial, cuyos volúmenes y picos totales interesa conocer.

El escurrimiento se define como el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca. El agua proveniente de la precipitación que llega hasta la superficie terrestre, una vez que una parte ha sido interceptada y evaporada, sigue diversos caminos hasta llegar a la salida de la cuenca. Conviene dividir estos caminos en tres clases: escurrimiento superficial, escurrimiento subsuperficial y escurrimiento subterráneo. La Figura 3.2. ilustra el proceso.

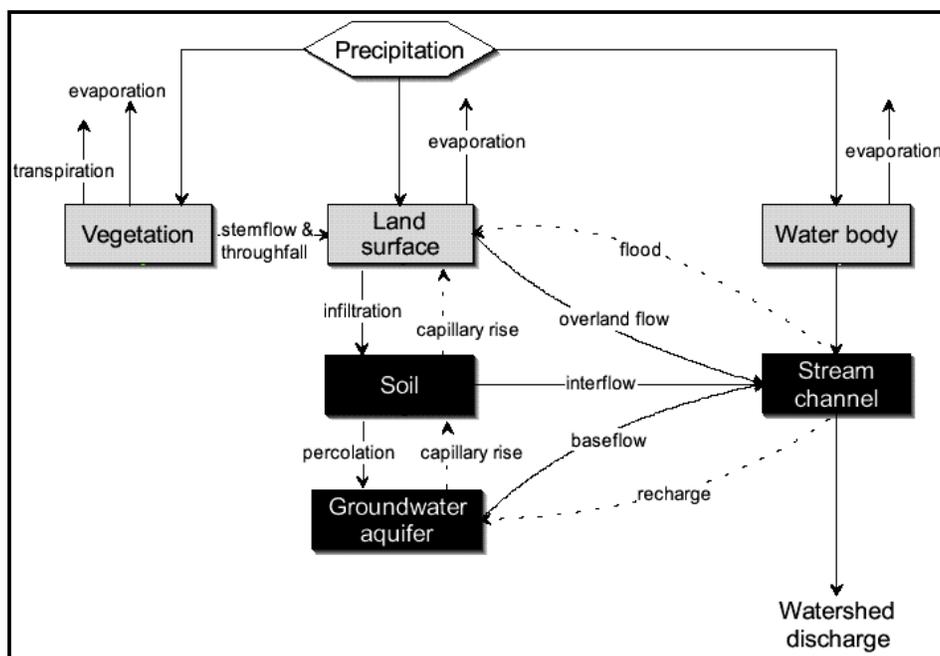


Figura 3.2.: Modelo hidrológico de transformación lluvia-caudal (HEC-HMS, 2000)

Una vez que la precipitación alcanza la superficie del suelo, se infiltra hasta que las capas superiores del mismo se saturan. Posteriormente, se comienzan a llenar las depresiones del terreno y, al mismo tiempo, el agua comienza a escurrir sobre su superficie. Este escurrimiento, llamado flujo en la superficie del terreno, se produce mientras el agua no llegue a cauces bien definidos (se entiende por cauces definidos a aquellos que no desaparecen entre dos tormentas sucesivas). En su trayectoria hacia la corriente más próxima, el agua que fluye sobre el terreno se sigue infiltrando, e incluso se evapora en pequeñas cantidades. Una vez que llega a un cauce bien definido se convierte en escurrimiento en corrientes.

El flujo sobre el terreno, junto con el escurrimiento en corrientes, forma el escurrimiento superficial. Una parte del agua de precipitación que se infiltra escurre cerca de la superficie del suelo y más o menos paralelamente a él. A esta parte del escurrimiento se le llama escurrimiento subsuperficial; la otra parte, que se infiltra hasta niveles inferiores al freático, se denomina escurrimiento subterráneo.

De los tres tipos de escurrimiento, el superficial es el que llega más rápido hasta la salida de la cuenca. Por ello está relacionado directamente con una tormenta particular y entonces se dice que proviene de la precipitación en exceso o efectiva y que constituye el escurrimiento directo. El escurrimiento subterráneo es el que de manera más lenta llega hasta la salida de la cuenca (puede tardar años en llegar), y, en general, difícilmente se le puede relacionar con una tormenta particular, a menos que la cuenca sea demasiado pequeña y su suelo muy permeable. Debido a que se produce bajo el nivel freático, es el único que alimenta a las corrientes cuando no hay lluvias y por eso se dice que forma el escurrimiento base.

El escurrimiento subsuperficial puede ser casi tan rápido como el superficial o casi tan lento como el subterráneo, dependiendo de la permeabilidad de los estratos superiores del suelo; por ello es difícil distinguirlo de los otros dos. Cuando es relativamente rápido se le trata junto con el escurrimiento superficial, y cuando es relativamente lento se le considera parte del subterráneo.

La clasificación anterior, aunque ilustrativa, no deja de ser arbitraria. El agua puede comenzar su viaje hacia la corriente como flujo superficial e infiltrarse en el camino, terminando como escurrimiento subsuperficial o subterráneo. A la inversa, el

escurrimiento subsuperficial puede emerger a la superficie si en su camino se encuentra con un estrato muy permeable que aflora en una ladera (vertiente). Lo importante en realidad es la rapidez con que una cuenca responde a una tormenta, pues esto es lo que determina la magnitud de las correspondientes avenidas.

3.5. MODELOS, CONCEPTOS Y CLASIFICACIÓN

Un modelo es una representación simplificada de un sistema real. Existen básicamente tres tipos de modelos, según su naturaleza. El *modelo físico*, que es una maqueta a escala que se construye a los fines de representar físicamente el fenómeno o proceso. El *modelo analógico*, es la representación de un sistema físico (prototipo), por un sistema físico análogo, de modo que su comportamiento simule de forma aproximada (o exacta) el del prototipo. Un ejemplo de modelos analógico típico de la hidrología, es la simulación del flujo de agua en un cauce (o a través de un medio poroso), mediante el flujo de una corriente eléctrica en un circuito compuesto por resistencias y condensadores. Finalmente, el *modelo matemático*, consiste en un sistema de ecuaciones o formulaciones matemáticas que representan el sistema en estudio. Estos últimos, se han convertido en una poderosa herramienta de trabajo, fundamentalmente desde el vertiginoso desarrollo computacional que se comenzó a verificar en las últimas décadas.

Algunas de las ventajas principales asociadas al uso de modelos matemáticos son:

- 1) Permite estudiar y experimentar en las complejas relaciones e interacciones que existen y ocurren en el interior de un sistema real.
- 2) Permite experimentar sobre un sistema que puede no existir en la realidad (de otra manera sería imposible) y en este caso asiste a la decisión de construirlo o no.
- 3) Se ahorra tiempo y dinero, y se evitan riesgos.
- 4) Se logra independencia de la duración real del evento. Por ejemplo se puede simular procesos muy largos como muy cortos. Por ejemplo, se simula en pocos minutos una crecida ocurrida sobre una cuenca, que en la realidad podría tardar días en manifestarse.
- 5) Se puede estudiar cómo reacciona el sistema al introducir variantes, sin correr riesgos (estudio de sensibilidad).

6) Se puede aplicar para verificar soluciones analíticas (por ejemplo, mediante la metodología denominada de Montecarlo). Ofrece mayor facilidad para estudiar sistemas dinámicos y no determinísticos.

Con respecto a este tema, cabe aclarar que el análisis cuantitativo que resulta de la aplicación de un modelo matemático, no reemplaza, sino que complementa al cualitativo, producto del sentido común y la experiencia del modelador. Los modelos cuantitativos auxilian, pero no sustituyen a los encargados de tomar decisiones.

Un modelo matemático representa a un sistema de modo simplificado. En dicha simplificación que se hace de la realidad, se conservan algunas características propias del sistema, y evidentemente, otras, se pierden. Estas características pueden ser, por ejemplo, la linealidad, su propiedad de ser concentrado o distribuido, etc. En base a esto, podría pensarse para los modelos, una clasificación semejante a la que se realizó con los sistemas.

Sin embargo, no necesariamente un sistema de ciertas características es representado con un modelo de las mismas características. En efecto, por definición un modelo matemático es más simple que el sistema real al cual representa. La función que cumple el modelo, es convertirse en una herramienta que represente al sistema real pero del modo más simple posible. Esta simplificación, que facilita la modelación, se realiza a expensas de sacrificar algunas propiedades del sistema. Así, por ejemplo, un sistema no lineal puede representarse mediante un modelo lineal. Tal es el típico caso del hidrograma unitario. El sistema genera una transformación lluvia-caudal no lineal, sin embargo el modelo del hidrograma unitario si lo es. Otro de los muchos ejemplos que podrían citarse es el modelo de las ecuaciones de Saint Venant, que representa el flujo a superficie libre en una formulación matemática unidimensional, aunque el flujo a superficie libre, naturalmente, es tridimensional. Por último, resulta ilustrativo citar el caso de la lluvia. En el sistema real, la lluvia cae en forma continua, sin embargo, en un modelo, la lluvia es incorporada como una variable de entrada que se computa en forma discreta, ya que la misma se mide a intervalos de tiempo mediante los pluviógrafos.

De acuerdo a la función que cumple el modelo, y a la filosofía que subyace el desarrollo del mismo, el grupo EURYDICE 92 (Chocat, 1997), los clasifica del siguiente modo:

- a. Según el propósito del modelo:

Modelos Cognitivos

Modelos Previsionales

Modelos de toma de decisión

Modelos normativos

b. Según la concepción planteada en su formulación:

Modelos axiomático o heurístico

Modelos determinístico o estadístico (o estocástico)

Modelos reduccionista u holístico

Modelos empírico o conceptuales

Modelos global o distribuido

Los *Modelos Cognitivos*, tienen por objeto dar una explicación del funcionamiento o estado del sistema. Dentro de los modelos cognitivos, pueden diferenciarse dos grupos, que son los modelos *explicativos* y los *descriptivos*, de acuerdo a que permitan o no, respectivamente, comprender la influencia de las variables de entrada sobre las de salida. Por ejemplo, en la representación de las pérdidas por infiltración, el modelo de Richard, es mucho más explicativo que el modelo de Green y Ampt o que el de Horton. Pero, a su vez, estos últimos son más explicativos que el modelo del "índice Phi". Es importante destacar que el mayor número de los modelos empleados en hidrología son de tipo Cognitivo.

Los *Modelos Provisionales*, tienen por objeto prever y simular el estado de funcionamiento de un sistema. Los *Modelos de Toma de Decisión*, se emplean para determinar las variables de entrada (o de concepción) a proveer al modelo para obtener las variables de salida conocidas y previamente impuestas. Los *Modelos Normativos*, tienen por objeto establecer las normas que relacionan la entrada y la salida. Formulan las relaciones que deben existir para que, con cierta entrada, se obtenga una salida también conocida. Se diferencian de los sistemas cognitivos en que estos modelos no analizan el proceso.

Los *modelos axiomáticos* son aquellos que se desarrollan partiendo rigurosamente de los principios y reglas que dominan el sistema, basados en hipótesis sobre el mismo. Los

modelos heurísticos plantean principios que reflejan parcialmente el comportamiento del sistema que luego articulan en forma aproximada para obtener el modelo.

Un *modelo determinístico* es aquel que produce siempre una misma salida para una cierta entrada. Es decir que no presentan aleatoriedad sus variables (Chow, 1994). Un *modelo estadístico*, es aquel en el cual las salidas son aleatorias. Cuando en un modelo la probabilidad de ocurrencia de sus variables es tenida en cuenta, o bien, el concepto de probabilidad es introducido en el modelo mismo, se dice que el modelo es de naturaleza estadística (Clarke, 1973). Cuando el proceso evoluciona en el espacio y en el tiempo de un modo que es parcialmente predecible y parcialmente aleatorio se denomina *estocástico* (Chow, 1994), entonces el modelo que lo representa manifiesta una estructura parcialmente determinística y parcialmente aleatoria y se denomina también estocástico.

La mayoría de los procesos hidrológicos son de tipo estocásticos, y dan nacimiento a una rama importante de la hidrología denominada Hidrología Estocástica. Cuando una variable de salida de un modelo hidrológico tiene un grado de aleatoriedad, un problema de rutina para la hidrología estocástica es identificar en qué grado influye su componente aleatorio y en qué grado su determinístico (Chow, 1994). Si la influencia del componente probabilístico no es significativa, es apropiado un modelo de tipo determinístico; pero si tiene importancia significativa, será necesario un modelo de tipo estocástico, pues de lo contrario, la salida real será muy distinta a la salida única que arrojaría el modelo determinístico.

Es importante destacar que, un modelo de tipo determinístico, puede tener variables de entrada o salida de tipo aleatorias, y que un modelo estocástico, puede tener variables determinísticas. Un ejemplo de esto, es un modelo determinístico que arroja para cada valor de entrada P (lluvia), su correspondiente valor de salida Q (caudal). Aun cuando P y Q son variables aleatorias, el modelo de transformación lluvia-caudal es determinístico.

El *enfoque Reduccionista* (también llamado microscópico, mecanicista o de caja blanca), incluye aquellos modelos que se desarrollan a partir de descomponer previamente el sistema real en muchos micro procesos, y luego se formula el modelo teniéndolos a todos en cuenta. En esencia se trata de un proceso de diferenciación e integración. Por ejemplo, las ecuaciones de Saint Venant. Mientras que el *enfoque Holístico* (o

macroscópico, o de caja gris, o conceptual), consideran el sistema en su conjunto, y se desarrolla el modelo basado en el comportamiento global del mismo. Por ejemplo, el modelo de Muskingum.

Los *modelos Empíricos* (o de caja negra) se basan en la experimentación. Pueden no guardar relación alguna con los fenómenos físicos y conceptuales del proceso analizado. El único criterio de formulación consiste en reducir las diferencias entre las variables observadas y las calculadas. Los *modelos conceptuales* (o de enfoque teórico), en cambio, se apoyan sobre el concepto de abstracción y el de razonamiento. En este caso el modelo es construido a priori, sobre un análisis teórico, y la experimentación posterior contribuye a validar el modelo.

Los *modelos concentrados* (o globales, o puntuales, o de orden cero), no consideran la variación espacial de los parámetros y las variables. Por ejemplo el método de la Curva Número de infiltración del SCS. Los *modelos distribuidos* (o de malla, o matriciales, o de discretización espacial) consideran la heterogeneidad del cuadro físico modelado. Pero siempre es necesario realizar alguna discretización sobre el dominio para poder analizar la variación dentro del campo de estudio. Esta discretización acota su concepción de distribuidos.

3.6. EL MODELO LLUVIA-CAUDAL

Tal como ha sido indicado anteriormente, el proceso de transformación lluvia caudal, es sumamente complejo y requiere de una abstracción a través de un modelo que simplifique suficientemente el sistema como para poder simular conceptualmente sus partes.

Dentro del proceso de transformación lluvia-caudal pueden identificarse dos procesos claramente independientes desde el punto de vista conceptual, como son el proceso de producción y el de transferencia. El primero, está asociado al mecanismo por el cual sólo una parte de la precipitación llega en forma rápida a la salida de la cuenca, ya que el resto queda retenido, se evapora o se infiltra y llega a la salida de la cuenca, pero ya como flujo subterráneo. El segundo, está relacionado con el recorrido que el agua realiza desde los distintos puntos de la cuenca hasta la salida de la misma.

En síntesis, el componente de producción en un modelo de transformación lluvia-caudal se encarga de estimar el porcentaje del volumen total caído sobre la cuenca como

precipitación que se convierte en caudal a la salida de la misma. Por su parte, el componente de transferencia se ocupa de establecer la forma en la cual llega repartido en el tiempo ese volumen a la salida de la cuenca, obteniendo así, el hidrograma de escurrimiento directo en la sección de salida de la cuenca.

En cuencas intermedias y grandes, para realizar el análisis del proceso de transformación lluvia caudal, normalmente, se subdividen en subcuencas. Entonces, se determina el hidrograma de salida de cada subcuenca y luego, se transita la creciente hasta la salida de la cuenca. Este proceso se denomina tránsito de creciente. Esto es, el proceso por el cual el caudal de agua a la salida de la subcuenca viaja hacia aguas abajo del río, alterándose el hidrograma de una sección del mismo, a la sección siguiente. Para este tipo de casos se implementan los modelos de tránsito de crecientes. Los mismos tienen por objetivo calcular el hidrograma en una sección del río, conociendo el hidrograma en otra sección, aguas arriba del mismo.

Hasta la actualidad, se ha desarrollado un gran número de modelos aplicados a estos procesos, barriendo un campo que abarca desde modelos simples de producción o transferencias a modelos más complejos que comprenden ambos procesos, más el de tránsito de crecidas. En esta práctica se utilizó el modelo Génie Rural (GR) de Charles Perrin et al, 2007.

3.7. OPTIMIZACIÓN – CONCEPTOS GENERALES

La *optimización* de modelos matemáticos, tradicionalmente ha sido tomada como una de las etapas de un proceso más amplio, que se ha dado en llamar la Investigación de Operaciones, la cual se refiere a la conducción y coordinación de operaciones (o actividades) dentro de una organización. Actualmente, el campo de la optimización ha crecido tanto que puede tratarse como un campo de investigación en sí mismo, que cumple la función de desarrollar herramientas que sean útiles en un proceso más complejo, que le otorga utilidad real.

El proceso involucrado en la Investigación de Operaciones comienza por la observación cuidadosa y la formulación del problema incluyendo la recolección de los datos pertinentes. El siguiente paso es la construcción de un modelo científico (por lo general matemático) que intenta abstraer la esencia del problema real. En este punto se propone la hipótesis de que el modelo es una representación lo suficientemente precisa

de las características esenciales de la situación como para que las conclusiones (soluciones) obtenidas sean válidas también para el problema real. Después, se llevan a cabo los experimentos adecuados para probar esta hipótesis, modificarla si es necesario y eventualmente verificarla. Con frecuencia este paso se conoce como validación del modelo. A continuación se analizan alternativas de decisión, y se procura seleccionar la solución óptima al problema planteado a partir de un criterio de jerarquía previamente establecido. Finalmente, se realiza la toma de decisión e implementación de las medidas adoptadas, en función de los resultados de la modelación.

Resumidamente casi todos los autores (Castillo et al., 2002; Zoraida Omaña, 2006) parecen coincidir con estas etapas, cuyo orden no es necesariamente el mencionado arriba, sino que las etapas se van desarrollando en paralelo y retroalimentándose unas con otras. Conviene remarcar que una de las características principales de la investigación de operaciones es la de intentar encontrar una mejor solución (llamada solución óptima) para el problema bajo consideración. Se dice una mejor solución, y no la mejor solución, porque pueden existir muchas soluciones que empaten como la mejor.

3.7.1. MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN

Las metodologías de optimización nacen de la mano de la Investigación de Operaciones, por lo cual tienen un origen común como ciencia aplicada. La mayoría de los textos introductorios a la Investigación de Operaciones describen un desarrollo histórico parecido de esta ciencia. Información más detallada se puede encontrar en literatura especializada (Alonso, 2008).

A los fines de este informe interesa señalar los avances que se han logrado desde la década de los sesenta, en cuanto a los conocidos como métodos heurísticos. Estos se aplican a aquellos problemas de optimización que no pueden ser abordados por métodos exactos, ya sea, por su alto grado combinatorio o por la dificultad de generar un modelo basado en programación matemática que represente exactamente una situación real. En los primeros tiempos se generaron métodos orientados específicamente a la resolución de cada problema, pero a partir de la década del 80, se han generado una familia de métodos conocidos como meta-heurísticos que ahora tienen la capacidad de ser aplicables a problemas de diversa naturaleza. Es decir, una

misma plantilla algorítmica puede ser utilizada para resolver problemas que provienen de diversos sectores.

Los métodos meta-heurísticos más conocidos son: Búsqueda Tabú, Simulated Annealing, Algoritmos Genéticos, Redes Neuronales, Métodos basados en Trayectoria de Hormiga y Métodos basados en Inteligencia Artificial. En este informe, sólo se profundiza el método de los Algoritmos Genéticos (AG). Una explicación detallada de cualquiera de estos métodos, pueden encontrarse en la literatura especializada (Palahí y Pukkala, 2004; Kuri y Galaviz, 2002, Viveros et al., 1998; USACH, 2007, entre otros).

El formato general del problema de optimización abordable mediante métodos heurísticos es el siguiente: La función $f(x)$, es una función matemática que se desea minimizar y las soluciones posibles deben pertenecer a un espacio W , los métodos de búsqueda heurística recorren el espacio W tratando de identificar la solución que genera el mejor valor para $f(x)$, el menor en la caso de minimización o el mayor en el caso de maximización.

3.7.2. GENERACIÓN DE NÚMEROS ALEATORIOS

Los métodos heurísticos constituyen la propuesta de los nuevos paradigmas computacionales de optimización, entre los cuales se encuentran los métodos de los algoritmos genéticos. La mayoría de estos métodos tienen entre sus rutinas la generación de números aleatorios con distintas distribuciones probabilísticas (Goldberg, 1989, Duan et al., 1992, Yapo et al., 1998, Vrugt et al., 2003, Viveros, et al. 1998). Se presentarán en este informe solamente los métodos clásicos de generación de números aleatorios con distribución uniforme. Para generar números con distintas distribuciones probabilísticas, se recurre al método de Montecarlo, desarrollado principalmente por Stan Ulam y John Von Neumann, por el año 1944, cuya presentación formal puede encontrarse, entre otros, en Eckhardt (1987) y Herring y Palmore (1989).

La generación de variables aleatorias tiene un rol preponderante en el proceso de simulación. Para generar variables aleatorias es necesario contar con un generador de números aleatorios. Para que un número sea considerado aleatorio, debe tener las siguientes características (UROU, 2006): 1) Distribución Uniforme. Lo que significa que cualquier número que pertenezca al rango de interés debe tener la misma chance de resultar sorteado. 2) No exista Correlación Serial. Lo que significa que la aparición de un

número no afecta de ninguna manera la chance de aparecer de otro número o de sí mismo. Existen pruebas para comprobar que un generador cumpla estas dos condiciones.

La forma más perfecta de generación de números aleatorios es a través de algún modelo físico, como por ejemplo la ruleta, que es el modelo por excelencia. También pueden conseguirse números aleatorios a través de tablas que han sido construidas con modelos físicos (en 1955 la compañía RAND publicó una tabla con un millón de números aleatorios). Matemáticamente, se puede mencionar dos formas diferentes de generar números aleatorios:

1) *Métodos de generación aleatoria*. En base a algún circuito o característica de la máquina se generan números que son totalmente aleatorios. El método básicamente consiste en interrumpir un proceso uniforme en forma aleatoria (que es esencialmente lo que ocurre cuando la bola cae en un casillero de la ruleta).

2) *Números pseudoaleatorios*. Se generan a través de una fórmula e imitan los valores de una variable aleatoria. Se llaman pseudoaleatorios porque se obtienen realizando un conjunto de operaciones sobre el número generado antes (recurrencia) por lo que no son realmente aleatorios según lo expuesto previamente. A pesar de esto muchos de los métodos de generación de números pseudoaleatorios se comportan correctamente y pasan todos los tests como si fueran una variable aleatoria. Presenta la gran ventaja de ser un método muy veloz y barato y la mayor desventaja es que son de período finito. En 1950, Von Neumann propuso el conocido *Método de Centros de Cuadrados*. El mismo, se basa en tomar un número, elevarlo al cuadrado y tomar los dígitos del centro como nuevo número, luego repetir el procedimiento. Por ejemplo, el número de 4 dígitos: 2061, elevado al cuadrado resulta en 4247721, del cual los cuatro números centrales son: 2477, que elevado al cuadrado resulta en 6135529, y así sucesivamente. La desventaja es que la secuencia generada por lo general es corta. El ejemplo anterior luego de 34 números degenera a 0; y si en lugar de empezar con 2061 se inicia con 2500, se repite 2500 en la primer iteración (y por lo tanto, en todas las restantes). Aún así si se toman números muy largo se puede llegar a secuencias de 100.000 números diferentes.

En 1951, Lehmer propuso el *Método Congruencial Lineal*, que se ha convertido en el generador pseudo-aleatorio estándar (Herring y Palmore, 1989), ya que es el método utilizado por excelencia, y se basa en la siguiente recurrencia (Eckhardt, 1987):

$$Z_i = (A * Z_{i-1} + C) \bmod M \quad (3-2)$$

Donde: Z_i es el i -ésimo número de la secuencia. A , C y M son parámetros que pueden ser ajustados por conveniencia y para asegurar la naturaleza pseudo-aleatoria de la secuencia. Por ejemplo, el módulo M , es normalmente tomado como la longitud de la palabra de la computadora, y el multiplicador A , se elige para producir tanto un periodo largo de la secuencia pseudo-aleatoria, como para asegurar buenas propiedades estadísticas. La expresión $y \equiv z \pmod{m}$, significa que existe un entero k tal que $mk = y - z$. La ecuación 3-2, puede ser llevada sencillamente a la forma:

$$Z_i = A * Z_{i-1} + C - [(A * Z_{i-1} + C) / M] * M \quad (3-3)$$

Donde la notación: $[x]$ significa el mayor entero menor o igual a x , y se puede demostrar por inducción completa (UROU, 2006) que:

$$Z_n = [Z_0 * A^n + (A^n - 1) / (A - 1) * C] \bmod M \quad (3-4)$$

Si se quieren obtener número Uniformes $(0,1)$ se normaliza el resultado dividiendo por el módulo: $U_i = Z_i / M$.

A continuación se presentan dos ejemplos:

a) Para los valores: $A = 3$, $C = 0$, $M = 5$ y $Z_0 = 4$; se obtiene la serie: 2,1,3,4,2,1,...

b) Para los valores: $A = 3$, $C = 0$, $M = 9$ y $Z_0 = 4$; se obtiene la serie: 3,0,0,...

Se desprende de estos ejemplos que, en este método, si se repite un número ya se repite toda la secuencia. Presenta la ventaja de consumir poca memoria y ser tener gran velocidad de cálculo. Además, es muy fácil volver a generar la misma secuencia guardando un solo número, ya que alcanza con partir de la misma semilla Z_0 .

Es muy importante la elección de las constantes A , C , M y la semilla Z_0 ya sea para la velocidad de generación como sobre todo para el largo de la secuencia. En la práctica para aumentar la velocidad de cálculo se suele tomar $M = a^b$ donde a es el número base de operación de la máquina, por lo que en máquinas binarias $a = 2$, esto permite calcular

muy fácilmente el resto y efectuar la normalización a $U(0,1)$ operando con desplazamientos y no con divisiones y multiplicaciones.

Con respecto al largo del período de la secuencia siempre será menor o igual a M y es deseable obtener el largo máximo (o sea M) aunque no siempre es posible. Cuando se obtiene largo máximo se dice que el método es de Período Completo.

Se distinguen dos casos según el valor de C .

Si $C = 0$, se llama Método Congruencial Multiplicativo Puro.

Si $C \neq 0$, se llama Método Congruencial Multiplicativo Mixto.

3.8. ALGORITMOS GENÉTICOS

Los algoritmos genéticos (AG) fueron desarrollados por John Holland, sus colegas, y sus estudiantes en la Universidad de Michigan. Los principales logros de sus investigaciones fueron: (1) lograr una explicación abstracta y rigurosa de los procesos de adaptación de los sistemas naturales, y (2) diseñar sistemas artificiales que retengan los mecanismos importantes de los sistemas naturales. El foco principal de investigación de los AG ha sido la robustez, y el balance entre la eficiencia y la eficacia necesaria para sobrevivir en diferentes ambientes.

Según establece Goldberg (1989), los *algoritmos genéticos son algoritmos de búsqueda basados en los mecanismos de selección natural y genética natural*. Estos combinan, continúa Goldberg (1989), la supervivencia del más apto entre estructuras de cadenas (que representan distintos individuos) con alguna otra estructura de información cambiante de manera aleatoria, para formar un algoritmo de búsqueda con ciertos instintos de búsqueda innovadores respecto de la búsqueda humana.

En cada generación, se crea un nuevo juego de individuos artificiales (cadenas) que emplean algunos elementos y piezas que eligen de entre los más aptos de los antiguos individuos, probando ocasionalmente alguna pieza nueva que pudiera resultar buena. Aunque es una técnica aleatoria, aclara Goldberg (1989), los AG no son un simple camino aleatorio, sino que exploran eficientemente toda la información histórica para especular en el siguiente punto de búsqueda con una performance mejorada.

3.8.1. CONCEPTOS BÁSICO DE BIOLOGÍA

A continuación se abordan algunos conceptos básicos de la genética que son estrictamente necesarios para situar al lector en el contexto preciso en el cual se gestan los algoritmos genéticos. El texto presentado posee limitaciones, ya que de ninguna manera se pretende en esta breve sección describir completamente el complejísimo y riquísimo misterio de la vida y consecución de las especies vivientes.

El cuerpo humano está formado por tejidos, los cuales se componen de millones de células. Cada célula del cuerpo humano contiene toda la información genética de esa persona. Hay dos tipos de células básicamente: las somáticas, que son células diploides, denominadas así porque poseen la dotación completa del número de cromosomas de la especie; y los gametos o células sexuales, que son células haploides, porque poseen la mitad de la dotación. En el caso del ser humano, las células diploides poseen 23 pares de cromosomas, mientras que las haploides sólo 23 cromosomas. Un cromosoma no es otra cosa que una larga molécula de ADN en su máximo estado de empaquetamiento (o compresión). El ADN es una molécula muy compleja de la cual -a los fines de esta tesis- sólo interesa destacar que allí está codificada la información genética de la persona. Cada cromosoma posee innumerables características de la persona; entre los 23 cromosomas incluyen la totalidad de las características de la persona (Alberts et al., 2002).

En las células diploides, cada par de cromosomas, está formado por uno heredado de la madre y otro heredado del padre. En cada par de cromosomas, la información de ambos es respecto de la misma característica, sin embargo, esta información puede ser diferente entre sí. Por ejemplo, si en un par de cromosomas está almacenado el color de ojos de la persona (entre otras características), entonces uno de los cromosomas puede indicar color azul (por ej. el de la madre), y el otro negro (el del padre). De la confrontación entre la información que tiene cada cromosoma respecto de cada característica, surgen las características dominantes y las recesivas. Siguiendo con el ejemplo, si se confronta el color de ojos azules que aporta la madre, con el negro del padre, triunfará el negro por orden de jerarquía. Es importante aclarar que el hecho de que el padre haya aportado negro no significa que tenga ojos negros, ni la madre azules.

La molécula de ADN (Ácido Desoxirribonucleico) está formada por cuatro distintos compuestos más simples llamados bases o nucleótidos: adenina (A), guanina (G), citosina (C) y timina (T). Cada subcadena de tres nucleótidos codifica un aminoácido diferente. A las subcadenas de tres nucleótidos se les llama codones. Al unirse varios codones, forman una proteína. Al conjunto de nucleótidos que codifican una proteína completa se les llama genes. El valor que posee un gen determinado se denomina alelo (Alberts et al., 2002). Por ejemplo, un gen puede tener el valor “azul” para la característica “color de ojos”.

Cuando en un par de cromosomas de una célula diploide, ambos tienen el mismo alelo se dice que son homocigos, si no, son heterocigos, y en este último caso sólo uno de los alelos se manifestará en el fenotipo. El alelo que se manifiesta se denomina dominante, y su homólogo que no se manifiesta, se llama recesivo. El conjunto de todos los cromosomas, es decir, toda la información genética de un individuo se llama genoma y el conjunto de genes contenidos en el genoma, genotipo. Es éste el que determina, en buena medida, el fenotipo del individuo.

En síntesis, el fenotipo de cada individuo está determinado por las proteínas que produce, y esto a su vez está definido en la información genética de cada una de sus células.

La reproducción comienza con el encuentro entre el óvulo y el espermatozoide. Ambos son células de tipo haploides, por lo tanto poseen solamente 23 cromosomas cada una de ellas. Al unirse en la fecundación, se fusionan el núcleo del espermatozoide con el núcleo del óvulo. De este modo, se obtiene una nueva célula denominada huevo o cigota, de tipo diploide, ya que posee los 23 cromosomas de la madre y los 23 del padre. Esa célula es la primera expresión de vida y se denomina embrión. En ese momento se ha producido la fecundación. La célula comenzará a efectuar el proceso de mitosis, que es el fenómeno por el cual a partir de una célula madre, se originan dos células hijas con la misma información genética. Resumidamente, la mitosis comienza con la duplicación de la información genética de cada cromosoma, y luego se parte en dos células que se llevan, cada una de ellas, uno de cada cromosoma duplicado, logrando así dos células exactamente iguales a la célula que le dio origen. Luego, se producirá nuevamente la mitosis en cada una de las dos células recientemente formadas, con lo cual se tendrán cuatro células iguales. En cada una de las cuatro, también ocurrirá la mitosis para

volverse ocho, y luego dieciséis, y así sucesivamente. De una célula original, se habrán logrado millones de copias exactamente iguales a ella.

Este proceso de sucesivas mitosis continuará hasta que se alcance la etapa de mórula. Hasta la mórula, el embrión tiene la totalidad de las células exactamente iguales entre sí. A partir de aquí comienza la etapa de diferenciación, en la cual se comienzan a manifestar diferentes genes en cada célula.

Cuando comienza esta etapa, algunas de estas células dan origen a las gametas. Es decir, siendo diploides aún, darán origen a la formación de células haploides, a través de un proceso denominado Meiosis. La Meiosis es el proceso de división celular mediante el cual se originan, a partir de una célula madre, cuatro células hijas con la mitad del número cromosómico que la célula madre que les dio origen.

Ese tipo de células (diploides), se denomina espermatogonia (cuando se producen en el hombre) y ovogonia (mujer). Las espermatogonias (diploides) generarán los espermatozoides (haploides), y las otras, los óvulos (o más precisamente los ovocitos secundarios, ya que el término óvulo debe aplicarse cuando el ovocito ha sido fecundado). Las etapas de la Meiosis (Kuri y Galaviz, 2002) se grafican en la Figura 3.3., y son:

1 – Se observa una célula diploide que dará origen a dos haploides a través del proceso de Meiosis. Esta célula tiene los 23 cromosomas del padre, y los 23 de la madre. En este esquema sólo se representa lo que ocurre en cada par de cromosomas. Así por ejemplo se puede suponer que la línea color negro representa uno de los 23 cromosomas que aporta el padre, y la verde uno de los 23 cromosomas que aporta la madre. En cada par de cromosomas se producirá lo que se describe aquí para uno sólo. Esta célula recibe el nombre de espermatogonia (u ovogonia) y dará origen a dos gametas.

2 – Se produjo la duplicación del material genético en cada cromosoma.

3 – Comienza el proceso de CrossingOver, en el cual hay un entrecruzamiento entre uno de los cromosomas duplicados de la madre en contacto con uno de los cromosomas duplicados del padre de cada par. Se denomina quiasma a los puntos de contacto entre los cromosomas.

4 – Ya están entrecruzados. De este modo quedará cada par de cromosomas formado por dos pares de cromátidas hermanas. Una dada por un cromosoma puro del padre y

otro del padre con componentes de la madre, y la otra dada por un cromosoma puro de la madre, y otro de la madre con componentes del padre.

5 – Comienza a producirse una polarización dentro de la célula que atrae a los cromosomas del padre a un polo, y a los de la madre, al otro.

6 – La célula se divide en dos células nuevas, cada una de las cuales posee 23 cromosomas duplicados, dando finalización a la llamada Meiosis 1.

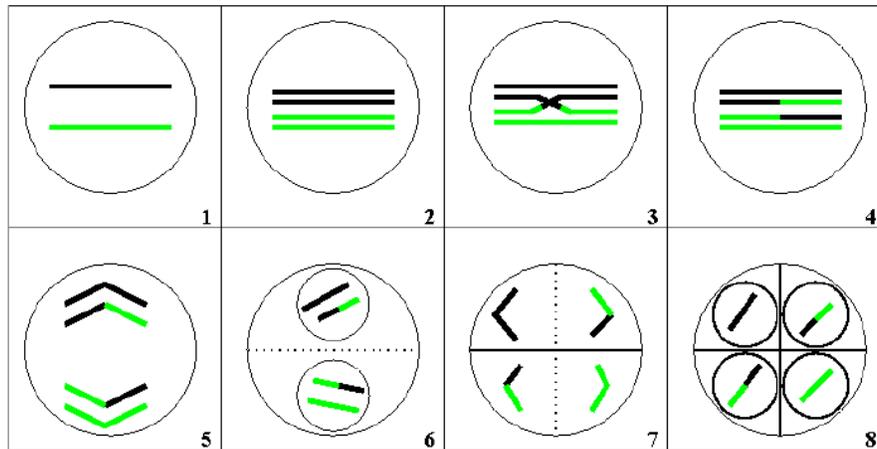


Figura 3.3.: Etapas de la meiosis (Kuri y Galaviz, 2002)

7 – Se separan las cromátidas hermanas, dando origen cada célula recientemente formada, a dos nuevas células, con la mitad del número de cromosomas. Por lo que resultan cuatro células.

8 – Se han formado las cuatro células hijas.

Es preciso remarcar que entre el paso uno y el dos, se ha producido una réplica de los cromosomas existentes. Para ello existe una enzima encargada de copiarlos, denominada ADN polimerasa. La molécula de ADN tiene forma de una doble hélice, como una escalera de caracol. La enzima abre por en medio los “escalones” de esta hélice y ensambla en cada mitad los nucleótidos que debe ensamblar (Figura 3.4.).

Ocasionalmente esta enzima comete un error, que puede ser causado por radiaciones energéticas externas o sustancias extrañas. La alteración de la molécula de ADN original constituye una mutación que puede manifestarse en el fenotipo y hacer al individuo diferente del resto de sus congéneres. Es muy poco probable que cambiar al azar un trozo de información que la naturaleza ha refinado cuidadosamente a lo largo de millones de años resulte en algo bueno. Por lo general las mutaciones son desfavorables, incluso letales, para el organismo mutante. Pero ocasionalmente pueden no serlo y

conferirle a dicho organismo alguna ventaja que le permita sobrevivir más fácilmente en su medio. Esta característica será transmitida a sus descendientes y un pequeño paso evolutivo se habrá dado (Kuri y Galaviz, 2002).

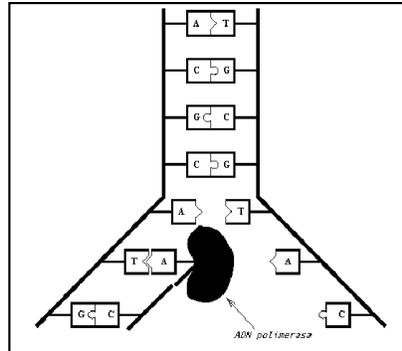


Figura 3.4.: Esquema de trabajo de la enzima ADN polimerasa (Kuti y Galaviz, 2002)

3.8.2. LA TÉCNICA DE LOS ALGORITMOS GENÉTICOS

Los algoritmos genéticos son algoritmos computacionales inspirados en los procesos de evolución natural. Por eso, cuando se realiza la descripción de los mecanismos de optimización basados en algoritmos genéticos, se introducen muchos términos que han sido tomados de la biología genética. A continuación, se presentan los mecanismos más destacados de los algoritmos genéticos, que tienen base en la biología, conforme fueron descritos por Kuri et al. (2002), y por Gomez Rocha et al. (2006).

Codificación del dominio

Como se ha expresado anteriormente, las características de cada individuo dependen de las proteínas. Las proteínas son codificadas por los genes, que constituyen una combinación de nucleótidos. Existe una innumerable cantidad de combinaciones posibles entre los millones de nucleótidos que forman cada molécula de ADN, cada una de las cuales sería capaz de codificar una proteína distinta. En otras palabras, las características de cada individuo responden a un código genético. A lo largo de miles y millones de generaciones, ese código genético ha ido optimizando las especies para su perfecta adaptación al medio. Se puede decir que todos los posibles códigos genéticos, son posibles soluciones a la formación de un nuevo individuo. Este conjunto de todas las posibles soluciones constituye el dominio dentro del cual el código puede tomar valores.

Del mismo modo, en un algoritmo genético lo primero que se requiere es determinar en qué espacio se encuentran las posibles soluciones al problema que se pretende resolver. Es decir, es necesario codificar de alguna manera el dominio del problema para obtener estructuras manejables que puedan ser manipuladas por el AG. Cada una de estas estructuras constituye el equivalente al genotipo de un individuo en términos biológicos. El individuo del dominio del problema al que se mapea este genotipo es el análogo al fenotipo. Es frecuente que el código de los elementos del dominio del problema utilice un alfabeto binario (ceros y unos).

Una vez que se ha definido la manera de codificar los individuos del dominio del problema y se conoce la forma de pasar de un individuo a su código y viceversa, es necesario fijar un punto de partida. Los algoritmos genéticos manipulan conjuntos de códigos en generaciones sucesivas. Nuevamente haciendo una analogía manipulan poblaciones de códigos. En éstas un código puede aparecer más de una vez. El algoritmo se encargará de favorecer la aparición en la población de códigos que correspondan a elementos del dominio que estén próximos a resolver el problema. En resumen, el algoritmo recibirá como entrada una población de códigos y a partir de ésta generará nuevas poblaciones, donde algunos códigos desaparecerán mientras que otros, que representan mejores soluciones posibles, aparecen con más frecuencia hasta que se encuentra una satisfactoria o hasta que se cumple alguna otra condición de terminación.

Adaptación

En una población, hay algunos individuos más hábiles para sobrevivir en el medio que otros. Estos individuos tienen mejor adaptación al medio (fitness) respecto del resto de los individuos. De la misma manera, en los AG existen códigos que resultan en individuos mejor adaptados para resolver el problema que se pretende optimizar. En general, este calificativo de adaptación se mide a través de un real no negativo. El objetivo de este número es que permita distinguir propuestas de solución buenas de aquéllas que no lo son. Si el problema a resolver consiste en minimizar una función, entonces tanto mejor calificado estará el individuo cuanto menor sea dicho valor.

Evidentemente, al hablar de que a cada individuo de la población se le asigna una y sólo una calificación, se está hablando de una función que se denomina función de adaptación, cuya evaluación puede no ser sencilla y es, de hecho, lo que en la mayoría

de los casos consume más tiempo en la ejecución de un algoritmo genético. Hay que tener en cuenta que se evalúa una vez en cada individuo de cada generación. Si un AG es ejecutado con una población de tamaño 100 durante 100 generaciones, la función es evaluada 10.000 veces. Además, puede darse el caso de que la función de evaluación no tenga una regla de correspondencia explícita, esto es, una expresión algebraica, y puede ocurrir incluso que la función cambie de generación en generación.

Selección

Una vez calificados todos los individuos de una generación, el algoritmo debe, al igual que lo hacen la naturaleza y el hombre, seleccionar a los individuos más calificados, mejor adaptados al medio, para que tengan mayor oportunidad de reproducción. De esta forma se incrementa la probabilidad de tener individuos “buenos” (con alta calificación) en el futuro.

En principio podría parecer que es conveniente tener una estrategia de selección estricta para que mejore rápidamente la población y converja el algoritmo, es decir, que la población se acumule alrededor de un genotipo óptimo. Esto no es cierto. Lo que ocurrirá es que la población se acumulará rápidamente alrededor de algún individuo que sea bueno, comparativamente con el resto de los individuos considerados a lo largo de la ejecución del algoritmo, pero este individuo puede no ser el mejor posible. A esto se le suele llamar convergencia prematura. Se habrá obtenido un óptimo local. Por esta razón, los algoritmos genéticos están diseñados para fomentar la supervivencia de los individuos aptos, pero no elimina la posibilidad de supervivencia y procreación por parte de los malos. Esta característica permite que se incursione una nueva región del dominio que podría converger hacia un óptimo mejor que los anteriores. En la naturaleza ocurre igual. Los individuos menos favorecidos tienen menor probabilidad de sobrevivir y procrear, pero nada impide que ocurra cada tanto e impongan sus genes, en principio, desfavorables. En los algoritmos genéticos debe buscarse en todo momento la variabilidad de individuos. Mientras que se tiende al óptimo debe permitirse que sobrevivan varios malos o poco aptos.

Cruzamiento

Durante la meiosis ocurre el proceso de producción de gametos. El código genético de los padres de un individuo se mezcla para producir gametos cuyo contenido genético es híbrido, es decir, una mezcla. De esta manera es posible que un individuo herede a sus descendientes las características mezcladas de sus propios padres, por ejemplo: el color de ojos del padre y el de cabello de la madre. La cruce de los códigos genéticos de individuos exitosos favorece la aparición de nuevos individuos que hereden de sus ancestros características deseables.

En el contexto de los algoritmos genéticos reproducirse significa que, dados dos individuos seleccionados en función de su grado de adaptación, éstos pasen a formar parte de la siguiente generación o, al menos, mezclen sus códigos genéticos para generar hijos que posean un código híbrido. Es decir, los códigos genéticos de los individuos se cruzan. Existen muchos mecanismos de cruzamiento.

Mutación

Algunas veces, muy pocas de hecho, la ADN-polimerasa (la enzima encargada de replicar el código genético), se equivoca y produce una mutación, una alteración accidental en el código genético de los seres vivos. Ocasionalmente algunos elementos del código de ciertos individuos de un algoritmo genético se alteran a propósito. Éstos se seleccionan aleatoriamente en lo que constituye el símil de una mutación. El objetivo es generar nuevos individuos, que exploren regiones del dominio del problema que probablemente no se han visitado aún. Esta exploración no presupone conocimiento alguno, no es sesgada.

Aleatoriamente se buscan nuevas soluciones posibles que quizá superen las encontradas hasta el momento. Esta es una de las características que hacen aplicables los algoritmos genéticos a gran variedad de problemas: no presuponer conocimiento previo acerca del problema a resolver ni de su dominio, no sólo en la mutación sino en el proceso total. De hecho, el problema a resolver sólo determina la función de evaluación y la manera de codificar las soluciones posibles (la semántica de los códigos genéticos de los individuos). El resto de los subprocesos que constituyen el algoritmo son independientes y universalmente aplicables.

3.9. TÉCNICAS DE CALIBRACIÓN

Una de las etapas fundamentales para la aplicación de un modelo matemático de tipo lluvia-caudal a una cuenca dada es la calibración de sus parámetros tomando como información de ajuste los datos de caudales observados. Esta calibración es realizada modificando los valores de los parámetros hasta que el hidrograma calculado reproduzca al hidrograma observado con buena precisión. Sin embargo, un ajuste cuantitativo del modelo, dado por una minimización aceptable de la FO, no basta para considerar buena la simulación, sino que es necesario agregar la contribución del método cualitativo. Este último consiste básicamente en una evaluación visual de los resultados, que se presentan usualmente en gráficos. En esta evaluación visual del ajuste, se presta especial atención a la parte del hidrograma que presenta mayor interés para el propósito del modelo, como puede ser el pico o la curva de recesión del hidrograma, o por ejemplo, el volumen total escurrido.

Sumado al ajuste cualitativo-cuantitativo, resulta necesaria una interpretación de los valores obtenidos para los parámetros por parte de un hidrólogo experimentado. Esto se debe a que no existe un conjunto único de parámetros capaz de representar todos los procesos hidrológicos involucrados en la cuenca, debido a las incertidumbres inherentes de los datos, a las simplificaciones introducidas en el desarrollo de los modelos y a la limitada representatividad de los parámetros involucrados (Collischonn et al., 2001). Existen varias soluciones posibles que, de forma adecuada darán la respuesta deseada (Beven y Binley, 1992), dentro del concepto de equifinalidad. Es decir, existen varios juegos de parámetros que satisfacen las ecuaciones planteadas, debido a que el número de incógnitas supera al de las ecuaciones. Sin embargo, solo algunos de esos juegos de parámetros tendrán un sentido físico lógico en el problema. A la inversa, será posible establecer varios juegos de parámetros con sentido físico lógico en el problema, pero que sólo algunos satisfacen las ecuaciones planteadas. A la vista de los resultados, la experiencia del modelador debe dar la última palabra respecto del juego de parámetros que mejor representa las condiciones modeladas.

3.9.1. CLASIFICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE CALIBRACIÓN

Las técnicas de calibración empleadas en modelos hidrológicos se pueden clasificar de acuerdo a los siguientes criterios (Bertoni, 2003):

- desde el punto de vista operativo: técnicas de calibración automática y manual.
- desde el punto de vista de la cantidad de objetivos que se propone optimizar: técnicas de calibración que utilizan funciones mono y multi-objetivo.
- desde el punto de vista del enfoque sobre el dominio analizado: técnicas de calibración local y global.

Calibración automática y calibración manual

Básicamente existen dos formas de calibrar un modelo matemático hidrológico desde el punto de vista operativo: (a) ajuste manual mediante prueba y error y (b) ajuste o calibración automática. La primera es la manera más clásica, que ha sido empleada por los hidrólogos desde los comienzos de la aplicación de las técnicas de calibración. Esta consiste básicamente en la aplicación del conocido método de prueba y error. Cuando el modelo utilizado tiene un gran número de parámetros y el usuario tiene poca experiencia en el proceso de calibración, este proceso puede volverse demasiado lento y tedioso. Además de ello, esta técnica no brinda al usuario un criterio objetivo de parada (Sorooshian y Gupta, 1995), sino que, por lo general, usuarios diferentes generalmente encuentran un conjunto diferente de parámetros con el mismo modelo, en la misma cuenca y en el mismo periodo de tiempo (Beven y Binley, 1992).

La calibración automática consiste en el empleo de las computadoras digitales para llevar a cabo el proceso de ajuste de los parámetros. Surgió como una alternativa para acotar el grado de error de la calibración manual ejecutada por los usuarios sin experiencia, para acelerar el proceso de calibración y para restarle subjetividad (Sorooshian y Gupta, 1995). De modo que se convierte en una herramienta que intenta determinar el conjunto óptimo de los valores de los parámetros de un modelo hidrológico con la mínima interferencia del usuario. La experiencia del usuario es sustituida, en gran parte, por una función objetivo sometida a una técnica iterativa de ajuste. El objetivo de la calibración automática es, por lo tanto, minimizar (o maximizar)

el valor de una función objetivo que mide la calidad del ajuste de los hidrogramas. Sin embargo, enfatizan Sorooshian y Gupta (1995), el estado del arte de los métodos de calibración automática no han madurado al punto de sustituir enteramente a la calibración manual.

Calibración con funciones mono y multi-objetivo

Como se explicó previamente, generalmente la FO representa la diferencia entre los valores medidos y los calculados por el modelo. Pero también se aclaró que esa diferencia debía venir dada por la característica del hidrograma que se pretenda ajustar con mayor precisión, en virtud del propósito para el cual será empleado el modelo una vez que se haya calibrado. Así por ejemplo, si el modelo hidrológico ha sido pensado para predecir caudales máximos de diseño, la FO debería marcar la diferencia entre los picos de los hidrogramas medidos y simulados. Si el propósito del modelo hidrológico estuviese asociado al balance hídrico, convendría asegurar un correcto ajuste de volúmenes escurridos, por lo que la FO debería representar la diferencia entre el volumen escurrido medido y el simulado.

Ahora bien, cuando se desean ajustar varias características del hidrograma de salida, como caudal pico, volumen escurrido, curva de recesión, etc., es necesario proponer la minimización simultánea de varias funciones objetivos, cada una de las cuales representa la diferencia entre la variable medida y la simulada de cada una de las características del hidrograma de salida. Este tipo de ajuste se denomina multi-objetivo. En una calibración automática multi-objetivo el propósito es optimizar, al mismo tiempo, varias funciones que evalúan varios aspectos de calidad de ajuste entre hidrogramas calculados y observados.

En numerosos procesos hidrológicos resulta insuficiente el ajuste de mono-objetivo. Por ejemplo, en la simulación continua se requiere de una característica multi-objetivo para el uso del modelo hidrológico, que permita representar correctamente los periodos lluviosos y de estiaje y no simplemente de uno de ellos en detrimento de los otros. La optimización multi-objetivo es un nuevo estado del uso de estas técnicas en el ajuste de los modelos hidrológicos.

Dadas las imperfecciones de los modelos y de los datos de entrada, es prácticamente imposible encontrar un conjunto de parámetros que produzca, al mismo tiempo, valores

óptimos de varias funciones objetivo diferentes. Casi siempre, la optimización adecuada de una función objetivo se logra a expensas de la inadecuada optimización de otra. Esta es la situación que normalmente se enfrenta en la calibración de modelos lluvia-caudal, cuando un conjunto de parámetros resulta en un buen ajuste de los picos de caudal, pero como consecuencia presenta resultados mediocres durante los periodos de estiaje (o viceversa).

La principal característica de un problema de calibración multi-objetivo, es que la solución, en general, no será única (Collischonn et al., 2003). Es decir, un conjunto A de valores de los parámetros, podrá corresponder al óptimo de la función F1, y un conjunto B (distinto de A), corresponderá al óptimo de la función F2. Existirán muchos conjuntos de parámetros entre A y B que no optimizan F1 ni F2, pero pueden ser considerados aceptables. Por ejemplo, si C y D son dos conjuntos de valores de parámetros entre A y B, serían considerados aceptables si, partiendo de la solución C hacia la solución D, un cambio en mejoría para una función objetivo será acompañada de un deterioro en la otra, y no existirá ninguna solución E que sea al mismo tiempo mejor que C y D en ambas funciones objetivo F1 y F2. La Figura 3.5. ilustra este concepto para el supuesto caso de un modelo de un parámetro. Como puede verse, no existe un valor de ese parámetro que minimice simultáneamente ambas FO, sino que cuando el parámetro toma el valor de 6 minimiza FO1, pero cuando toma el valor de 10, minimiza FO2. Entre 6 y 10 existe un rango de valores para el parámetro tal que, a medida que se acerca a 6, mejora FO1, pero empeora FO2, y viceversa. Si se toman dos valores en el rango entre 6 y 10, como por ejemplo, 7 y 9 puede verse claramente que no existe un valor entre ellos que sea mejor que ambos en ambas FO. Entonces 7 y 9 son considerados aceptables. Del mismo modo, todos los valores entre 6 y 10 también lo son.

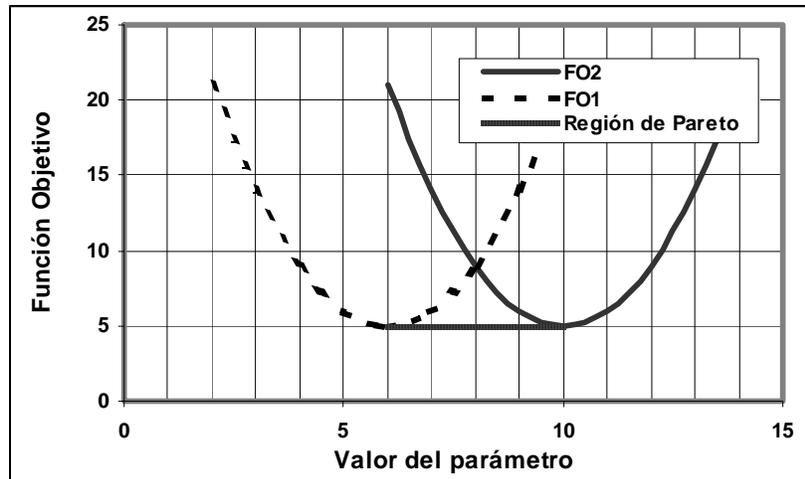


Figura 3.5.: Esquema de la Región de Pareto para dos funciones objetivo

Si no hubiere ninguna información adicional que permita dar mayor importancia a una de las dos funciones objetivo (Collischonn y Tucci, 2003), todas las soluciones intermedias deben ser consideradas buenas. Debido a estas características, la solución de un problema de optimización multi-objetivo no es un punto, sino que se trata de una región de soluciones posibles, todas ellas aceptables, denominada región de Pareto, o región de soluciones no inferiores o no dominadas (Yapo et al., 1998).

Este último enfoque responde al concepto actual en la calibración de modelos matemáticos que se orienta a buscar un conjunto de soluciones posibles y aceptables, en vez de una solución óptima. Esto se debe a que existe una gran incerteza asociada a la estimación de los parámetros del modelo. Las técnicas recientes en calibración de modelos matemáticos prefieren asignar un conjunto de soluciones posibles con una cierta probabilidad de éxito en la calibración. De este moderno concepto proviene la importancia del análisis de incertidumbre en las técnicas de calibración.

Métodos de Calibración local y global

Dado que las técnicas de calibración automática son casos particulares de los métodos de Optimización, estas técnicas también pueden clasificarse entre local y global, de acuerdo al tipo de búsqueda que haga. El gráfico de la Figura 3.6. muestra el caso hipotético de un modelo con un solo parámetro. Como puede verse, la FO tiene varios mínimos locales. Se denomina mínimo global, al mínimo valor de los mínimos locales. En el ejemplo, los puntos A, B y C son mínimos locales, ya que en la vecindad de dichos puntos los demás son superiores a ellos, pero sólo el punto B es mínimo global, ya que

es el menor de los mínimos locales, dentro del dominio de validez del único parámetro del modelo. Este concepto es fácilmente extrapolado a modelos de varios parámetros, como son la mayoría de los modelos matemáticos utilizados en hidrología.

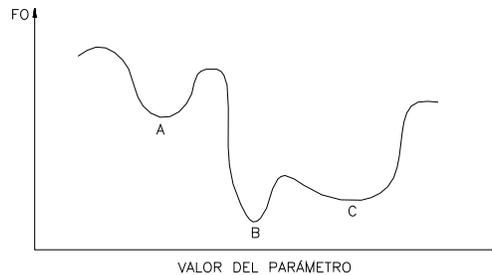


Figura 3.6.: Proyección plana de la superficie de respuesta de una FO

Las primeras técnicas desarrolladas que se encuentran en la bibliografía estaban basadas en algoritmos de búsqueda local. Debido a la complejidad de los modelos hidrológicos, las funciones objetivos, son expresiones implícitas. En otras palabras, no es posible despejar los valores de los parámetros asociados al mínimo valor de la FO, sino que resulta necesario tender a éste mínimo mediante aproximaciones sucesivas basadas en iteraciones direccionadas de prueba y error.

Estos métodos iterativos de búsqueda local poseen cuatro características básicas (Tucci, 2005), que son:

- definición del punto de partida,
- dirección de la búsqueda,
- espaciamiento de cada prueba,
- y criterio de parada.

La bibliografía es pródiga en metodologías de optimización local (Beveridge y Schechter, 1979), sin embargo sólo algunos de estos métodos, fueron preferidos para calibración de modelos hidrológicos.

Una de las primeras propuestas metodológicas de calibración local, que posteriormente fueron empleadas en calibración de modelos hidrológicos (Beard, 1966), surge de la mano de dos economistas (Friedman y Savage, 1947) con el método Univariacional. Para ejemplificar este método resulta ilustrativo suponer un modelo con dos parámetros y luego extrapolar la idea a n parámetros.

Supóngase que se tienen dos parámetros X_1 y X_2 . La superficie de respuesta de la FO se desarrolla en tres dimensiones, dos de las cuales son los valores de ambos parámetros

del modelo, siendo la tercera, el valor de la FO para cada par de valores $FO=f(X1, X2)$. El método se inicia en un punto de partida elegido por el usuario, y luego se elige una dirección de búsqueda, por ejemplo, la dirección de X1. Se realiza un paso DX1, en algún sentido del eje X1. Si en la nueva ubicación se obtiene un valor de FO menor que la anterior, realiza un nuevo paso en este sentido, de lo contrario, prueba con un DX1 en sentido contrario. Si en esta nueva ubicación la FO es inferior continúa en este sentido. Una vez que se ha verificado que para la dirección X1, en cualquier sentido se obtiene un valor superior al actual, entonces se comienza la búsqueda a lo largo de X2, para lo cual se elige un sentido de búsqueda y se da un paso DX2. Nuevamente se procura reducir el valor de FO, de lo contrario se invierte el sentido.

En cualquier caso, se continúa el sentido de búsqueda siempre que la FO siga reduciéndose con cada nuevo paso, y se invierte en caso de que aumente. Cuando en ambos sentidos FO verifica un aumento, se toma la siguiente dirección. Así se continúa hasta que se agoten todas las direcciones, posterior a lo cual se dice que se ha cumplido un ciclo, y se comienza con la primera dirección nuevamente. En este ejemplo hemos supuesto dos direcciones, pero si se tratara de un modelo de n parámetros, tendríamos un espacio hiperdimensional con n ejes ortogonales entre sí. Si bien no puede graficarse este espacio, la idea del método es exactamente igual. Así se continúa, hasta que la FO no perciba reducciones en ningún sentido de las n direcciones, o bien, las reducciones sean aceptablemente despreciables para el caso en estudio.

El método Univariacional tiene una estructura muy convincente pero poco eficiente, ya que no tiene ninguna dirección preferencial de búsqueda. Simplemente prueba en cada una de las direcciones correspondientes al sistema de coordenadas de referencia de la superficie de respuesta. Rosenbrock (1960) propuso el método de Rotación de Coordenadas, que comienza del mismo modo que el método Univariacional, hasta el final del primer ciclo. Posteriormente, traza una recta imaginaria entre el primer punto y el último del primer ciclo, y la establece como dirección preferencial de búsqueda para el parámetro X1, ajustando las restantes direcciones a esta rotación. Las pruebas son realizadas del mismo modo en cada ciclo, provocando una rotación de los ejes de coordenadas al cabo de cada uno. Otra diferencia con respecto al método Univariacional es la incorporación de un par de coeficientes de aceleración (A valor mayor que 1) y retardo (B valores entre 0 y 1). Estos coeficientes de aceleración y retraso se multiplican

por el valor del espaciamiento del paso de avance, de acuerdo a la secuencia de éxitos (reducción de la FO) o fracasos (aumento de la FO) que experimente el avance en cierta dirección.

Ibbitt (1970) modificó el procedimiento de búsqueda en cada dirección del método de rotación de coordenadas. El criterio adoptado incluye una aproximación cuadrática para estimar la tendencia de minimización de la superficie de respuesta. Una explicación más detallada puede encontrarse en Tucci (2005).

El método Simplex (Nelder y Mead, 1965) dio un paso considerablemente superior en la eficiencia de búsqueda, ya que este incursiona libremente en cualquier dirección del espacio hiperdimensional de validez de los parámetros. En otras palabras, no se limita a las direcciones de los ejes de coordenadas de los parámetros, sino que elige la dirección en la cual parece más probable que se minimice la FO. Además de eso, no parte de un punto, sino de un conjunto de puntos, lo que permite un direccionamiento más preciso y eficiente en la búsqueda. Este algoritmo se explica en detalle en el capítulo referido a la Metodología.

Todos estos métodos de optimización local, dependen fuertemente del punto de partida o conjunto de puntos elegidos inicialmente (Johnston y Pilgrim, 1976), y por lo tanto caen comúnmente en punto óptimos locales. Diferentes puntos de partida, podrían conducir a diferentes óptimos locales, lo que genera diferentes juegos de valores de los parámetros del modelo, aun cuando se utilice la misma serie de datos en la misma cuenca, para todos los diferentes puntos de partida. Esto se debe a que las superficies de respuesta de las funciones objetivos no siempre son suaves y continuas, sino que presentan discontinuidades, y varios óptimos locales (Duan et al., 1992). Un complemento a estos métodos de búsqueda local podría estar dado por una iniciación múltiple del método, en diferentes puntos de partida, y la selección del mínimo de los mínimos locales encontrados.

Sorooshian y Gupta (1995) probaron la eficiencia del algoritmo Simplex, mediante una implementación de múltiples partidas, denominado MSX. En esta prueba quedó demostrado que ni siquiera este algoritmo de búsqueda local con múltiples partidas, fue capaz de encontrar eficazmente el óptimo global de una superficie de respuesta. Inicializando 50 veces para cada optimización, el algoritmo MSX no fue capaz de

encontrar el óptimo global de los parámetros del modelo Sacramento (Burnash, 1995) en ninguna de las diez pruebas realizadas.

Dadas las limitaciones de las metodologías de búsqueda local, surgen las técnicas de optimización global. En sus versiones primitivas, estos métodos consistían esencialmente en la aplicación sucesiva de la técnica de búsqueda local. Surgen los Métodos de Búsqueda Aleatoria (RandomSearch, RS). Entre otros, se comienza a desarrollar la técnica de Búsqueda Aleatoria Uniforme (URS) que consiste en asignar una distribución probabilística uniforme para cada variable a calibrar. Como ejemplo, se puede suponer dos variables dadas X_1 y X_2 a calibrar en el modelo. Las mismas se van arrojando aleatoriamente según una distribución probabilística uniforme para cada variable y luego con cada par X_1 , X_2 se evalúa la función objetivo. A continuación se comienzan a aplicar las técnicas de optimización local en cada punto X_1 , X_2 . Una vez obtenido un óptimo para cada par X_1 , X_2 se elige el óptimo entre éstos, que corresponde al óptimo global. Brazil (1988) propone la Técnica de búsqueda aleatoria adaptativa, que asigna una distribución de probabilidades a cada variable. Por lo demás, es igual al método anteriormente descrito. Kuczera (1997), aporta el Método de búsqueda local con múltiples partidas (o método combinado – Múltiples start local search, MSLS), que utiliza métodos aleatorios para fijar los puntos de comienzo de búsqueda.

Dando principio a una nueva generación de métodos de optimización, Holland (1975), formaliza los principios de la técnica de los Algoritmos Genéticos (GeneticAlgorithm, GA) que han sido tratados en sección aparte.

3.10. CALIBRACIÓN AUTOMÁTICA DE MODELOS P-Q.

Un procedimiento típico de estimación automática de los parámetros de un modelo hidrológico comprende los siguientes cuatro elementos principales (Sorooshian y Gupta, 1995):

1. Función objetivo, también llamada criterio de calibración.
2. Algoritmo de optimización.
3. Criterio de parada.
4. Datos de calibración.

3.10.1. LA FUNCIÓN OBJETIVO

Todos los autores concuerdan con la destacada importancia de las funciones objetivos en el proceso de calibración automática de los modelos hidrológicos. Sorooshian y Gupta (1995) apuntan una sintética definición estableciéndola como “una ecuación usada para computar una medida numérica de la diferencia entre la salida simulada por el modelo (típicamente el hidrograma de escurrimiento) y el hidrograma observado (medido)”. Agregan estos autores que el propósito de la calibración del modelo es, por consiguiente: “encontrar esos valores de los parámetros del modelo que optimizan (minimizan o maximizan, como sea apropiado) el valor numérico de la función objetivo”. Debido a que la FO es la expresión matemática que evalúa la calidad de la calibración, debe ser elegida con cuidado, de modo que represente fielmente el error de la calibración con una estructura matemática lo más sencilla posible.

El proceso de calibración del modelo matemático puede estar sometido a restricciones o no. En el primer caso, el valor de los parámetros debe moverse en un intervalo previamente establecido por las restricciones, por lo que la FO puede tomar valores en una región definida por los rangos de validez de los parámetros del modelo. En el segundo caso, los parámetros del modelo pueden tomar cualquier valor en el proceso de calibración. Tanto la FO, como sus restricciones son funciones matemáticas que podrán tener forma lineal o no lineal (cuadrática, logarítmica, etc.). Las restricciones vienen expresadas, normalmente, como desigualdades. Las FO deben tener una estructura matemática sencilla, para poder identificar con claridad el sentido físico del número que nos arroja.

Existen diversos tipos de FO, de acuerdo a su finalidad. Sin embargo la FO mayormente empleada en la teoría de optimización (Sorooshian y Gupta, 1995), y por lo tanto en calibración automática, ha sido diferentes formas de la Función de Mínimos Cuadrados Ponderada, presentada en la ecuación 3-5.

$$FO = \sum_{i=1}^n w_i (QO_i - QC_i)^2 \quad (3-5)$$

Que puede simplificarse a la denominada Función Cuadrática, como la denomina Tucci (2005), simplemente igualando los pesos de todos los intervalos, como se muestra en la ecuación 3-6.

$$FO = \sum_{i=1}^n (QO_i - QC_i)^2 \quad (3-6)$$

Donde:

QO_i: valor de caudal observado en el intervalo i.

QC_i: valor de caudal calculado en el intervalo i.

w_i: peso relativo de la diferencia cuadrática en el intervalo i.

n: número de intervalos de los hidrogramas comparados.

Según Tucci (2005), esta función asigna mayor peso a los caudales mayores. En el ajuste de un periodo continuo de caudales la tendencia del ajuste será el de ajustar mejor las crecidas. Esto se debe a que, para una diferencia de caudales iguales, el porcentaje de error es mayor cuando los caudales son más pequeños. Por ejemplo, si se estima 18 m³/s, para un caudal observado de estiaje de 20 m³/s, y 198 m³/s, para un caudal de crecida de 200 m³/s, en ambos casos se estará cometiendo un error de 2 m³/s, sin embargo, en estiaje representa el 10% del caudal observado, mientras que en crecida, sólo el 1%. Estas diferencias todavía se marcan más, cuando consideramos que se elevan al cuadrado. Entonces, si nuestro método de ajuste asegura un error del 5%, por ejemplo, para el ajuste de los hidrogramas, en los picos es insignificante, pero en estiaje se puede estar cometiendo un error importante.

La FO de mínimos cuadrados tiene gran aplicación por su sencilla formulación y fácil interpretación. Sin embargo, recuerdan Sorooshian y Gupta (1995) que la elección de alguna forma de la Función de Mínimos Cuadrados está típicamente basada en un criterio subjetivo, de acuerdo al cual se asumen dos hipótesis referidas a la distribución probabilística de los errores, que se desprenden de la teoría de Máxima Verosimilitud:

La probabilidad conjunta de los errores sobre la serie de datos disponibles, es Gaussiana con media cero.

Los errores son independientes unos de otros.

Adicionalmente, Clarke (1973) enfatizó que, dado que los datos hidrológicos pueden frecuentemente violar esas hipótesis, los efectos de asumirlas pueden resultar bastante

serios. En consecuencia, Sorooshian y Dracup (1980) desarrollaron funciones objetivo basadas en la Máxima Verosimilitud, para contabilizar apropiadamente tanto la auto correlación (carencia de independencia), como la heteroscedasticidad (varianza cambiante) de las series de datos de caudales. En muchos casos, el criterio de Máxima Verosimilitud (MV) dio pruebas de superioridad con respecto a la Función de Mínimos Cuadrados (FMC). Estudios posteriores de Sorooshian y Gupta (1983) revelaron que entre las razones que justifican el éxito del criterio de MV, fueron las propiedades de convergencia superiores de las superficies de las funciones respuestas generadas por esta.

La forma más exitosa del criterio de Máxima Verosimilitud (Sorooshian y Gupta, 1995) ha sido una función llamada HMLE (Heteroscedastic Maximum Likelihood Estimator) que contabiliza la no estacionaridad de la varianza en los errores de caudal medidos. El estimador HMLE es el estimador de máxima verosimilitud, mínima varianza, asintóticamente no sesgado, cuando los errores en los datos de salida son Gaussianos, con media cero, no correlacionada, y tiene una varianza relativa a la magnitud de los caudales generados. La no estacionaridad de la varianza de los errores se cree que son comunes en los datos de caudal. Además, el estimador HMLE está relacionado con la FMC, ya que aquella se reduce a esta en el caso especial en que la varianza se hace constante en los errores de los datos de caudal.

El estimador HMLE, tiene la forma de la ecuación 3-7.

$$\min HMLE = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i \varepsilon_i^2}{\left[\prod_{i=1}^n w_i \right]^{1/n}} \quad (3-7)$$

Donde:

$\varepsilon_i = QO_i - QC_i$, es el residual del modelo en el tiempo i , siendo QO y QC los caudales observados y calculados por el modelo, respectivamente.

w_i = es el peso asignado al tiempo i , computado como sigue:

$$w_i = f_i^{2(\lambda-1)}$$

Donde:

f_i = es el valor verdadero de caudal en el intervalo de tiempo i . Se aproxima mediante QO_i .

n es el número de datos de la serie.

λ es el parámetro desconocido de transformación que estabiliza la varianza.

Tucci (2005), propone como las principales funciones empleadas en la hidrología para calibración automática de modelos hidrológicos, además de la Función de Mínimos Cuadrados: la Función Módulo, la Función Inversa y la Función Relativa, presentadas respectivamente en las ecuaciones 3-8, 3-9, y 3-10. Indica Tucci (2005), al respecto de estas FO, que la Función Módulo también asigna mayor peso a los caudales mayores, mientras que la Función Inversa busca ajustar mejor los caudales menores. Mientras que la Función Relativa, empareja las prioridades dividiendo por el valor del caudal observado en cada intervalo.

$$FO = \sum_{i=1}^n |QO_i - QC_i| \quad (3-8)$$

$$FO = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{QO_i} - \frac{1}{QC_i} \right)^2 \quad (3-9)$$

$$FO = \sum_{i=1}^n \left(\frac{QO_i - QC_i}{QO_i} \right)^2 \quad (3-10)$$

Tassi et al. (2006), presentan las tres FO anteriores, más la Función Cuadrática (ecuación 3-6), pero dividiéndolas por el número de datos n , y obteniéndole la raíz cuadrada. Con lo cual, le asigna un sentido conceptual al valor numérico hallado, convirtiendo la Función Cuadrática en la expresión de la Raíz Media Cuadrática, o sea, una forma de error promedio. Además, Tassi et al. (2006), agregan una nueva FO, que se muestra en la ecuación 3-11. Esta forma de FO también es elegida por Yapo et al. (1998), quienes adoptan además el criterio de HMLE para presentar y probar el desempeño del algoritmo multi-objetivo MOCOM-UA.

$$FO = \sum_{i=1}^n \left(\frac{QO_i - QC_i}{QO_i} \right) \quad (3-11)$$

Como puede verse, la FO adoptada para calibrar el modelo hidrológico es altamente dependiente del uso al cual será destinado el mismo. Si el objetivo es ajustar el modelo para simulación de crecidas, debe procurarse minimizar los errores en la simulación de los caudales mayores, para lo cual sería adecuado aplicar la función cuadrática o módulo. Si, en cambio, el modelo será usado para simulación de una secuencia de caudales, para la operación o para dimensionamiento de reservorios, el ajuste busca que las frecuencias de los caudales observados y calculados sean semejantes, en cuyo caso sería recomendable la función relativa (Tucci, 2005).

Madsen (2000) resume los objetivos mayormente considerados en una apropiada calibración automática, en los siguientes cuatro:

1. Un buen acuerdo entre los volúmenes totales escurridos y simulados por el modelo.
2. Una concordancia global aceptable entre las formas de ambos hidrogramas.
3. Una buena concordancia entre los picos de hidrogramas, en términos de tiempo de pico, pendiente de la curva y volumen.
4. Una buena aproximación de los caudales bajos.

Agrega Madsen (2000) que resulta necesario traducir el objetivo global de la calibración en términos más operacionales, de donde se desprenden las formas más comunes de las funciones objetivos. Propone en su trabajo, las FO presentadas en las ecuaciones de la 3-12 a la 3-15, que asignan cierto protagonismo al peso de los errores en cada intervalo de la serie de datos, y las denomina respectivamente: error global de volumen, raíz media cuadrática global de los errores, raíz media cuadrática promedio de los errores al pico de los eventos, raíz media cuadrática promedio de los errores en los caudales bajos de los eventos.

$$FO = \left| \frac{\sum_{i=1}^n w_i (QO_i - QC_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \right| \quad (3-12)$$

$$FO = \left| \frac{\sum_{i=1}^n w_i^2 (QO_i - QC_i)^2}{\sum_{i=1}^n w_i^2} \right|^{1/2} \quad (3-13)$$

$$FO = \frac{1}{M_p} \sum_{j=1}^{M_p} \left| \frac{\sum_{i=1}^{n_j} w_i^2 (QO_i - QC_i)^2}{\sum_{i=1}^n w_i^2} \right|^{1/2} \quad (3-14)$$

$$FO = \frac{1}{M_l} \sum_{j=1}^{M_l} \left| \frac{\sum_{i=1}^{n_j} w_i^2 (QO_i - QC_i)^2}{\sum_{i=1}^n w_i^2} \right|^{1/2} \quad (3-15)$$

Donde

M_p es el número de eventos con caudales pico.

M_l es el número de eventos con caudales bajos.

n_j es el número de intervalos de tiempo con caudales de pico, para la ecuación 3-14, y de caudales bajos, para la ecuación 3-15.

Los eventos con caudales pico se definen como los periodos donde el caudal observado está por encima de un dado nivel prefijado. Del mismo modo, los eventos con caudales bajos se definen como los periodos donde el caudal observado está por debajo de un dado nivel prefijado.

Los pesos, siempre según Madsen (2000), representan la importancia a darle a una porción particular del hidrograma, reflejando el error en los datos y en el modelo. Es

decir, se les asigna poco peso a los periodos en los cuales se presentan largas series de datos, o errores del modelo.

Coefficiente de Nash Sutcliffe

Una vez calibrado el modelo matemático, es necesario verificar la bondad del ajuste realizado. Tradicionalmente, se ha venido utilizando el famoso coeficiente de Nash y Sutcliffe (1970) para cuantificar la performance del ajuste. En la ecuación 3-16, se presenta dicho coeficiente, que representa una reinterpretación del coeficiente de determinación, empleado en regresión lineal.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n w_i^2 (QO_i - QC_i)^2}{\sum_{i=1}^n w_i^2 (QO_i - \overline{QO})^2} \quad (3-16)$$

Donde \overline{QO} es el promedio de los caudales del hidrograma observado.

En su forma simplificada, se suprimen los pesos (w_i), y resulta la ecuación 3-17.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (QO_i - QC_i)^2}{\sum_{i=1}^n (QO_i - \overline{QO})^2} \quad (3-17)$$

Sin embargo, en los últimos tiempos, se emplea este coeficiente directamente para realizar la calibración, considerando claro que en este caso el objetivo es maximizar dicho coeficiente. Es decir, en vez de minimizar una FO que represente un error, se opta por maximizar una medida numérica que representa el grado de performance del modelo.

Si se observa su formulación, el criterio de Nash-Sutcliffe consiste en restar a la unidad un cociente que representa una medida cuadrática del error, ya que está dado por la relación entre dos medidas cuadráticas. En el numerador de dicha relación tenemos el desvío cuadrado de la simulación respecto de la observación, y en el denominador, el desvío cuadrado de la observación respecto de la media observada.

Dicha relación no podrá ser nunca negativa ya que tanto numerador como denominador son valores cuadráticos. En consecuencia, el coeficiente de Nash-Sutcliffe, nunca podrá

ser mayor que uno. Sin embargo, sí puede ser mucho mayor el denominador que el numerador, en cuyo caso es un error pequeño, o bien el numerador que el denominador, en cuyo caso es un error grande y por lo tanto se obtendría un cociente mucho mayor que uno, por lo que R sería negativo. En teoría si el error fuera inmenso R puede tender incluso a infinito.

La aptitud de este coeficiente para presentar una referencia de calidad de ajuste del modelo en modo simulación, para cualquier tipo de cuenca hidrográfica, radica en que compara el error cometido en la simulación ($QO_i - QCi$), respecto de una magnitud de referencia, dada por la amplitud promedio del hidrograma observado respecto de la media observada ($QO_i - \overline{QO}$).

En simulación, ese criterio es bueno porque del hidrograma completo observado, rescatamos un valor constante que es la media, y respecto de ése valor normalizamos. Al normalizar se puede comparar simulaciones entre sí, aunque pertenezcan a distintas cuencas, períodos, etc. Es decir, ya que el denominador mide la distancia al cuadrado entre los caudales y la media, nos da un orden de magnitud de las dimensiones de los caudales medidos. Entonces promediando esas diferencias elevadas al cuadrado, nos da la varianza de esa distribución, o sea nos da el orden de magnitud de las variaciones.

En otras palabras, es un modo de adimensionalizar el error, empleando como técnica dividir la varianza real, respecto de la varianza de las magnitudes observadas con relación a la media.

Eso es muy valioso porque, cometer un error de simulación de 10 m³/s en un río que tiene caudales de 5 a 20 m³/s es muy grosero, pero es insignificante para un río que tiene fluctuaciones entre 2000 y 5000 m³/s. Entonces si calculamos la magnitud de esas fluctuaciones en el denominador con un valor como el propuesto por Nash-Sutcliffe, dado por la varianza de los caudales observados respecto de la media observada, tenemos un orden de magnitud de los valores que alcanzan las fluctuaciones reales en ese río. Si luego dividimos la varianza de los caudales simulados respecto de los observados, tenemos un número que representa la magnitud del error. La relación entre ambos, me da un coeficiente adimensional que indica la relación entre el error de simulación y la magnitud promedio de las fluctuaciones de la variable, que en este caso es el caudal. Eso me da una idea del error al cuadrado normalizado, es como la varianza

normalizada. De modo que puedo comparar ríos con módulos del orden de los 10 m³/s con otros de 5000 m³/s.

A pesar de ser un excelente indicador de la calidad del ajuste, el valor numérico que representa puede ser un poco engañoso, ya que por ejemplo un coeficiente de 0.9 no implica que el ajuste haya sido un 10% superior a otro con un coeficiente de 0.8. En la página 118 de la tesis doctoral de Perrin (2000), se da una explicación acabada de las razones que justifican esta afirmación, pero exceden este trabajo.

Coeficiente de Persistencia

El Coeficiente de Nash-Sutcliffe ha demostrado ser un buen indicador para representar de manera normalizada la calidad del ajuste de un modelo que trabaja en simulación. Sin embargo, presenta cierta deficiencia como indicador de la calidad de ajuste de un modelo aplicado al pronóstico, ya que en pronóstico la medida comparativa que establece la escala de referencia no es el caudal promedio (o la diferencia promedio de caudales) de todo el hidrograma, sino que nos interesa específicamente el tramo de hidrograma en el paso en el cual estamos pronosticando. Por eso surge el concepto de “persistencia” como criterio de evaluación de la calidad de pronóstico.

La expresión del Coeficiente de Persistencia (PC, por sus siglas en inglés) tiene la forma que se presenta en la siguiente ecuación:

$$PC = 1 - \frac{\sum \varepsilon_m^2}{\sum \varepsilon_r^2} \quad (3-18)$$

Para comprender la notación correspondiente a la expresión del PC, es necesario interpretar el gráfico de la Figura 3.7.

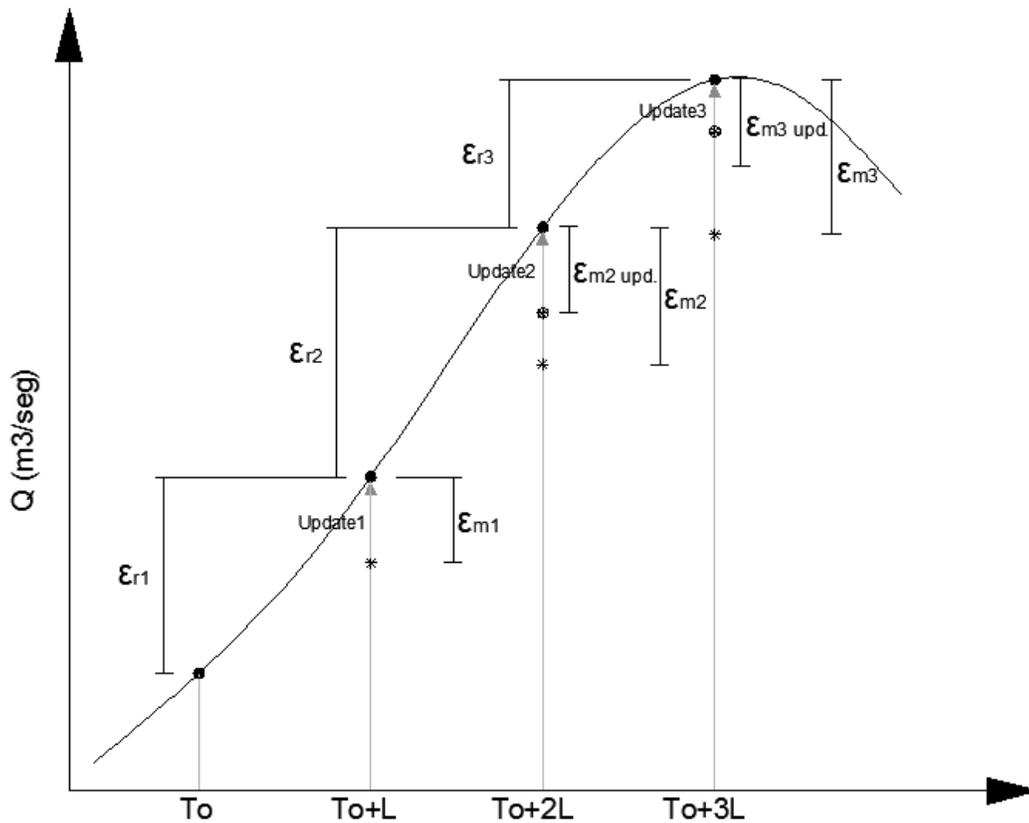


Figura 3.7. Coeficiente de Persistencia

En dicho gráfico se observa el tramo de un hidrograma observado en línea continua, y se indican con puntos las estimaciones que el modelo hace de los valores de caudal. Los puntos en estrella roja, corresponden al hidrograma generado en tiempo t_0 . Es decir, el dibujo indica que en tiempo t_0 , se corre el modelo de pronóstico y se obtiene para horizontes de tiempo (t_0+L) , (t_0+2L) , (t_0+3L) , etc, el hidrograma pronosticado. Cuando ha transcurrido el tiempo “L”, es decir ubicados en el instante de tiempo (t_0+L) , ya se puede constatar si el caudal pronosticado para ese instante es el correcto. De no ser así, el error cometido se denota como ϵ_m . También en ese instante estamos en condiciones de modificar la variable de estado “R” del modelo GR, al valor necesario para obtener un pronóstico adecuado en el tiempo actual.

La dimensión ϵ_r indica la medida de referencia con la cual se adimensionaliza el error de pronóstico. Esta segunda dimensión, si bien es denominada también con la letra “E”, en realidad no es un error, sino una diferencia simplemente, que indica la medida con respecto a la cual se normalizan los errores de pronóstico. Esa dimensión es

representativa en pronóstico como dimensión de referencia porque en pronóstico no nos interesa tanto cuánto ha sido el error cometido con respecto a la media (como se indicó para coeficiente de Nash-Sutcliffe), sino con respecto a una dimensión local del paso en que estamos pronosticando. Como E_r representa la diferencia de los valores de caudal entre el tiempo actual y el tiempo futuro pronosticado, me da un orden de magnitud de los saltos que da el hidrograma en ese intervalo. Por ejemplo, si se comete un error de pronóstico de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ en un tiempo de pronóstico dado en que la variación del caudal del hidrograma fue de $100 \text{ m}^3/\text{s}$, el error es insignificante, mientras que no lo es si la variación de caudal fuera de $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

Notar que también podría haberse usado el criterio de Nash-Sutcliffe, pues tiene en cuenta el promedio de los caudales, es decir algo así como el orden de magnitud del módulo del río. Pero el criterio de Nash no tiene en cuenta cómo varían los caudales durante el momento en que se está pronosticando. Aclaremos con un ejemplo. Si tenemos un hidrograma que tiene un módulo de unos $2000 \text{ m}^3/\text{s}$, durante los tramos de crecida puede tener fluctuaciones de $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ en un intervalo de pronóstico, mientras que en los de recesión, puede rondar los $10 \text{ m}^3/\text{s}$ por ejemplo. Pero el error cometido en pronóstico durante el periodo de crecida, no puede ser medido con la misma vara con que se mide un error en recesión, que es el problema que tiene el criterio de Nash para ser aplicado en pronóstico. En efecto, si se cometiera un error de $1 \text{ m}^3/\text{s}$, de acuerdo al criterio de Nash, es insignificante como error al lado de lo que significa el módulo del río, pero si consideramos que las variaciones de los caudales durante el periodo de recesión rondan los $10 \text{ m}^3/\text{s}$, de acuerdo al criterio de persistencia, se vuelve importante. En cambio, un error de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ en crecida, el mismo criterio de persistencia también lo considera insignificante, pues en ese caso lo contrastaría con el salto de $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ que se produce durante el periodo de crecida.

En síntesis, el criterio de Nash es menos exigente pues no le importa cuál es la medida de los caudales en el momento en que se está pronosticando, sino que mira la medida del error sin importar en qué momento se produce. El criterio de persistencia, en cambio, compara ese error con el orden de magnitud de las variaciones de los caudales en el momento en el que se está pronosticando. Está diseñado este criterio para fijar el grado de precisión que se requiere en cada parte del hidrograma, y mide el error cometido contrastándolo con ese grado de precisión.

3.10.2. ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN PARA MODELOS P-Q

La superficie descrita por la FO en el espacio de validez de los parámetros, recibe el nombre de superficie de respuesta. Un algoritmo de optimización es un procedimiento lógico empleado para buscar dentro de la superficie de respuesta, restringida a los rangos permitidos para los parámetros, el juego de valores de los parámetros del modelo que optimizan (minimizan o maximizan, según corresponda) el valor numérico de la FO (Sorooshian y Gupta, 1995). El procedimiento, agregan Sorooshian y Gupta (1995), es típicamente implementado en una computadora digital para permitir una búsqueda rápida.

Una descripción detallada de la historia en cuanto al estudio de los algoritmos de optimización puede encontrarse en la tesis de maestría del Mg. Ing. Facundo Jose Alonso. Acá solo se abarcara lo que es de estrictamente de interés para esta práctica.

Una de los primeros antecedentes que se encuentran en la bibliografía, respecto del empleo de las técnicas de optimización antes citadas para llevar a cabo la calibración automática de modelos hidrológicos, se remonta a la década del 60. Beard (1966) empleó la calibración automática para ajustar el modelo hidrológico HEC1, predecesor del conocido modelo hidrológico HEC-HMS. Ibbitt (1970) empleó la calibración automática para ajustar un modelo hidrológico para diferentes combinaciones de series con y libre de errores, y estudió los efectos de los errores sobre el ajuste. Posteriormente, (Ibbitt, 1972) utilizó un modelo conceptual para generar datos de caudales sintéticos libre de errores de información de precipitación y evaporación potencial. Luego introdujo errores en las tres series de datos. Mediante ajuste automático y objetivo, ajustó el modelo para diferente combinación de series libre de errores y con errores, y estudió los efectos de los errores sobre el ajuste. Encontró que los valores del criterio de ajuste dependen fuertemente de los errores en los datos de caudal, ya que las variaciones en los valores finales de los parámetros para el ajuste a los datos con errores mostraron no ser tan grandes como a los datos libres de errores. Duan et al. (1992) presentan claramente la naturaleza de los problemas que asocia a la calibración la existencia de múltiples óptimos locales, en el intento de calibración del modelo hidrológico PQ denominado SIXPAR. Estos resultados sugieren que la optimización de los modelos PQ es más difícil de lo que se pensaba previamente y que

los procedimientos corrientes de búsqueda local tienen una muy baja probabilidad de éxito a la hora de encontrar el juego óptimo de parámetros. Por consiguiente, evalúan la performance de tres algoritmos de búsqueda local aplicados sobre el modelo SIXPAR. Finalmente, presentan un nuevo procedimiento de optimización global, denominado SCE-UA (Shuffled Complex Evolutionmethod), el cual fue capaz de encontrar consistentemente el óptimo global del modelo SIXPAR, y aparece como capaz de resolver efectiva y eficientemente el problema de optimización de un modelo PQ.

Yapo et al. (1998) introducen la necesidad de calibrar con múltiples objetivos. Indican que las experiencias prácticas realizadas con calibración de modelos sugieren que ninguna función mono-objetivo es adecuada para identificar las formas en que el modelo falla para reunir las características importantes de los datos observados. Dado que algunos de los últimos modelos hidrológicos simulan varias características del flujo de salida (como por ej., agua, energía, constituyentes químicos), sugieren que existe una necesidad de procedimientos de calibración multi-objetivo eficientes y efectivos a los fines de explotar toda la información útil respecto del sistema físico contenida en series de datos medidos. Entonces, presentan el algoritmo MOCOM-UA, que es una metodología eficiente y efectiva para resolver el problema de la optimización global multi-objetivo. El método es una extensión del exitoso algoritmo mono-objetivo de calibración global SCE-UA. A través de un simple modelo hidrológico estudian las características y capacidades de calibración del MOCOM-UA.

Vrugt et al. (2003) propusieron una versión modificada del algoritmo original de optimización global SCE-UA desarrollado por Duan et al. (1992). Se trata de un manipulador de muestras (sampler) del tipo Markov Monte Carlo (MCMC), denominado ShuffledComplexEvolutionMetropolis (SCEM-UA), ya que incorpora conceptos del método de Metrópolis. Este algoritmo está diseñado para inferir la distribución posterior de los parámetros del modelo hidrológico. Proponen combinar las destrezas del exitoso algoritmo SCE-UA con la ventaja de los métodos de cadenas de Markov Monte Carlo, que han ido aumentando su popularidad debido a que estiman la distribución de probabilidades posterior de los parámetros en los modelos hidrológicos. En este trabajo Vrugt et al. (2003), presentan tres casos de estudio, en los cuales demuestran que las capacidades de adaptación del SCEM-UA reduce significativamente

el número de simulaciones del modelo necesarias para inferir la distribución posterior de los parámetros cuando se comparan con el tradicional manipulador de muestras Metropoli-Hastings.

Un nuevo equipo de trabajo (Vrugt et al., 2003), encabezado por Vrugt, lanza el mismo año, la versión multi-objetivo del SCEM-UA, denominado MOSCEM-UA (Multiobjective Shuffled Complex Evolution Metropolis). Los autores insisten en que la experiencia práctica con la calibración de modelos hidrológicos sugiere que ninguna función mono-objetivo, independientemente de cuan cuidadosamente haya sido elegida, es capaz de representar por sí misma, adecuadamente todas las características de los datos considerados importantes. Entonces proponen el MOSCEM, como un algoritmo capaz de resolver el problema de optimización multi-objetivo para modelos hidrológicos, empleando el concepto de dominancia de Pareto (más que el de evaluación directa de función mono-objetivo) para evolucionar la población inicial de puntos hacia un conjunto de soluciones estancadas con distribución estable (set de Pareto). Por último, los autores comparan la eficacia del MOSCEM-UA con la del algoritmo MOCOM-UA para tres caso de estudio de modelaciones hidrológicas que se incrementan en complejidad.

3.10.3. CRITERIO DE PARADA

Las estrategias de optimización que se presentan en este trabajo, son todas procedimientos iterativos que buscan el juego óptimo de valores para los parámetros mediante pasos de aproximación. En consecuencia, como lo establecen Sorooshian y Gupta (1995), resulta necesario establecer un criterio que determine cuando debe detenerse la búsqueda. En principio, la solución existe en aquel punto de la superficie de respuesta en el cual la pendiente es nula y el valor de la función, un mínimo. En la práctica, es virtualmente imposible, agregan Sorooshian y Gupta (1995), conocer en qué momento exacto ese punto ha sido alcanzado, en consecuencia, estos autores proponen los criterios de terminación mayormente usados en la práctica, del modo que se transcriben a continuación.

Convergencia de la FO. Una manera sencilla de terminar la búsqueda es detenerla cuando el algoritmo es incapaz de apreciar una mejora del valor de la FO en dos iteraciones seguidas. Aunque este criterio puede indicar que se ha alcanzado el óptimo, también puede representar simplemente que se ha llegado a una zona plana de la

superficie de respuesta. Si no fuese importante el valor preciso del óptimo, la convergencia de la FO puede ser muy útil como criterio de parada. Una implementación típica es detenerse cuando se cumple con la condición:

$$\frac{(FO_{i-1} - FO_i)}{FO_i} \leq \varepsilon_{FO} \quad (3-19)$$

Donde:

FO_i: valor de la FO en el paso iterativo i.

eFO : error de la FO prefijado. Por ejemplo eFO = 10⁻³.

Convergencia de los parámetros. Otra forma de terminar la búsqueda es cuando el algoritmo es incapaz de generar un cambio apreciable en el valor de los parámetros, y simultáneamente mejorar el valor de la FO. Aunque este criterio puede indicar que se ha alcanzado el óptimo, también puede representar simplemente que se ha alcanzado una región con alta interacción paramétrica en la superficie de respuesta, como por ejemplo, una región al tipo de un estrecho valle. Sorooshian y Gupta (1995) comentan que se han obtenido mejores resultados con este criterio que con el anterior. Una implementación típica de este criterio se muestra en la siguiente ecuación:

$$\frac{(\theta(j)_{i-1} - \theta(j)_i)}{(\theta(j)_{\max} - \theta(j)_{\min})} \leq \varepsilon_{\theta} \quad (3-20)$$

Donde:

θ(j)_i: valor del parámetro j, en el paso iterativo i.

eθ: error paramétrico prefijado. Por ejemplo eθ = 10⁻³.

Número máximo de iteraciones. Si el tiempo de computadora es limitado, y para asegurar que el algoritmo no quedará atrapado en un ciclo infinito, se emplea como práctica normal, programar la terminación del algoritmo si se ha alcanzado un número máximo preestablecido de iteraciones, a menos que se haya cumplido previamente con alguno de los criterios anteriores. Para métodos de búsqueda aleatoria, este es el procedimiento normal de terminación. No es posible dar una regla fija respecto del

número de iteraciones convenientes, ya que es dependiente, tanto del algoritmo como del problema particular tratado.

3.10.3.1. Limitaciones

Ninguno de estos criterios son confiables en términos de dar una indicación precisa respecto del arribo al óptimo global, excepto en el caso más trivial en el cual la FO presenta una superficie de respuesta convexa y de comportamiento suave. Sin embargo, en la experiencia de Sorooshian y Gupta (1995), el criterio de terminación por convergencia de los parámetros es más adecuado para los estudios de calibración, ya que termina la calibración cuando el parámetro no está cambiando significativamente. El criterio de máximo número de iteraciones se emplea como respaldo para evitar consumo computacional innecesario. Si el algoritmo no concluye dentro de un número “razonable” de iteraciones, el código computacional debería ser examinado de “bugs”. Finalizan los autores citados, indicando que la mejor manera de establecer valores apropiados como criterios de terminación consiste en correr el algoritmo empleando series sintéticas de datos sobre el modelo.

3.10.4. DATOS DE CALIBRACIÓN

Para realizar la calibración automática de un modelo hidrológico de transformación lluvia-caudal, ajustado para el funcionamiento en una cuenca específica, resulta necesario contar con una serie de datos buenos y confiables. Sin embargo, según ironizan Sorooshian y Gupta (1995), poco se conoce objetivamente respecto de aquello que constituye una “buena” serie de datos de calibración. Por esta razón, resulta necesario analizar cuántos y qué tipo de datos darán los mejores o aceptables resultados de calibración automática. Los autores citados, establecen los siguientes criterios que se transcriben a continuación.

Cantidad de datos. La práctica común consiste en utilizar la mayor cantidad de los datos disponibles para la calibración, luego de apartar una cierta cantidad de datos para la verificación de los resultados. Sin embargo, los estudios de Sorooshian et al. (1983) indicaron que, cuando el procedimiento de calibración había sido correctamente diseñado, sólo un año de datos diarios eran suficientes como para obtener estimaciones conceptualmente realistas para los parámetros del modelo de pronóstico de crecidas de

la US-National Weather Services (SMA-NWSRFS) bien presentado en Burnash (1995). Más aún, el uso de series de datos de mayor longitud sólo sirven para mejorar marginalmente la estimación de los parámetros. En general, desde un punto de vista estadístico, la serie de datos debería ser al menos unas 20 veces el número de parámetros a ser estimados (por ejemplo, si hay 7 parámetros, entonces al menos se debería contar con 140 datos diarios de caudal para computar la función). Esto es, aclaran los autores, simplemente una aproximación de dedo gordo. Gupta y Sorooshian (1985) mostraron que el error estándar ($\sigma(j)$) en la estimación del parámetro (j) decrece con el tamaño n de la muestra aproximadamente de acuerdo a la fórmula de la ecuación:

$$\sigma(j) \propto \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (3-18)$$

Como la mejora marginal en $1/n$ se convierte en pequeña después de 500 o 100 puntos de dato, esto sugiere que dos a tres años de datos de calibración deberían ser suficientes, siempre y cuando los datos sean de los “buenos”. Lo cual nos conduce a una discusión acerca de la calidad de los datos.

Calidad de datos. Desde el punto de vista de la calibración del modelo, la calidad de los datos dependen de la información (relacionada con los parámetros) contenida en los datos y el ruido (errores) en los datos. Claramente, es deseable que el contenido de información paramétrica en los datos sea tan larga como sea posible, y el ruido tan pequeño como sea posible.

Respecto de la información, cualitativamente, una serie de datos informativos son aquellos tales que contienen o representan tanta variabilidad en el comportamiento del escurrimiento, que los distintos modos de operación del proceso hidrológico son apropiadamente representados. Esto maximiza las chances de los datos de contener información suficiente como para identificar apropiadamente el valor de los parámetros del modelo (es decir, variaciones de los parámetros del modelo, resultarán en variaciones detectables en las salidas del modelo, fuera del hidrograma observado). Por ejemplo, si los datos elegidos corresponden a un año relativamente seco, ciertos procesos del modelo, no serán activados; en consecuencia, la respuesta del modelo será insensible a algunos de los parámetros del modelo que determinan el fraccionamiento de la humedad entre las distintas capas subterráneas y el agua superficial. Sin embargo, si la serie de datos corresponde a un año tan húmedo que mantiene la capa superior del

suelo saturada la mayor parte del tiempo, la respuesta del modelo puede ser insensible a variaciones en los parámetros que controlan las distintas capas subterráneas del modelo.

La mejor elección parece ser una serie de datos que contenga una gran “variabilidad hidrológica”. Por ejemplo, Gupta y Sorooshian (1985b) mostraron que la identificabilidad del parámetro correspondiente a la capa superior de humedad de un modelo de escurrimiento típico, depende no de cuán larga sea el flujo excedente en esta capa, sino de cuantas veces el flujo excede este reservorio. Por consiguiente, la mayoría de las veces en que el régimen hidrológico intercambia entre modos secos, medios y húmedos, es probable que los datos sean más informativo aún.

Con respecto al error en los datos, la presencia de errores en la medida y escritura de los datos causa un deterioro en la calidad, resultando en un desmedro de confianza en la estimación de los parámetros. El error en los datos tiene distintas fuentes, como registro incorrecto de la máquina, mal funcionamiento de la máquina, métodos de transferencia de datos a la computadora, aproximaciones en la curva de transformación, cambios en el fondo del río, aproximaciones en las fórmulas usadas para convertir registros de campo, negligencia, fraude, etc. Aunque se ha sugerido que los efectos combinados de todos esos errores deberían tender hacia una distribución normal, esto no ha sido demostrado suficientemente. En la práctica, los errores en los datos probablemente contengan sesgos, particularmente en el caso de datos de precipitación, que tienden a subestimar el valor real de lluvia. Los datos de caudal son en general, los más confiables, pero contienen típicamente un 10 % de error. En la selección de los datos para calibración del modelo, sería deseable que la serie sea cuidadosamente examinada para identificar primeramente errores groseros, por ejemplo periodos donde el caudal se eleva, pero no se observan datos de precipitación. Mientras que los errores en los datos de caudal pueden ser manejados mediante el uso de la máxima verosimilitud y otras teorías estadísticas, todavía deben desarrollarse métodos satisfactorios para el manejo apropiado de los errores de precipitación.

4. METODOLOGÍA

En este capítulo se describe el modelo hidrológico GénieRural (Perrin et al., 2007), y el método de optimización MOCOM-UA (Yapo et al., 1998), empleado para realizar la calibración automática multi-objetivo, del modelo hidrológico.

4.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO GR

4.1.1. OBJETIVOS DE SU DESARROLLO

La simulación del caudal a la salida de una cuenca hidrográfica es necesaria, y en ocasiones, indispensable para las numerosas aplicaciones de ingeniería y de gestión de los recursos hídricos, tales como el dimensionamiento y la gestión de obras, el pronóstico de crecidas o de estiaje, la detección del impacto en el uso del suelo o en los cambios climáticos. Para responder a esta cuestión, el instituto IRSTEA (ex CEMAGREF) comenzó a desarrollar a comienzos de los años 1980 (Michel, 1983) una generación de modelos hidrológicos denominados genéricamente “Génie Rural” (GR).

4.1.2. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS

Como todo modelo hidrológico, los modelos GR operan una triple globalización:

A nivel de proceso: se propone una relación comportamental simple a la escala de cuenca hidrográfica, puesta a punto empírica, y sin vínculo conceptual con los procesos físicos subyacentes. Es decir, la puesta a punto se focaliza en el juego de parámetros que mejor ajusta al modelo para las condiciones planteadas.

A nivel espacial: Los modelos GR, son de tipo global, es decir que trabajan con información promediada de toda la cuenca hidrográfica. A pesar de ello, algunas de sus versiones han sido calibradas con éxito en cuencas hidrográficas desde unos pocos Km², hasta varios miles de Km² (Perrin, 2000), como por ejemplo, la cuenca hidrográfica del río Sena a la entrada de París, de unos 43.800 km².

A nivel temporal: los modelos GR han sido desarrollados para distintos pasos de tiempo específicos: (i) Versión anual denominado GR1A (Mouelhi et al., 2006a), (ii) Versión mensual denominado GR2M (Mouelhi et al., 2006a), (iii) Versión con paso de tiempo diario, denominada GR4J (Perrin et al., 2003), (iv) Versión horaria, GR3H (Berthet, 2010). Adicionalmente, existe una versión reformulada para la aplicación en pronóstico

hidrológico, denominada GRP, orientada al paso de tiempo diario (Tangara, 2005), y horario (Berthet, 2010). Para conocer en detalle la estructura de cada modelo, remitirse a la referencia citada.

4.1.3. ESTRUCTURA DEL MODELO

La filosofía general de construcción de modelos hidrológicos que sigue el equipo de trabajo que desarrolló la familia de modelos “GR”, consiste en reducir tanto como sea posible la complejidad de la estructura del modelo, procurando conservar la performance y eficiencia del mismo.

Por esta razón, las versiones indicadas previamente no difieren mucho entre sí, a pesar de estar orientadas a distintos pasos de tiempo. La estructura general de este tipo de modelos “GR” se conserva, y sólo existen pequeñas diferencias según se trate de un modelo orientado al paso de tiempo anual, diario u horario.

A continuación se presenta el desarrollo sólo de la versión GR4J, es decir, con paso de tiempo diario, y las pequeñas modificaciones relativas al paso de tiempo horario, ya que son las empleadas en este trabajo. La versión del modelo horario de este trabajo, no es exactamente la versión GR3H, mencionada previamente, sino muy semejante al modelo GR4J, de cuatro parámetros, con una sensible diferencia que se muestra oportunamente durante la presentación del modelo GR4J.

El modelo GR4J (GénieRural à quatreparamètresjournaliste), tiene paso de tiempo diario y dispone de 4 parámetros ajustables. Es un modelo de precipitación-caudal global. Su desarrollo se inició en el instituto “Cemagref” (hoy “Irstea”) a principios de 1980, con el objetivo de desarrollar un modelo de simulación robusta y fiable para utilizar en problemas de lluvia-caudal aplicados a la gestión de los recursos hídricos en ingeniería (diseño, pronóstico de inundaciones y flujos bajos, manejo de reservorios, detección de impacto, etc) .

Este modelo ha sido adecuado en varias versiones en los trabajos de EdijatnoyMichel (1989), Edijatno (1991), Nascimento (1995), Edijatno et al. (1999), Perrin(2000), Perrin (2002) y Perrin et al. (2003). Estos han mejorado progresivamente el rendimiento del modelo. La versión que aquí se presenta es la de Perrin et al. (2003).

AunqueGR4J es un modelo empírico, su estructura es similar a la de los modelos conceptuales que utilizan tanques, con un procedimiento de control de las condiciones

de humedad del reservorio que tiene en cuenta las condiciones anteriores y para garantizar el funcionamiento en simulación continua. Su estructura combina un reservorio de producción y uno de transferencia, unos hidrogramasunitarios, así como una función de apertura hacia el exterior no atmosférico (es decir, subterráneo), permitiendo simular el comportamiento global de la gran cuenca hidrológica, que incluye el flujo subterráneo.

4.1.3.1. DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DEL MODELO GR4J.

En la Figura 4.1, se muestra un diagrama de la estructura del modelo. En la misma, “Pk” es la lluvia diaria del día “k”, y “E” es la evapotranspiración potencial (EP) media del mismo día calendario.

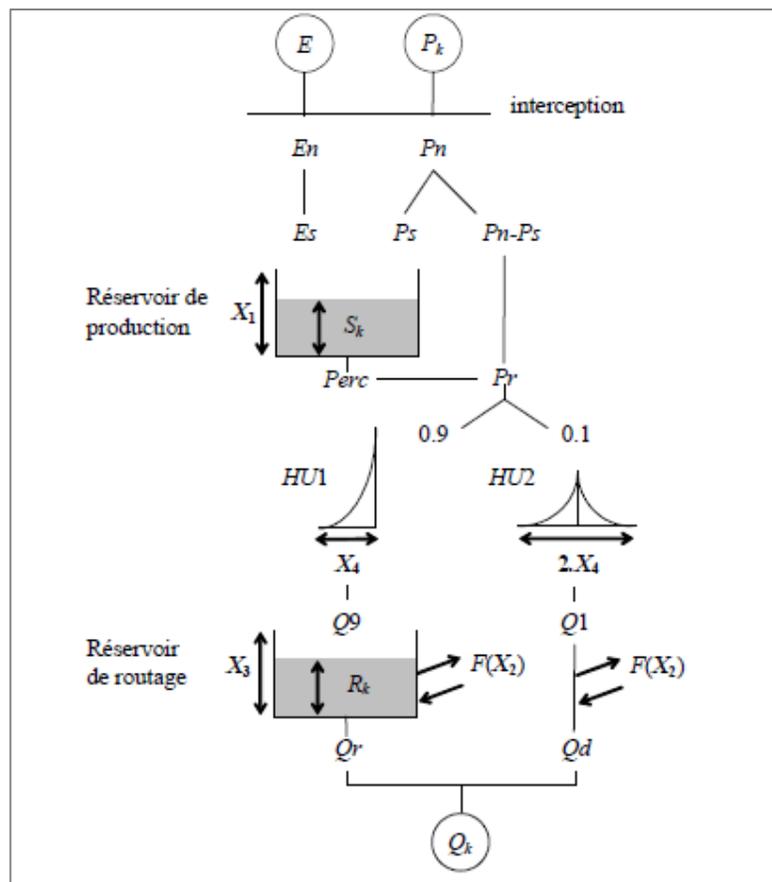


Figura 4.1. Estructura del modelo GR4J (Perrin et al., 2003).

- Neutralización

El primer paso es la neutralización entre “Pk” y “E” para determinar una lluvia neta “Pn”, y la evapotranspiración neta “En”. Estas se calculan por las siguientes ecuaciones, según corresponda:

$$\text{Si } P_k \geq E, \text{ entonces } P_n = P_k - E \quad \text{y} \quad E_n = 0 \quad (4.1)$$

$$\text{Si } P_k < E, \text{ entonces } P_n = 0 \quad \text{y} \quad E_n = E - P_k \quad (4.2)$$

- Función de salida

En el caso en que Pn es diferente de cero, una parte de Pn, denominada Ps, es asignada al tanque de producción. Esta porción es calculada por:

$$P_s = \frac{X_1 \left(1 - \left(\frac{S_k}{X_1}\right)^2\right) \tanh\left(\frac{P_n}{X_1}\right)}{1 + \frac{S_k}{X_1} \tanh\left(\frac{P_n}{X_1}\right)} \quad (4.3)$$

Donde X1 (mm) es la capacidad máxima del reservorio de producción Sk al comienzo del día “k”.

Cuando En es distinto de cero, una cantidad de En, denominada Es, abandona el tanque de producción. Esta cantidad, se calcula según la siguiente ecuación:

$$E_s = \frac{S_k \left(2 - \frac{S_k}{X_1}\right) \tanh\left(\frac{E_n}{X_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S_k}{X_1}\right) \tanh\left(\frac{E_n}{X_1}\right)} \quad (4.4)$$

El contenido del reservorio resultante, está dado por:

$$S' = S_k + P_s - E_s \quad (4.5)$$

- Percolación

La Percolación (“Perc”) que se produce desde el tanque de producción se calcula con la siguiente ecuación:

$$Perc = S' * \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{4}{9} * \frac{S'}{X_1} \right)^4 \right]^{\frac{1}{4}} \right\} \quad (4.6)$$

Como resultado, el contenido del tanque se convierte en:

$$S_{k+1} = S' - Perc \quad (4.7)$$

La cantidad de agua Pr que finalmente llega a la etapa de transferencia del modelo está dada por:

$$Pr = Perc + (Pn - Ps) \quad (4.8)$$

- Hidrogramas unitarios

Pr se divide en dos componentes de flujo, el 90% describe un hidrograma unitario, HU1, y se almacena en un depósito y el 10 % describe otro hidrograma unitario, HU2, el cual es simétrico. HU1 y HU2 dependen del mismo parámetro X_4 , que es el tiempo en la base de HU1 expresado en días.

Las ordenadas de los hidrogramas se calculan a partir de las curvas "S" denominadas SH1 y SH2, respectivamente, que corresponden a las funciones acumuladas de los hidrogramas.

SH1 se define por una función de tiempo:

$$\text{Para } t \leq 0, \quad SH1(t) = 0 \quad (4.9)$$

$$\text{Para } 0 < t < X_4, \quad SH1(t) = \left(\frac{t}{X_4}\right)^{\frac{5}{2}} \quad (4.10)$$

$$\text{Para } t \geq X_4 \quad SH1(t) = 1 \quad (4.11)$$

SH2 se define de manera similar:

$$\text{Para } t \leq 0, \quad SH2(t) = 0 \quad (4.12)$$

$$\text{Para } 0 < t < X_4, \quad SH2(t) = \frac{1}{2} * \left(\frac{t}{X_4}\right)^{\frac{5}{2}} \quad (4.13)$$

$$\text{Para } 0 < t < 2 X_4, \quad SH2(t) = 1 - \frac{1}{2} * \left(2 - \frac{t}{X_4}\right)^{\frac{5}{2}} \quad (4.14)$$

$$\text{Para } t \geq X_4 \quad SH2(t) = 1 \quad (4.15)$$

Para el modelo con paso de tiempo horario, en lugar de utilizar un índice de potencia igual a $5/2$, este se transforma a $5/4$.

Los valores en las ordenadas de HU1 Y HU2 se calculan por medio de

$$UH1(j) = SH1(j) - SH1(j - 1) \quad (4.16)$$

$$UH2(j) = SH2(j) - SH(j - 1) \quad (4.17)$$

Donde j es un número entero.

En cada paso de tiempo k, los caudales Q9 y Q1 salidos de los dos hidrogramas corresponden a la convolución de las lluvias anteriores por el esquema de repartición dado por el hidrograma discretizado y son calculados por:

$$Q9(k) = 0.9 * \sum_{j=1}^l UH1(j) * Pr(k - j + 1) \quad (4.18)$$

$$Q1(k) = 0.1 * \sum_{j=1}^m UH2(j) * Pr(k - j + 1) \quad (4.19)$$

Donde l = int(X4) + 1 y m = int(2.X4) + 1, int(.) denota la parte entera.

- Función de intercambio con el exterior no atmosférico

El intercambio de agua subterránea se calcula a través de:

$$F = X_2 * \left(\frac{R_k}{X_3}\right)^2 \quad (4.20)$$

Donde R_k es el nivel en el reservorio al inicio del paso de tiempo, X₃ es la capacidad del tanque a un día, y X₂ es el coeficiente de intercambio de agua que puede ser positivo en el caso que aporte o negativo en el caso de pérdidas a hacia las aguas subterráneas o bien puede ser nulo. La interpretación física de esta función de cambio, no es directa.

- Reservorio de transferencia

El nivel en el depósito de transferencia se modifica mediante la adición de Q9 que proviene del hidrograma HU1 y F:

$$R' = \max(0 ; RK + Q9(k) + F)$$

El caudal Qr que se obtiene a la salida del depósito de transferencia es:

$$Q_r = R' * \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R'}{X_3} \right)^4 \right]^{\frac{1}{4}} \right\} \quad (4.21)$$

Entonces el nivel del reservorio se convierte en:

$$RK + 1 = R' - Qr \quad (4.22)$$

- Total

La salida Q1 del hidrograma HU2 es sometida al intercambio para dar la componente de flujo Qd:

$$Qd = \max(0 ; Q1(k) + F)$$

El caudal total Q resulta entonces:

$$QK = Qr + Qd \quad (4.23)$$

- Parámetros:

El modelo GR4J se compone de cuatro parámetros de calibración:

X1: Es la capacidad del reservorio de producción en mm.

X2: Es el coeficiente de intercambio subterráneo, en mm.

X3: Es la capacidad del reservorio de transferencia en mm

X4: Es el tiempo de base del hidrograma unitario HU1.

En una amplia muestra de las cuencas hidrográficas, los valores de parámetros que se obtuvieron se entran en la tabla 4.1.

Paramètre	Médiane	Intervalle de confiance à 80%
X ₁ (mm)	350	100 à 1200
X ₂ (mm)	0	-5 à 3
X ₃ (mm)	90	20 à 300
X ₄ (jours)	1.7	1.1 à 2.9

Tabla 4.1.: Parámetros modelo GR4J, (Perrin et al. 2003).

- Modo pronóstico:

El modelo en modo pronóstico, incorpora al proceso de simulación un algoritmo de actualización de datos de estado, que mejora el pronóstico aprovechando los propios datos de caudal medidos en tiempo real. En la figura 4.2. se presenta un esquema del modelo en modo pronóstico.

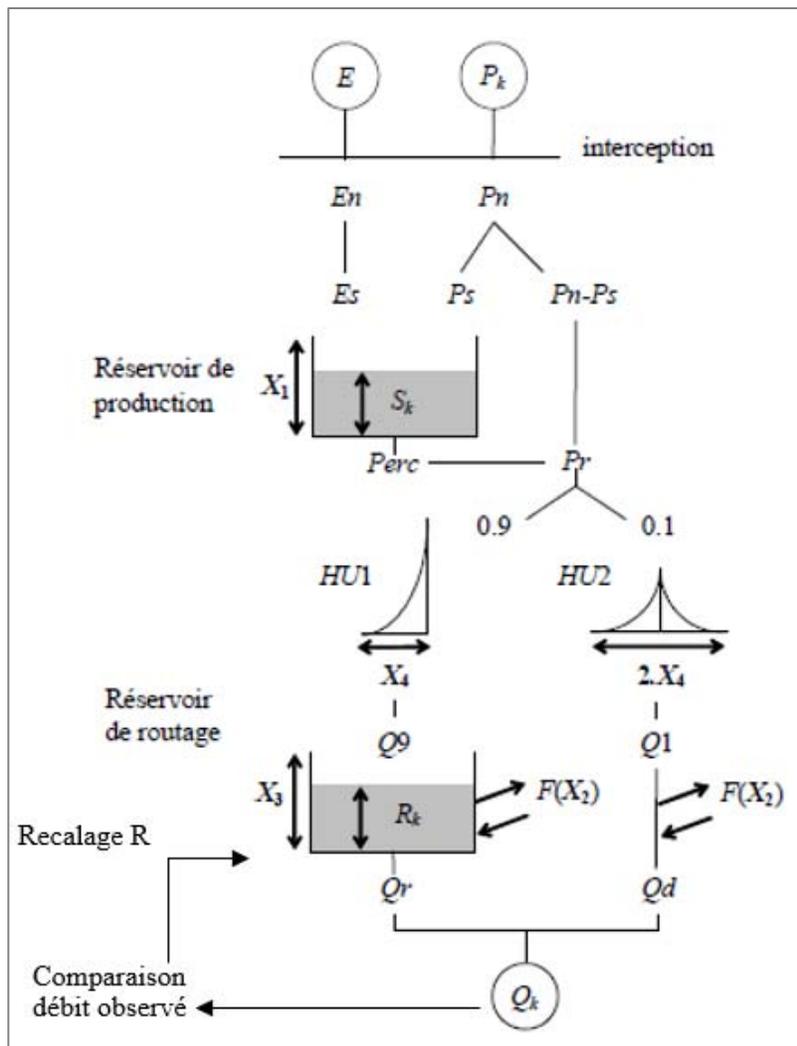


Figura 4.2. Modelo GR4J modo pronóstico.

En dicha figura se observa que existe un procedimiento de ajuste del reservorio de transferencia en función de los datos de caudales observados a tiempo real.

Como fue presentado arriba, un modelo de simulación utiliza como datos de entrada sólo la precipitación y la evapotranspiración potencial. Con una serie de estas variables, se estima una serie de caudales simulados, que representa la salida del modelo.

El modelo en modo pronóstico agrega a estas variables de entrada, también el caudal observado a tiempo real. De este modo, es posible estimar en cada paso de tiempo, cuál debería ser el estado del reservorio de transferencia para producir caudales como los que son observados a tiempo real.

De este modo, el modelo va ajustando (se podría decir también, calibrando) la variable de estado en cada paso de tiempo en función de los caudales que el sistema de colección de datos a tiempo real, va arrojando a la computadora.

Sintetizando, para aclarar conceptos se puede decir que en el tiempo “ t_0 ” el modelo recibe como datos de entrada $P(t_0)$ y $EP(t_0)$, y genera el hidrograma para t_1 (siendo $t_1 = t_0 + \Delta t$), es decir el valor Q_1 , y para todo valor de $t > t_0$ (es decir $Q_2, Q_3...$). Cuando transcurre un Δt , y ya estamos en t_1 , es posible verificar si el caudal generado Q_1 cuando estábamos en t_0 , coincide con el valor actual Q_1' de caudal (conocido). Si no coincide, el modelo modifica su variable de estado R_0 (para el paso de tiempo anterior), ajustando de este modo el estado del sistema para que Q_1 sea igual al observado Q_1' . Es decir, el modelo arroja el valor que tendría que haber tenido R en el paso de tiempo anterior, para haber arrojado un valor de caudal Q_1 , igual al medido Q_1' . Una vez que ajustó R , vuelve a correr y calcula Q_2 , con los datos de entrada P_1 y EP_1 . Y así sucesivamente con todo el periodo de tiempo simulado.

4.2. EL ALGORITMO MOCOM-UA

Como se ha presentado previamente, el algoritmo MOCOM-UA es un algoritmo de optimización multi-objetivo, ya que está diseñado para optimizar un modelo matemático empleando más de una función objetivo.

Se ha dicho que una función objetivo es una expresión matemática que cuantifica la diferencia entre la salida del modelo hidrológico (hidrograma simulado, si se trata de un modelo de transformación lluvia-caudal), y los datos medidos de referencia (hidrograma medido). Cuanto menor sea dicha función objetivo, mejor habrá sido el ajuste.

Ahora bien, esa “diferencia” que cuantifica la FO, puede ser diferencia de caudales máximos de los hidrogramas, diferencia de volúmenes de escurrimiento directo, diferencias de los caudales de recesión, diferencia de los tiempos en que se produjeron los picos, etc. De acuerdo a la FO elegida para realizar la calibración automática, el juego

de valores de parámetros que la minimice será la que mejor representa cierta parte del proceso que simula el modelo.

Por ejemplo, si se elige como FO, aquella que minimiza la diferencia entre caudal máximo simulado y el medido, entonces el juego de valores de parámetros que la minimice, será el que mejor ajusta los picos de los hidrogramas, es decir, probablemente sea el que mejor represente el proceso de transferencia. Pero si se elige la FO que cuantifica la diferencia entre volúmenes de escurrimiento directo de hidrogramas simulado y medido, el juego de parámetros que la minimice será el que mejor representa el proceso de infiltración. Sin embargo, este último juego de valores de los parámetros no tiene por qué coincidir con el anterior. En otras palabras, el conjunto de valores de parámetros que mejor representa la transferencia en la cuenca, no necesariamente sea el que mejor represente la infiltración. En la mayoría de los casos esos valores no sólo no coinciden sino que se diferencian notablemente, al menos en algunos de sus parámetros.

Como consecuencia del análisis anterior, el hidrólogo que va a realizar la calibración automática del modelo de simulación, deberá elegir un criterio de calibración, el cual dependerá de los objetivos de la simulación. Si por ejemplo, el objetivo de la simulación está asociado al proyecto del vertedero de un embalse, indudablemente que deberá elegirse una FO que conduzca a un juego de valores para los parámetros que permita una simulación adecuada de los picos (y de los volúmenes) de las crecidas. Por el contrario, si se está realizando un estudio de balance hídrico, la FO debe calibrar el modelo para adecuarse a simular con precisión los volúmenes escurridos.

A la vista de la experimentación, ha quedado ampliamente demostrado que un mismo juego de parámetros puede ser una excelente solución para un objetivo y pésima para otro, es decir que puede minimizar notablemente una FO y resultar en valores elevados para otra. En efecto, el juego de parámetros que minimiza una FO, normalmente tiene un valor elevado en la otra, y viceversa. Entre el mejor punto para una FO y el mejor para la otra, existe un conjunto de puntos intermedios que conforman una región de puntos tales que ninguno de ellos es mejor que el otro en ambas FO al mismo tiempo. Esta región se denomina Región de Pareto. Frente a este panorama de divergencias, surgen los métodos de optimización multi-objetivo, que se emplean para obtener la Región de Pareto mediante la minimización simultánea de dos o más FO.

Antes de abarcar la descripción paso a paso del método se introduce el proceso de evolución competitiva y el algoritmo de Nelder y Mead, los cuales son empleados, como se verá más adelante, para llevar a cabo la evolución del complejo.

4.2.1. EVOLUCIÓN COMPETITIVA COMPLEJA

La Evolución Competitiva Compleja es un proceso de evolución que se lleva a cabo sobre un conjunto de individuos dados. En el contexto del Algoritmo SCE-UA, el conjunto de individuos sometido a esta evolución es el complejo. A continuación se describe su metodología.

Atribución de pesos.

En primer lugar, se atribuye a cada individuo del complejo un peso tal que los mejores puntos del complejo (menor valor de FO) tienen mayor peso. Ese peso podría estar dado por la expresión que proponen Duan et al. (1992):

$$\rho_i = \frac{2(m+1-i)}{m(m+1)}, \quad i = 1, \dots, m. \quad (4.24)$$

Donde:

- ρ_i es el valor del peso asignado al individuo i .
- m es el número de puntos en cada complejo.
- i es la posición del punto dentro del complejo.

De acuerdo a esta expresión, la suma de los pesos de los m puntos del complejo debe ser igual a 1.

Selección de subcomplejos.

Luego se elige aleatoriamente un conjunto de puntos dentro del complejo. Ese conjunto de puntos recibe el nombre de subcomplejo, y naturalmente, debe tener un número de puntos menor o igual al tamaño del complejo. Por ejemplo, si el complejo tiene 18 individuos, el tamaño del subcomplejo debe ser menor o igual a 18. Los puntos del subcomplejo son elegidos de modo tal que tengan mayor probabilidad de ser elegidos aquellos puntos del complejo con mayor peso, aun cuando cualquiera pueda serlo. O sea que el método de selección de los puntos del complejo que pasarán a formar parte

del subcomplejo, debe dar mayor probabilidad de ser elegidos a los mejores, aunque los peores también podrán formar parte del Subcomplejo.

Siguiendo con nuestra analogía, la selección del Subcomplejo es análoga a la selección de los padres (o reproductores) que serán los que den origen a la siguiente generación. De todos los individuos del complejo, interesa elegir como reproductores a los mejores, por eso se le otorga mayor peso a los puntos con menor FO, para que tengan más probabilidad de formar parte del subcomplejo, o sea de reproducir. Sin embargo, los puntos malos también pueden ser elegidos, aunque tienen menor probabilidad de serlo. La única diferencia que existe con la reproducción natural es que, en la natural, los padres son sólo dos, en cambio, en el subcomplejo (los reproductores) pueden ser más de dos.

Conviene remarcar que:

El número de individuos de la población puede ser cualquiera, aunque conviene que sea grande.

El número de individuos del complejo puede ser cualquiera, siempre que sea un submúltiplo del tamaño de la población.

El número de individuos del subcomplejo puede ser cualquiera, siempre que sea menor o igual que el tamaño del Complejo.

Por ejemplo, de una población de 100 individuos pueden elegirse 5 complejos de 20 individuos cada uno. A su vez, de cada complejo pueden tomarse subcomplejos de 13 individuos.

Evolución de los Subcomplejos.

Una vez que se elige el subcomplejo, el mismo evoluciona mediante el Algoritmo de Nelder y Mead un número “a” de veces. Luego de esta evolución, el subcomplejo habrá llegado a un nuevo conjunto de puntos. El Algoritmo de Nelder y Mead es un algoritmo de búsqueda local, que se explica más adelante. El subcomplejo con sus nuevos puntos es devuelto al complejo, en donde se reúnen con los que no habían sido elegidos para formar parte del subcomplejo. Es decir que el complejo vuelve a tener la misma cantidad de puntos, pero ahora tiene algunos que han evolucionado y son distintos a los que partieron hacia el subcomplejo antes de que este fuese sometido al algoritmo de Nelder y Mead, y por lo tanto, tienen distinto valor de FO. En consecuencia los puntos están

desordenados. Si por ejemplo, de un complejo de 20 individuos, se toman 13 del modo explicado para formar parte del subcomplejo, estos 13 puntos evolucionarán mediante el Algoritmo de Nelder y Mead, pero los otros 7 puntos esperarán pacientes y en su estado inicial el regreso de los 13 que partieron. Una vez que los 13 evolucionaron, se juntan con los otros 7 y vuelven a sumar 20 individuos en el complejo. Pero 13 de esos 20 individuos del complejo ya no son los de antes, por lo tanto tienen distinto valor de FO y en consecuencia es necesario volver a ordenarlos para poderlos pesar nuevamente y continuar con el proceso.

Ordenamiento de los puntos del Complejo.

Los puntos del nuevo complejo son reordenados de mejor a peor, o sea, de menor a mayor valor de la FO. Una vez reordenados, se les vuelve a asignar un peso, se vuelve a elegir un subcomplejo, y se vuelve a someter al subcomplejo al algoritmo de Nelder y Mead, y así sucesivamente un número “b” de veces. En otras palabras, se repite del paso “a” al paso “d” un número “b” de veces.

Durante la Evolución Competitiva Compleja, se han elegido y vuelto a mezclar en el complejo “b” veces subcomplejos, cada uno de los cuales fue sometido “a” veces al algoritmo de Nelder y Mead. Al cabo de la misma, el complejo ha evolucionado hacia nuevos individuos distintos a los que salieron.

4.2.2. ALGORITMO DE NELDER Y MEAD

El Algoritmo de Nelder y Mead es un método de búsqueda local que se lleva a cabo dirigiendo la evolución de un conjunto de individuos hacia el óptimo local. Una vez que el subcomplejo ha sido seleccionado del modo que se explicó previamente, será sometido a este algoritmo siguiendo los pasos que se explican a continuación.

Organización del Subcomplejo.

Los puntos del subcomplejo son organizados de mejor a peor, o sea, de menor a mayor valor de la FO. Si suponemos que nuestro subcomplejo tiene “q” individuos, entonces el primer punto será el de mejor valor de FO, y el punto q-ésimo será el peor.

Cálculo del centro de gravedad.

Se calcula el centro de gravedad de los (q-1) mejores puntos del subcomplejo, mediante la expresión:

$$g = \frac{1}{q-1} \sum_{j=1}^{q-1} u_j \quad (4.25)$$

Donde u_j es el vector posición del individuo j -ésimo, y g es el vector de coordenadas del centro de gravedad de los $q-1$ mejores puntos.

Notar que si fuesen dos parámetros del modelo, u_j sería un vector con dos coordenadas, o sea, cada punto del subcomplejo sería un punto en el plano cuya evolución podría visualizarse. Si fuesen tres parámetros, sería un subcomplejo que evoluciona en el espacio. Más de tres coordenadas no puede visualizarse, ni imaginarse, pero sí pueden realizarse proyecciones en dos dimensiones del hiperespacio, y analizar las variaciones de las funciones objetivos en estas proyecciones.

Cálculo del punto de reflexión.

Si trazamos un segmento que parta del peor punto del complejo, que pase por el centro de gravedad de los $(q-1)$ mejores puntos, y luego se prolongue más allá del centro de gravedad una distancia igual a la distancia que lo separa del peor punto, obtendremos un punto “ r ” equidistante al centro de gravedad con el peor punto. Ese punto así obtenido, se denomina punto de reflexión, y su vector de coordenadas de ubicación puede calcularse como:

$$r = 2g - u_q \quad (4.26)$$

Evaluación del punto de reflexión.

En el caso de que el punto r estuviera contenido dentro del hipercubo de validez de los parámetros, se calcula el valor de su FO y se compara con el valor de la FO del peor punto. Si es menor que aquel, el punto r reemplaza al peor, caso contrario, sigue en el paso siguiente. Ahora bien, si el punto r cayera fuera del hipercubo de validez de los parámetros, es definido el menor hipercubo que contiene todos los puntos del complejo, y se genera un nuevo punto (z) aleatoriamente en el interior de este hipercubo, el cual reemplaza al peor punto.

Cálculo del punto de contracción.

Como se dijo en el paso anterior, si r fuese peor que el peor punto del subcomplejo, se calculan las coordenadas de un nuevo punto “ c ” denominado punto de contracción, y sus coordenadas son calculadas de acuerdo con la ecuación:

$$c = \frac{(g + u_q)}{2} \quad (4.27)$$

Este punto está ubicado sobre el segmento que une el centro de gravedad de los $(q-1)$ mejores puntos y el peor punto, equidistante a ambos.

Evaluación del punto de contracción.

Se evalúa la función objetivo del punto c . Si es menor que el peor punto del subcomplejo, reemplazará a este, en caso contrario, es definido el menor hipercubo que contiene todos los puntos del complejo, y se genera aleatoriamente en su interior un nuevo punto (z).

En síntesis, el algoritmo consiste en sustituir el peor punto del subcomplejo por otro punto. Para lo cual, calcula un punto de reflexión en dirección al baricentro de los mejores puntos. Si se escapa del hipercubo, genera aleatoriamente un punto en su interior y reemplaza al peor. Si no, se analiza si el punto de reflexión es peor que el peor del subcomplejo, siendo así, genera el de contracción. Si este también es peor, define el menor hipercubo que contiene a los puntos del subcomplejo y genera aleatoriamente un punto en su interior. Pero, si el de reflexión (prioritariamente) o el de contracción, son mejores que el peor del subcomplejo, reemplaza al peor, por uno de estos.

Debe notarse que en el método descrito de búsqueda del punto óptimo, se da la oportunidad de subsistir y reproducirse a todos los individuos de la población. Por ejemplo, en la construcción del Complejo, no se descarta ningún punto, sino que en cada complejo hay puntos buenos y malos. En la selección del subcomplejo, se da la oportunidad de salir elegido a todos los puntos del complejo, aún a los peores. De acuerdo al criterio de selección del subcomplejo, podría elegirse como reproductor al peor punto inclusive. Estos criterios, a primera vista contradictorios (ya que permiten la supervivencia de los puntos malos, cuando se buscan los buenos), tienen una propiedad

muy interesante que se resume en una palabra: variabilidad. A través de este método se incursiona en todo el hiperespacio de validez de los parámetros, dando la posibilidad que el modelo se optimice localmente aún en las proximidades de los puntos malos.

4.2.3. PASOS DEL MÉTODO

Generación de la población inicial

Se establece el rango de validez de los parámetros del modelo matemático, que definen un hipercubo de validez de los parámetros. Luego, se genera aleatoriamente una población de puntos con distribución probabilística uniforme en su interior.

Por ejemplo, si se estuviese calibrando un modelo de dos parámetros ($P1$ y $P2$), cada uno de ellos tendría su rango de validez, de tal modo que se cumpla para cualquier punto $(P1, P2)$ de la población inicial, que:

$$P1_{\min} \leq P1 \leq P1_{\max} \quad (4.28)$$

$$P2_{\min} \leq P2 \leq P2_{\max} \quad (4.29)$$

De tal modo que la zona de validez de los valores de los parámetros está dada por un espacio de dos dimensiones (plano), como lo muestra la Figura 4.3.

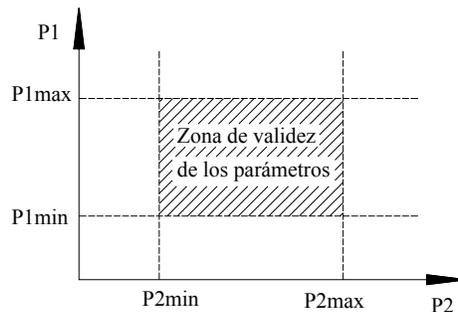


Figura 4.3. Zona de validez de los parámetros del modelo, (Alonso, 2008).

En la Figura 4.4, pueden observarse cuatro puntos A, B, C y D generados aleatoriamente con distribución uniforme en este espacio bidimensional asociado al supuesto modelo hidrológico de dos parámetros $P1$ y $P2$. Cada punto generado tiene asociado un valor de cada parámetro, así el punto B por ejemplo tiene asociado un valor de $P1$, que se ha denominado $P1B$, y uno de $P2$, denominado $P2B$. Como puede verse, el punto B satisface las desigualdades (4.28) y (4.29), que constituyen las restricciones del problema en cuestión, del mismo modo que lo hace el punto C. Mientras que los puntos A y D, están

fuera de la zona de validez determinada por las restricciones (4.28) y (4.29), por lo tanto no son puntos válidos y no pueden ser considerados en la población.

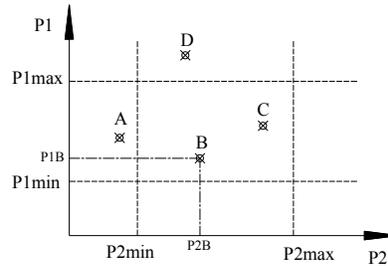


Figura 4.4. Puntos válidos y no válidos (Alonso, 2008).

Si en vez de tratarse de un modelo de dos parámetros, fuese de tres, la zona de validez de los parámetros estaría definida entonces por un espacio de tres dimensiones, tal que los puntos en su interior cumplirían con las condiciones (4.28) y (4.29), más la siguiente:

$$P3_{\min} \leq P3 \leq P3_{\max} \quad (4.30)$$

Extrapolando esta idea a cuatro, cinco y más parámetros, se puede imaginar la existencia de un hipercubo de n dimensiones, que naturalmente no puede visualizarse, dentro del cual pueden caer los puntos aleatoriamente generados. Por ejemplo, el modelo hidrológico GR tiene cuatro parámetros, cada uno de los cuales tiene un rango dentro del cual puede tomar valores posibles o con sentido físico. Una generación aleatoria de puntos para los parámetros del modelo GR, debería caer dentro del hipercubo limitado por los rangos de variación admisibles de estos cuatro parámetros. De este modo, cada punto generado en el interior del hipercubo de validez de los parámetros, tiene asociado un juego de valores de los parámetros del modelo a calibrar, que constituyen las coordenadas de este punto. Por ejemplo, si el modelo tiene cuatro parámetros, cada punto tiene cuatro valores asociados (que son sus coordenadas en este espacio hiperdimensional), cada uno de los cuales corresponde a cada uno de los parámetros. Si hemos asignado a cada parámetro un valor dentro de su rango de validez, entonces los cuatro valores definirán un punto que caerá indudablemente en el interior del hipercubo imaginario.

La generación de puntos en el hiperespacio sigue, en este método, una ley uniforme de distribución probabilística, pero también podría pensarse en una generación aleatoria

con distribución normal, o triangular por ejemplo. Para ello se emplea, por ejemplo, el Método de MonteCarlo.

Cada punto, de este modo generado, es un individuo de una población primitiva y original que se dispone a evolucionar. Es decir, esta población irá evolucionando mediante un reemplazo de sus individuos por otros generados de algún modo. Luego de la evolución, la población resultará ser otra población nueva con otros, pero igual número, de individuos finales.

Clasificación y ordenamiento de los individuos de la población. Para realizar la clasificación se evalúa cada una de las FO para cada uno de los puntos de la población. Luego de la evaluación resultarán puntos que tienen menor valor que otros en todas las funciones objetivos, en cuyo caso no cabe duda que estos puntos son mejores que los otros. Pero el problema se plantea cuando se observa que hay puntos que tienen menor valor que otro en algunas FO, pero mayor en otras FO. No puede establecerse un orden de prioridad si hay puntos mejores que otros con el criterio de una de las FO, pero peores con el criterio de la otra. Por ejemplo, supóngase que se tiene dos FO, denominadas FO1 y FO2. Si un punto A tiene menor valor de FO1 que otro B, pero mayor valor de FO2, entonces no puede decirse que A es mejor que B, ni tampoco que B es mejor que A. Entonces surgen los conceptos de puntos Dominados y puntos No Dominados.

Son puntos Dominados aquellos tales que existe otro punto que es mejor que ellos en todas las FO. Y por consiguiente, los restantes puntos son No Dominados. Entonces, se eligen todos los puntos no dominados de la población y se dice que forman el Nivel 1. Una vez que se retiran de la población esos puntos no dominados, habrá ahora, otros puntos que son dominados, y otros no dominados. Entonces se retiran los nuevos puntos no dominados y se dice que pertenecen al Nivel 2. Una vez retirados estos puntos no dominados, se toman los restantes y se identifican los nuevos puntos no dominados, y así sucesivamente, hasta que resulte un conjunto de puntos tal que todos ellos son no dominados.

De acuerdo al esquema de jerarquización antes explicado, en cada nivel habrá un conjunto de puntos. Se dice que los puntos del nivel 1, son todos mejores que los puntos del nivel 2, y estos mejores que los del nivel 3, y así sucesivamente. Pero no hay manera de identificar cuál de los puntos del nivel 1 es el mejor. Puede suponerse que todos los

puntos de un mismo nivel tienen la misma jerarquía. El ranking de este modo logrado se denomina Ranking de Pareto.

Construcción de complejos. Una vez que los puntos de la población se han jerarquizado en niveles, se les atribuye peso a cada uno de los puntos. Todos los puntos de un mismo nivel tendrán el mismo peso, pero mayor peso que los puntos de niveles inferiores. Por ejemplo, los puntos del nivel 4 tendrán mayor peso que los del nivel 5.

Luego se eligen tantos complejos como puntos tiene el último nivel. Por ejemplo, supongamos que luego de la jerarquización, se obtengan 8 niveles, y que en el nivel octavo (el último) hayan quedado 25 puntos de la población. Entonces, deben elegirse 25 complejos de la población, tales que, cada complejo debe tener uno de los puntos del último nivel y el resto de los puntos del complejo se eligen de la población aleatoriamente, pero dándole mayor probabilidad de ser elegido a los que tienen mayor peso, o sea, a los mejores. Si, por ejemplo, cada complejo debe tener 12 puntos, entonces, uno de esos será uno de los 25 correspondientes al último nivel (en nuestro ejemplo, al octavo nivel), y cada uno de los restantes 11 puntos que falta agregar, se eligen de la población en forma aleatoria, pero ponderada, dándole mayor probabilidad de ser elegido a los de mejor nivel.

Evolución independiente de cada complejo. Una vez que la muestra ha sido separada en p complejos, se da a cada complejo la oportunidad de evolucionar en forma independiente mediante la Evolución Competitiva Compleja. Con la diferencia de que no se eligen subcomplejos, sino que evolucionan los complejos mismos de acuerdo a Nelder y Mead. Se repite para cada complejo varias veces el algoritmo de Nelder y Mead. Pero como hay dos funciones objetivos el criterio de aceptación de un punto en el algoritmo de Nelder y Mead es que sea no dominado. Por ejemplo, cuando se genera el punto de reflexión, se verifica que no haya ningún punto que tenga menor valor en ambas FO; si es así, entonces se acepta el punto, puesto que es no dominado. Cuando los complejos han evolucionado independientemente, se devuelven a la población que ya está más optimizada, y se vuelve al paso 2, es decir, se vuelven a ordenar y jerarquizar, etc.

Los pasos del 1 al 4 descriptos se repiten hasta que no sea posible encontrar puntos dominados. Es decir que todos los puntos de la población se encuentren en el nivel 1 del ranking de Pareto. Como consecuencia, el resultado final de este algoritmo no es un

punto óptimo, como lo era el SCE, sino una población óptima de puntos que forma la región de Pareto.

5. RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS

En este capítulo se realiza inicialmente una exposición de los criterios adoptados para definir la escala temporal de estudio con la cual debe abordarse la modelación de cada cuenca hidrográfica.

Posteriormente, se lleva adelante una breve presentación de cada una de las cuencas en estudio:

- San Antonio, en la provincia de Córdoba.
- Gualeguaychú, en la provincia de Entre Ríos.

Dentro de cada cuenca se realiza una descripción de los datos originales recolectados, y el procesamiento de esa información a los fines de que alcancen la calidad necesaria para ser empleado como datos de entrada de un modelo hidrológico.

Cabe destacar que, durante el periodo de esta práctica supervisada, sólo fue posible llevar la calidad de los datos al estado final requerido para modelación, en el caso del río San Antonio. En el caso del Gualeguaychú, no fue posible concretar esta tarea debido a que los datos procesados todavía adolecen de confiabilidad y por lo tanto las series obtenidas presentan mucha incertidumbre. Sin embargo, se dejó planteado el procedimiento a seguir para la depuración de esta información, por lo que podrá avanzarse sin dificultad en futuras instancias, y llegar finalmente a la calidad requerida.

El procesamiento de los datos referido previamente, para ambas cuencas, consistió en la estimación de las variables de entrada del modelo hidrológico descrito en el capítulo 4. Como se indicó en dicha descripción de modelo Génie Rural, es necesario contar con series continuas de Precipitación (P), Evapotranspiración (E) y Caudal observado (Q), para permitir la calibración del mismo, y su posterior verificación.

Ahora bien, como se verá posteriormente, existen algunas razones que obligan a un tratamiento de la información para la obtención de la serie definitiva, como son las siguientes:

- Las variables no siempre son medidas en forma directa. Normalmente, sólo la precipitación se mide en la misma unidad en que se requiere en el modelo. El

caudal en cambio, se deduce en general de los niveles, y la Evapotranspiración potencial, se deduce al menos de la temperatura.

- Las variables medidas no siempre son registradas en el paso de tiempo requerido. A veces, se mide en pasos de tiempo mayor o menor, lo cual obliga a interpolar, o agrupar respectivamente. Dependiendo del tipo de variable será distinto el tratamiento.
- Normalmente hay periodos no registrados, que hay que rellenar con algún criterio, o simplemente no se dispone, y produce una interrupción en la serie.
- Existe un alto grado de incertidumbre asociado a los datos. Esto se manifiesta normalmente cuando se contrasta precipitación con caudal. Se supone que estas dos variables tienen implícitas una relación causa-efecto que debe observarse en la mayor parte de los eventos al menos. Estas falencias en los datos son originados por múltiples causas que no interesa abordar a los fines de este estudio, pero sí purgar los errores para llevar adelante la calibración con datos confiables.

En consecuencia, se procedió a analizar la información y trabajar en cada uno de los aspectos manifestados, a los fines de propender a series, o tramos de estas, confiables.

5.1. CONSIDERACIONES SOBRE EL PASO DE TIEMPO ADOPTADO

El tiempo de respuesta de una cuenca depende de ciertos factores como la pendiente de la cuenca y los cauces, la bifurcación del sistema de drenaje, la permeabilidad del suelo, la longitud de su cauce principal, etc.

En cuanto a la pendiente se puede señalar que cuanto mayor sea esta más rápida será la respuesta de la cuenca.

La bifurcación del sistema de drenaje se puede indicar con el orden de corrientes. El orden de corrientes se determina como se muestra en la figura 5.1. Una corriente de orden 1 es un tributario sin ramificaciones, una de orden 2 tiene solo tributarios de primer orden, etc. Dos corrientes de orden 1 forman una de orden 2, dos corrientes de orden 3 forman una de orden 4, etc., per por ejemplo una corriente de orden 2 y una de orden 3 forman otra de orden 3. El orden de una cuenca es el mismo que el de la

corriente principal en su salida; así, por ejemplo el orden de la cuenca de la Figura 5.1. es 4.

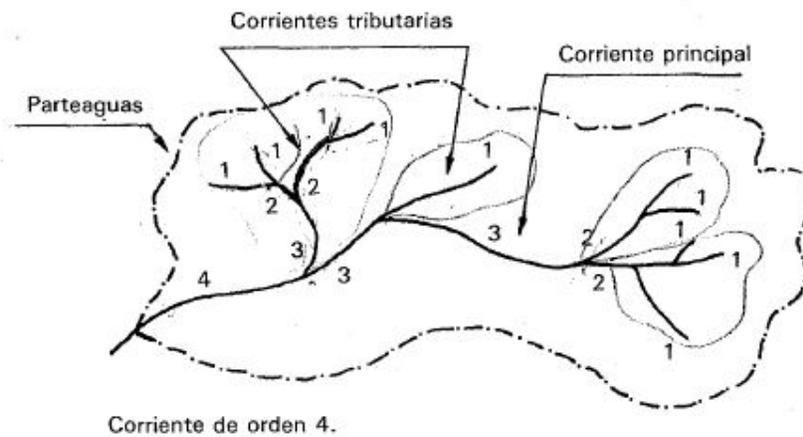


Figura 5.1. Cuenca hidrológica, (Mijares, 1992)

Otro indicador del grado de bifurcación son: la densidad de corrientes D_s , definida como el número de corrientes perennes e intermitentes por unidad de área y la densidad de drenaje D_d , definida como la longitud de corrientes por unidad de área.

Un orden de corriente alto o una densidad elevada refleja una cuenca altamente disectada, que responde rápidamente a una tormenta.

La elección de una escala de tiempo adecuada entre datos sucesivos de la serie continua es de suma importancia. Si el paso de tiempo elegido es más largo que el necesario, se corre el riesgo de perder información. Esto se ilustra en la Figura 5.2, donde se muestra la variación del caudal de un río durante un periodo de un día. Resulta evidente que si en una cuenca con una respuesta como esta se eligiese tomar un dato diario se podría perder información valiosa como ser el pico del hidrograma. Analizado esto, se podría concluir en que resultaría más conveniente detallar la información con paso de tiempo menor, por ejemplo horario. Como caso contrario, se podría elegir tomar un dato cada una unidad de tiempo menor a una hora, supongamos un dato cada 15 min. Si bien no se perderá información como en el caso anterior, puede ocurrir que se incurra en elevar el costo computacional sin una mejora importante en cuanto a la información obtenida, por lo tanto elegir una unidad de tiempo menor a una sería contraproducente.

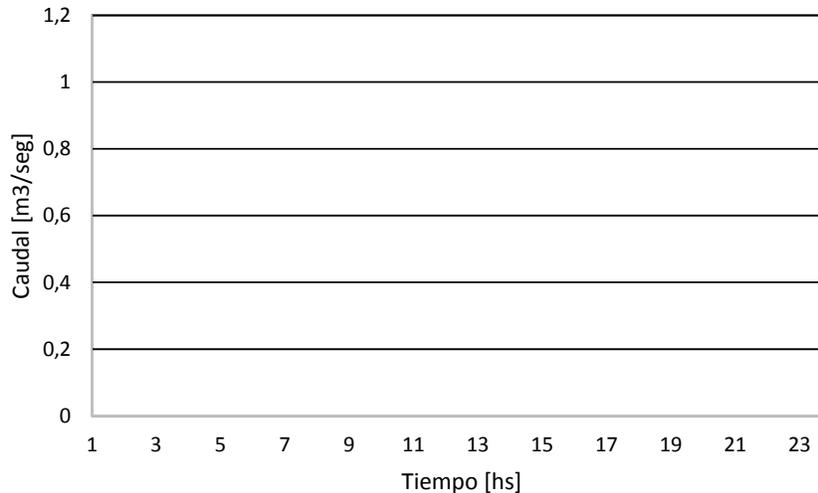


Figura 5.2. Hidrograma.

Por lo expuesto, y en función de las características propias de las cuencas en estudio se optó lo siguiente:

- Para la cuenca del río San Antonio se adoptó un paso de tiempo horario ya que la misma es una cuenca relativamente pequeña sobre vegetación degradada con terrenos someros de alta pendiente (Catalini et al, 2010).
- Para la cuenca del arroyo Gualaguaychú, se consideró interesante efectuar un estudio comparativo de los resultados obtenidos operando con 2 pasos de tiempos diferentes, diario y horario.

5.2. CUENCA DEL RIO SAN ANTONIO

5.2.1. DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA

La cuenca del Río San Antonio (Figura 5.3) se ubica a unos 30 km al Oeste de la ciudad de Córdoba, sobre la ladera Oriental de las Sierras Grandes, componentes del sistema de las Sierras Pampeanas de la Provincia de Córdoba, Argentina. Geográficamente, está posicionada entre los 64º 30' y 64º 52' de longitud oeste y entre los 31º 24' y 31º 36' de latitud sur, a una altitud promedio de 1500m s.n.m.

La cuenca cuenta con un área de aporte de 328 Km², en la sección de aforo de la estación 700, que se encuentra en la confluencia de los ríos Icho Cruz y El Cajón, como lo muestra la Figura 5.4.. En la estación 600, el área de aporte asciende a 492 Km², y finalmente a

509 Km² en su desembocadura en el lago San Roque. El cauce principal, denominado San Antonio, en su recorrido a través de la cuenca, atraviesa las localidades de Cuesta Blanca, Icho Cruz, Tala Huasi, Mayu Sumaj y San Antonio, hasta ingresar por el sur a la ciudad de Villa Carlos Paz, en donde descarga sus aguas al lago San Roque.

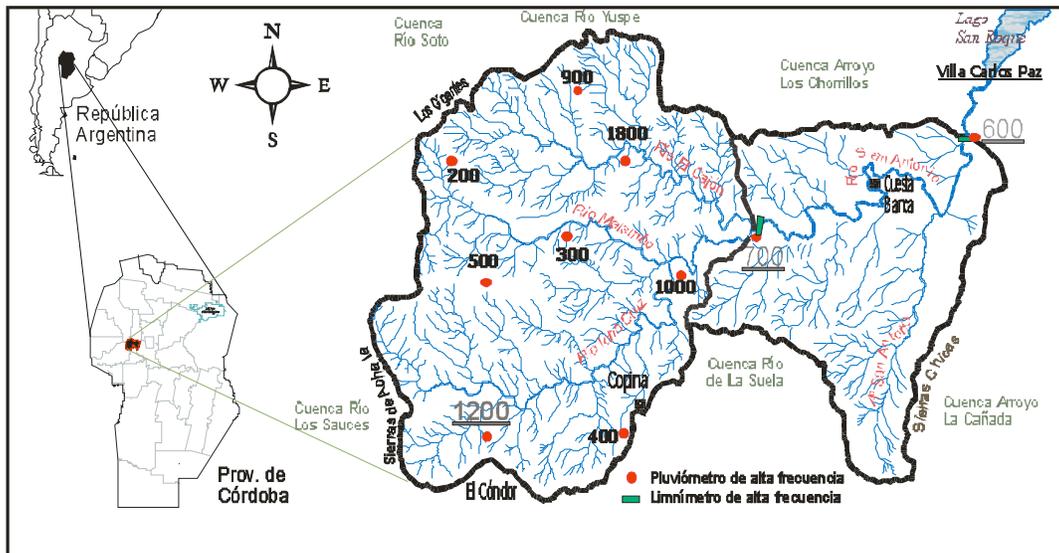


Figura 5.3. Ubicación de la cuenca del río San Antonio (CIRSA, 2003)

El clima es del tipo semiárido. Presenta uniformidad térmica con concentración en la temporada estival de altas temperaturas y precipitaciones. La precipitación media anual oscila los 850 mm, con una concentración de lluvias torrenciales en el período de octubre a marzo (Rodríguez, 2004).

Una de las características que le otorga mayor importancia al Río San Antonio es la de constituirse en el principal tributario del Lago San Roque. Este lago es actualmente la principal fuente de agua potable para la Ciudad de Córdoba.

Otra característica atendible está representada por la peligrosa combinación de una importante afluencia turística a las costas de este río, junto con importantes, violentas y rápidas crecidas en la misma época veraniega. La cuenca del río San Antonio posee fuertes pendientes, un punto de salida bien definido, clara divisoria de aguas, baja permeabilidad y altos índices de escorrentía. La combinación de los factores anteriormente expuestos con las tormentas intensas generadas en el período estival, da como resultado la generación de hidrogramas de crecidas repentinos (tiempo de concentración pequeño), de altos valores de caudal pico y de corta duración. Estas

crecidas se producen normalmente en la época del pico turístico en esta zona del valle de Punilla.

Debido a la rapidez de respuesta señalada, se decidió que un paso de tiempo horario entre datos sucesivos sería el apropiado para analizar esta cuenca.

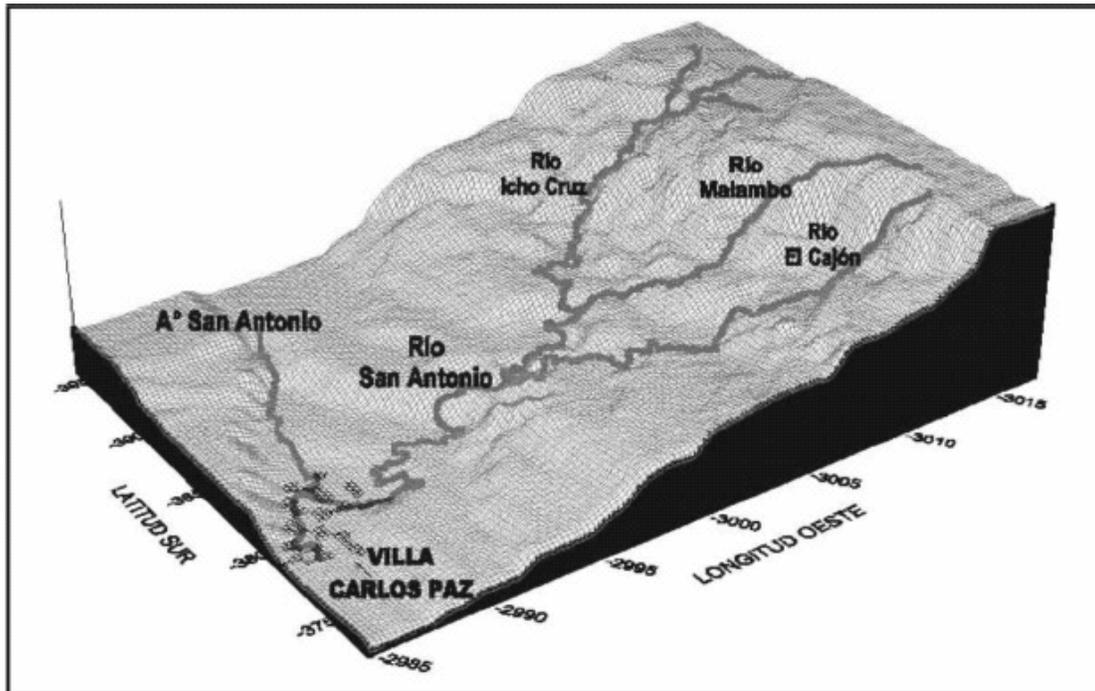


Figura 5.4. Perfil de la Cuenca y tributarios del Río San Antonio (CIRSA, 2003)

5.2.2. PRECIPITACIÓN

La cuenca del río San Antonio, se encuentra monitoreada en forma remota, (desde inicios de la década de 1990) por una red hidrometeorológica compuesta de 13 estaciones automáticas (Figura 5.5 y tabla 5.1), las cuales son capaces de medir distintas variables hidrometeorológicas a tiempo real, como por ejemplo: lámina de lluvia precipitada, niveles de agua en ríos, temperatura del aire, humedad relativa ambiente, velocidad y dirección del viento, presión barométrica, radiación solar incidente y evaporación entre otros. Esta información histórica disponible cuenta con una muy buena calidad y densidad espacial de los registros. Los pluviómetros de alta frecuencia (PAF) con los que cuentan estas estaciones registran series de tiempo de los valores unitarios de milímetros precipitados en eventos lluviosos. Estos datos son transmitidos en tiempo real al centro del INA-CIRSA emplazado en la ciudad de Villa Carlos Paz.

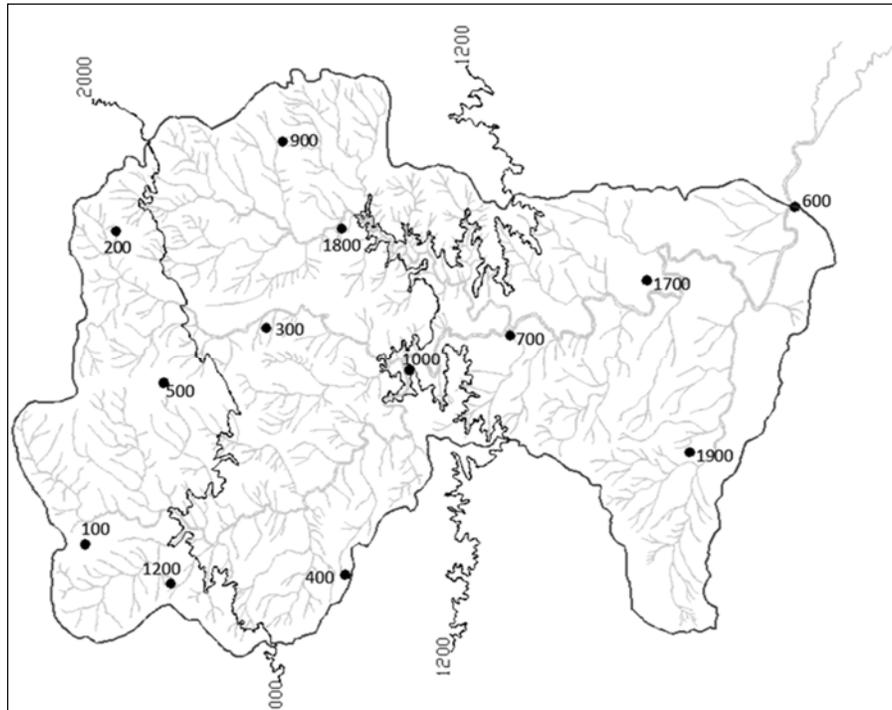


Figura 5.5. Cuenca del río San Antonio, red de estaciones hidrometeorológicas. Se representan además las isolíneas 1.200 y 2.200 m de altitud sobre el nivel del mar. (Catalini et al., 2010)

Código en el Sistema	Denominación de la Estación	Latitud [WSG1984]	Longitud [WSG1984]	Altitud [msnm]
100	Santo Tomas	-31,57	-64,83	2.250
200	Puesto Pereyra	-31,45	-64,81	2.292
300	La Casita	-31,48	-64,74	1.555
400	Cañada Larga	-31,58	-64,71	1.740
500	El Galpón	-31,51	-64,82	2.380
600	Bo, El Canal	-31,40	-64,47	675
700	Confluencia El Cajón	-31,49	-64,64	760
900	Puesto Garay	-31,42	-64,74	1.625
1000	Confluencia Malambo	-31,50	-64,68	1.340
1200	Las Enseñadas	-31,60	-64,79	2.286
1700	La Quebrada	-31,49	-64,60	918
1800	El Cajón	-31,44	-64,69	1.280
1900	Las Jarillas	-31,53	-64,55	838

Tabla 5.1. Pluviómetros de alta frecuencia instalados en la cuenca del río San Antonio, denominación, emplazamiento y altitud relativa, (INA-CIRSA).

Se dispuso de información registrada por diez de las trece estaciones pluviométricas a instancia del trabajo del Dr. Ing. Cesar García, quién procesó (García et al., 2012 y García, 2013) la información básica recibida del sistema de monitoreo, empleando la

herramienta de manejo de datos on-line en la página <http://leutra.geogr.uni-jena.de/cirsaRBIS>. Esta información incluye la lámina de precipitación acumulada por hora y el porcentaje de datos disponible en esa hora. La información comprende un periodo de 15 años de duración, el cual inicia el 1 de enero de 1994 y finaliza el 31 de enero de 2009. Durante este tiempo se presentan periodos sin registros entre las fechas que se señalan a continuación:

- 28/02/1995 - 06/03/1995
- 01/09/2005 - 30/11/2005
- 31/10/2006 - 1/12/2006
- 31/12/2007 - 04/01/2008

Durante esos periodo, no se encuentran registro en ninguna de las diez estaciones pluviométricas, por lo que se rellenó la serie como si no hubiesen ocurrido precipitaciones, es decir con 0 mm de precipitación acumulada por hora transcurrida.

La información se recibió con formato de archivo .txt(Figura 5.6) por lo que en primera instancia se la transformó en formato .xlsx para que puedan ser utilizados en Excel, lo cual resultó una herramienta clave para el procesamiento.

```
#Download source:San Antonio RBIS#Date:2010-12-13#Username:Cesar Luis Garcia#Dataset title:Rain-100#Station name:100#Latitude:-31.56527778#Longitude:-64.82637271#Spatial Re
-08 12:00 0 100 2006-03-08 13:00 0 100 2006-03-08 14:00 0 100 2006-03-08 15:00 1 100 2006-03-08 16:00
2006-03-10 07:00 0 100 2006-03-10 08:00 0 100 2006-03-10 09:00 0 100 2006-03-10 10:00 0 100 2006-03-10 1
0 100 2006-03-12 02:00 0 100 2006-03-12 03:00 0 100 2006-03-12 04:00 0 100 2006-03-12 05:00 0 100
3 20:00 0 100 2006-03-13 21:00 0 100 2006-03-13 22:00 0 100 2006-03-13 23:00 0 100 2006-03-14 00:00 0
006-03-15 15:00 0 100 2006-03-15 16:00 0 100 2006-03-15 17:00 0 100 2006-03-15 18:00 0 100 2006-03-15 19:00
0 100 2006-03-17 10:00 0 100 2006-03-17 11:00 0 100 2006-03-17 12:00 0 100 2006-03-17 13:00 0 100
9 04:00 0 100 2006-03-19 05:00 0 100 2006-03-19 06:00 0 100 2006-03-19 07:00 0 100 2006-03-19 08:00 0
006-03-20 23:00 0 100 2006-03-21 00:00 0 100 2006-03-21 01:00 0 100 2006-03-21 02:00 0 100 2006-03-21 03:00
0 100 2006-03-22 18:00 0 100 2006-03-22 19:00 0 100 2006-03-22 20:00 0 100 2006-03-22 21:00 0 100
4 12:00 0 100 2006-03-24 13:00 0 100 2006-03-24 14:00 0 100 2006-03-24 15:00 0 100 2006-03-24 16:00 0
006-03-26 07:00 0 100 2006-03-26 08:00 0 100 2006-03-26 09:00 0 100 2006-03-26 10:00 0 100 2006-03-26 11:00
0 100 2006-03-28 02:00 0 100 2006-03-28 03:00 0 100 2006-03-28 04:00 0 100 2006-03-28 05:00 0 100
9 20:00 0 100 2006-03-29 21:00 0 100 2006-03-29 22:00 0 100 2006-03-29 23:00 0 100 2006-03-30 00:00 0
006-03-31 15:00 0 100 2006-03-31 16:00 0 100 2006-03-31 17:00 0 100 2006-03-31 18:00 0 100 2006-03-31 19:00
0 100 2006-04-02 10:00 1 100 2006-04-02 11:00 2 100 2006-04-02 12:00 3 100 2006-04-02 13:00 3 100
4 04:00 0 100 2006-04-04 05:00 0 100 2006-04-04 06:00 0 100 2006-04-04 07:00 0 100 2006-04-04 08:00 0
006-04-05 23:00 0 100 2006-04-06 00:00 0 100 2006-04-06 01:00 0 100 2006-04-06 02:00 1 100 2006-04-06 03:00
0 100 2006-04-07 18:00 0 100 2006-04-07 19:00 0 100 2006-04-07 20:00 0 100 2006-04-07 21:00 5 100
9 12:00 0 100 2006-04-09 13:00 0 100 2006-04-09 14:00 0 100 2006-04-09 15:00 0 100 2006-04-09 16:00 0
006-04-11 07:00 0 100 2006-04-11 08:00 0 100 2006-04-11 09:00 0 100 2006-04-11 10:00 0 100 2006-04-11 11:00
0 100 2006-04-13 02:00 0 100 2006-04-13 03:00 0 100 2006-04-13 04:00 0 100 2006-04-13 05:00 0 100
4 20:00 0 100 2006-04-14 21:00 0 100 2006-04-14 22:00 0 100 2006-04-14 23:00 0 100 2006-04-15 00:00 0
006-04-16 15:00 0 100 2006-04-16 16:00 0 100 2006-04-16 17:00 0 100 2006-04-16 18:00 0 100 2006-04-16 19:00
0 100 2006-04-18 10:00 0 100 2006-04-18 11:00 0 100 2006-04-18 12:00 0 100 2006-04-18 13:00 0 100
0 04:00 0 100 2006-04-20 05:00 0 100 2006-04-20 06:00 0 100 2006-04-20 07:00 0 100 2006-04-20 08:00 0
```

Figura 5.6. Archivo de información base formato txt.

Posteriormente se ordenó en una planilla Excel los datos encolumnados por cada estación de manera que a cada fila le corresponda un mismo tiempo para todas las estaciones (Figura 5.7).

Día	Mes	Año	Hora	Est 1800	Est 1200	Est 1000	Est 900	Est 700	Est 600	Est 500	Est 400	Est 300	Est 200
				mm acum x hora									
29	7	1994	10:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	7	1994	11:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	7	1994	12:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	7	1994	13:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	7	1994	14:00:00	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
29	7	1994	15:00:00	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
29	7	1994	16:00:00	0	3	0	0	0	0	1	0	0	0
29	7	1994	17:00:00	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
29	7	1994	18:00:00	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
29	7	1994	19:00:00	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
29	7	1994	20:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	7	1994	21:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	7	1994	22:00:00	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
29	7	1994	23:00:00	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
30	7	1994	00:00:00	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
30	7	1994	01:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	7	1994	02:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	7	1994	03:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	7	1994	04:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	7	1994	05:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	7	1994	06:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	7	1994	07:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	7	1994	08:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	7	1994	09:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	7	1994	10:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 5.7. Datos de precipitaciones ordenados.

En general, la altura de lluvia que cae en un sitio dado difiere de la que cae en los alrededores aun en sitios cercanos, esto se hace evidente si se observa la figura 5.7. Los aparatos como los pluviógrafos o pluviómetros, registran la lluvia puntual, es decir la que ocurre en el punto en que está instalado el aparato y para los cálculos ingenieriles, es necesario conocer la lluvia media en toda la cuenca.

Los polígonos de Thiessen es un método que permite calcular la lluvia media. Este se representa en la Figura 5.8, y consiste en realizar lo siguiente:

1. Unir, mediante una línea recta las estaciones dibujadas sobre un plano de la cuenca. Con ello se forman triángulos en cuyos vértices están las estaciones pluviométricas.
2. Trazar líneas rectas que bisectan los lados de los triángulos. Por geometría elemental, las líneas correspondientes a cada triángulo convergerán en un solo punto.
3. Cada estación pluviométrica quedará rodeada por líneas rectas generadas en el paso 2, que forman los llamados polígonos de Thiessen y en algunos casos, en parte por el parteaguas de la cuenca.

El área encerrada por los polígonos de Thiessen y el parteaguas será el área de influencia de la estación correspondiente.

4. La lluvia media se calcula entonces como un promedio pesado de las precipitaciones registradas en cada estación, usando como peso el área de influencia correspondiente:

$$\bar{P} = \frac{1}{A_T} * \sum_{i=1}^n A_i * P_i \quad (5.1)$$

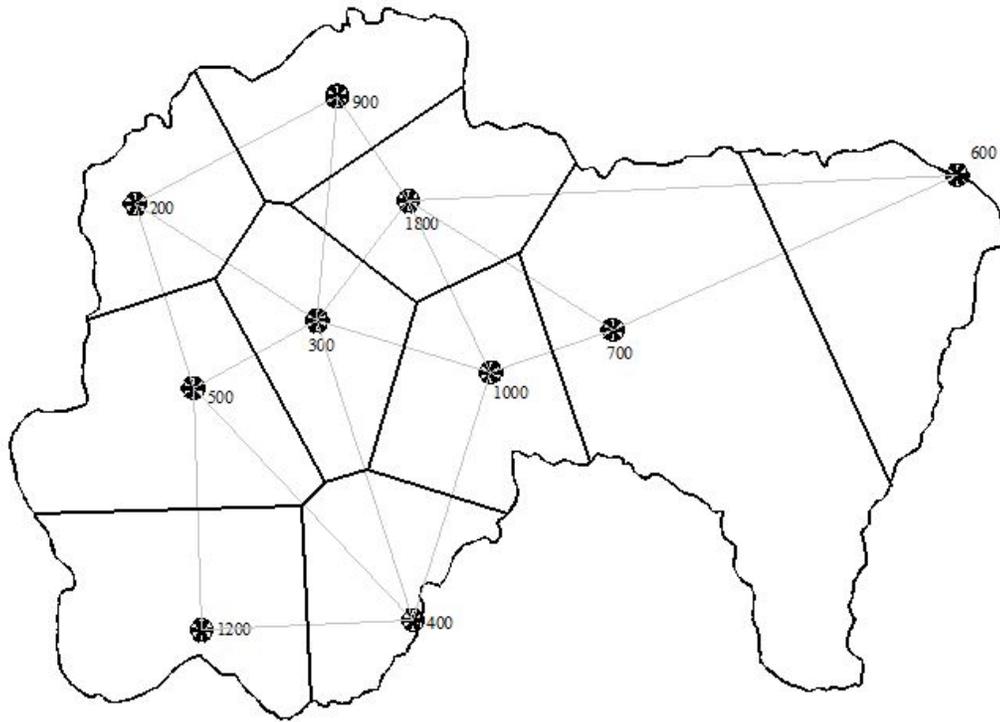


Figura 5.8. Polígonos de Thiessen con 10 estaciones utilizadas para el análisis de precipitación del Río San Antonio.

Como sucede generalmente en la práctica, no todas las estaciones contaban con datos durante todo el periodo, por lo que para calcular la precipitación media de la cuenca se debió encontrar cuales eran las estaciones que se debían combinar en los diferentes periodos. Se encontraron así 62 combinaciones de estaciones diferentes y para cada combinación, se dibujaron los polígonos de Thiessen. Una vez dibujados los polígonos se obtuvieron las áreas de influencia de cada estación para finalmente calcular la precipitación media de la cuenta con la ecuación 5.1.

A continuación en la figura 5.9 se muestran algunas de las combinaciones nombradas precedentemente.

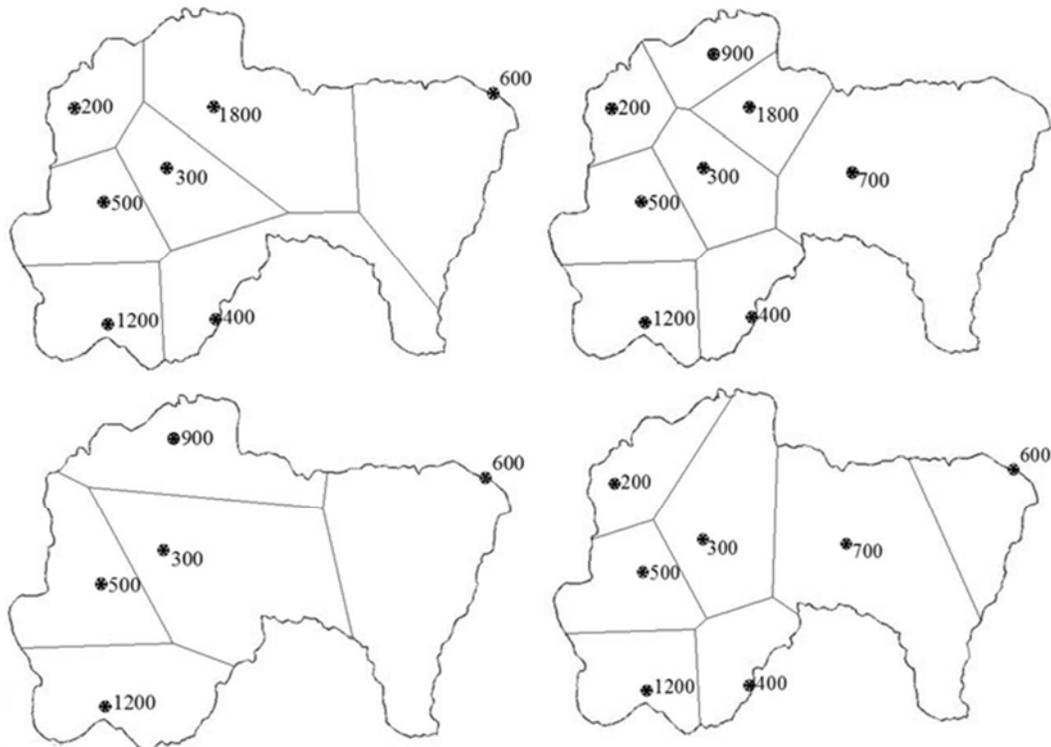


Figura 5.9. Ejemplos de polígonos confeccionados.

5.2.3. DETERMINACIÓN DE LA CURVA H-Q

Las series de caudales son poco habituales en Argentina. Normalmente se dispone de series de niveles, y algunos caudales aforados en campañas de aforo específicas que permite estimar una curva altura-caudal (mejor conocida como curva H-Q) en alguna sección estable del río. Por ello para obtener los caudales fue necesario la confección de una curva H-Q.

Aforos disponibles

Para transformar los niveles a caudales, si bien el CIRSA había brindado una curva de transformación, se confeccionó una curva diferente, con el fin de obtener un mejor ajuste en los caudales transformados. Para esto se utilizaron datos de 725 aforos realizados entre 1969 y 1995. Cuando se realizaron los aforos, la lectura se hacía en escala hidrométrica, esa escala ya no existe, pero se conoce que su cero estaba ubicado más abajo que el labio del vertedero de la sección de control una magnitud igual a (-0.1167m), mientras que los datos de nivel medidos por el sensor 600 tienen como cero el labio del vertedero. Por lo tanto, antes de estimar la curva, se le resto 0.1167m a los

niveles leídos durante los aforos para que estuviesen referenciados al mismo cero que los datos base.

En la figura 5.10 se observa la información de los aforos que se usó para el análisis de la relación entre h-Q:

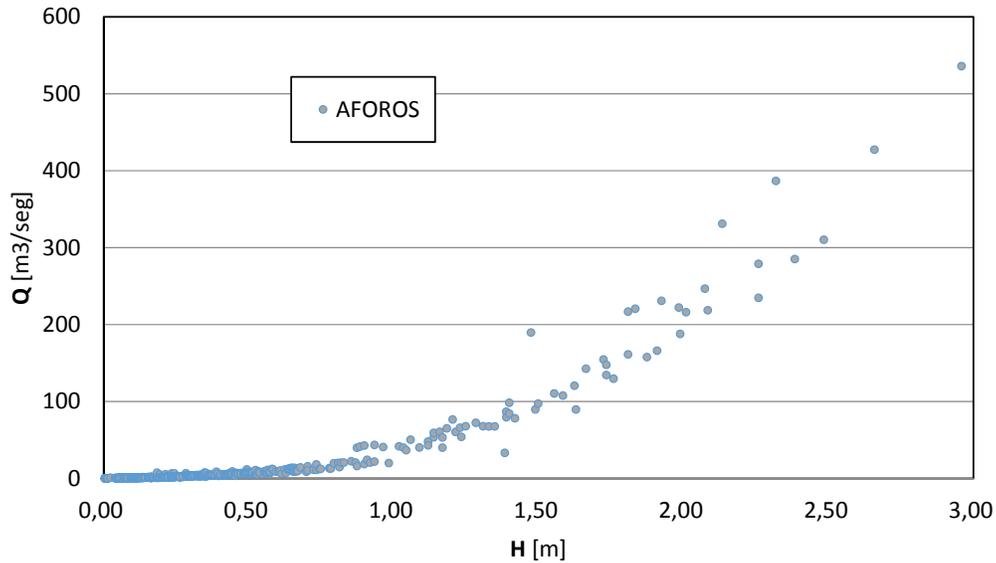


Figura 5.10. Datos de aforos realizados.

Como se puede observar, los datos presentan cierta incoherencia ya que la relación entre la altura y el caudal debería ser unívoca y en este caso para una misma altura tenemos varios niveles de caudal. Otra incoherencia que se presenta es que podemos leer para una altura un caudal menor que para una altura inferior, lo cual no sería correcto ya que la naturaleza del caso supondría que a mayor altura, mayor debería ser el caudal.

Por estas razones se debió proceder a realizar un análisis minucioso de los datos, con el fin de lograr la adecuada curva de transformación.

En primera instancia, se pensó en realizar un análisis estadístico de los datos, buscando plantear una distribución gaussiana para cada altura, y lograr manejar así rangos de confiabilidad. Esto no fue factible ya que el número de datos de caudal por altura en la mayoría de los casos no supera a 20, número que se corresponde con el mínimo de población necesario.

Alternativa N° 1: H-Q estimada a partir de caudales promedios.

Se optó por realizar un promedio de los caudales observados para cada altura y con esto se aproximó la curva que se presenta a continuación en la figura 5.11:

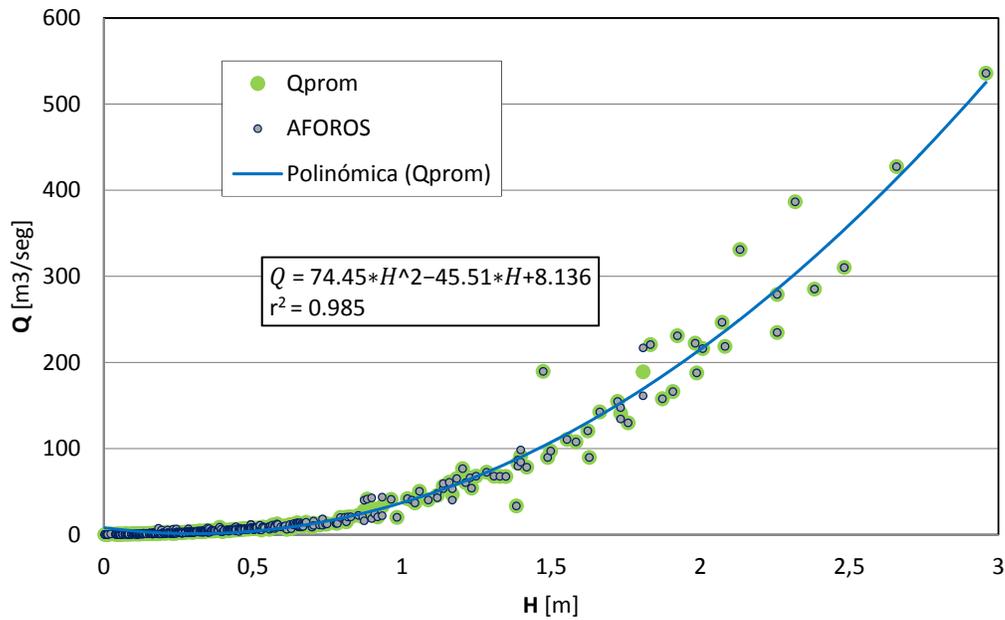


Figura 5.11. Curva altura caudal, Alternativa N° 1.

La curva responde a la ecuación:

$$Q = 74.45 * H^2 - 45.51 * H + 8.136 \quad (5.2)$$

Como se puede observar esta ecuación aproxima bien para valores de H elevados pero cuando observamos la aproximación para valores de H menores a 1m en la figura 5.12 vemos que para estos valores de H, la curva no se aproxima a la tendencia real.

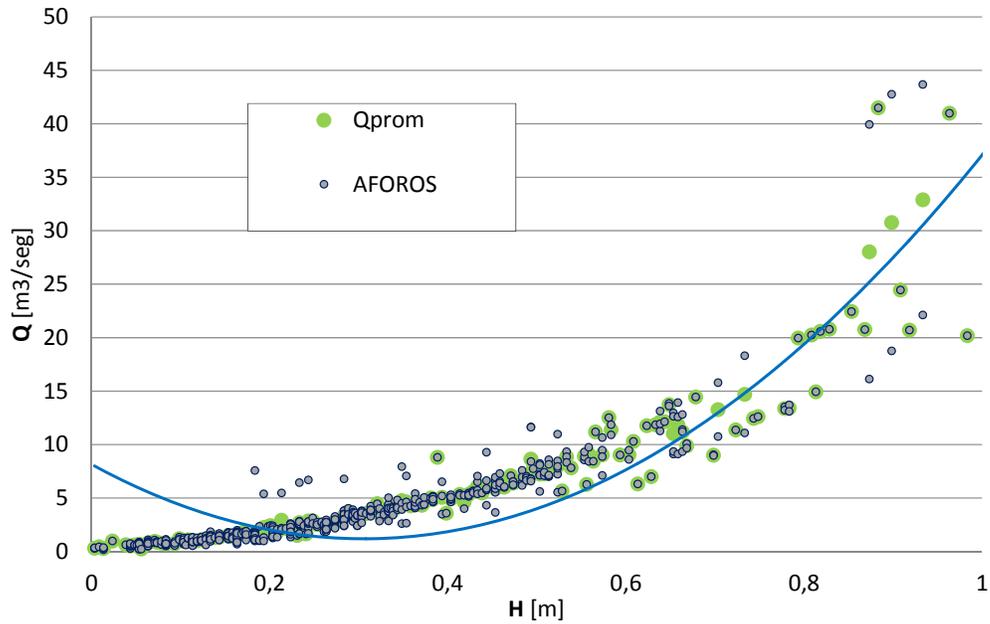


Figura 5.12. Curva altura caudal, Alternativa N° 1.

Alternativa N°2: H-Q en dos tramos separados por H=1m

Como segunda alternativa se planteó luego realizar dos curvas para describir la tendencia de los datos utilizando como punto de quiebre la altura correspondiente a 1m.

Para las alturas inferiores a 1m se plantearon 2 límites de con la intención de definir un rango dentro del cual estuviesen contenidos la mayoría de los pares altura-caudal estudiados. La representación de dicho rango se observa en la figura 5.13 a continuación:

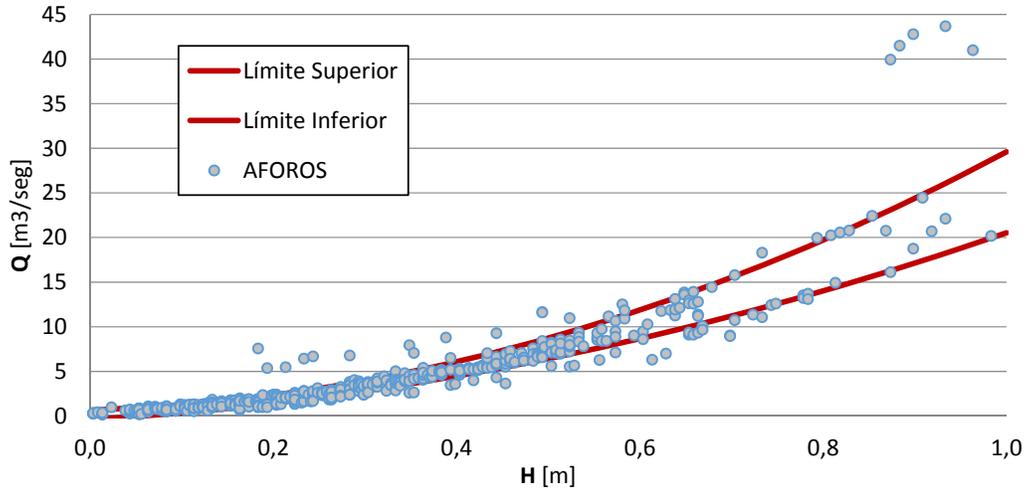


Figura 5.13. Rango abarcador del 80% de los datos.

Una vez definidos los límites se propuso como curva de transformación aquella que represente el valor medio entre ambos límites, obteniendo así la ecuación 5.3:

$$Q = 19.86 (H^2) + 5.139 H + 0.053 \quad (5.3)$$

A continuación se presenta una comparación entre la curva propuesta y dos curvas proporcionadas por el CIRSA (Figura 5.14), en relación a los pares altura-caudal obtenidos en los aforos. Se puede observar como si se descartan los valores señalados los cual no siguen la tendencia del resto de los datos la curva propuestas aproximaría mejor.

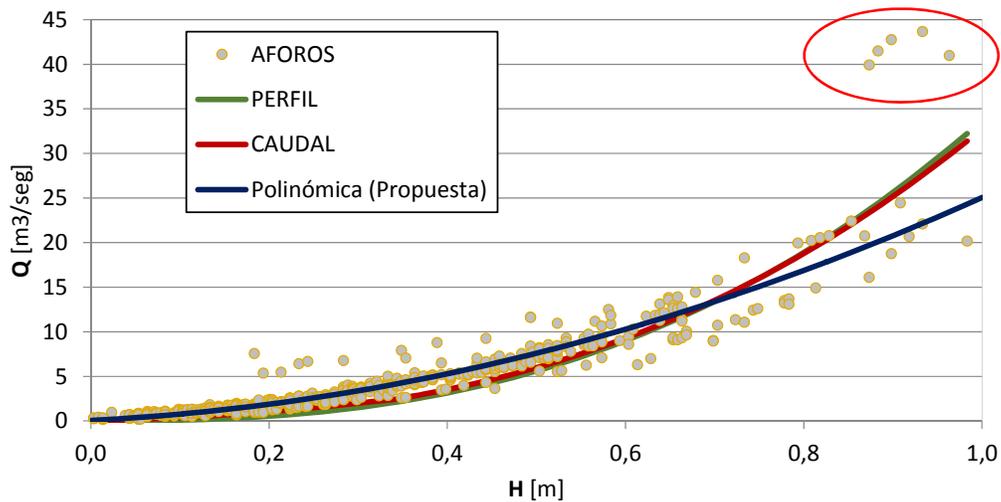


Figura 5.14. Comparación de alternativas.

Para los valores de altura superiores a 1m se aproximó tendencia sin desechar dato alguno (Figura 5.15). La ecuación resultó:

$$Q = 77.28 (H^2) - 51.65 H + 8.95 \quad (5.4)$$

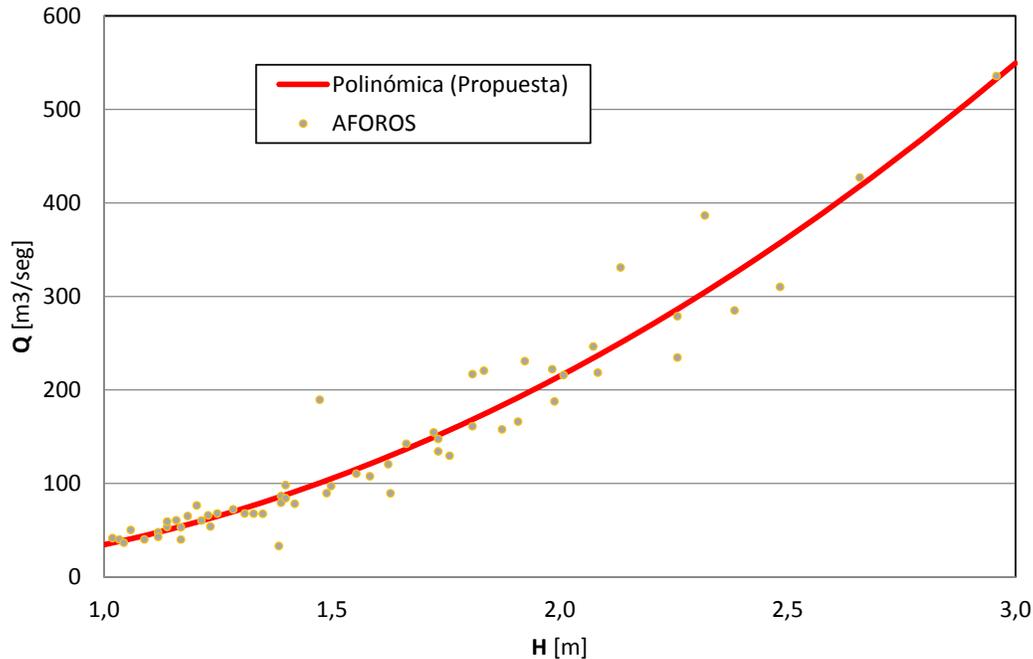


Figura 5.15. Curva de transformación. Alternativa N°2.

Luego se debieron modificar las curvas para compatibilizarlas en la zona próxima a $H = 1\text{m}$. Se calculó la diferencia entre los caudales resultantes al aplicar las dos ecuaciones, la que corresponde a los valores superiores a 1m y la que lo hace a los valores inferiores, con $H=1\text{m}$. Se dividió en dos esta diferencia y con ese valor se planteó una ecuación para corregir cada una de las curvas de modo que cuanto más próximo a 1m fuera el valor de H , mayor fuese la modificación que esta ecuación le aplicaría a la ecuación inicial de la curva. Por lo tanto para valores lejanos a 1 m no se modificaron significativamente las curvas. Este procedimiento puede comprenderse mejor si se observa la figura 5.16. Finalmente resultaron las siguientes ecuaciones:

$$\text{Para } H < 1\text{m} \quad Q = 19.86 * (H^2) + 9.903 * H + 0.053 \quad (5.5)$$

$$\text{Para } H > 1\text{m} \quad Q = 77.28 * (H^2) - 49.268 * H + 1.804 \quad (5.6)$$

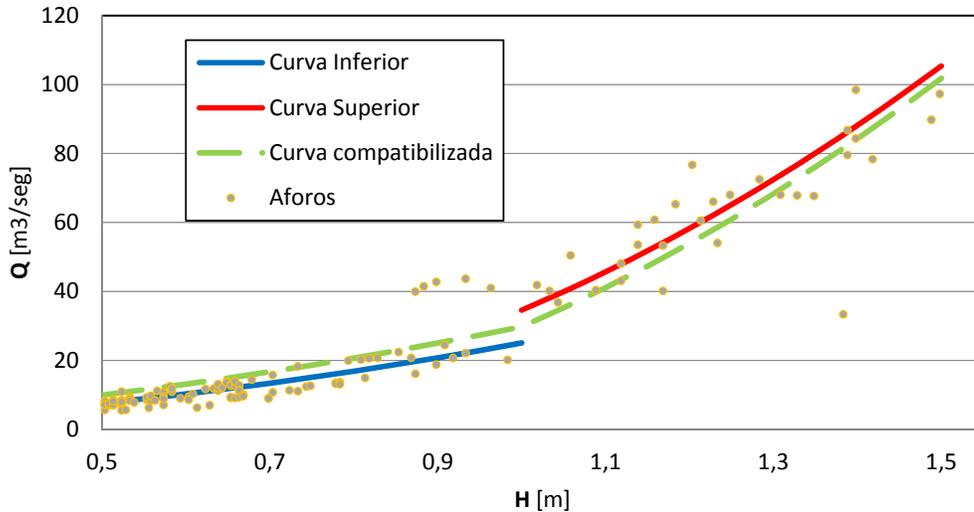


Figura 5.16. Compatibilización de curvas en el punto de quiebre.

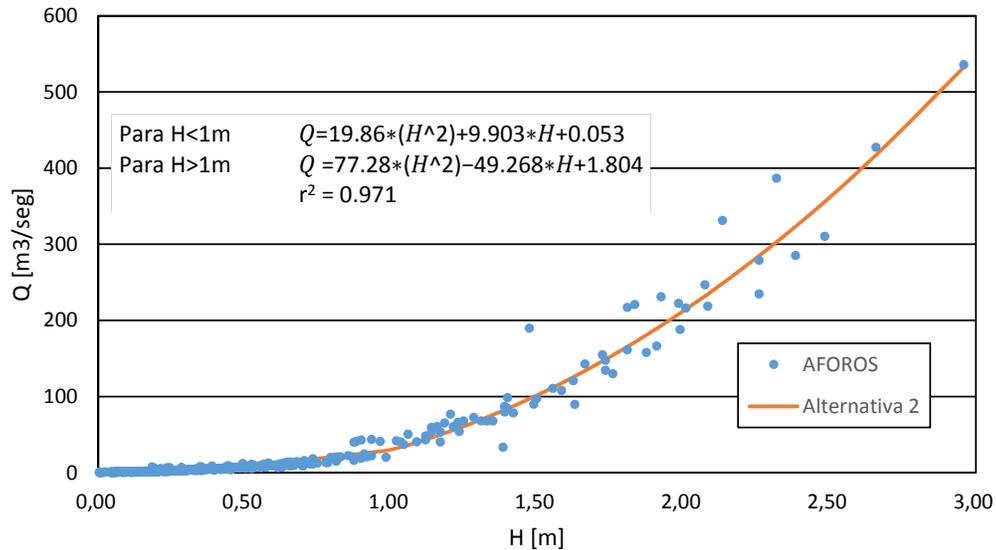


Figura 5.17. Alternativa N°2.

Alternativa N°3: H-Q en dos tramos separados por H=0.85m.

Posteriormente para mejorar la aproximación se planteó otra alternativa, también dividiendo la serie en dos, pero esta vez con punto de quiebre en $H = 0,85m$. y se procedió de igual manera que para el caso anterior, usando como curva de tendencia para los pares altura-caudal correspondientes a alturas inferiores a $0,85m$ la misma curva que en el caso anterior. Como única diferencia se señala que para la aproximación de la curva para los pares con alturas superiores a $0,85 m$ se descartó el par altura-caudal correspondiente a ($H=1.383$; $Q=33.36$).

Se obtuvieron así dos curvas, cuyas ecuaciones son las que siguen y sus graficas con las correspondientes a las figuras 5.18 y 5.19.

$$\text{Para } H < 0,85\text{m} \quad Q = 19.86 (H^2) + 5.139 H + 0.053 \quad (5.7)$$

$$\text{Para } H > 0,85\text{m} \quad Q = 77.90 (H^2) - 55.41 H + 14.27 \quad (5.8)$$

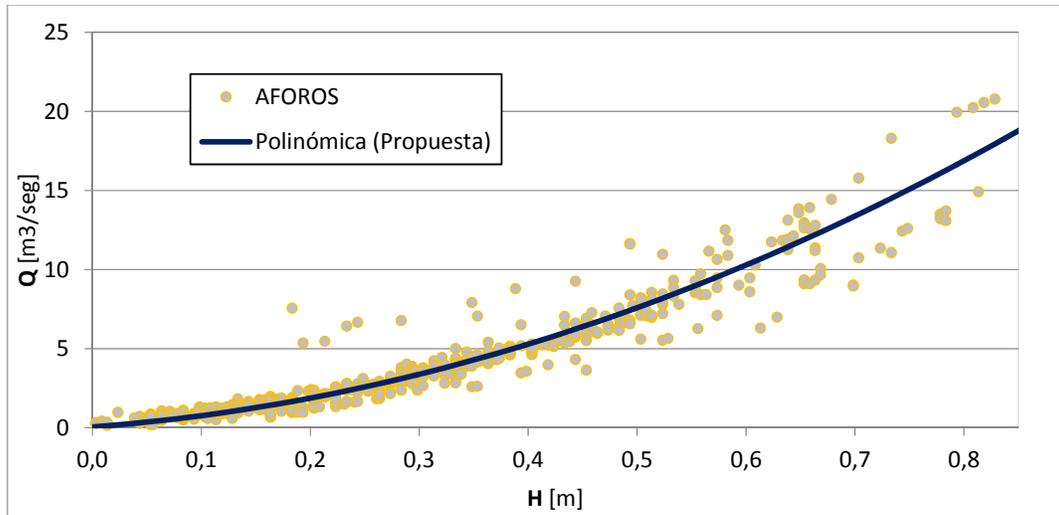


Figura 5.18. Curva de transformación. Alternativa N°3.

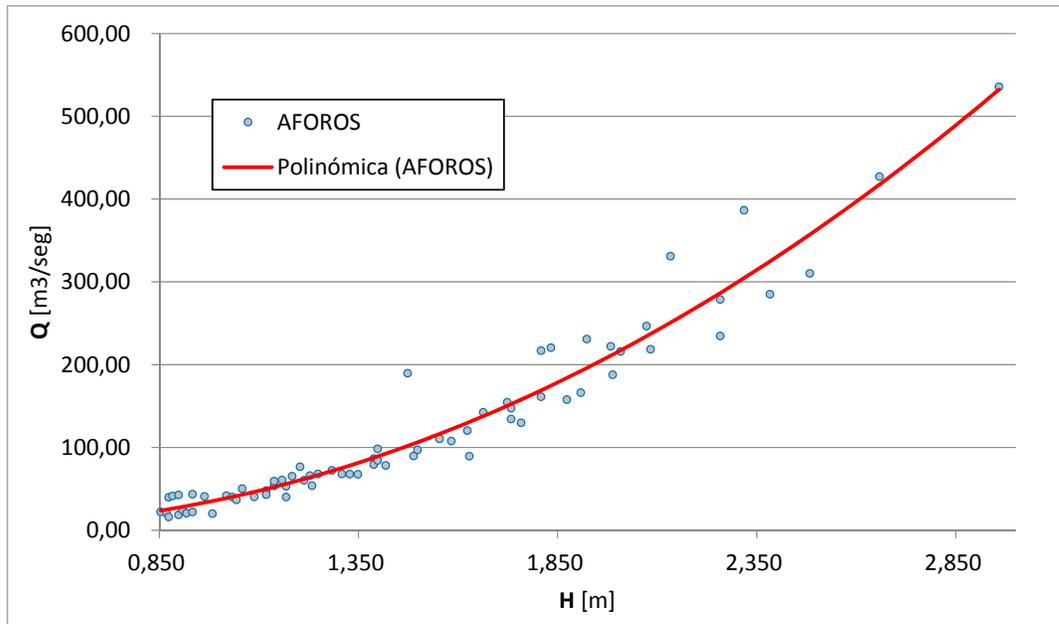


Figura 5.19. Curva de transformación. Alternativa N°3.

De igual manera que en el caso anterior se compatibilizaron las curvas en el punto de quiebre obteniendo las siguientes ecuaciones:

$$\text{Para } H < 0.85\text{m} \quad Q = 19.86 * (H^2) + 7.8944 * H + 0.053 \quad (5.9)$$

Para $H > 0,85m$ $Q = 77.9 * (H^2) - 54.3206 * H + 11.0019$ (5.10)

La figura 5.20 representa la compatibilización realizada:

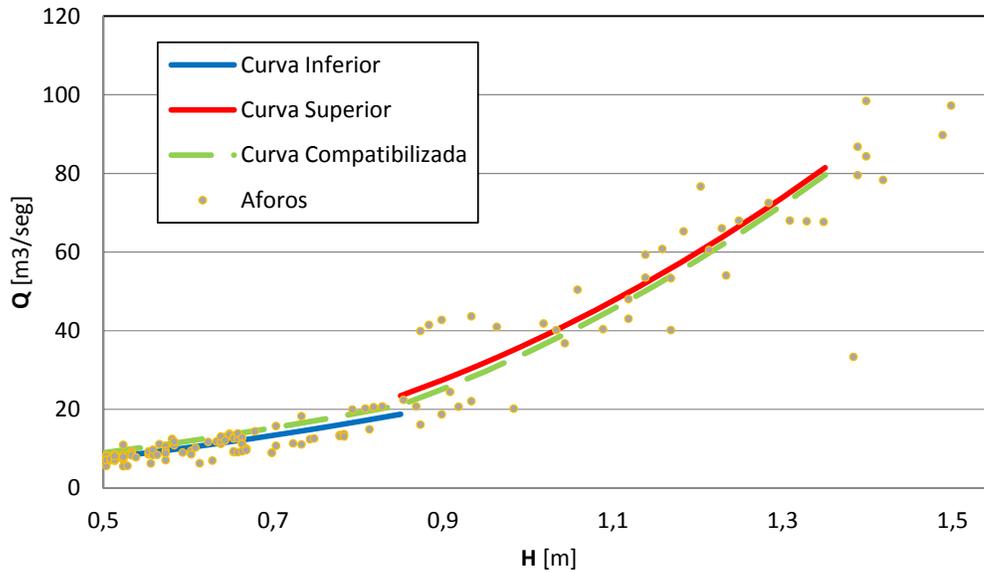


Figura 5.20. Compatibilización de curvas en el punto de quiebre.

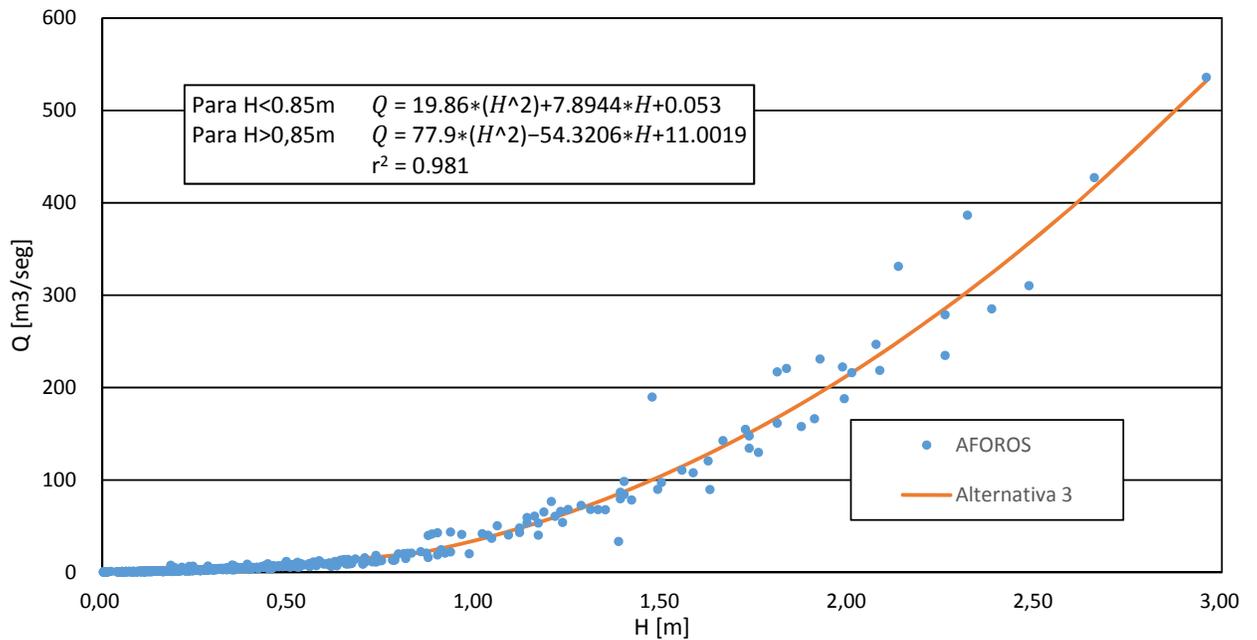


Figura 5.21. Alternativa N°3

Alternativa N°4: H-Q en tres tramos separados por H=0.85m y H=1.5m.

En busca de mejorar aún más la curva de transformación se propuso como otra alternativa aproximar la tendencia con 3 curvas cuyos puntos de quiebre fuesen 0,85m

y 1,5m. Posteriormente se demostró que si bien mejoraba la correlación con los datos, esta mejora no justificaba el incremento en la dificultad operativa que suponía. Se escriben solo las ecuaciones obtenidas luego de la compatibilización en los puntos de quiebre y la figura 5.22 representa la propuesta.

Ecuaciones:

$$\text{Para } H < 0,85\text{m } Q = 19.86 * (H^2) + 5.139 * H + 0.053 + 4.15 * \left(\frac{H}{0.85}\right) \quad (5.11)$$

Para $0,85\text{m} < H < 1,5 \text{ m}$

$$Q = 155.1 * (H^2) - 229.4 * H + 110 - 4.76 * \frac{H-0,85}{0,65} - 4.15 * \frac{1,5-H}{0,65} \quad (5.12)$$

$$\text{Para } H > 1,5 \text{ m } Q = 77.28 * (H^2) - 51.65 * H + 8.95 + 4.76 * \frac{3-H}{1.5} \quad (5.13)$$

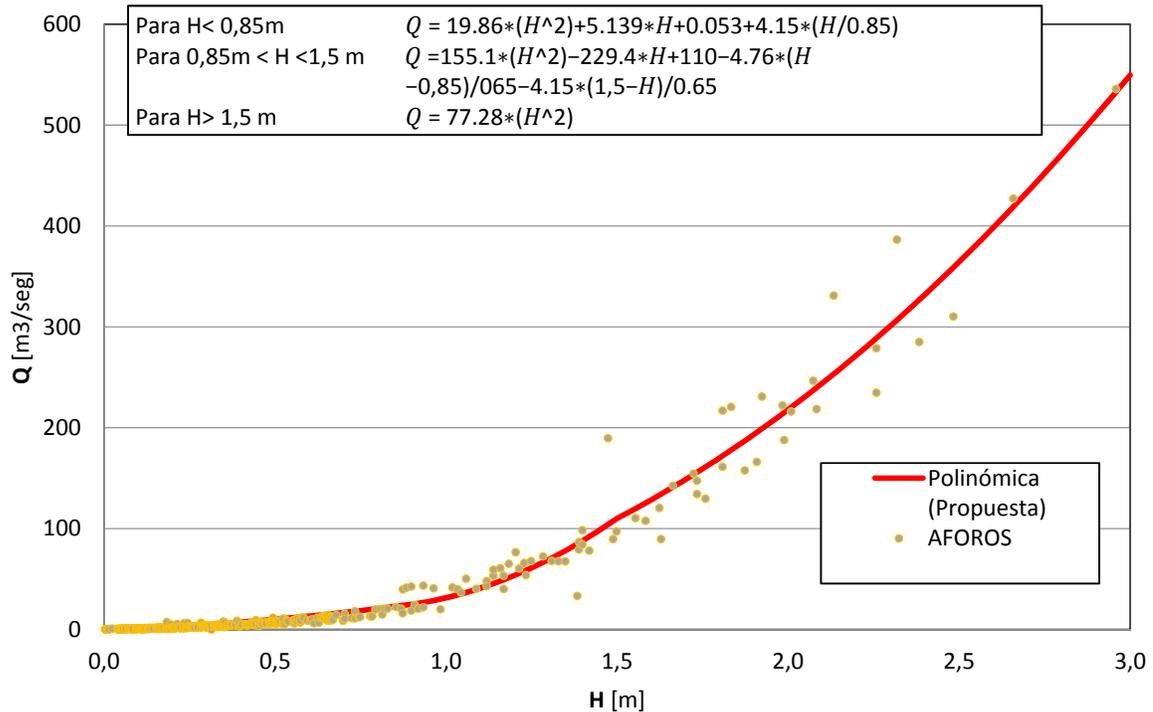


Figura 5.22. Curva de transformación. Alternativa N°4.

Curva H-Q adoptada.

Finalmente antes de seleccionar la mejor alternativa, se verificó que no existiese alguna relación entre la dispersión de los datos con relación al año en el que se hicieron los aforos. Para estudiar eso se graficaron los aforos por año en relación a un rango definido anteriormente el cual abarca el 80% de los datos, definiendo un límite superior y otro

inferior, y se realizó un examen visual de la situación. Estos gráficos se adjuntan en el anexo. Se concluyó que no existía relación.

Para decidir cuál curva de transformación utilizar se hizo un análisis de regresión el cual se adjunta en el anexo. Como resultado de este, como la lógica indica, el mayor coeficiente de regresión se obtuvo con la curva aproximada a partir de los valores promedios para cada altura, pero esta se desechó por no ajustar bien en los valores inferiores. Una vez rechazada esta alternativa se observó que las curvas que mayor coeficiente de correlación presentaban en orden decreciente fueron las alternativas N°3 y N°4. Por razones ya expuestas se decidió optar por la alternativa N°3. Se presentan a continuación todas las alternativas propuestas en la tabla 5.2, las alternativas N°5 y N°6 corresponden a las curvas propuestas por el CIRSA.

Curva	Rango	Ecuación
1	-	$Q = 74.45 * H^2 - 45.51 * H + 8.136$
2	H<1m	$Q = 19.86 * (H^2) + 9.903 * H + 0.053$
	H>1m	$Q = 77.28 * (H^2) - 49.268 * H + 1.804$
3	H<0.85m	$Q = 19.86 * (H^2) + 7.8944 * H + 0.053$
	H>0.85m	$Q = 77.9 * (H^2) - 54.3206 * H + 11.0019$
	H<0.85m	$Q = 19.86 * (H^2) + 5.139 * H + 0.053 + 4.15 * \left(\frac{H}{0.85}\right)$
4	0.85<H Y	$Q = 155.1 * (H^2) - 229.4 * H + 110 - 4.76 * \frac{H - 0,85}{0,65} - 4.15 * \frac{1,5 - H}{0,65}$
	H<1.5m	
	H>1.5m	$Q = 77.28 * (H^2) - 51.65 * H + 8.95 + 4.76 * \frac{3 - H}{1.5}$
5	-	$Q = 33.6519 * H^{2.5833}$
6	H<0.333m	$Q = (9.025203 * H^{1.0011}) * (1.5312 * H + 0.2773)$
	H>0.333m	$Q = (18.1048 * H^{1.66}) * (1.5312 * H + 0.2773)$

Tabla 5.2. Síntesis de alternativas.

Finalmente se presentan la figura 5.23 con el fin de comparar la alternativa elegida y las curvas propuestas por el CIRSA en relación a los aforos.

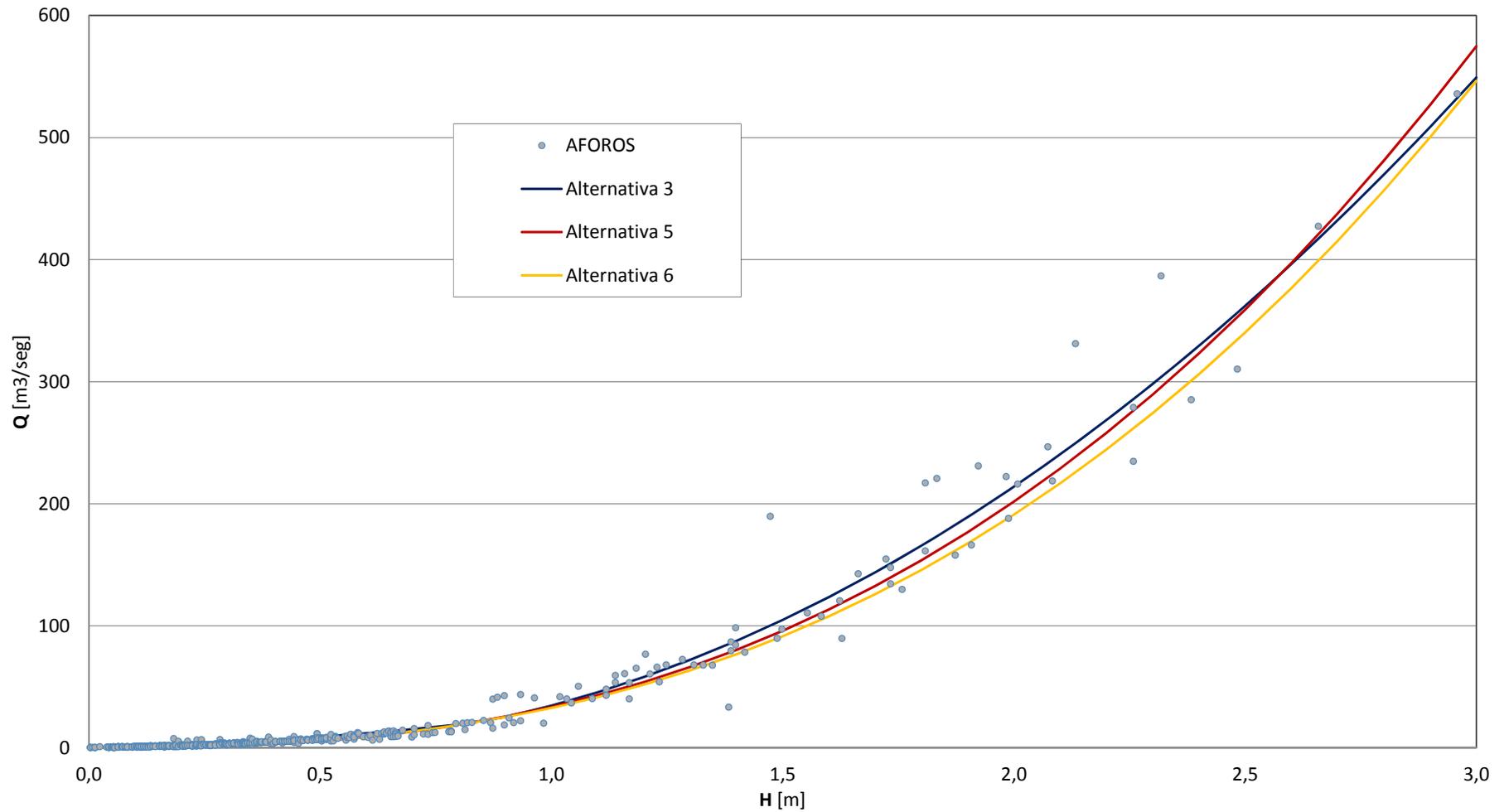


Figura 5.23. Comparación de alternativas.

5.2.4. NIVELES Y CAUDALES

La cuenca del Rio San Antonio cuenta con una estación limnigráfica, ubicada en la estación "El canal" la cual corresponde a la estación 600 señalada en la figura 5.3. Parte de esta información, concedida por Dr. Ing. César García, abarca un periodo coincidente con el correspondiente a la serie de precipitaciones. Al igual que sucedió al trabajar con las precipitaciones, la información disponible de los niveles del rio presentaba periodos en los cuales no se contaba con registro información. Estas lagunas de información fueron rellenadas estipulando una relación lineal entre los valores de los datos extremos a cada periodo sin dato.

A partir de la experiencia de la Ing. Laura Colladon, como profesional integrante del CIRSA (Centro de la región semiárida), en la operación del sistema y el conocimiento del origen de la información registrada, fue posible contar con información útil que permitió interpretar mejor los datos obtenidos.

La serie de niveles medidas por el CIRSA inicia en febrero de 1993 y contiene datos hasta la actualidad. Sin embargo, se pueden distinguir periodos en los cuales no se realizaron registros. Entre estos, se destaca el que abarca desde abril de 1998 hasta marzo de 2002, periodo durante el cual solo se recupera noviembre y diciembre de 1999. En febrero de 2002, se reinstala el sensor y se advierte que la sección de aforo estaba rota en la parte más baja. Dicha rotura abarcaba un área de 2.4 m².

Posteriormente el 25 de enero de 2007, el cero del sensor fue modificado y se incrementó en 30 cm con respecto al periodo inicial. Por esta razón, para referir todas las alturas medidas al mismo cero, se debió modificar las lecturas registradas a partir de esta fecha en adelante restando 30 cm a los datos base.

Resulta de interés, asimismo, destacar que inicialmente el sensor 600 tenía un rango de 0-4m. A partir del 12 de enero de 1994, fue reemplazado por uno de rango 0-10m. El sensor de 4 m es capaz de interpretar variaciones de 0.0125m, mientras que el sensor de 10m posee una apreciación mínima del orden de 0.04m.

Una vez depurados los niveles, eliminando errores y adecuando las alturas, se procedió a aplicar la curva H-Q electa en la sección anterior para la obtención de los caudales.

5.2.5. EVAPOTRANSPIRACIÓN

La bibliografía hidrológica presenta una variedad considerable de modelos de cálculo de evapotranspiración potencial, cada uno de los cuales requiere diferente tipo de información. Por lo tanto se debió decidir cuál era el modelo adecuado.

Oudin et al. (2005.b) realizaron un extenso estudio en el cual compararon diferentes modelos de Evapotranspiración Potencial (EP), con el fin de descubrir si formulas simples podían sustituir a aquellas que requieren una gran cantidad de información.

El resultado del estudio fue que modelos simples que se basen en la radiación extraterrestre y la temperatura diaria son tan eficientes como modelos complejos como por el ejemplo el de Penman. Esto resulta conveniente ya que los estudios hidrológicos por lo general carecen de suficiente información climática.

Oudin et al. (2005.a) también llegaron a una conclusión muy útil relacionada con la influencia que tiene el grado de precisión de la EP, respecto de la temperatura desde el punto de vista de la performance de los modelos hidrológicos. En este sentido, Oudin et al. (2005.a) concluyen que los modelos de EP calculada empleando series diarias de temperatura medida, presentan igual performance que cuando se calcula empleando la temperatura diaria promedio para cada día del año. Ese concepto indica que de no disponer series largas medidas de temperatura, puede calcularse la temperatura promedio día a día, con el registro de la temperatura de ese día para una serie de años. Supongamos, por ejemplo, que se tiene una serie diaria de precipitación y caudal entre Enero de 2005 y Diciembre de 2012. Entonces, se requiere de EP para igual periodo. Como EP no se tiene, se debe calcular con una serie de temperaturas diarias de igual periodo. Ahora bien, puede ocurrir que se disponga por ejemplo de una serie diaria de temperatura solamente durante el periodo 01/01/2005 al 31/12/2008, faltando desde Enero de 2009 a Diciembre de 2012. La conclusión de Oudin et al. (2005.a) indica que es posible calcular para el periodo de tiempo que falta una temperatura media diaria tomando los días homólogos del periodo disponible. Así por ejemplo, la temperatura media del 1 de Enero, es el promedio de las temperaturas de los 1 de Enero de los años entre 2005 y 2008. Luego, lo mismo con el 2 de Enero y así sucesivamente. Por lo que tendremos una curva de temperaturas medias diarias a lo largo de un año, que puede repetirse para todos los años en los cuales no se tenga datos de temperatura.

Luego, empleando el modelo de Oudin et al. (2005.b), puede calcularse la EP de toda la serie 2005 a 2012, tomando la serie diaria de temperaturas.

Por lo expuesto, se decidió utilizar el modelo propuesto por Oudin et al. (2005.b) basado sólo en la temperatura media diaria, el cual es descripto por la siguiente expresión matemática:

$$\text{Si } T_a + 5 > 0 \quad PE = \frac{R_e}{\lambda * \rho} * \frac{T_a + 5}{100} \quad (5.14)$$

De lo contrario $PE = 0$

Donde:

- PE es la evapotranspiración potencial [mm/día].
- R_e es la radiación extraterrestre [MJ/m²dia].
- λ es el calor latente del agua [MJ/kg].
- ρ es la densidad del agua [kg/m³].
- T_a es la temperatura diaria [°C].

Se consiguió entonces información de temperatura de las diferentes estaciones que ya fueron presentadas en la figura 5.3. Como esta información poseía brechas sin datos, se calculó para cada día del año un promedio de las temperaturas históricas y con ellas se rellenaron las series. Luego se aplicó el método de los polígonos de Thiessen para obtener la temperatura media de la cuenca.

Un punto que conviene destacar es que la expresión de Oudin arroja la EP diaria, pero la serie de temperatura disponible y la EP buscada, tiene paso de tiempo horario, por lo tanto el método consistió simplemente en aplicar la fórmula del modelo de Oudin et al. (2005.b) con la temperatura disponible en cada hora y al resultado (que es el valor de EP que habría para un día a esa temperatura promedio) se lo dividió por 24, para lograr así la cantidad de evapotranspiración por hora.

5.3. CUENCA DEL ARROYO GUALEGUAYCHÚ

5.3.1. DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA

La cuenca del río Gualeguaychú (Figura 5.24) se ubica en la zona centro - este de la Provincia de Entre Ríos, entre los 31° 45' y 33° 12' de latitud sur y 58° y 58° 45' de longitud oeste. El río Gualeguaychú es el segundo en importancia de la provincia. Abarca los departamentos Gualeguaychú, Uruguay y Colon.

Dentro de su cuenca las principales localidades son: Gualeguaychú, Villa Elisa, Basavilbaso, Urdinarrain, Santa Anita, Aldea San Antonio, Gilbert, Enrique Carvo, Colonia Baylina.

El curso se desarrolla próximo al límite de su cuenca, con mayores aportes en su margen derecha, donde están los afluentes de forma permanente que de norte a sur son los siguientes: Arroyo San Antonio, Arrollo El Gato y por último el Arroyo Gualeyan. Sobre la margen izquierda el río recibe aportes de arroyos más pequeños.

El área de aportes del río Gualeguaychú tiene una superficie de 6840 km². Presenta una red hidrográfica con una alta densidad de drenaje y su curso principal tiene una orientación general aproximada en el sentido norte – sur. Este es meandroso escurriendo dentro de un valle aluvial, al cual ocupa en distinto grado durante las crecidas, de acuerdo a la magnitud de éstas. Su longitud total es de aproximadamente 180 km.

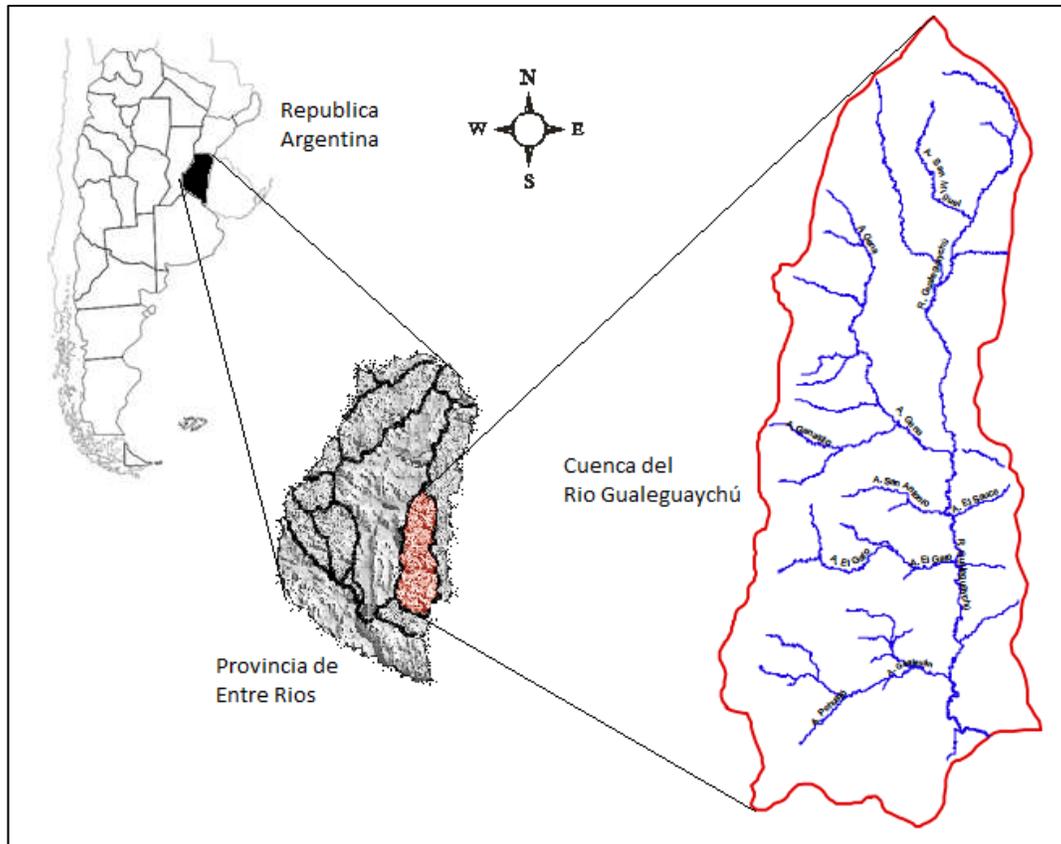


Figura 5.24. Ubicación Cuenca del Río Gualeguaychú.

En esta cuenca se decidió hacer una comparación entre la sensibilidad del modelo frente a pasos de tiempo diario y horarios, basándonos en que la Mg. Ing. Silvina San Miguel en su tesis de maestría utilizó un modelo sobre esta cuenca con datos diarios pero señaló: “El relieve ondulado, con pendientes importantes y la muy baja capacidad de infiltración de sus suelos hacen que la respuesta hidrológica del área de aportes frente a precipitaciones significativas sea inmediata y con caudales de gran magnitud y muy poca duración, con lo que una única medición diaria puede frecuentemente omitir el registro de un pico”.

5.3.2. PRECIPITACIÓN

En cuanto a la información con paso de tiempo diario se dispone de una serie continua que fue proporcionada por la Mg. Ing. Silvina San Miguel, quien en su tesis de maestría había presentado un modelo de transformación lluvia-Caudal, aplicado sobre sobre la cuenca del río Gualeguaychú. Esta serie está integrada por datos que transcurren desde el 1 de junio de 1983 hasta el 30 de abril de 2005.

En cuanto a la información con paso de tiempo horario se digitalizó información proveniente del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) de Concepción del Uruguay, otorgada por medio del Ing. Agr. Nicolas Vaiman, quien integra dicha institución como becario. Dicha información abarca el tiempo comprendido desde el 1 de enero de 2005 al 31 de diciembre de 2011.

5.3.3. CAUDAL

Una serie de caudales descripta con un paso de tiempo diario, fue construida por el Mg. Ing. Facundo Alonso, tutor de esta práctica profesional supervisada, a partir de información proporcionada por tres diferentes fuentes.

- En primer lugar, contó con una serie continua de caudales provista por el Mg. Ing. Eduardo Zamanillo, la cual abarca desde 1 de julio de 1987 al 31 de agosto de 2004.
- En segundo lugar, la Mg. Ing. Silvina San miguel, proporciono una serie de caudales registrada por el Evarsa, la cual transcurre entre el 2 de agosto de 2003 y el 28 de febrero de 2005.
- Finalmente y en tercer lugar, se obtuvo una serie de niveles limnigráficos también proveniente del Evarsa, por medio del Ing. Luis Lenzi la cual inicia el 24 de junio de 1987 y finaliza el 28 de febrero de 2013. Esta última, presentaba algunas características sobre las cuales se efectuaron correcciones.

Algunos de los días de la serie presentaban más de una lectura por día, en los casos en los que las lecturas no eran igual ni parecidas se optó por dejar un único dato ese día, tomando la lectura que aparentaba ser más confiable. En el resto de los casos se optó por dejar la lectura cuyo valor fuese mayor.

Por otro lado, se encontraron días sin registro. Para rellenar esos días se establecieron diferentes criterios. Si se salteaban hasta 3 días se tomó para el relleno el promedio de los días previo y posterior al periodo sin dato. Cuando el número de días seguidos sin datos era grande, se permitió el relleno con el promedio de los datos extremos siempre y cuando no se registrase alguna precipitación importante en dicho periodo.

Esta serie luego debió transformarse a los niveles de la regla del INA (Instituto nacional de agua) utilizando la siguiente ecuación:

$$H_{INA} = 0.9537 * H_{EVARSA} - 0.2111 \quad (5.15)$$

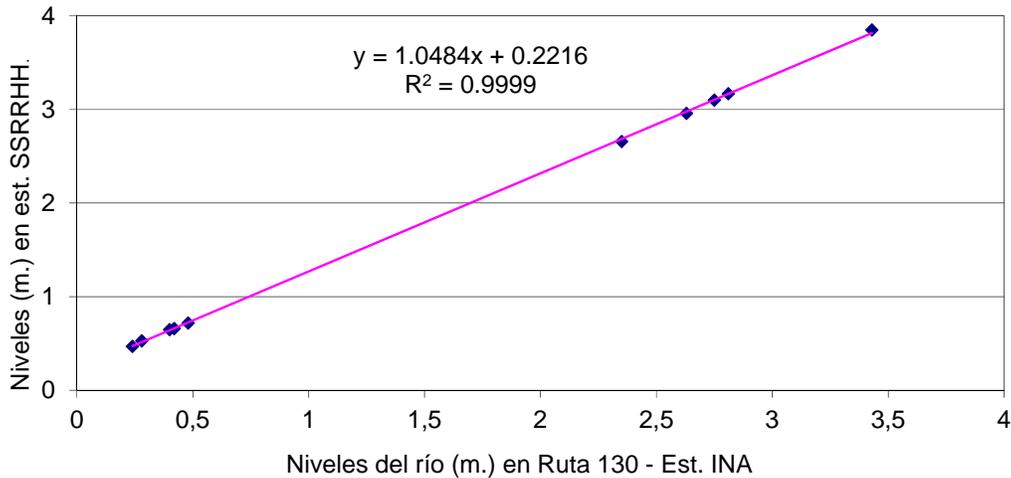


Figura 5.25. Curva de transformación niveles INA y Evarsa.

Se realizó posteriormente una verificación entre las series, buscando que fueran semejantes unas con otras. A partir de esto se observó que las series provistas por el Ing. Luis Lenzi y la Mg. Ing. Silvina San Miguel resultaron ser parecidas, no así la serie suministrada por el Mg. Ing. Eduardo Zamanillo.

En cuanto a la serie de caudales horarios, se adquirieron unas fajas limnigráficas generadas en una estación instalada sobre la ruta provincial n°130, en Villa Elisa, las cuales abarcan un periodo desde el 22 de abril de 2005 hasta el 7 de noviembre de 2011. Dichas fajas fueron digitalizadas, y durante este proceso se fueron corrigiendo errores. Como por ejemplo, se rectificaron las fajas ya que en algunos casos debían leerse espejadas, puesto que la hoja no había sido emplazada correctamente. Sin embargo, esta serie de niveles requiere aun correcciones. Entre estas se pueden nombrar:

- Correcciones en las lecturas tomadas al inicio y fin de cada faja. Para esto se debería comparar las lecturas, con una serie proporcionada por el Ing. Luis Lenzi. Dicha serie proviene del Evarsa, y contiene lecturas realizadas en el mismo lugar, aunque con una escala diferente por lo que se tiene que aplicar la ecuación de transformación 5.15, para que resulten comparables.
- Correcciones cuando la bocha del instrumental permaneció estancada y luego en algún momento desciende súbitamente generando tramos rectos en el linmigramas.

Para ambos pasos de tiempo, se utilizó la misma curva de transformación altura-caudal, la cual fue provista junto con su historia por la Mg. Ing. Silvina San Miguel.

Hasta mayo del año 2002 la curva de descarga había sido:

$$Q = 2.2944 * (h - 0.48)^{2.0759} \quad p / h \leq 2.48 \text{ m} \quad (5.16)$$

$$Q = 0.0588 * e^{(2.07 * h)} \quad p / h > 2.48 \text{ m.} \quad (5.17)$$

Los aforos efectuados después de las grandes crecientes ocurridas durante los primeros cinco meses del 2002 determinaban que el nivel del río para un caudal igual a cero había pasado de 0.50m a 0.22m. Las consultas hechas en el lugar permitieron establecer que la razón del descenso había sido la rotura de un tajamar realizado en el cauce del río a aproximadamente 500 m aguas abajo del puente. Considerando esta circunstancia, se establecieron las ecuaciones de las curvas de descarga y rangos de aplicación nuevamente:

$$Q = 0.1393 * e^{(1.75 * h)} \quad p / h \leq 2.69 \text{ m.} \quad (5.18)$$

$$Q = 0.0588 * e^{(2.07 * h)} \quad p / h > 2.69 \text{ m.} \quad (5.19)$$

5.3.4. EVAPOTRANSPIRACIÓN

En lo que se refiere a las temperaturas necesarias para aplicar el modelo de evapotranspiración elegido, se consiguió la serie de las mismas tomadas en las estaciones ubicadas en la localidad de Gualeguaychú y en Concepción del Uruguay, por medio del servicio meteorológico nacional. Si bien contiene Temperaturas diarias esto es suficiente aun cuando tratamos con paso de tiempo horario, caso en el cual se debe tomar el valor diario y dividirlo por 24, suponiendo que la evapotranspiración fue uniforme durante todas las horas del día.

5.4. SÍNTESIS

A continuación se presenta la tabla 5.3 la cual resume cual fue la información disponible:

Cuenca	VAR	PASO	PERIODO	FUENTE
San Antonio	P	Horario	01/01/1994-31/01/2009	INA-CIRSA. Dr. Ing. Cesar García
	H	Horario	01/01/1994-31/01/2009	INA-CIRSA. Dr. Ing. Cesar García
	T	Horario	01/01/1994-31/01/2009	INA-CIRSA. Dr. Ing. Cesar García
Gualeduaychú	P	Diario	01/06/1983-30/05/2005	- Mg. Ing. Eduardo Zamanillo
	Q	Diario	01/07/1987-31/08/2004	- Mg. Ing. Eduardo Zamanillo
	Q	Diario	02/08/2003-28/02/2005	Evarsa. Mg. Ing. Silvina San Miguel
	H	Diario	24/06/1987-28/02/2013	Evarsa. Ing. Luis Lenzi
	T	Diario	01/09/1962-03/03/2013	Servicio Meteorológico Nacional
	P	Horario	01/01/2005-31/12/2011	INTA Concepción del Uruguay. Ing. Agr. Nicolas Vaiman
	H	Horario	22/04/2005-07/11/2011	INA. Ing. Luis Lenzi

Tabla 5.3. Resumen información disponible.

Luego de procesarla fue posible llegar a la siguiente información:

Cuenca	VAR	PASO	ACLARACIÓN
San Antonio	P	Horario	Información disponible en 15 periodos, capítulo 7.
	H	Horario	
	T	Horario	
Gualeduaychú	P	Diario	-
	Q	Diario	-
	T	Diario	-
	P	Horario	-

Tabla 5.4. Resumen información disponible.

6. CONTROL ESTADÍSTICO DE LAS SERIES PROCESADAS

6.1. INTRODUCCIÓN

Las series de datos de caudales y precipitaciones fueron corroboradas para que cumplan ciertas condiciones o pruebas estadísticas. Las mismas deben ser superadas con un determinado nivel de significancia. Las pruebas estadísticas a las que se sometieron las series y que fueron superadas fueron:

- Prueba de estacionalidad (Kendall).
- Prueba de homogeneidad a escala anual (Wilcoxon).

La aplicación de estas pruebas se realizó mediante la herramienta computacional Hyfran. Se adjuntan en el anexo impresiones de pantalla de la salida del programa con los resultados.

No se realizó el análisis estadístico sobre las series de evapotranspiración ya que como se señaló con anterioridad, no es una variable que afecte de manera significativa a los resultados arrojados por el modelo. Hubiese sido interesante realizar también la prueba de datos atípicos a las series de cada estación.

6.2. NIVEL DE SIGNIFICANCIA

En las distintas pruebas estadísticas se plantea una hipótesis nula (H_0) la cual se mantiene como verdadera a menos que en la serie de la muestra se encuentre evidencia de lo contrario.

A esta hipótesis nula se la contrasta con una hipótesis alternativa (H_1). En los casos en los que no se especifica H_1 de manera explícita, se puede considerar que la misma ha quedado definida implícitamente como “ H_0 es falsa”.

Al analizar una serie de datos, los mismos pueden ser relacionados con una determinada distribución de probabilidad la cual esté relacionada con la hipótesis de estudio. Luego, pueden tomarse un conjunto o un rango de valores para el cual si un valor estadístico obtenido pertenece a él se rechazara la hipótesis nula. Dicho rango se conoce como región de rechazo y el mismo se puede modificarse para plantear condiciones más estrictas o más relajadas.

Cuando se contrastan las hipótesis, se determina el rechazo o no de la hipótesis nula H_0 . Esta decisión puede ser errónea o no coincidir con lo que sucede en la realidad. Se pueden dar cuatro casos los cuales se visualizan en la tabla 6.1.

	Ho es cierta	H1 es cierta
Se acepta H0	No hay error	Error tipo II
Se acepta H1	Error tipo I	No hay error

Tabla 6.1. Nivel de significancia, hipótesis de contrastación.

La probabilidad de cometer un error de tipo I es conocido como nivel de significancia de la prueba y se denota con la letra griega α .

Por otro lado la probabilidad de cometer un error de tipo II se denota con la letra griega β . Se denomina potencia del contraste al valor $1-\beta$, esto es, a la probabilidad de escoger H_1 cuando esta es cierta.

Considerado un nivel de significación α (error que estamos dispuestos a asumir en el caso de optar por H_1 y equivocarnos) y una muestra de tamaño n . Se pueden plantear dos alternativas representadas en las figuras 6.1 y figura 6.2.

Los valores, t_α o $t_{2\alpha}$ se encuentran tabulados para cada valor de α . Si la media de la muestra cae en la región de aceptación se acepta la hipótesis H_0 ; si cae en la región crítica, se acepta la hipótesis H_1 .

En el presente trabajo, se utilizó un nivel de significancia del 5% (0.05) en la mayoría de las series. En los casos en que no se cumplía alguna de las pruebas estadísticas se procedió a analizarlas con un nivel de significancia del 1%. Luego si las series eran rechazadas bajo este nivel de significancia se las descartaba para el análisis y dicha estación no era tomada en cuenta.

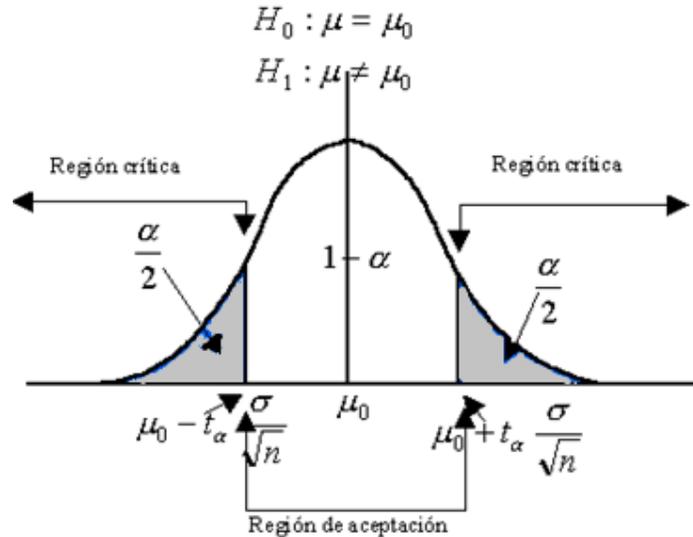


Figura 6.1. Funciones de frecuencia para la información de muestra y funciones de probabilidad para la población.

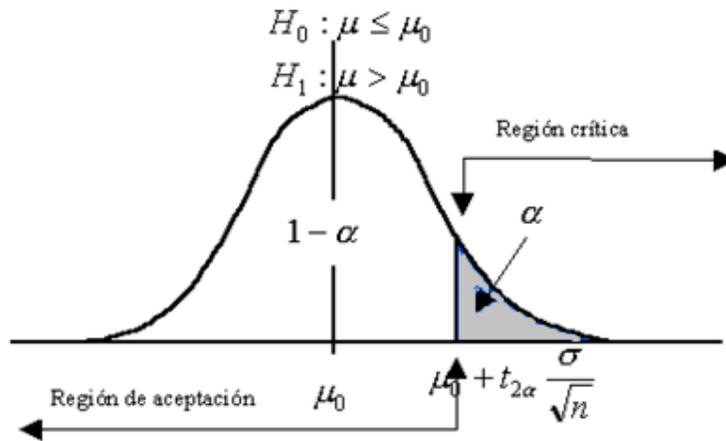


Figura 6.2. Función de frecuencia para la información de muestra y funciones de probabilidad para la población.

6.3. PRUEBA DE ESTACIONALIDAD (KENDALL)

Mediante la prueba estadística de estacionalidad de Kendall se busca que en la serie de datos no se presente una tendencia importante.

En la misma, para cada dato de la serie, la cual se encuentra ordenada cronológicamente, se calcula cuantos datos posteriores son superiores. De esta forma:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} s(i) \tag{6.1}$$

En donde $s(i)$ es el número de los valores de $X_j > X_i$, siendo $i < j \leq n$.

Por otro lado se determinan cuantos valores posteriores son menores. Los mismos se determinan de la siguiente manera:

$$T = \sum_{i=1}^{n-1} t(i) \tag{6.2}$$

En donde $t(i)$ es el número de valores $X_j < X_i$, siendo $i < j \leq n$.

Con los valores de S y T calculados, se define el índice $I = S - T$, que debe ser próximo a cero si la hipótesis nula es verdadera.

Por lo tanto se deben verificar las siguientes condiciones:

- $I < I_{cri}(\alpha)$, o sea que el I calculado sea menor que un valor de I crítico tabulado en función del tamaño de la muestra y según diferentes niveles de significación.
- Para tamaños de muestra mayores a 10, el valor del estadístico se aproxima a una distribución normal. Por lo que se debe utilizar una forma estandarizada del estadístico en donde se transforma el índice I en el índice K , definido como:

$$K = \frac{I-1}{\left(\frac{N*(N-1)*(2N+5)}{18}\right)^{0.5}} I > 0 \tag{6.3}$$

$$K = 0 \qquad I = 0 \tag{6.4}$$

$$K = \frac{I+1}{\left(\frac{N*(N-1)*(2N+5)}{18}\right)^{0.5}} I < 0 \tag{6.5}$$

Ecuación 6-1

Los valores de K_{cri} son obtenidos de una distribución normal, los cuales son presentados en la tabla 6.2.

α	0,01	0,05	0,1
K_{cri}	2,33	1,64	1,28

Tabla6.2.: Valores de K_{cri} para el test de Mann – Kendall

6.3.1. PRECIPITACIÓN

A partir de las precipitaciones horarias, se obtuvo la serie en precipitaciones diarias para someter los datos a la prueba, con el fin de no contar con un número excesivo de datos. Como hipótesis H_0 se planteó que no existe tendencia entre las observaciones, y como resultado se obtuvo que si bien se debe rechazar H_0 a un nivel de significancia del 5% se puede aceptar para un nivel de significancia del 1%, con lo cual se acepta que los datos no presentan ninguna tendencia.

6.3.2. CAUDAL

Por igual razón que en el caso de las precipitaciones, a partir de caudales horarios, se obtuvo una serie de caudales medios diarios para someter los datos a la prueba. Se planteó también igual hipótesis H_0 , y como resultado se debió rechazar H_0 a un nivel de significancia del 1%. En ese caso, puede que el que no verifique H_0 , se deba a que series que se desarrollan en un periodo de tiempo tan corto y a esta escala, están afectadas por tendencia que se deben a la misma variabilidad climática, por lo que el resultado no es perjudicial.

6.4. PRUEBA DE HOMOGENEIDAD A ESCALA ANUAL (WILCOXON)

La prueba de homogeneidad a escala anual de Wilcoxon permite comprobar si el promedio de un primer subconjunto de la muestra difiere significativamente del promedio de un segundo subconjunto de la muestra.

Para efectuar la se debe sustituir las observaciones de las dos muestras de tamaños n_1 y n_2 , por sus rangos combinados. Los rangos son asignados de tal manera que el rango 1 se asigna a la más pequeña de las $n = n_1 + n_2$ observaciones combinadas, el rango 2 se le asigna a la siguiente más alta y así sucesivamente, de modo que el rango n queda asignado a la observación más grande. Si varias observaciones tienen el mismo valor, se asigna a cada una de estas el promedio de los rangos que, en otra circunstancia, se les habría asignado.

La estadística de la prueba de Wilcoxon T_1 , es simplemente la suma de los rangos asignados a las n_1 observaciones de la muestra más pequeña.

Para cualquier valor entero n , la suma de los n primeros enteros consecutivos pueden calcularse fácilmente como $n(n+1)/2$. La estadística de prueba T_1 , más la suma de los rangos asignados a los n_2 elementos de la segunda muestra, T_2 , por consiguiente, debe ser igual a este valor, es decir;

$$T_1 + T_2 = \frac{n(n+1)}{2} \quad (6.5)$$

De modo que esta ecuación puede ser empleada como verificación del procedimiento de asignación de rangos.

La prueba de la hipótesis nula puede ser de dos extremos o de un extremo, dependiendo de si se está probando si las dos medianas de población son exclusivamente diferentes o si una es mayor que la otra.

La estadística de prueba, T_1 , está distribuida de manera aproximadamente normal. Se puede emplear la siguiente fórmula de aproximación de muestra grande para probar la hipótesis nula:

$$|Z| = \frac{T_1 - \mu_{T_1}}{\sigma_{T_1}} \quad (6.6)$$

El valor medio de la estadística de prueba T_1 , puede calcularse con:

$$\mu_{T_1} = \frac{n_1(n+1)}{2} \quad (6.7)$$

y la desviación estándar de la estadística de prueba T_1 , se puede calcular con:

$$\sigma_{T_1} = \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2 (n+1)}{12}} \quad (6.8)$$

Basándose en α , el nivel de significación seleccionado, la hipótesis nula puede ser rechazada si el valor Z calculado cae en la región de rechazo apropiada.

6.4.1. PRECIPITACIÓN

Se utilizó una serie de precipitaciones diarias al igual que en la prueba de Kendall. H_0 señalaba que los promedios de las series eran iguales. Como resultado se obtuvo que si bien se debía rechazar H_0 para un nivel de significancia del 5%, se podía aceptar para un nivel de significancia del 1%. Con lo que aceptamos que las dos sub-series series son homogéneas y provienen de la misma población.

6.4.2. CAUDAL

Al igual que en el caso de las precipitaciones, utilizo una serie de caudales medios diarios para someter los datos a la prueba. Se planteó también igual hipótesis H_0 , y como resultado se debió rechazar H_0 a un nivel de significancia del 1%. En ese caso, se confecciono una serie de caudales medios mensuales y se la sometió a prueba. Se obtuvo como resultado que se podía aceptar que los promedios de las series eran iguales con un nivel de significancia del 5%. Con lo cual se concluye que las serie proviene toda de una misma población.

7. REVISIÓN FINAL DE LOS DATOS

Hasta ahora las diferentes series de datos habían sido sometidas en las distintas etapas a pruebas o análisis que sirviesen para la obtención de una serie continua fiable.

Para concluir este proceso, se debía verificar que existiese una correspondencia entre la ocurrencia de precipitaciones y las variaciones de caudal. Solo cuando existe esta relación las series resultan utilizables para la calibración y aplicación del modelo. Se recurrió por lo tanto a una revisión visual en la que se apreciara esta relación causal, es decir que permitiese ver la respuesta de la cuenca, traducida en una modificación en el caudal, frente a una precipitación.

Para ello se contó con la asistencia del Mg. Ing. Antoine Patalano, que desarrolló un sencillo programa en matlab, que permitió recorrer visualmente toda la serie, comparando P y Q en una misma imagen compuesta por dos gráficos encolumnados, como se muestra en la Figura 7.1.

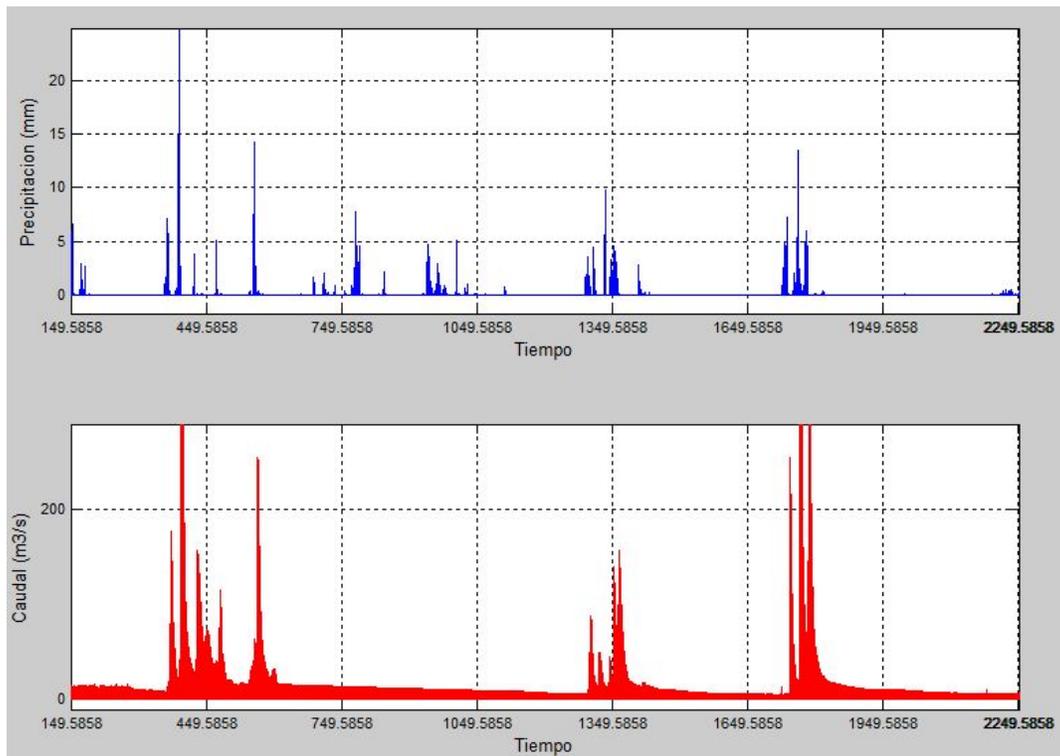


Figura 7.1. Figura matlab.

En este análisis resulta de vital importancia el criterio de quien lo realiza, ya que deberá decidir cuándo una lluvia es significativa y cuando no, pues no siempre el hecho de que ocurra una precipitación se traduce en una modificación del caudal. Esto depende de varios factores como ser la magnitud de la lámina precipitada o la humedad del suelo de la cuenca. Por ejemplo, podría ocurrir que si la lámina precipitada es pequeña, no se manifieste una modificación en el caudal ya que el volumen precipitado lograría disiparse mediante evapotranspiración, o infiltración y no llegar nunca al cauce del río. Supongamos ahora que la lámina precipitada es importante, puede ocurrir que si el estado de humedad de la cuenca es bajo, todo el volumen precipitado sea retenido, por lo que no se manifestaría una variación de caudal.

Considerando lo manifestado anteriormente, este análisis tuvo como resultado la división de la serie completa en 15 tramos, en los cuales la relación entre las precipitaciones y el caudal era evidente. Esos tramos son los siguientes:

- Tramo 1: Inicia el 8 de enero de 1994 - finaliza el 29 de enero de 1994.
- Tramo 2: Inicia el 16 de febrero de 1994 y finaliza el 28 de febrero de 1995.
- Tramo 3: Inicia el 7 de marzo de 1995 y finaliza el 29 de septiembre de 1997.
- Tramo 4: Inicia el 9 de noviembre de 1997 y finaliza el 20 de marzo de 1998.
- Tramo 5: Inicia el 12 de noviembre de 1999 y finaliza el 27 de marzo de 2000.
- Tramo 6: Inicia el 15 de febrero de 2002 y finaliza el 1 de febrero de 2003.
- Tramo 7: Inicia el 1 de marzo de 2003 y finaliza el 18 de marzo de 2004.
- Tramo 8: Inicia el 30 de marzo de 2004 y finaliza el 10 de octubre de 2004.
- Tramo 9: Inicia el 10 de noviembre de 2004 y finaliza el 13 de noviembre de 2005.
- Tramo 10: Inicia el 20 de diciembre de 2005 y finaliza el 30 de enero de 2006.
- Tramo 11: Inicia el 3 de febrero de 2006 y finaliza el 31 de noviembre de 2006.
- Tramo 12: Inicia el 4 de diciembre de 2006 y finaliza el 7 de enero de 2007.
- Tramo 13: Inicia el 27 de enero de 2007 y finaliza el 4 de septiembre de 2007.
- Tramo 14: Inicia el 5 de diciembre de 2007 y finaliza el 27 de septiembre de 2008.
- Tramo 15: Inicia el 5 de noviembre de 2008 y finaliza el 10 de abril de 2009.

8. APLICACIÓN Y RESULTADOS

8.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta inicialmente la descripción de los datos necesarios y se muestran las formas de los archivos de entrada y salida.

Luego se describe la calibración realizada. Como se señaló anteriormente la calibración se llevó a cabo únicamente en la cuenca del Río San Antonio. Para ello se seleccionó entre los 15 tramos definidos en el capítulo anterior, el que contenía la mayor cantidad de datos, y consecuentemente representaba la serie continua más extensa. El tramo seleccionado fue por lo tanto el tramo N°3 el cual inicia el 7 de marzo de 1995 a las 12:00 pm y finaliza el 29 de septiembre de 1997 a las 4:00 am, representando una extensión de poco más de dos años y medio.

Finalmente una vez realizada la calibración, para valorar la calidad de ajuste, se empleó el modelo sobre los 14 tramos restantes, en sus dos modos disponibles, simulación y pronóstico, pudiendo así efectuar la comparación entre los datos obtenidos a través del modelo y los realmente observados.

8.2. DESCRIPCIÓN GENERAL

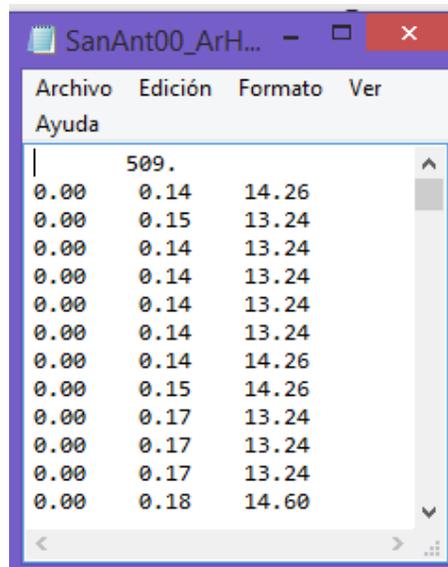
La programación del modelo a cargo de Mg. Ing. Facundo José Alonso se efectuó a través del lenguaje de programación de alto nivel fortran (**Formula Translating System**). Para la utilización del ejecutable, resultado de dicha programación, se crearon archivos de entrada ordenados dentro de una carpeta Datos. También fue necesaria una carpeta de Salidas y un archivo de entrada (Ent_Main.txt) que indica al ejecutable que proceso llevar a cabo y algunos datos necesarios para efectuar dichos proceso (Figura 8.1).

Nombre	Fecha de modifica...	Tipo	Tamaño
Datos	29/11/2013 10:38 a...	Carpeta de archivos	
Salidas	29/11/2013 10:38 a...	Carpeta de archivos	
Ejec	08/11/2013 06:52 ...	Aplicación	1.157 KB
Ent_Main	12/11/2013 02:46 ...	Documento de tex...	4 KB

Figura 8.1. Carpetas y archivos utilizados.

Los archivos de entrada, tienen un formato .txt y debieron ser nombrados por medio de 12 caracteres. Los primeros seis hacen referencia al nombre de la cuenca, los dos siguientes al número de archivo, en este caso el número variaba desde 01 hasta 15, en correspondencia con los 15 tramos definidos en el capítulo 7. A continuación de este número se ubica un guion bajo (_), luego del cual se ocupan dos caracteres para designar el país al cual pertenece la cuenca, en nuestro caso Ar haciendo referencia a Argentina, y finalmente la designación H o D en función si el paso de tiempo entre datos sucesivos de la serie es horario (H) o diario (D).

Estos archivos de entrada deben contener en la primera fila el área en km² de la cuenca y en las filas sucesivas tres columnas, en las cuales la primera corresponde a precipitación en milímetros, la segunda a evapotranspiración en milímetros, y la tercera a caudal en m³/seg (Figura 8.2).



	509.		
0.00	0.14	14.26	
0.00	0.15	13.24	
0.00	0.14	13.24	
0.00	0.14	13.24	
0.00	0.14	13.24	
0.00	0.14	14.26	
0.00	0.15	14.26	
0.00	0.17	13.24	
0.00	0.17	13.24	
0.00	0.17	13.24	
0.00	0.18	14.60	

Figura 8.2. Archivo de entrada de datos.

El archivo de entrada Ent_Main.txt se muestra a continuación (Figura 8.3):

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda									
	2	14	2	10									
	6	300											
	235.74	2.71	297.14	1.92	12.	16.2	5.	1.5	0.08	0.	1.	0.1	
	1	2	3	4	5	6	36	48	72				
	100	10	5000000	1	10								
	100.	-5.	20.	1.1	10.	6.	4.	1.3	5.0	0.	3.	0.	
	1200.	3.	300.	2.9	13.	7.5	6.2	1.6	8.5	0.9	6.	0.3	
SanAnt01_ArH		504											
SanAnt02_ArH		9063											
SanAnt04_ArH		3152											
SanAnt05_ArH		3263											
SanAnt06_ArH		8430											
SanAnt07_ArH		9183											
SanAnt08_ArH		4661											
SanAnt09_ArH		8833											
SanAnt10_ArH		985											
SanAnt11_ArH		6492											
SanAnt12_ArH		807											
SanAnt13_ArH		5290											
SanAnt14_ArH		7138											
SanAnt15_ArH		3747											

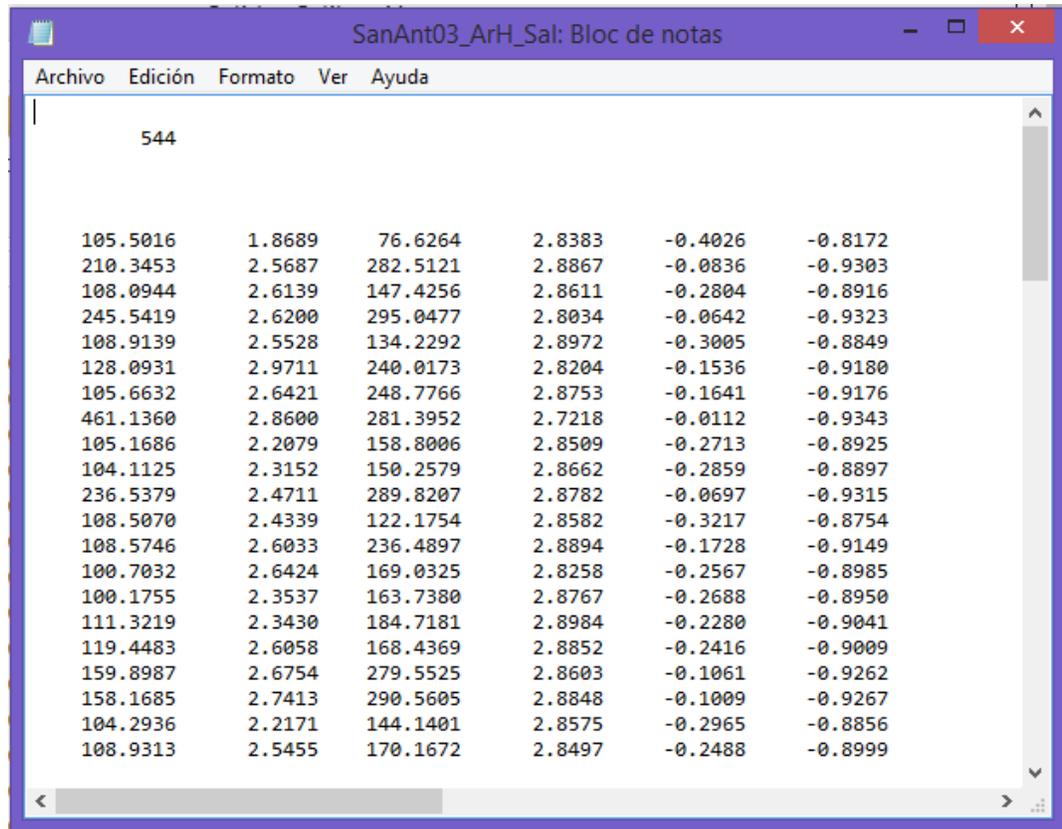
Figura 8.3. Archivo de entrada Ent_Main.txt

Se describen a continuación solo aquellos valores que fueron necesarios interpretar para este trabajo:

- Primera fila: con el primer valor se selecciona si se desea utilizar el modelo o el algoritmo de calibración, el segundo valor indica el número de archivos a correr y el tercer número es relevante solo si se utiliza el modelo, ya que va a indicar si se ejecuta en modo pronóstico o simulación.
- Segunda fila: el primer número indica el número de veces que se almacenaran las salidas en modo pronóstico. Esto es útil ya que se calibraron diferentes horizontes de pronóstico.
- Tercera fila: Los primeros cuatro valores corresponden a los parámetros X1, X2, X3 y X4, que describen el modelo GR.
- Quinta fila: Son los parámetros que requiere el algoritmo MOCOM, se describen más adelante.
- Sexta fila: Los primeros cuatro valores indican los límites inferiores para cada parámetro.
- Séptima fila: los primeros cuatro valores indican los límites superiores para cada parámetro.
- Octava fila en adelante: Lista de códigos de los archivos que debe leer y el número de datos que incluye cada archivo.

Finalmente los archivos de salida según el modo en el que se utilice el ejecutable contienen la siguiente información:

- Modo calibración:



SanAnt03_ArH_Sal: Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

544

105.5016	1.8689	76.6264	2.8383	-0.4026	-0.8172
210.3453	2.5687	282.5121	2.8867	-0.0836	-0.9303
108.0944	2.6139	147.4256	2.8611	-0.2804	-0.8916
245.5419	2.6200	295.0477	2.8034	-0.0642	-0.9323
108.9139	2.5528	134.2292	2.8972	-0.3005	-0.8849
128.0931	2.9711	240.0173	2.8204	-0.1536	-0.9180
105.6632	2.6421	248.7766	2.8753	-0.1641	-0.9176
461.1360	2.8600	281.3952	2.7218	-0.0112	-0.9343
105.1686	2.2079	158.8006	2.8509	-0.2713	-0.8925
104.1125	2.3152	150.2579	2.8662	-0.2859	-0.8897
236.5379	2.4711	289.8207	2.8782	-0.0697	-0.9315
108.5070	2.4339	122.1754	2.8582	-0.3217	-0.8754
108.5746	2.6033	236.4897	2.8894	-0.1728	-0.9149
100.7032	2.6424	169.0325	2.8258	-0.2567	-0.8985
100.1755	2.3537	163.7380	2.8767	-0.2688	-0.8950
111.3219	2.3430	184.7181	2.8984	-0.2280	-0.9041
119.4483	2.6058	168.4369	2.8852	-0.2416	-0.9009
159.8987	2.6754	279.5525	2.8603	-0.1061	-0.9262
158.1685	2.7413	290.5605	2.8848	-0.1009	-0.9267
104.2936	2.2171	144.1401	2.8575	-0.2965	-0.8856
108.9313	2.5455	170.1672	2.8497	-0.2488	-0.8999

Figura 8.4. Archivo Calibración.

El primer número del archivo de la figura 8.4 corresponde al número de iteración en el cual se ha encontrado la región de Pareto. Luego se visualiza una tabla en la cual desde la primer columna a la cuarta se presentan los valores X_1 , X_2 , X_3 y X_4 , y finalmente la quinta y sexta corresponden al valor de la función objetivo uno y dos respectivamente, multiplicado por (-1).

- Modo simulación:

Simulated Flow	Observed Flow
0.0000	14.2600
0.0000	13.2400
0.0000	13.2400
0.0000	13.2400
0.0000	13.2400
0.0000	13.2400
0.0000	13.2400
0.0000	14.9600
0.0000	14.2600
0.0000	13.2400
0.0000	14.2600
0.0000	14.9600
0.0000	14.2600
0.0000	14.2600
0.0000	14.2600
0.0000	14.2600
0.0000	13.5800
0.0000	13.2400
0.0000	13.2400
0.0000	14.2600

Figura 8.5. Archivo salida modo simulación.

La primera columna del archivo en la figura 8.5 corresponde a los caudales simulados por el modelo. Se observa que inicialmente son nulos. Estos comienzan a variar a medida que ocurran lluvias y se comiencen a rellenar los reservorios. La segunda columna corresponde a los caudales observados.

- Modo pronóstico:

Predicted Flow	Observed Flow
12.8266	14.2600
12.7875	13.2400
12.7486	13.2400
12.7103	13.2400
12.6721	13.2400
12.6340	13.2400
12.5961	13.2400
12.5588	14.9600
12.5215	14.2600
12.4844	13.2400
12.4474	14.2600
12.4104	14.9600
12.3741	14.2600
12.3380	14.2600
12.3019	14.2600
12.2664	13.5800
12.2317	13.2400
12.1964	13.2400
12.1612	14.2600
12.1267	14.2600
12.0917	13.2400
12.8266	15.6700
12.7875	13.2400

Figura 8.6. Archivo salida modo pronóstico.

Al igual que en el caso anterior la primer columna que se observa en la figura 8.6 corresponde a los caudales calculados por el modelo y la segunda a los observados.

8.2.1. DATOS DE ENTRADA REQUERIDOS POR EL ALGORITMO MOCOM-UA.

Se realiza una síntesis de los datos de entrada requeridos por el algoritmo MOCOM-UA, para realizar la calibración del modelo hidrológico:

- Nip: Número de individuos de la población.
- Nic: Número de individuos de cada complejo.
- Nis: Número de individuos de cada subcomplejo.
- NiterP: Número de veces en que la población es dividida en complejos.
- NiterC: Número de veces en que son elegidos subcomplejo de cada complejo.
- Niterf: Número de veces que el vector aleatorio uniforme se automultiplica.
- X1 máx: Límite máximo del parámetro X1, en mm.
- X1 min: Límite mínimo del parámetro X1, en mm.
- X2 máx: Límite máximo del parámetro X2, en mm.
- X2 min: Límite mínimo del parámetro X2, en mm.
- X3 máx: Límite máximo del parámetro X3, en mm.
- X3 min: Límite mínimo del parámetro X3, en mm.
- X4 máx: Límite máximo del parámetro X4.
- X4 min: Límite mínimo del parámetro X4.

8.2.2. DATOS DE ENTRADA REQUERIDOS POR EL MODELO GR

Se realiza una síntesis de los datos de entrada requeridos por el modelo GR, para realizar una simulación hidrológica:

- NT: Número de datos de la serie ingresada.
- A: Área de la cuenca.
- Dt: Intervalo de tiempo, en horas.
- P: Precipitación en cada intervalo de tiempo, en mm.
- EP: Evapotranspiración potencial en cada intervalo de tiempo, en mm.
- Qobs: Caudal observado promedio en cada intervalo de tiempo, en m³/seg.
- X1: Capacidad del reservorio de producción, en mm.
- X2: Coeficiente de la función intercambio, en mm

- X3: Capacidad del reservorio de transferencia, en mm.
- X4: Tiempo de base del hidrograma unitario HU1.

8.3. CALIBRACIÓN

Para llevar a cabo la calibración automática del modelo hidrológico GR sobre la cuenca del Rio San Antonio, con el método de optimización multi-objetivo MOCOM-UA, se establecieron los parámetros algorítmicos presentados en la tabla 8.1., dentro de los límites de los parámetros del modelo presentados en la tabla 8.2.

Nip	Nic	NiterP	Niter C	Nunif
100	10	5000000	1	10

Tabla 8.1.: Parámetros algorítmicos propuestos.

Parámetros	X1	X2	X3	X4
Unidades	mm	mm	mm	h
Min	100	-5	20	1.1
Max	1200	3	300	2.9

Tabla 8.2.: Límites de los parámetros del modelo.

Se llevó a cabo la calibración seis veces, modificando entre una y otra el horizonte de pronóstico de calibración. Se comenzó con un horizonte de 1 hora y luego se fue incrementando hasta llegar a las 6hs. Como la lógica sugiere, para horizontes más cercanos se obtuvieron mejores resultados de los coeficientes de Nash y Stutcliffe utilizado como función objetivo para calibrar en simulación (FO1), y el coeficiente de persistencia, función objetivo en pronóstico (FO2) (figura 8.7).

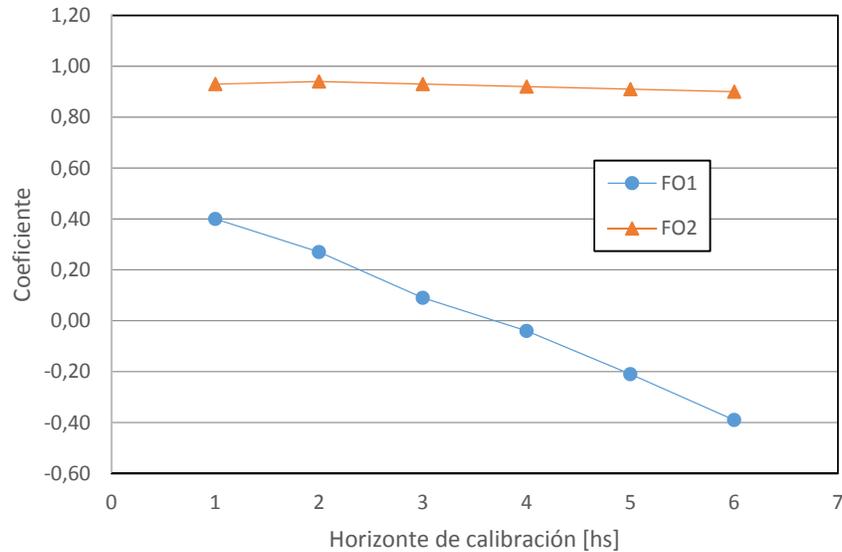


Figura 8.7: Coeficientes de Calibración

Esto resulta así ya que mientras más lejano es el horizonte de pronóstico mayor es la incertidumbre. También se puede observar como la calibración para el modo pronóstico es mejor ya que luego de la simulación el caudal obtenido es corregido por comparación con el caudal realmente observado.

Los juegos de parámetros obtenidos, que optimizan las funciones objetivos FO1 Y FO2 se observan en la tabla 8.3.

	FO1				FO2			
	X1	X2	X3	X4	X1	X2	X3	X4
Ntprev = 1	105.50	1.87	76.63	2.84	461.14	2.86	281.40	2.72
Ntprev = 2	110.79	1.22	71.87	2.37	556.74	2.94	289.42	2.88
Ntprev = 3	103.40	1.82	65.55	2.87	166.96	2.72	285.36	2.84
Ntprev = 4	106.29	1.81	79.12	2.88	148.29	2.87	293.79	2.58
Ntprev = 5	107.92	1.96	86.54	2.81	131.88	2.64	296.02	2.84
Ntprev = 6	121.03	2.11	92.53	2.45	235.74	2.71	297.14	1.92

Tabla 8.3.: Parámetros obtenidos.

8.4. SIMULACIÓN

Con los parámetros obtenidos a partir de la calibración se efectuó la simulación de caudales aplicando el modelo sobre los catorce tramos no utilizados para calibrar. Puesto que el mejor valor de la función objetivo se obtuvo para el horizonte de pronóstico de 1 hora, se presenta a continuación el análisis realizado sobre algunas

situaciones que representan los resultados obtenidos para dicho horizonte de pronóstico:

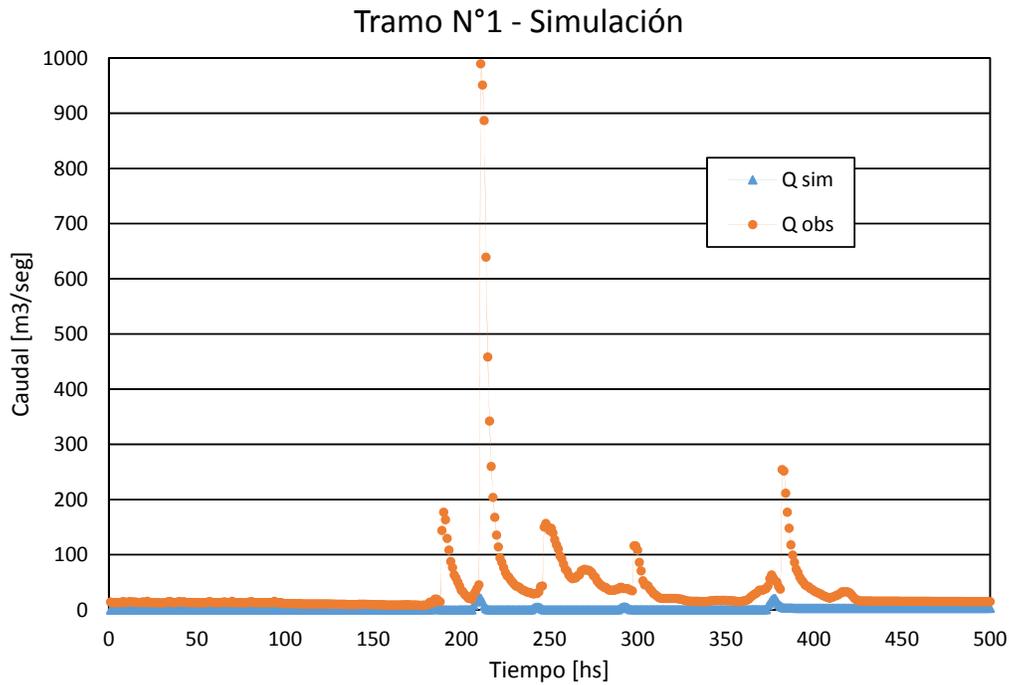


Figura 8.8. Resultado Simulación.

En la figura 8.8 se puede observar como el tramo N°1 es muy corto para lograr una buena simulación por que no se completa el tiempo necesario para la adecuación del modelo, es decir, el tiempo para que se llene el sistema de reservorios. Por esto no se pueden sacar conclusiones en este tramo. Este periodo de adecuación del modelo es observable en todos los tramos.

En el resto de los tramos se presentan las siguientes situaciones ilustradas a continuación:

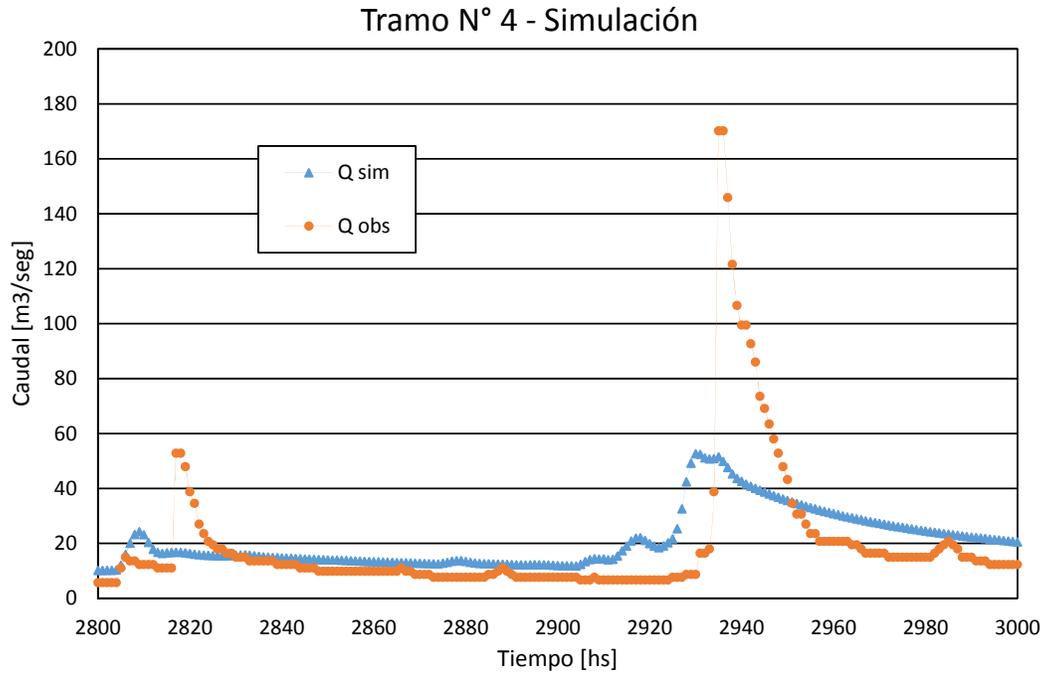


Figura 8.9. Resultado Simulación.

En la figura 8.9 se puede observar que el momento de ocurrencia del pico para los caudales simulados antecede el momento de ocurrencia real. A su vez, el caudal pico simulado es sumamente inferior al realmente observado. Según este resultado se puede concluir que la bondad de ajuste lograda por la calibración es muy pobre.

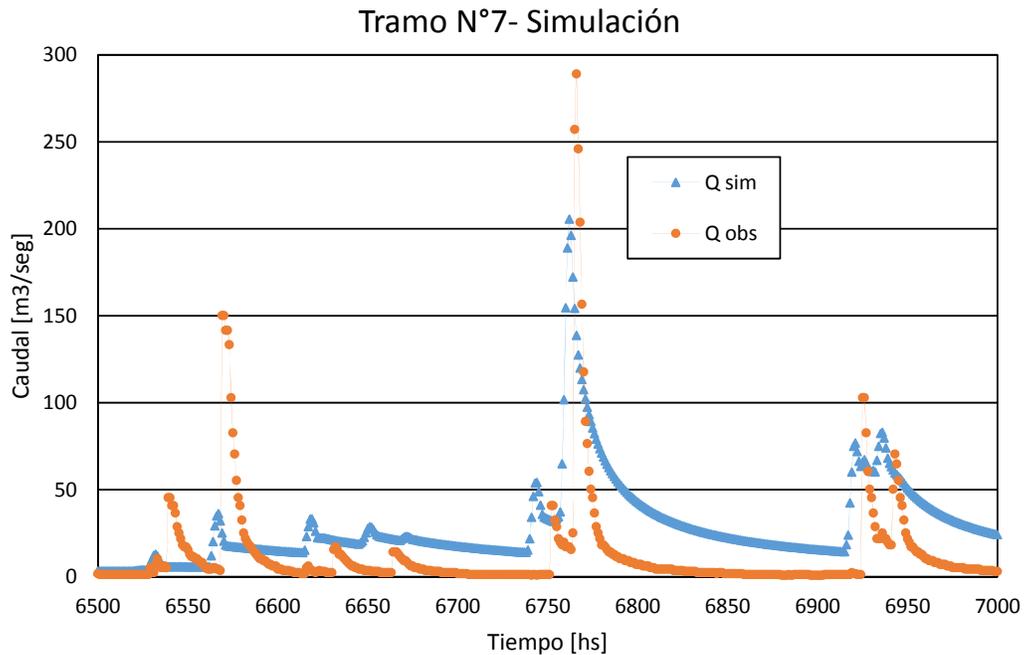


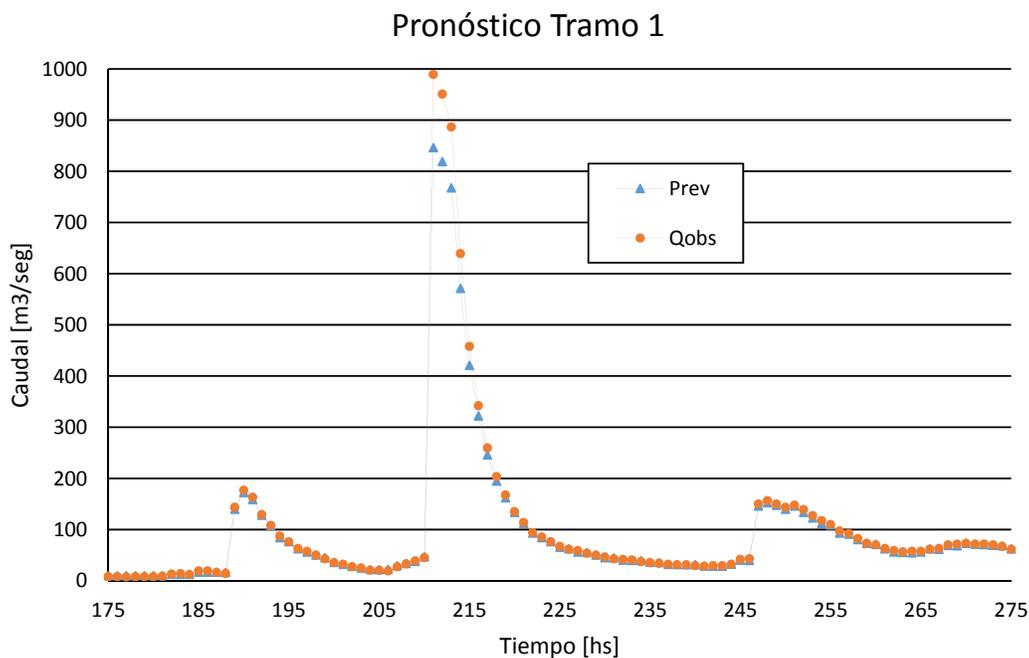
Figura 8.10. Resultado Simulación.

En la figura 8.10 se puede observar como la forma del hidrograma fue mejor simulada que en el caso de la figura 8.9. Sin embargo, al igual que en el caso de la figura 8.9, la no coincidencia entre el pico simulado y el observado sigue siendo evidente, como así también que el caudal pico observado supere al simulado.

A su vez, puede apreciarse en la figura 8.10, que la velocidad con la que disminuyen los caudales observados es superior a la que rige la variación de los caudales simulados. Esto se debe a que la velocidad de vaciado de los reservorios del modelo no se ajusta bien a la realidad.

8.5. PRONÓSTICO

Para el modo pronóstico, los valores obtenidos de la función objetivo, a diferencia de los obtenidos para el modo simulación, fueron más parejos para los diferentes horizontes de pronósticos. Se presentan a continuación el análisis de algunas situaciones que representan los resultados obtenidos para el horizonte de pronóstico correspondiente a 1 hora.



8.11. Resultados Pronóstico.

En la figura 8.11 se observa como la forma del hidrograma calculado por el modelo es semejante a la del hidrograma generados por los caudales observados. Se puede

apreciar también una importante diferencia entre los caudales picos de una magnitud cercana a 200 m³/seg.

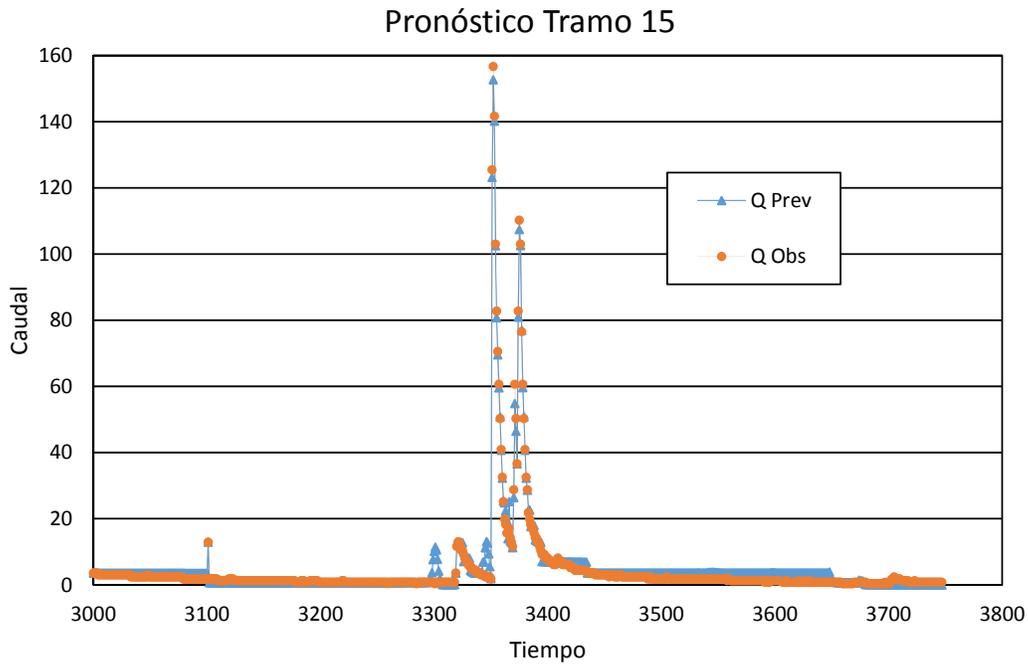


Figura 8.12. Resultados pronóstico.

En el caso de la figura 8.12 las formas de los hidrogramas calculado y observado, ya no son tan similares como ocurría en la figura 8.11. Esto podría deberse a errores propios que incluye la inevitable incertidumbre de los datos.

Si bien en este caso los caudales picos resultan más próximos, esto es análogo a lo que se observa en la figura 8.11 ya que para esta magnitud de caudal, los picos sí son bien simulados.

9. CONCLUSIONES

Si bien el objetivo principal de esta práctica estuvo orientado al ordenamiento y depuración de series hidrológicas, fue posible realizar varias modelaciones hidrológicas que permitieron poner en práctica la utilidad de algunas de las series de los datos obtenidos. Por esta razón las conclusiones de este trabajo se dividen en dos partes:

9.1. CONCLUSIONES SOBRE EL ORDENAMIENTO Y CONTROL DE DATOS

Durante esta etapa de trabajo, se advirtió la importancia y utilidad de los conceptos adquiridos durante el cursado de la carrera, más específicamente de las materias referidas al área de hidráulica. Sin el conocimiento previo de estos conceptos, hubiese resultado imposible el desarrollo de este trabajo. Se comprobó que la hidrología del mundo real tiene muchísima complejidad, que solo se comprende trabajando en casos reales. Por ello, en el proceso realizado durante la práctica supervisada, se constató la necesidad de formación de un criterio ingenieril, que permita la resolución de diversas situaciones habituales en el campo de la hidráulica.

Asimismo, durante este proceso se comprendió que la situación actual en cuanto a la disponibilidad de datos en Argentina no es la ideal. Por lo contrario, se observó una situación completamente deficitaria. Se debió partir de información incompleta y a veces de calidad dudosa. Se obtuvo información en múltiples formatos: en papel, escaneados, fotos en planillas, en documentos de texto, en imágenes satelitales, etc. que condujo a la necesidad de darles distintos tratamientos. Hubo que aplicar criterios, consultar con personal experimentado y utilizar numerosos recursos, para lograr series que fueran de mayor fiabilidad. No obstante, los resultados muestran que los datos obtenidos luego de procesados, aún conservan reducida calidad y reservan un cierto grado de incertidumbre.

Por otro lado, durante el proceso de trabajo, se tomó contacto con ciertos programas en cuales se contaba con experiencia, como Excel y AutoCAD y se incursionó en otros no empleados hasta el momento, por ejemplo Matlab. Esto resulta muy importante y ventajoso en esta era, en la cual la tecnología significa un ahorro importante de tiempo. En relación a esto se comprendió que si bien la tecnología facilitó el proceso para la

obtención de las series, el trabajo manual es insustituible ya que la prueba final debe ser la observación de consistencia en los datos.

Finalmente, durante este proceso, quedo claramente demostrada la importancia del trabajo desarrollado en grupo, y sus ventajas.

9.2. CONCLUSIONES SOBRE LA CALIBRACIÓN

Durante esta etapa del trabajo se aprendió el manejo de un programa hidrológico de gran difusión en Europa, como es el GR. También, el manejo de un método de optimización global multi-objetivo de gran difusión a nivel mundial, como es el MOCOM-UA.

Se observó la importancia de la calibración en el proceso de aplicación del modelo hidrológico. Se corroboró que un error en el ajuste puede generar imprecisiones de consideración que disparen alertas irreales, las cuales luego vuelven no creíble el sistema de alerta. Supongamos que se pronostica una crecida de 850m³/seg, y ocurre como en el caso de la figura 8.11 en la cual el caudal real resulta 1000 m³/seg. Esta diferencia es importante, y el área inundada esperada será inferior a la inundada real. Si por ejemplo, se debieran llevar a cabo evacuaciones, estaríamos poniendo en riesgo la vida de personas que no serían notificadas. Supongamos ahora el caso contrario, en el cual la crecida real fuese de 500 m³/seg. En este caso se crearía una cierta incredulidad, ya que el área inundada sería inferior a la designada por pronóstico, lo cual resultaría contraproducente para crecidas venideras.

Por lo señalado anteriormente es importante analizar de evaluar la bondad de ajuste de la calibración del modelo. Como resultado de este proceso, se observó que, aun existiendo deficiencias en ciertos tramos, el método de optimización arribó a juegos de parámetros que explican bastante bien la mayor parte de las series en modo pronóstico. En este caso observamos que cuando se aplica el modo simulación, en general se puede señalar que se obtuvieron coeficientes de ajuste que subestiman la calidad de ajuste, con respecto a la calidad observada al menos en la mayor parte de las series probadas. El modelo no ajusta adecuadamente el pico, ni la forma del hidrograma, y la velocidad de vaciado de los reservorios no se corresponde con lo que ocurren en la realidad. Por esto se concluye que la calibración en modo simulación no es buena.

En cuanto a los resultados obtenidos para modo pronóstico, el modelo ajusto generalmente bien la forma del hidrograma. Los errores perceptibles podrían deberse a las incongruencias presentes en las series de datos que se utilizaron como entrada. En cuanto al caudal pico del hidrograma, se puede señalar que este fue bien modelado, para caudales de hasta 500 m³/seg aproximadamente. Para caudales superiores no se logró un buen ajuste. Aunque la calibración lograda para pronóstico fue mucho mejor que la lograda para simulación, se concluye que está todavía debe ser mejorada.

Como conclusión final, se considera que el presente trabajo representa una base metodológica ordenada y eficiente de manejo y procesamiento de datos para ser empleados en el ajuste de modelos hidrológicos de simulación y pronóstico. Se considera además que todo el trabajo realizado en el manejo de datos, constituye un sólido punto de partida para continuar con el desarrollo de esta actividad, hasta conseguir una calidad de datos justificada adecuadamente por los indicadores de calidad de ajuste.

10. BIBLIOGRAFÍA

10.1. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Raff, M., Roberts, K., Walter, P. (2002). *Molecular Biology of the Cell*. New York: Garland Publishing. 4th ed.

Alonso, F.J. (2008). Calibración automática de un modelo hidrológico basada en algoritmos genéticos, aplicación a dos cuencas típicas argentinas. Tesis de Maestría. FCEFyN. Universidad Nacional de Córdoba.

Bacchiega J.D.; Bertoni J.C.; Maza. J.A. (2003). Pericia Hidráulica correspondiente al Expediente Nº 1341/2003 - Anexo V: Dinámica hídrica de la cuenca del río Salado.

Bertoni, J.C. (2003). Hidrología Avanzada. Notas de clases. Curso de Postgrado.

Beven, K., Binley, A. (1992). The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Process.*, 6, 279-298.

Beveridge, G., Schechter, R. (1979). *Optimization Theory and Practice*. MacGraw-Hill Book Co.

Bianchi J., Goniadzki D. Modelación hidrológica de la cuenca del río Guleguay para pronóstico y alerta hidrológico utilizando información de sensores remotos de microondas. Instituto Nacional del Agua. Ezeiza, Argentina.

Brazil, L.E. (1988). Multilevel calibration strategy for complex hydrologic simulation models. PhD Dissertation Colorado State University, Fort Collins.

Castillo, E., Conejo, A., Pedregal, P., García, R. y Alguacil, N. (2002). *Formulación y Resolución de Modelos de Programación Matemática en Ingeniería y Ciencia*. Universidad de Castilla-La Mancha, España.

Catalini, C., Garcia, C., Ortega, F., Ottaviani, M., Aliaga, I., Garcia, C. (2010). Análisis de sensibilidad sobre parámetros de un modelo hidrológico conceptual para pronóstico de crecida en una cuenca de montaña (Rio San Antonio, Prov. De Córdoba, XXXIV Congreso latinoamericano de hidráulica, punta del este, Uruguay.

Chocat, B. (1997). Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement. Eurydice 92, Ed. Lavoisier, Paris, 1124 p.

Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W. (1994). Hidrología Aplicada. McGraw Hill.

Clarke, R.T. (1973). A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use. Journal of Hydrology, 19, 1-20.

Collischonn, W. (2001). Simulação hidrológica de grandes bacias. Tesis Doctoral. UFRGS – IPH.

Duan, Q., Sorooshian, S., Gupta, V. (1992). Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. Water Resources Research Vol. 28, Nº 4 pp. 1015-1031.

Eckhardt, R. (1987). Stan Ulam, John Von Neumann, and The Monte Carlo Method. Los Alamos Science Special Issue.

García, C.L. (2013). Utilización de información satelital y terrestre para el manejo integrado del recurso hídrico de una cuenca serrana en la provincia de Córdoba, Argentina. Tesis Doctoral para optar al título de Doctor en Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Agropecuarias.

García, C.L. Zander, F., Kralisch, S., Ravelo, A.C., García, C.M., Flügel, W.A. (2012). Importancia de los Sistemas de Información Integral para el manejo integrado de cuencas hidrológicas. Primer Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos (INA, Buenos Aires). ISBN 978-987-20109-6-6. http://www.ina.gov.ar/pdf/ifrrhh/03_006_Garcia.pdf

Giordano, L., (2011). Cuenca del río Gualeguay en Rosario del Tala. Proceso de transformación lluvia total-escurrentía total. Desarrollo de herramientas de alerta y pronóstico hidrológico. Instituto Nacional del Agua. Ezeiza, Argentina.

Goldberg, D.E. (1989). Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley Pub. Co.

Gomez Rocha, H. y Acosta, J., Velez-Langs, O. (2006). Utilizacion de la Computacion Evolutiva y la Teoria de Juegos para la Automatizacion en Sistemas de Soporte a la Negociacion. Cap.3. Trabajo Final de la Carrera de Ingeniero de Sistemas. Universidad de Magdalena (Santa Marta-Colombia).

Goniadzki, D., M. Thibeault, H. Lozza, M. UriburuQuirno, & D. Dadamia, (2011). SCD/Aquarius Announcement of Opportunity. Assimilation of Soil Moisture Estimates into Flow-Forecasting Hydrologic Models. Instituto Nacional del Agua. Ezeiza, Argentina.

HEC-HMS. (2000). Hydrologic Modeling System. Technical Reference Manual. U.S.Army, Hydrologic Engineering.

Herring, C., Palmore, J.I. (1989). Random number generators are chaotic. ACM SIGPLAN Notices archive. V 24, Issue 11, P.76-79

Ibbitt, R.P. (1970). Systematic parameter fitting for conceptual models of catchment hydrology. Ph.D. dissertation, Imperial College of Science and Technology, University of London.

Johnston, P.R., Pilgrim, D.H. (1976). Parameter optimization for watershed model. Water Resources Research Vol. 12, Nº 3 pp. 477-486.

Kuczera, G., (1997). Efficient subspace probabilistic parameter optimization for catchment models. Water Resources Research. Vol. 33. Nº 1. Pags. 177-185.

Kuri, A., Galaviz, J. (2002). Algoritmos Genéticos. Fondo de Cultura Económica, UNAM, IPN.

Madsen. H. (2000). Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives. Journal of Hidrology. Vol. 235. Pags. 276-288.

Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. Journal of Hydrology, 10 (3), 282–290.

Nelder, J.A., Mead, R. (1965). A Simplex method for function minimization. Computer Journal, 7: 303-313.

Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andreassian, V., Anctil, F., Loumagne, C. (2005.a). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 1 - Can rainfall-runoff models effectively handle detailed potential evapotranspiration inputs? *Journal of Hydrology* 303(1-4), 275-289.

Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andreassian, V., Anctil, F., Loumagne, C. (2005.b). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 2 – Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfallrunoff modelling. *Journal of Hydrology* 303(1-4), 290-306.

Palahí M., Pukkala T. (2004). Métodos de optimización Heurística para la resolución de modelos de planificación forestal. *Cuadernos de S.E.C.F.* 18:103-108. I Reunión del grupo de trabajo sobre modelización forestal. Palencia, marzo, 2004.

San Miguel, S., (2005). Modelación hidrológica de cuencas de aporte en la provincia de Entre Ríos. Tesis de grado para la Licenciatura en Ciencias Aplicadas, UTN Regional Concepción del Uruguay.

Sorooshian, S. and Gupta, V.K. (1985). The Analysis of Structural Identifiability: Theory and Application to Conceptual Rainfall-Runoff Models. *Water Resources Research*. Vol. 21. Nº 4, Pags. 487-495.

Tassi, R. ; Bravo, J. M. ; Meller, A. ; Collischonn, W. (2006). Avaliação do impacto de diferentes funções-objetivo na calibração automática do modelo hidrológico IPH2. In: XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, 2006, Ciudad Guayana. Anais del XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica.

Viveros, E.R.C.; Barán, B.; Almirón, M. (1998). Optimización Basada en Colonias de Hormigas con Heurística de Inicialización. In: IX Panel de Informática, 1998, Asunción. EXPOMÁTICA'98.

Vrugt, J.A., Gupta, H.V., Bastidas, L.A., Bouten, W. and Sorooshian, S. (2003). Effective and efficient algorithm for multiobjective optimization of hydrologic models. *Water Resources Research*. Vol. 39. Nº 8. Pags. 5-1 a 5-19.

Vrugt, J.A., Gupta, H.V., Bouten, W. and Sorooshian, S. (2003). A Shuffled Complex Evolution Metropolis algorithm for optimization and uncertainty assessment

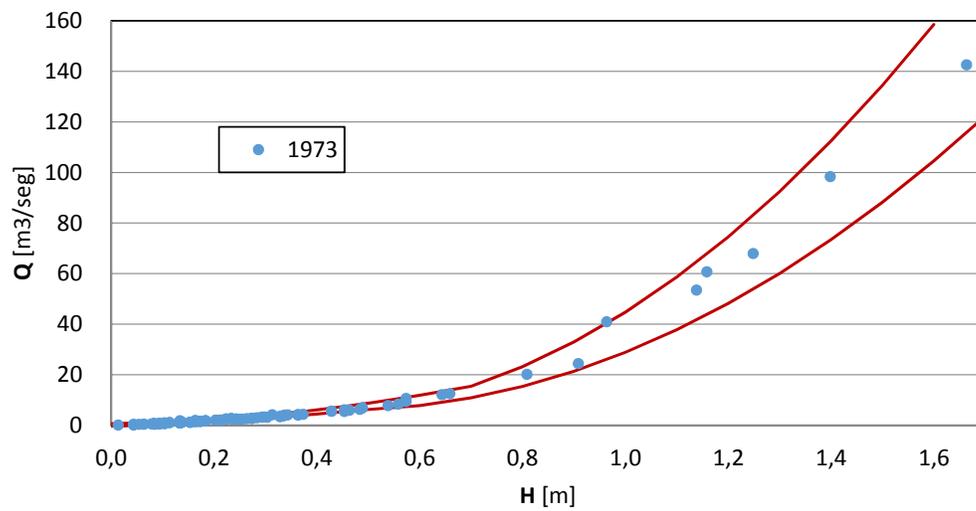
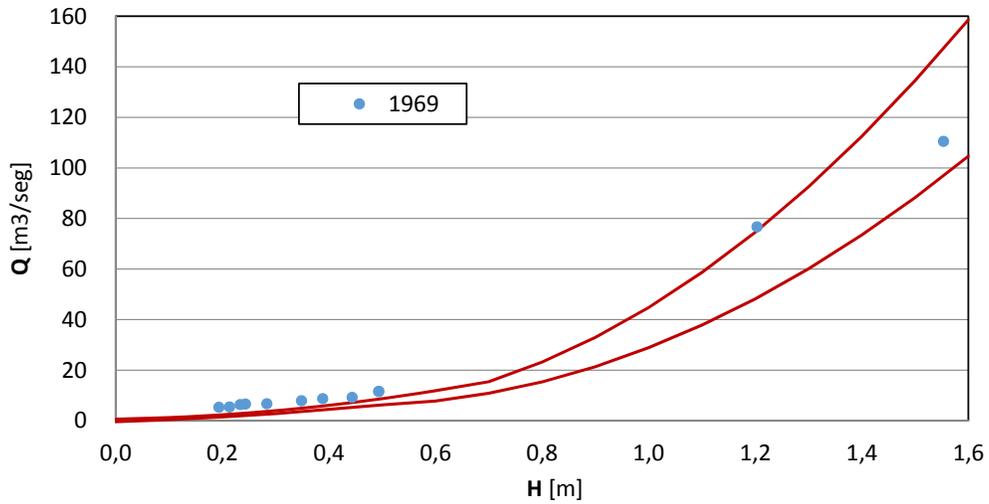
of hydrologic model parameters. *Water Resources Research*. Vol. 39. Nº 8. Pags. 1-1 a 5-16.

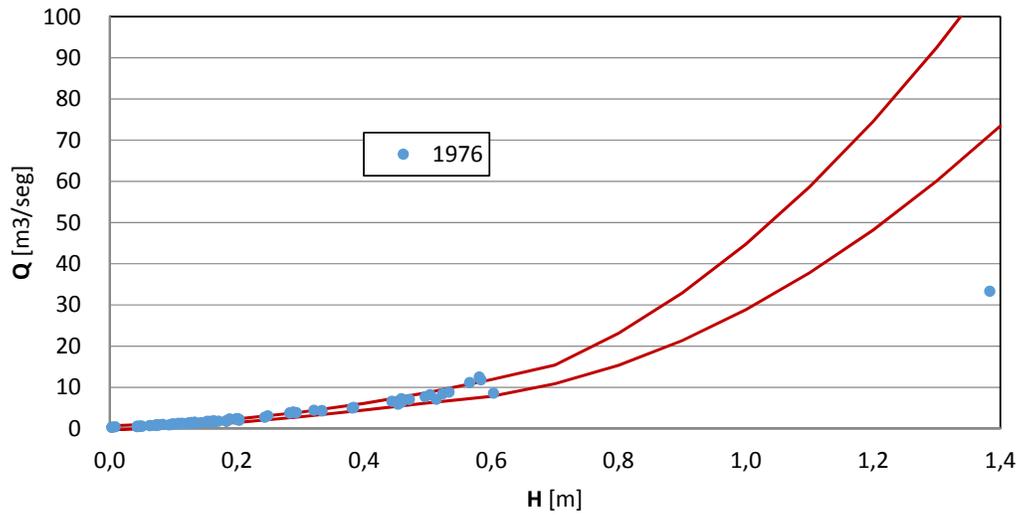
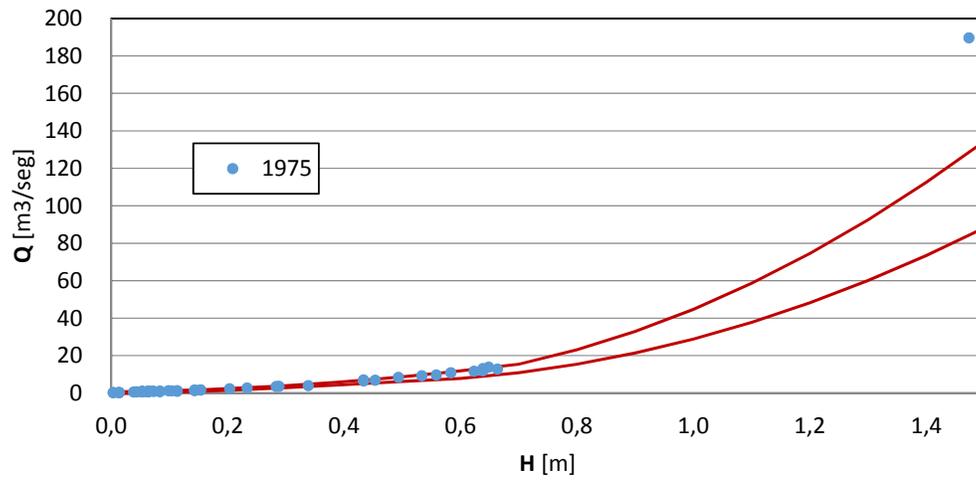
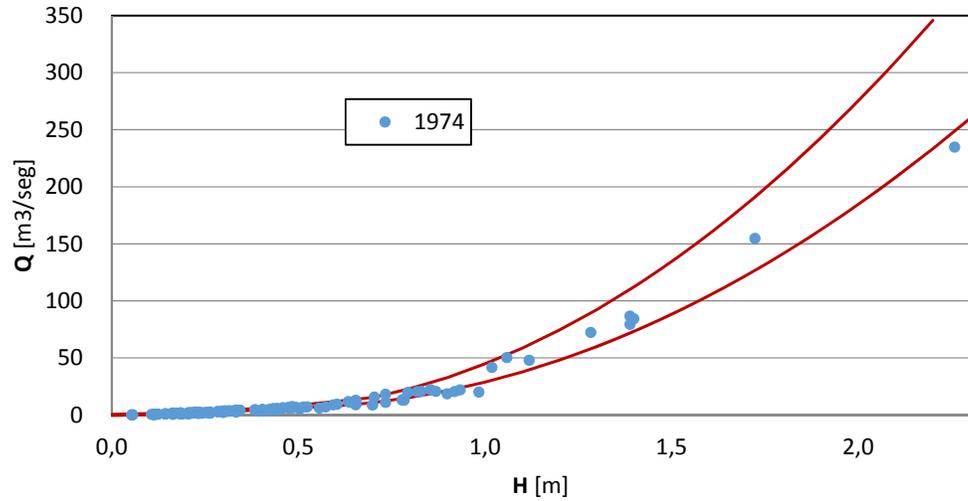
Yapo, P.O., Gupta, H. V. and Sorooshian, S. (1998). Multi-objective global optimization for hydrologic models. *Journal of Hydrology*. Vol. 204. Pags. 83-97.

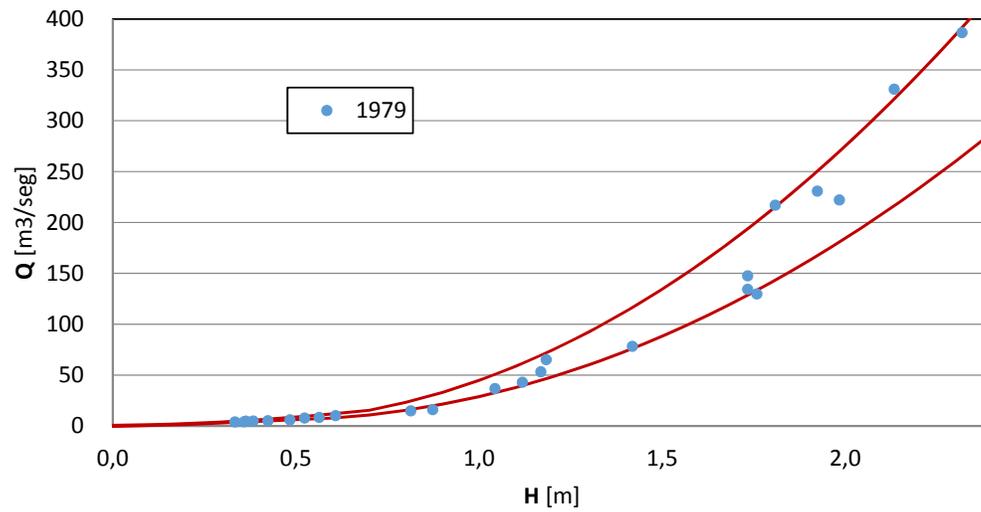
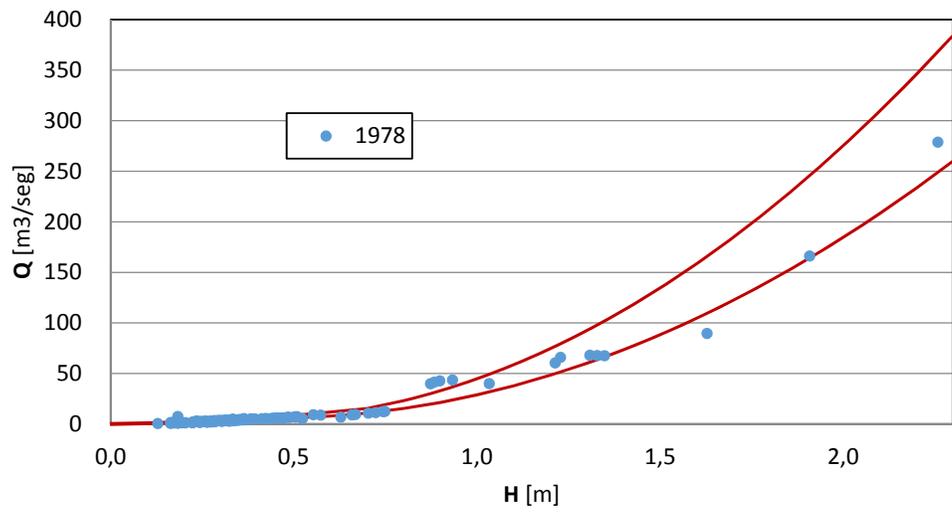
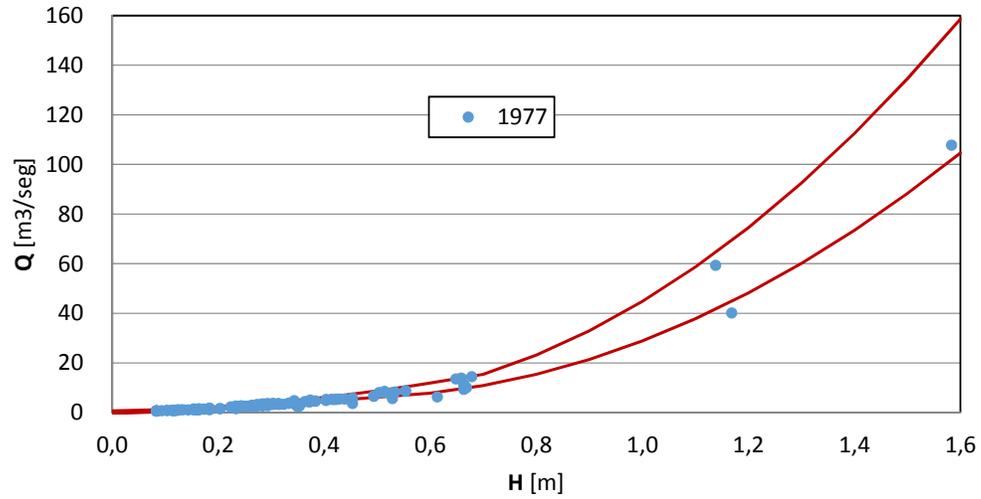
Zoraida Omaña G. (2006). *Introducción a la Investigación de Operaciones*. Universidad de Carabobo, Venezuela.

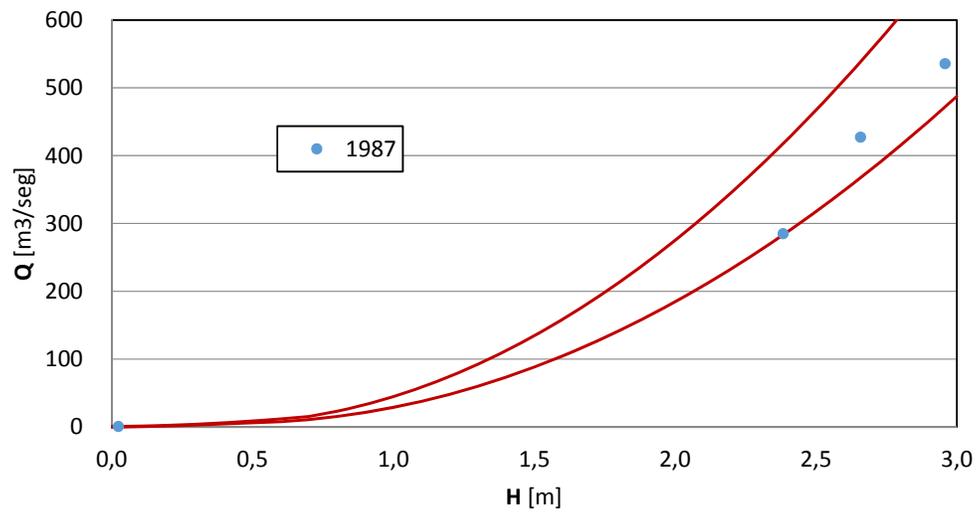
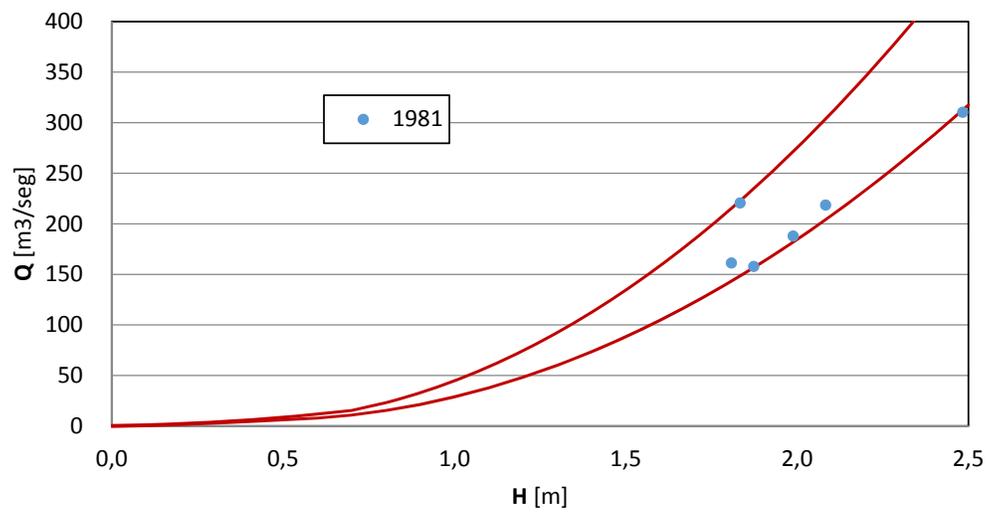
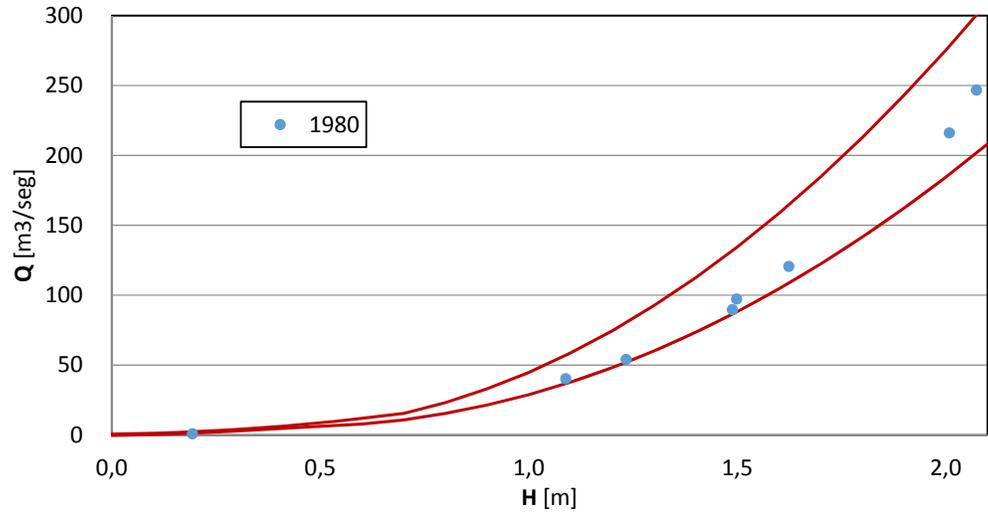
11. ANEXO

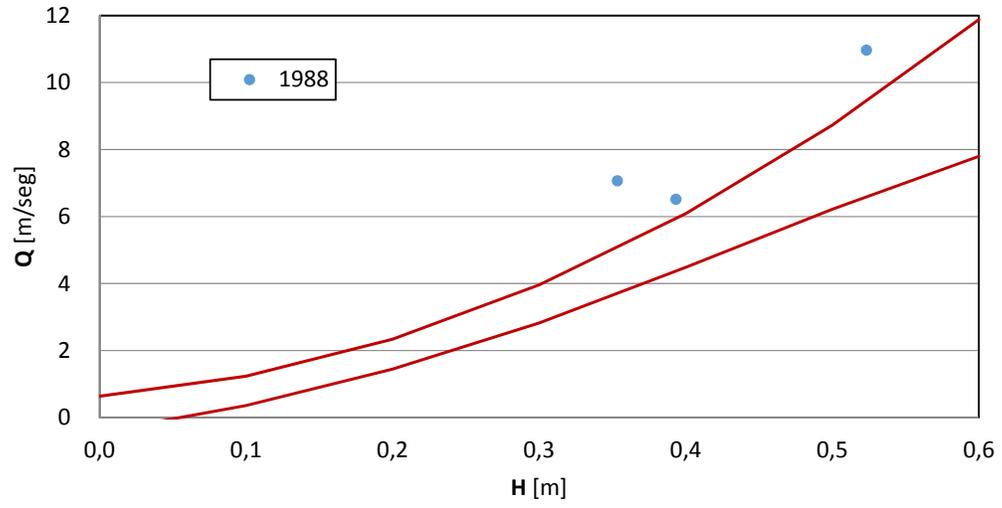
Análisis en busca de la existencia de relación entre resultado y fecha de los aforos:











Análisis de regresión:

AFOROS	H-0,1167	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6	Y-Ym	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6
									Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym
0.28	0.00	7.99	0.09	0.08	0.09	0.00	0.01	222.66	52.12	228.61	228.81	228.60	231.22	230.96
0.29	0.00	7.99	0.09	0.08	0.09	0.00	0.01	222.60	52.12	228.61	228.81	228.60	231.22	230.96
0.33	0.00	7.99	0.09	0.08	0.09	0.00	0.01	221.35	52.12	228.61	228.81	228.60	231.22	230.96
0.33	0.00	7.99	0.09	0.08	0.09	0.00	0.01	221.23	52.12	228.61	228.81	228.60	231.22	230.96
0.43	0.01	7.76	0.14	0.12	0.14	0.00	0.02	218.47	55.39	227.08	227.59	227.05	231.21	230.56
0.17	0.01	7.54	0.19	0.16	0.19	0.00	0.04	226.14	58.71	225.53	226.33	225.48	231.20	230.14
0.30	0.01	7.54	0.19	0.16	0.19	0.00	0.04	222.27	58.71	225.53	226.33	225.48	231.20	230.14
0.30	0.01	7.54	0.19	0.16	0.19	0.00	0.04	222.15	58.71	225.53	226.33	225.48	231.20	230.14
0.36	0.01	7.54	0.19	0.16	0.19	0.00	0.04	220.43	58.71	225.53	226.33	225.48	231.20	230.14
0.98	0.02	7.12	0.29	0.25	0.30	0.00	0.07	202.31	65.44	222.35	223.75	222.27	231.16	229.23
0.63	0.04	6.50	0.46	0.38	0.47	0.01	0.12	212.51	75.75	217.40	219.67	217.26	230.99	227.71
0.36	0.04	6.31	0.52	0.43	0.52	0.01	0.13	220.55	79.22	215.70	218.26	215.55	230.91	227.17
0.34	0.04	6.31	0.52	0.43	0.52	0.01	0.13	220.90	79.22	215.70	218.26	215.55	230.91	227.17
0.30	0.04	6.31	0.52	0.43	0.52	0.01	0.13	222.09	79.22	215.70	218.26	215.55	230.91	227.17
0.29	0.04	6.31	0.52	0.43	0.52	0.01	0.13	222.36	79.22	215.70	218.26	215.55	230.91	227.17
0.72	0.04	6.31	0.52	0.43	0.52	0.01	0.13	209.78	79.22	215.70	218.26	215.55	230.91	227.17
0.66	0.04	6.31	0.52	0.43	0.52	0.01	0.13	211.52	79.22	215.70	218.26	215.55	230.91	227.17
0.50	0.04	6.31	0.52	0.43	0.52	0.01	0.13	216.32	79.22	215.70	218.26	215.55	230.91	227.17
0.49	0.04	6.31	0.52	0.43	0.52	0.01	0.13	216.61	79.22	215.70	218.26	215.55	230.91	227.17
0.55	0.04	6.31	0.52	0.43	0.52	0.01	0.13	214.94	79.22	215.70	218.26	215.55	230.91	227.17
0.60	0.04	6.31	0.52	0.43	0.52	0.01	0.13	213.45	79.22	215.70	218.26	215.55	230.91	227.17
0.72	0.04	6.31	0.52	0.43	0.52	0.01	0.13	209.93	79.22	215.70	218.26	215.55	230.91	227.17
0.61	0.05	6.11	0.58	0.48	0.58	0.01	0.15	213.13	82.71	213.98	216.83	213.82	230.81	226.60

AFOR OS	H-0,1167	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6	Y-Ym	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6
									Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym
0.59	0.05	6.11	0.58	0.48	0.58	0.01	0.15	213.51	82.71	213.98	216.83	213.82	230.81	226.60
0.60	0.05	6.02	0.61	0.51	0.61	0.02	0.16	213.33	84.45	213.12	216.11	212.94	230.75	226.31
0.42	0.05	5.92	0.64	0.53	0.64	0.02	0.17	218.65	86.19	212.24	215.37	212.06	230.69	226.01
0.22	0.05	5.92	0.64	0.53	0.64	0.02	0.17	224.55	86.19	212.24	215.37	212.06	230.69	226.01
0.22	0.05	5.92	0.64	0.53	0.64	0.02	0.17	224.70	86.19	212.24	215.37	212.06	230.69	226.01
0.87	0.05	5.92	0.64	0.53	0.64	0.02	0.17	205.60	86.19	212.24	215.37	212.06	230.69	226.01
0.82	0.05	5.92	0.64	0.53	0.64	0.02	0.17	207.07	86.19	212.24	215.37	212.06	230.69	226.01
0.85	0.05	5.92	0.64	0.53	0.64	0.02	0.17	206.23	86.19	212.24	215.37	212.06	230.69	226.01
0.84	0.05	5.92	0.64	0.53	0.64	0.02	0.17	206.26	86.19	212.24	215.37	212.06	230.69	226.01
0.80	0.05	5.92	0.64	0.53	0.64	0.02	0.17	207.41	86.19	212.24	215.37	212.06	230.69	226.01
0.80	0.05	5.92	0.64	0.53	0.64	0.02	0.17	207.67	86.19	212.24	215.37	212.06	230.69	226.01
0.73	0.05	5.92	0.64	0.53	0.64	0.02	0.17	209.46	86.19	212.24	215.37	212.06	230.69	226.01
0.71	0.05	5.92	0.64	0.53	0.64	0.02	0.17	210.16	86.19	212.24	215.37	212.06	230.69	226.01
0.22	0.06	5.83	0.67	0.56	0.67	0.02	0.18	224.46	87.94	211.37	214.64	211.17	230.63	225.71
0.49	0.06	5.55	0.76	0.63	0.77	0.03	0.21	216.59	93.17	208.70	212.39	208.48	230.40	224.78
0.51	0.06	5.55	0.76	0.63	0.77	0.03	0.21	216.00	93.17	208.70	212.39	208.48	230.40	224.78
1.08	0.06	5.55	0.76	0.63	0.77	0.03	0.21	199.48	93.17	208.70	212.39	208.48	230.40	224.78
0.90	0.06	5.55	0.76	0.63	0.77	0.03	0.21	204.80	93.17	208.70	212.39	208.48	230.40	224.78
0.86	0.06	5.55	0.76	0.63	0.77	0.03	0.21	205.77	93.17	208.70	212.39	208.48	230.40	224.78
0.81	0.06	5.55	0.76	0.63	0.77	0.03	0.21	207.36	93.17	208.70	212.39	208.48	230.40	224.78
0.76	0.06	5.55	0.76	0.63	0.77	0.03	0.21	208.62	93.17	208.70	212.39	208.48	230.40	224.78
0.93	0.06	5.55	0.76	0.63	0.77	0.03	0.21	203.77	93.17	208.70	212.39	208.48	230.40	224.78
0.89	0.06	5.55	0.76	0.63	0.77	0.03	0.21	204.89	93.17	208.70	212.39	208.48	230.40	224.78
0.75	0.06	5.55	0.76	0.63	0.77	0.03	0.21	209.06	93.17	208.70	212.39	208.48	230.40	224.78
0.75	0.06	5.55	0.76	0.63	0.77	0.03	0.21	208.97	93.17	208.70	212.39	208.48	230.40	224.78
0.74	0.06	5.55	0.76	0.63	0.77	0.03	0.21	209.41	93.17	208.70	212.39	208.48	230.40	224.78

AFOR OS	H-0,1167	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6	Y-Ym	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6
									Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym
1.06	0.07	5.29	0.85	0.71	0.86	0.04	0.25	200.19	98.38	205.98	210.09	205.74	230.12	223.80
0.82	0.07	5.29	0.85	0.71	0.86	0.04	0.25	207.07	98.38	205.98	210.09	205.74	230.12	223.80
0.92	0.07	5.20	0.89	0.74	0.89	0.04	0.26	204.00	100.11	205.07	209.31	204.82	230.02	223.47
0.82	0.07	5.20	0.89	0.74	0.89	0.04	0.26	207.04	100.11	205.07	209.31	204.82	230.02	223.47
0.81	0.07	5.20	0.89	0.74	0.89	0.04	0.26	207.24	100.11	205.07	209.31	204.82	230.02	223.47
0.91	0.07	5.20	0.89	0.74	0.89	0.04	0.26	204.46	100.11	205.07	209.31	204.82	230.02	223.47
0.81	0.07	5.20	0.89	0.74	0.89	0.04	0.26	207.38	100.11	205.07	209.31	204.82	230.02	223.47
0.64	0.08	5.03	0.95	0.79	0.96	0.05	0.28	212.13	103.57	203.22	207.73	202.96	229.80	222.78
0.93	0.08	5.03	0.95	0.79	0.96	0.05	0.28	203.89	103.57	203.22	207.73	202.96	229.80	222.78
0.55	0.08	4.86	1.02	0.85	1.03	0.05	0.30	214.76	107.00	201.36	206.14	201.08	229.55	222.08
0.56	0.08	4.86	1.02	0.85	1.03	0.05	0.30	214.65	107.00	201.36	206.14	201.08	229.55	222.08
0.51	0.08	4.86	1.02	0.85	1.03	0.05	0.30	215.85	107.00	201.36	206.14	201.08	229.55	222.08
0.70	0.08	4.86	1.02	0.85	1.03	0.05	0.30	210.54	107.00	201.36	206.14	201.08	229.55	222.08
0.68	0.08	4.86	1.02	0.85	1.03	0.05	0.30	211.06	107.00	201.36	206.14	201.08	229.55	222.08
0.68	0.08	4.86	1.02	0.85	1.03	0.05	0.30	211.06	107.00	201.36	206.14	201.08	229.55	222.08
0.72	0.08	4.86	1.02	0.85	1.03	0.05	0.30	209.81	107.00	201.36	206.14	201.08	229.55	222.08
0.67	0.08	4.86	1.02	0.85	1.03	0.05	0.30	211.20	107.00	201.36	206.14	201.08	229.55	222.08
0.93	0.08	4.86	1.02	0.85	1.03	0.05	0.30	203.94	107.00	201.36	206.14	201.08	229.55	222.08
1.12	0.08	4.86	1.02	0.85	1.03	0.05	0.30	198.33	107.00	201.36	206.14	201.08	229.55	222.08
0.84	0.08	4.86	1.02	0.85	1.03	0.05	0.30	206.43	107.00	201.36	206.14	201.08	229.55	222.08
1.04	0.08	4.86	1.02	0.85	1.03	0.05	0.30	200.81	107.00	201.36	206.14	201.08	229.55	222.08
0.71	0.08	4.86	1.02	0.85	1.03	0.05	0.30	210.07	107.00	201.36	206.14	201.08	229.55	222.08
0.61	0.08	4.86	1.02	0.85	1.03	0.05	0.30	213.10	107.00	201.36	206.14	201.08	229.55	222.08
0.67	0.08	4.86	1.02	0.85	1.03	0.05	0.30	211.41	107.00	201.36	206.14	201.08	229.55	222.08
0.71	0.08	4.86	1.02	0.85	1.03	0.05	0.30	210.25	107.00	201.36	206.14	201.08	229.55	222.08
0.70	0.08	4.86	1.02	0.85	1.03	0.05	0.30	210.33	107.00	201.36	206.14	201.08	229.55	222.08

AFOR OS	H-0,1167	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6	Y-Ym	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6
									Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym
0.71	0.08	4.86	1.02	0.85	1.03	0.05	0.30	210.10	107.00	201.36	206.14	201.08	229.55	222.08
0.72	0.08	4.86	1.02	0.85	1.03	0.05	0.30	209.98	107.00	201.36	206.14	201.08	229.55	222.08
0.67	0.09	4.54	1.15	0.96	1.16	0.07	0.35	211.35	113.80	197.57	202.87	197.26	228.99	220.61
0.77	0.09	4.54	1.15	0.96	1.16	0.07	0.35	208.42	113.80	197.57	202.87	197.26	228.99	220.61
0.77	0.09	4.54	1.15	0.96	1.16	0.07	0.35	208.51	113.80	197.57	202.87	197.26	228.99	220.61
0.75	0.09	4.54	1.15	0.96	1.16	0.07	0.35	209.00	113.80	197.57	202.87	197.26	228.99	220.61
0.56	0.09	4.54	1.15	0.96	1.16	0.07	0.35	214.59	113.80	197.57	202.87	197.26	228.99	220.61
0.93	0.09	4.54	1.15	0.96	1.16	0.07	0.35	203.91	113.80	197.57	202.87	197.26	228.99	220.61
0.77	0.09	4.54	1.15	0.96	1.16	0.07	0.35	208.39	113.80	197.57	202.87	197.26	228.99	220.61
1.33	0.10	4.38	1.22	1.02	1.23	0.08	0.38	192.68	117.16	195.65	201.21	195.32	228.67	219.85
1.13	0.10	4.38	1.22	1.02	1.23	0.08	0.38	198.04	117.16	195.65	201.21	195.32	228.67	219.85
1.11	0.10	4.38	1.22	1.02	1.23	0.08	0.38	198.75	117.16	195.65	201.21	195.32	228.67	219.85
1.06	0.10	4.23	1.29	1.08	1.30	0.10	0.40	200.08	120.49	193.71	199.53	193.37	228.32	219.07
0.73	0.10	4.23	1.29	1.08	1.30	0.10	0.40	209.64	120.49	193.71	199.53	193.37	228.32	219.07
0.71	0.10	4.23	1.29	1.08	1.30	0.10	0.40	210.07	120.49	193.71	199.53	193.37	228.32	219.07
1.25	0.10	4.23	1.29	1.08	1.30	0.10	0.40	194.77	120.49	193.71	199.53	193.37	228.32	219.07
1.11	0.10	4.23	1.29	1.08	1.30	0.10	0.40	198.75	120.49	193.71	199.53	193.37	228.32	219.07
0.88	0.10	4.23	1.29	1.08	1.30	0.10	0.40	205.26	120.49	193.71	199.53	193.37	228.32	219.07
0.87	0.10	4.23	1.29	1.08	1.30	0.10	0.40	205.63	120.49	193.71	199.53	193.37	228.32	219.07
0.60	0.11	4.15	1.32	1.11	1.34	0.10	0.42	213.27	122.13	192.73	198.68	192.38	228.14	218.67
1.23	0.11	4.08	1.36	1.14	1.37	0.11	0.43	195.44	123.77	191.75	197.82	191.40	227.95	218.26
1.27	0.11	4.08	1.36	1.14	1.37	0.11	0.43	194.26	123.77	191.75	197.82	191.40	227.95	218.26
1.25	0.11	4.08	1.36	1.14	1.37	0.11	0.43	194.88	123.77	191.75	197.82	191.40	227.95	218.26
1.13	0.11	3.94	1.43	1.20	1.44	0.12	0.46	198.13	127.02	189.77	196.10	189.41	227.54	217.44
1.12	0.11	3.94	1.43	1.20	1.44	0.12	0.46	198.35	127.02	189.77	196.10	189.41	227.54	217.44
0.61	0.11	3.94	1.43	1.20	1.44	0.12	0.46	212.98	127.02	189.77	196.10	189.41	227.54	217.44

AFOR OS	H-0,1167	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6	Y-Ym	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6
									Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym
0.62	0.11	3.94	1.43	1.20	1.44	0.12	0.46	212.86	127.02	189.77	196.10	189.41	227.54	217.44
0.61	0.11	3.94	1.43	1.20	1.44	0.12	0.46	213.13	127.02	189.77	196.10	189.41	227.54	217.44
0.61	0.11	3.94	1.43	1.20	1.44	0.12	0.46	212.98	127.02	189.77	196.10	189.41	227.54	217.44
0.52	0.11	3.94	1.43	1.20	1.44	0.12	0.46	215.61	127.02	189.77	196.10	189.41	227.54	217.44
1.32	0.11	3.94	1.43	1.20	1.44	0.12	0.46	192.79	127.02	189.77	196.10	189.41	227.54	217.44
0.99	0.11	3.94	1.43	1.20	1.44	0.12	0.46	202.18	127.02	189.77	196.10	189.41	227.54	217.44
1.24	0.11	3.94	1.43	1.20	1.44	0.12	0.46	194.99	127.02	189.77	196.10	189.41	227.54	217.44
1.31	0.11	3.94	1.43	1.20	1.44	0.12	0.46	193.09	127.02	189.77	196.10	189.41	227.54	217.44
0.88	0.11	3.94	1.43	1.20	1.44	0.12	0.46	205.37	127.02	189.77	196.10	189.41	227.54	217.44
0.89	0.11	3.94	1.43	1.20	1.44	0.12	0.46	205.09	127.02	189.77	196.10	189.41	227.54	217.44
0.90	0.11	3.94	1.43	1.20	1.44	0.12	0.46	204.80	127.02	189.77	196.10	189.41	227.54	217.44
1.25	0.12	3.79	1.50	1.26	1.52	0.14	0.49	194.71	130.23	187.78	194.35	187.40	227.11	216.61
0.90	0.12	3.79	1.50	1.26	1.52	0.14	0.49	204.71	130.23	187.78	194.35	187.40	227.11	216.61
0.95	0.12	3.79	1.50	1.26	1.52	0.14	0.49	203.17	130.23	187.78	194.35	187.40	227.11	216.61
0.90	0.12	3.79	1.50	1.26	1.52	0.14	0.49	204.54	130.23	187.78	194.35	187.40	227.11	216.61
0.96	0.12	3.79	1.50	1.26	1.52	0.14	0.49	203.03	130.23	187.78	194.35	187.40	227.11	216.61
0.93	0.12	3.66	1.58	1.33	1.59	0.15	0.52	203.74	133.39	185.77	192.59	185.38	226.65	215.75
0.92	0.12	3.66	1.58	1.33	1.59	0.15	0.52	204.14	133.39	185.77	192.59	185.38	226.65	215.75
1.26	0.12	3.66	1.58	1.33	1.59	0.15	0.52	194.37	133.39	185.77	192.59	185.38	226.65	215.75
1.29	0.12	3.66	1.58	1.33	1.59	0.15	0.52	193.59	133.39	185.77	192.59	185.38	226.65	215.75
1.32	0.12	3.66	1.58	1.33	1.59	0.15	0.52	192.79	133.39	185.77	192.59	185.38	226.65	215.75
1.32	0.12	3.66	1.58	1.33	1.59	0.15	0.52	192.79	133.39	185.77	192.59	185.38	226.65	215.75
1.00	0.12	3.66	1.58	1.33	1.59	0.15	0.52	201.69	133.39	185.77	192.59	185.38	226.65	215.75
1.04	0.12	3.66	1.58	1.33	1.59	0.15	0.52	200.73	133.39	185.77	192.59	185.38	226.65	215.75
1.02	0.12	3.66	1.58	1.33	1.59	0.15	0.52	201.35	133.39	185.77	192.59	185.38	226.65	215.75
1.02	0.12	3.66	1.58	1.33	1.59	0.15	0.52	201.27	133.39	185.77	192.59	185.38	226.65	215.75

AFOR OS	H-0,1167	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6	Y-Ym	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6
									Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym
1.03	0.12	3.66	1.58	1.33	1.59	0.15	0.52	201.10	133.39	185.77	192.59	185.38	226.65	215.75
1.47	0.13	3.52	1.65	1.39	1.67	0.17	0.55	188.59	136.50	183.75	190.80	183.34	226.16	214.87
1.24	0.13	3.52	1.65	1.39	1.67	0.17	0.55	195.07	136.50	183.75	190.80	183.34	226.16	214.87
1.15	0.13	3.52	1.65	1.39	1.67	0.17	0.55	197.57	136.50	183.75	190.80	183.34	226.16	214.87
0.60	0.13	3.52	1.65	1.39	1.67	0.17	0.55	213.48	136.50	183.75	190.80	183.34	226.16	214.87
1.84	0.13	3.39	1.73	1.46	1.74	0.18	0.58	178.67	139.56	181.71	189.00	181.28	225.64	213.98
1.07	0.13	3.39	1.73	1.46	1.74	0.18	0.58	199.91	139.56	181.71	189.00	181.28	225.64	213.98
1.06	0.13	3.39	1.73	1.46	1.74	0.18	0.58	200.02	139.56	181.71	189.00	181.28	225.64	213.98
1.08	0.13	3.39	1.73	1.46	1.74	0.18	0.58	199.48	139.56	181.71	189.00	181.28	225.64	213.98
1.11	0.13	3.39	1.73	1.46	1.74	0.18	0.58	198.83	139.56	181.71	189.00	181.28	225.64	213.98
0.97	0.13	3.39	1.73	1.46	1.74	0.18	0.58	202.60	139.56	181.71	189.00	181.28	225.64	213.98
0.95	0.13	3.39	1.73	1.46	1.74	0.18	0.58	203.29	139.56	181.71	189.00	181.28	225.64	213.98
1.21	0.13	3.39	1.73	1.46	1.74	0.18	0.58	196.00	139.56	181.71	189.00	181.28	225.64	213.98
1.46	0.13	3.39	1.73	1.46	1.74	0.18	0.58	188.89	139.56	181.71	189.00	181.28	225.64	213.98
1.37	0.13	3.39	1.73	1.46	1.74	0.18	0.58	191.43	139.56	181.71	189.00	181.28	225.64	213.98
1.51	0.13	3.39	1.73	1.46	1.74	0.18	0.58	187.49	139.56	181.71	189.00	181.28	225.64	213.98
1.50	0.13	3.39	1.73	1.46	1.74	0.18	0.58	187.99	139.56	181.71	189.00	181.28	225.64	213.98
1.48	0.13	3.39	1.73	1.46	1.74	0.18	0.58	188.51	139.56	181.71	189.00	181.28	225.64	213.98
1.38	0.13	3.39	1.73	1.46	1.74	0.18	0.58	191.21	139.56	181.71	189.00	181.28	225.64	213.98
1.13	0.13	3.39	1.73	1.46	1.74	0.18	0.58	198.13	139.56	181.71	189.00	181.28	225.64	213.98
1.30	0.14	3.27	1.80	1.52	1.82	0.20	0.61	193.37	142.56	179.65	187.17	179.21	225.09	213.06
1.18	0.14	3.14	1.88	1.59	1.90	0.22	0.64	196.64	145.51	177.58	185.33	177.13	224.50	212.13
1.18	0.14	3.14	1.88	1.59	1.90	0.22	0.64	196.86	145.51	177.58	185.33	177.13	224.50	212.13
1.14	0.14	3.14	1.88	1.59	1.90	0.22	0.64	197.82	145.51	177.58	185.33	177.13	224.50	212.13
1.68	0.14	3.14	1.88	1.59	1.90	0.22	0.64	183.06	145.51	177.58	185.33	177.13	224.50	212.13
1.43	0.14	3.14	1.88	1.59	1.90	0.22	0.64	189.83	145.51	177.58	185.33	177.13	224.50	212.13

AFOR OS	H-0,1167	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6	Y-Ym	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6
									Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym
1.50	0.14	3.14	1.88	1.59	1.90	0.22	0.64	187.96	145.51	177.58	185.33	177.13	224.50	212.13
1.44	0.14	3.14	1.88	1.59	1.90	0.22	0.64	189.39	145.51	177.58	185.33	177.13	224.50	212.13
1.06	0.14	3.14	1.88	1.59	1.90	0.22	0.64	200.02	145.51	177.58	185.33	177.13	224.50	212.13
1.15	0.15	2.91	2.04	1.73	2.06	0.26	0.71	197.65	151.21	173.40	181.60	172.92	223.23	210.22
1.35	0.15	2.91	2.04	1.73	2.06	0.26	0.71	191.96	151.21	173.40	181.60	172.92	223.23	210.22
1.73	0.15	2.91	2.04	1.73	2.06	0.26	0.71	181.60	151.21	173.40	181.60	172.92	223.23	210.22
1.62	0.15	2.91	2.04	1.73	2.06	0.26	0.71	184.71	151.21	173.40	181.60	172.92	223.23	210.22
1.79	0.15	2.91	2.04	1.73	2.06	0.26	0.71	179.98	151.21	173.40	181.60	172.92	223.23	210.22
1.69	0.15	2.91	2.04	1.73	2.06	0.26	0.71	182.60	151.21	173.40	181.60	172.92	223.23	210.22
1.64	0.15	2.91	2.04	1.73	2.06	0.26	0.71	183.98	151.21	173.40	181.60	172.92	223.23	210.22
1.68	0.15	2.91	2.04	1.73	2.06	0.26	0.71	182.87	151.21	173.40	181.60	172.92	223.23	210.22
1.24	0.15	2.91	2.04	1.73	2.06	0.26	0.71	195.18	151.21	173.40	181.60	172.92	223.23	210.22
1.20	0.15	2.91	2.04	1.73	2.06	0.26	0.71	196.08	151.21	173.40	181.60	172.92	223.23	210.22
1.45	0.15	2.91	2.04	1.73	2.06	0.26	0.71	189.33	151.21	173.40	181.60	172.92	223.23	210.22
1.44	0.15	2.91	2.04	1.73	2.06	0.26	0.71	189.61	151.21	173.40	181.60	172.92	223.23	210.22
1.77	0.16	2.80	2.12	1.80	2.14	0.29	0.74	180.66	153.97	171.28	179.71	170.79	222.55	209.23
1.38	0.16	2.80	2.12	1.80	2.14	0.29	0.74	191.15	153.97	171.28	179.71	170.79	222.55	209.23
1.38	0.16	2.80	2.12	1.80	2.14	0.29	0.74	191.21	153.97	171.28	179.71	170.79	222.55	209.23
1.19	0.16	2.80	2.12	1.80	2.14	0.29	0.74	196.53	153.97	171.28	179.71	170.79	222.55	209.23
1.25	0.16	2.80	2.12	1.80	2.14	0.29	0.74	194.88	153.97	171.28	179.71	170.79	222.55	209.23
1.21	0.16	2.80	2.12	1.80	2.14	0.29	0.74	195.91	153.97	171.28	179.71	170.79	222.55	209.23
1.99	0.16	2.69	2.20	1.87	2.22	0.31	0.78	174.68	156.66	169.16	177.80	168.66	221.83	208.23
1.48	0.16	2.69	2.20	1.87	2.22	0.31	0.78	188.54	156.66	169.16	177.80	168.66	221.83	208.23
1.61	0.16	2.69	2.20	1.87	2.22	0.31	0.78	184.98	156.66	169.16	177.80	168.66	221.83	208.23
1.55	0.16	2.69	2.20	1.87	2.22	0.31	0.78	186.37	156.66	169.16	177.80	168.66	221.83	208.23
0.68	0.16	2.69	2.20	1.87	2.22	0.31	0.78	211.12	156.66	169.16	177.80	168.66	221.83	208.23

AFOR OS	H-0,1167	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6	Y-Ym	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6
									Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym
1.67	0.16	2.69	2.20	1.87	2.22	0.31	0.78	183.14	156.66	169.16	177.80	168.66	221.83	208.23
1.62	0.16	2.69	2.20	1.87	2.22	0.31	0.78	184.66	156.66	169.16	177.80	168.66	221.83	208.23
1.61	0.16	2.69	2.20	1.87	2.22	0.31	0.78	184.98	156.66	169.16	177.80	168.66	221.83	208.23
1.61	0.16	2.69	2.20	1.87	2.22	0.31	0.78	184.90	156.66	169.16	177.80	168.66	221.83	208.23
1.68	0.16	2.69	2.20	1.87	2.22	0.31	0.78	183.08	156.66	169.16	177.80	168.66	221.83	208.23
1.63	0.16	2.69	2.20	1.87	2.22	0.31	0.78	184.41	156.66	169.16	177.80	168.66	221.83	208.23
1.85	0.16	2.69	2.20	1.87	2.22	0.31	0.78	178.35	156.66	169.16	177.80	168.66	221.83	208.23
1.79	0.16	2.69	2.20	1.87	2.22	0.31	0.78	180.09	156.66	169.16	177.80	168.66	221.83	208.23
1.78	0.16	2.69	2.20	1.87	2.22	0.31	0.78	180.23	156.66	169.16	177.80	168.66	221.83	208.23
1.78	0.16	2.69	2.20	1.87	2.22	0.31	0.78	180.23	156.66	169.16	177.80	168.66	221.83	208.23
1.51	0.16	2.69	2.20	1.87	2.22	0.31	0.78	187.66	156.66	169.16	177.80	168.66	221.83	208.23
1.51	0.16	2.69	2.20	1.87	2.22	0.31	0.78	187.66	156.66	169.16	177.80	168.66	221.83	208.23
1.37	0.16	2.69	2.20	1.87	2.22	0.31	0.78	191.57	156.66	169.16	177.80	168.66	221.83	208.23
1.33	0.16	2.69	2.20	1.87	2.22	0.31	0.78	192.54	156.66	169.16	177.80	168.66	221.83	208.23
1.43	0.16	2.69	2.20	1.87	2.22	0.31	0.78	189.91	156.66	169.16	177.80	168.66	221.83	208.23
1.52	0.16	2.69	2.20	1.87	2.22	0.31	0.78	187.44	156.66	169.16	177.80	168.66	221.83	208.23
1.37	0.16	2.69	2.20	1.87	2.22	0.31	0.78	191.35	156.66	169.16	177.80	168.66	221.83	208.23
1.40	0.16	2.69	2.20	1.87	2.22	0.31	0.78	190.49	156.66	169.16	177.80	168.66	221.83	208.23
1.40	0.16	2.69	2.20	1.87	2.22	0.31	0.78	190.57	156.66	169.16	177.80	168.66	221.83	208.23
1.30	0.16	2.69	2.20	1.87	2.22	0.31	0.78	193.34	156.66	169.16	177.80	168.66	221.83	208.23
1.33	0.16	2.69	2.20	1.87	2.22	0.31	0.78	192.59	156.66	169.16	177.80	168.66	221.83	208.23
1.39	0.16	2.69	2.20	1.87	2.22	0.31	0.78	190.90	156.66	169.16	177.80	168.66	221.83	208.23
1.41	0.16	2.69	2.20	1.87	2.22	0.31	0.78	190.38	156.66	169.16	177.80	168.66	221.83	208.23
1.21	0.16	2.69	2.20	1.87	2.22	0.31	0.78	196.02	156.66	169.16	177.80	168.66	221.83	208.23
1.23	0.16	2.69	2.20	1.87	2.22	0.31	0.78	195.32	156.66	169.16	177.80	168.66	221.83	208.23
1.44	0.16	2.69	2.20	1.87	2.22	0.31	0.78	189.61	156.66	169.16	177.80	168.66	221.83	208.23

AFOR OS	H-0,1167	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6	Y-Ym	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6
									Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym
0.85	0.16	2.69	2.20	1.87	2.22	0.31	0.78	206.06	156.66	169.16	177.80	168.66	221.83	208.23
0.85	0.16	2.69	2.20	1.87	2.22	0.31	0.78	206.06	156.66	169.16	177.80	168.66	221.83	208.23
1.70	0.16	2.69	2.20	1.87	2.22	0.31	0.78	182.33	156.66	169.16	177.80	168.66	221.83	208.23
1.63	0.17	2.59	2.28	1.94	2.30	0.34	0.81	184.38	159.27	167.02	175.87	166.51	221.08	207.21
1.82	0.17	2.53	2.32	1.98	2.34	0.35	0.83	179.18	160.56	165.95	174.90	165.43	220.69	206.69
1.64	0.17	2.49	2.37	2.02	2.39	0.36	0.85	184.03	161.82	164.87	173.93	164.34	220.29	206.17
1.70	0.17	2.49	2.37	2.02	2.39	0.36	0.85	182.41	161.82	164.87	173.93	164.34	220.29	206.17
1.37	0.17	2.49	2.37	2.02	2.39	0.36	0.85	191.57	161.82	164.87	173.93	164.34	220.29	206.17
1.44	0.17	2.49	2.37	2.02	2.39	0.36	0.85	189.53	161.82	164.87	173.93	164.34	220.29	206.17
1.06	0.17	2.49	2.37	2.02	2.39	0.36	0.85	200.22	161.82	164.87	173.93	164.34	220.29	206.17
1.88	0.17	2.49	2.37	2.02	2.39	0.36	0.85	177.47	161.82	164.87	173.93	164.34	220.29	206.17
1.88	0.17	2.49	2.37	2.02	2.39	0.36	0.85	177.50	161.82	164.87	173.93	164.34	220.29	206.17
1.58	0.17	2.49	2.37	2.02	2.39	0.36	0.85	185.69	161.82	164.87	173.93	164.34	220.29	206.17
1.65	0.18	2.34	2.49	2.13	2.51	0.41	0.90	183.68	165.49	161.62	170.99	161.08	219.05	204.58
1.86	0.18	2.30	2.54	2.17	2.56	0.42	0.92	178.14	166.68	160.54	170.00	159.99	218.61	204.05
1.81	0.18	2.30	2.54	2.17	2.56	0.42	0.92	179.56	166.68	160.54	170.00	159.99	218.61	204.05
1.80	0.18	2.30	2.54	2.17	2.56	0.42	0.92	179.80	166.68	160.54	170.00	159.99	218.61	204.05
1.80	0.18	2.30	2.54	2.17	2.56	0.42	0.92	179.66	166.68	160.54	170.00	159.99	218.61	204.05
1.87	0.18	2.30	2.54	2.17	2.56	0.42	0.92	177.82	166.68	160.54	170.00	159.99	218.61	204.05
1.84	0.18	2.30	2.54	2.17	2.56	0.42	0.92	178.62	166.68	160.54	170.00	159.99	218.61	204.05
0.98	0.18	2.30	2.54	2.17	2.56	0.42	0.92	202.37	166.68	160.54	170.00	159.99	218.61	204.05
1.83	0.18	2.30	2.54	2.17	2.56	0.42	0.92	178.81	166.68	160.54	170.00	159.99	218.61	204.05
1.81	0.18	2.30	2.54	2.17	2.56	0.42	0.92	179.56	166.68	160.54	170.00	159.99	218.61	204.05
1.82	0.18	2.30	2.54	2.17	2.56	0.42	0.92	179.10	166.68	160.54	170.00	159.99	218.61	204.05
1.66	0.18	2.30	2.54	2.17	2.56	0.42	0.92	183.52	166.68	160.54	170.00	159.99	218.61	204.05
1.65	0.18	2.30	2.54	2.17	2.56	0.42	0.92	183.79	166.68	160.54	170.00	159.99	218.61	204.05

AFOR OS	H-0,1167	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6	Y-Ym	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6
									Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym
1.86	0.18	2.30	2.54	2.17	2.56	0.42	0.92	178.16	166.68	160.54	170.00	159.99	218.61	204.05
1.92	0.18	2.30	2.54	2.17	2.56	0.42	0.92	176.41	166.68	160.54	170.00	159.99	218.61	204.05
1.79	0.18	2.30	2.54	2.17	2.56	0.42	0.92	180.07	166.68	160.54	170.00	159.99	218.61	204.05
1.55	0.18	2.30	2.54	2.17	2.56	0.42	0.92	186.57	166.68	160.54	170.00	159.99	218.61	204.05
1.74	0.18	2.30	2.54	2.17	2.56	0.42	0.92	181.33	166.68	160.54	170.00	159.99	218.61	204.05
1.53	0.18	2.30	2.54	2.17	2.56	0.42	0.92	187.17	166.68	160.54	170.00	159.99	218.61	204.05
1.72	0.18	2.30	2.54	2.17	2.56	0.42	0.92	181.92	166.68	160.54	170.00	159.99	218.61	204.05
1.17	0.18	2.30	2.54	2.17	2.56	0.42	0.92	197.06	166.68	160.54	170.00	159.99	218.61	204.05
1.51	0.18	2.30	2.54	2.17	2.56	0.42	0.92	187.47	166.68	160.54	170.00	159.99	218.61	204.05
1.50	0.18	2.30	2.54	2.17	2.56	0.42	0.92	187.93	166.68	160.54	170.00	159.99	218.61	204.05
1.69	0.18	2.30	2.54	2.17	2.56	0.42	0.92	182.81	166.68	160.54	170.00	159.99	218.61	204.05
1.55	0.18	2.30	2.54	2.17	2.56	0.42	0.92	186.51	166.68	160.54	170.00	159.99	218.61	204.05
1.55	0.18	2.30	2.54	2.17	2.56	0.42	0.92	186.59	166.68	160.54	170.00	159.99	218.61	204.05
1.48	0.18	2.30	2.54	2.17	2.56	0.42	0.92	188.32	166.68	160.54	170.00	159.99	218.61	204.05
1.51	0.18	2.30	2.54	2.17	2.56	0.42	0.92	187.49	166.68	160.54	170.00	159.99	218.61	204.05
1.55	0.18	2.30	2.54	2.17	2.56	0.42	0.92	186.54	166.68	160.54	170.00	159.99	218.61	204.05
1.14	0.18	2.30	2.54	2.17	2.56	0.42	0.92	197.74	166.68	160.54	170.00	159.99	218.61	204.05
1.20	0.18	2.30	2.54	2.17	2.56	0.42	0.92	196.16	166.68	160.54	170.00	159.99	218.61	204.05
1.15	0.18	2.30	2.54	2.17	2.56	0.42	0.92	197.57	166.68	160.54	170.00	159.99	218.61	204.05
1.22	0.18	2.30	2.54	2.17	2.56	0.42	0.92	195.72	166.68	160.54	170.00	159.99	218.61	204.05
1.07	0.18	2.30	2.54	2.17	2.56	0.42	0.92	199.79	166.68	160.54	170.00	159.99	218.61	204.05
7.58	0.18	2.30	2.54	2.17	2.56	0.42	0.92	58.21	166.68	160.54	170.00	159.99	218.61	204.05
1.00	0.19	2.21	2.62	2.24	2.64	0.45	0.96	201.95	168.99	158.36	168.02	157.80	217.72	202.96
1.03	0.19	2.21	2.62	2.24	2.64	0.45	0.96	200.93	168.99	158.36	168.02	157.80	217.72	202.96
2.36	0.19	2.21	2.62	2.24	2.64	0.45	0.96	165.14	168.99	158.36	168.02	157.80	217.72	202.96
5.38	0.19	2.12	2.71	2.32	2.73	0.48	1.00	96.53	171.22	156.16	166.02	155.59	216.79	201.85

AFOR OS	H-0,1167	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6	Y-Ym	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6
									Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym
1.28	0.19	2.12	2.71	2.32	2.73	0.48	1.00	193.96	171.22	156.16	166.02	155.59	216.79	201.85
1.30	0.19	2.12	2.71	2.32	2.73	0.48	1.00	193.51	171.22	156.16	166.02	155.59	216.79	201.85
0.98	0.19	2.12	2.71	2.32	2.73	0.48	1.00	202.32	171.22	156.16	166.02	155.59	216.79	201.85
2.33	0.20	2.04	2.80	2.40	2.82	0.51	1.04	165.79	173.37	153.96	164.00	153.38	215.82	200.73
2.31	0.20	2.04	2.80	2.40	2.82	0.51	1.04	166.20	173.37	153.96	164.00	153.38	215.82	200.73
2.42	0.20	2.00	2.84	2.44	2.87	0.53	1.06	163.48	174.41	152.86	162.99	152.27	215.32	200.16
2.03	0.20	1.96	2.89	2.48	2.91	0.55	1.08	173.52	175.43	151.75	161.98	151.16	214.82	199.59
2.11	0.20	1.96	2.89	2.48	2.91	0.55	1.08	171.47	175.43	151.75	161.98	151.16	214.82	199.59
1.36	0.20	1.96	2.89	2.48	2.91	0.55	1.08	191.71	175.43	151.75	161.98	151.16	214.82	199.59
1.25	0.20	1.96	2.89	2.48	2.91	0.55	1.08	194.74	175.43	151.75	161.98	151.16	214.82	199.59
1.89	0.20	1.96	2.89	2.48	2.91	0.55	1.08	177.20	175.43	151.75	161.98	151.16	214.82	199.59
2.40	0.20	1.96	2.89	2.48	2.91	0.55	1.08	163.96	175.43	151.75	161.98	151.16	214.82	199.59
2.26	0.20	1.96	2.89	2.48	2.91	0.55	1.08	167.67	175.43	151.75	161.98	151.16	214.82	199.59
2.04	0.20	1.96	2.89	2.48	2.91	0.55	1.08	173.39	175.43	151.75	161.98	151.16	214.82	199.59
1.60	0.20	1.96	2.89	2.48	2.91	0.55	1.08	185.04	175.43	151.75	161.98	151.16	214.82	199.59
1.63	0.20	1.96	2.89	2.48	2.91	0.55	1.08	184.41	175.43	151.75	161.98	151.16	214.82	199.59
1.40	0.20	1.96	2.89	2.48	2.91	0.55	1.08	190.55	175.43	151.75	161.98	151.16	214.82	199.59
1.38	0.20	1.96	2.89	2.48	2.91	0.55	1.08	191.13	175.43	151.75	161.98	151.16	214.82	199.59
2.05	0.21	1.89	2.98	2.56	3.00	0.58	1.12	173.10	177.40	149.53	159.94	148.93	213.78	198.44
1.34	0.21	1.89	2.98	2.56	3.00	0.58	1.12	192.29	177.40	149.53	159.94	148.93	213.78	198.44
2.06	0.21	1.89	2.98	2.56	3.00	0.58	1.12	172.71	177.40	149.53	159.94	148.93	213.78	198.44
5.48	0.21	1.82	3.07	2.64	3.09	0.62	1.16	94.65	179.29	147.31	157.89	146.69	212.70	197.27
1.96	0.21	1.82	3.07	2.64	3.09	0.62	1.16	175.58	179.29	147.31	157.89	146.69	212.70	197.27
2.19	0.21	1.82	3.07	2.64	3.09	0.62	1.16	169.54	179.29	147.31	157.89	146.69	212.70	197.27
2.06	0.21	1.82	3.07	2.64	3.09	0.62	1.16	172.87	179.29	147.31	157.89	146.69	212.70	197.27
2.15	0.22	1.75	3.16	2.72	3.19	0.66	1.20	170.48	181.08	145.07	155.83	144.45	211.58	196.08

AFOR OS	H-0,1167	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6	Y-Ym	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6
									Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym
2.60	0.22	1.69	3.25	2.81	3.28	0.70	1.25	158.93	182.79	142.83	153.75	142.20	210.42	194.88
2.58	0.22	1.69	3.25	2.81	3.28	0.70	1.25	159.34	182.79	142.83	153.75	142.20	210.42	194.88
2.53	0.22	1.69	3.25	2.81	3.28	0.70	1.25	160.63	182.79	142.83	153.75	142.20	210.42	194.88
2.21	0.22	1.69	3.25	2.81	3.28	0.70	1.25	168.89	182.79	142.83	153.75	142.20	210.42	194.88
2.17	0.22	1.69	3.25	2.81	3.28	0.70	1.25	170.04	182.79	142.83	153.75	142.20	210.42	194.88
2.29	0.22	1.69	3.25	2.81	3.28	0.70	1.25	166.95	182.79	142.83	153.75	142.20	210.42	194.88
1.34	0.22	1.69	3.25	2.81	3.28	0.70	1.25	192.15	182.79	142.83	153.75	142.20	210.42	194.88
1.59	0.22	1.69	3.25	2.81	3.28	0.70	1.25	185.53	182.79	142.83	153.75	142.20	210.42	194.88
1.82	0.22	1.69	3.25	2.81	3.28	0.70	1.25	179.07	182.79	142.83	153.75	142.20	210.42	194.88
1.83	0.22	1.69	3.25	2.81	3.28	0.70	1.25	178.83	182.79	142.83	153.75	142.20	210.42	194.88
1.50	0.23	1.60	3.40	2.93	3.42	0.76	1.31	187.90	185.17	139.46	150.62	138.82	208.62	193.05
6.44	0.23	1.57	3.44	2.98	3.47	0.78	1.33	76.86	185.92	138.33	149.58	137.69	208.00	192.43
2.66	0.23	1.57	3.44	2.98	3.47	0.78	1.33	157.52	185.92	138.33	149.58	137.69	208.00	192.43
2.82	0.23	1.57	3.44	2.98	3.47	0.78	1.33	153.46	185.92	138.33	149.58	137.69	208.00	192.43
2.40	0.23	1.57	3.44	2.98	3.47	0.78	1.33	163.99	185.92	138.33	149.58	137.69	208.00	192.43
2.47	0.23	1.57	3.44	2.98	3.47	0.78	1.33	162.25	185.92	138.33	149.58	137.69	208.00	192.43
1.63	0.23	1.57	3.44	2.98	3.47	0.78	1.33	184.25	185.92	138.33	149.58	137.69	208.00	192.43
2.74	0.23	1.57	3.44	2.98	3.47	0.78	1.33	155.45	185.92	138.33	149.58	137.69	208.00	192.43
2.64	0.23	1.57	3.44	2.98	3.47	0.78	1.33	158.03	185.92	138.33	149.58	137.69	208.00	192.43
2.58	0.23	1.57	3.44	2.98	3.47	0.78	1.33	159.34	185.92	138.33	149.58	137.69	208.00	192.43
1.66	0.23	1.57	3.44	2.98	3.47	0.78	1.33	183.54	185.92	138.33	149.58	137.69	208.00	192.43
1.68	0.23	1.57	3.44	2.98	3.47	0.78	1.33	183.03	185.92	138.33	149.58	137.69	208.00	192.43
2.77	0.23	1.57	3.44	2.98	3.47	0.78	1.33	154.65	185.92	138.33	149.58	137.69	208.00	192.43
2.68	0.23	1.57	3.44	2.98	3.47	0.78	1.33	156.86	185.92	138.33	149.58	137.69	208.00	192.43
2.59	0.23	1.57	3.44	2.98	3.47	0.78	1.33	159.04	185.92	138.33	149.58	137.69	208.00	192.43
2.78	0.23	1.57	3.44	2.98	3.47	0.78	1.33	154.51	185.92	138.33	149.58	137.69	208.00	192.43

AFOR OS	H-0,1167	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6	Y-Ym	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6
									Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym
2.41	0.24	1.52	3.54	3.06	3.57	0.83	1.38	163.68	187.34	136.08	147.47	135.42	206.73	191.18
1.64	0.24	1.49	3.59	3.11	3.62	0.85	1.40	184.09	188.01	134.95	146.42	134.29	206.08	190.55
6.68	0.24	1.47	3.64	3.15	3.67	0.87	1.42	72.64	188.66	133.81	145.36	133.15	205.42	189.92
2.42	0.24	1.47	3.64	3.15	3.67	0.87	1.42	163.58	188.66	133.81	145.36	133.15	205.42	189.92
2.58	0.24	1.47	3.64	3.15	3.67	0.87	1.42	159.34	188.66	133.81	145.36	133.15	205.42	189.92
2.55	0.24	1.47	3.64	3.15	3.67	0.87	1.42	160.27	188.66	133.81	145.36	133.15	205.42	189.92
2.50	0.24	1.47	3.64	3.15	3.67	0.87	1.42	161.46	188.66	133.81	145.36	133.15	205.42	189.92
2.24	0.24	1.47	3.64	3.15	3.67	0.87	1.42	168.22	188.66	133.81	145.36	133.15	205.42	189.92
2.78	0.24	1.47	3.64	3.15	3.67	0.87	1.42	154.43	188.66	133.81	145.36	133.15	205.42	189.92
2.74	0.24	1.47	3.64	3.15	3.67	0.87	1.42	155.42	188.66	133.81	145.36	133.15	205.42	189.92
2.60	0.24	1.47	3.64	3.15	3.67	0.87	1.42	158.83	188.66	133.81	145.36	133.15	205.42	189.92
2.63	0.24	1.47	3.64	3.15	3.67	0.87	1.42	158.28	188.66	133.81	145.36	133.15	205.42	189.92
2.73	0.24	1.47	3.64	3.15	3.67	0.87	1.42	155.75	188.66	133.81	145.36	133.15	205.42	189.92
2.79	0.24	1.47	3.64	3.15	3.67	0.87	1.42	154.16	188.66	133.81	145.36	133.15	205.42	189.92
1.69	0.24	1.47	3.64	3.15	3.67	0.87	1.42	182.70	188.66	133.81	145.36	133.15	205.42	189.92
3.13	0.25	1.43	3.74	3.24	3.77	0.92	1.47	145.87	189.89	131.55	143.24	130.88	204.07	188.64
2.62	0.25	1.43	3.74	3.24	3.77	0.92	1.47	158.50	189.89	131.55	143.24	130.88	204.07	188.64
2.52	0.25	1.39	3.84	3.33	3.87	0.97	1.52	160.85	191.01	129.28	141.11	128.60	202.68	187.35
2.53	0.25	1.39	3.84	3.33	3.87	0.97	1.52	160.60	191.01	129.28	141.11	128.60	202.68	187.35
2.47	0.25	1.39	3.84	3.33	3.87	0.97	1.52	162.28	191.01	129.28	141.11	128.60	202.68	187.35
2.35	0.25	1.39	3.84	3.33	3.87	0.97	1.52	165.22	191.01	129.28	141.11	128.60	202.68	187.35
2.32	0.25	1.39	3.84	3.33	3.87	0.97	1.52	166.02	191.01	129.28	141.11	128.60	202.68	187.35
2.61	0.25	1.39	3.84	3.33	3.87	0.97	1.52	158.78	191.01	129.28	141.11	128.60	202.68	187.35
2.61	0.25	1.39	3.84	3.33	3.87	0.97	1.52	158.78	191.01	129.28	141.11	128.60	202.68	187.35
2.73	0.25	1.39	3.84	3.33	3.87	0.97	1.52	155.73	191.01	129.28	141.11	128.60	202.68	187.35
2.51	0.25	1.39	3.84	3.33	3.87	0.97	1.52	161.24	191.01	129.28	141.11	128.60	202.68	187.35

AFOR OS	H-0,1167	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6	Y-Ym	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6
									Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym
2.69	0.26	1.35	3.94	3.42	3.97	1.02	1.57	156.77	192.04	127.01	138.97	126.32	201.25	186.04
2.77	0.26	1.35	3.94	3.42	3.97	1.02	1.57	154.73	192.04	127.01	138.97	126.32	201.25	186.04
1.85	0.26	1.33	3.99	3.46	4.02	1.05	1.59	178.38	192.52	125.87	137.90	125.18	200.53	185.38
2.51	0.26	1.33	3.99	3.46	4.02	1.05	1.59	161.16	192.52	125.87	137.90	125.18	200.53	185.38
2.71	0.26	1.31	4.04	3.51	4.07	1.07	1.61	156.17	192.97	124.74	136.83	124.04	199.79	184.72
1.91	0.26	1.31	4.04	3.51	4.07	1.07	1.61	176.91	192.97	124.74	136.83	124.04	199.79	184.72
1.86	0.26	1.31	4.04	3.51	4.07	1.07	1.61	178.24	192.97	124.74	136.83	124.04	199.79	184.72
2.69	0.26	1.31	4.04	3.51	4.07	1.07	1.61	156.55	192.97	124.74	136.83	124.04	199.79	184.72
2.95	0.26	1.31	4.04	3.51	4.07	1.07	1.61	150.13	192.97	124.74	136.83	124.04	199.79	184.72
2.46	0.26	1.31	4.04	3.51	4.07	1.07	1.61	162.51	192.97	124.74	136.83	124.04	199.79	184.72
2.69	0.26	1.31	4.04	3.51	4.07	1.07	1.61	156.65	192.97	124.74	136.83	124.04	199.79	184.72
2.46	0.26	1.31	4.04	3.51	4.07	1.07	1.61	162.51	192.97	124.74	136.83	124.04	199.79	184.72
2.74	0.26	1.31	4.04	3.51	4.07	1.07	1.61	155.37	192.97	124.74	136.83	124.04	199.79	184.72
2.57	0.26	1.31	4.04	3.51	4.07	1.07	1.61	159.56	192.97	124.74	136.83	124.04	199.79	184.72
2.73	0.26	1.31	4.04	3.51	4.07	1.07	1.61	155.64	192.97	124.74	136.83	124.04	199.79	184.72
2.06	0.26	1.31	4.04	3.51	4.07	1.07	1.61	172.73	192.97	124.74	136.83	124.04	199.79	184.72
2.06	0.26	1.31	4.04	3.51	4.07	1.07	1.61	172.89	192.97	124.74	136.83	124.04	199.79	184.72
2.07	0.26	1.31	4.04	3.51	4.07	1.07	1.61	172.47	192.97	124.74	136.83	124.04	199.79	184.72
2.84	0.27	1.26	4.24	3.69	4.28	1.18	1.71	153.01	194.51	120.19	132.52	119.48	196.74	182.04
2.83	0.27	1.26	4.24	3.69	4.28	1.18	1.71	153.14	194.51	120.19	132.52	119.48	196.74	182.04
2.80	0.27	1.26	4.24	3.69	4.28	1.18	1.71	153.86	194.51	120.19	132.52	119.48	196.74	182.04
2.69	0.27	1.26	4.24	3.69	4.28	1.18	1.71	156.60	194.51	120.19	132.52	119.48	196.74	182.04
2.86	0.27	1.26	4.24	3.69	4.28	1.18	1.71	152.32	194.51	120.19	132.52	119.48	196.74	182.04
3.13	0.27	1.26	4.24	3.69	4.28	1.18	1.71	145.87	194.51	120.19	132.52	119.48	196.74	182.04
3.27	0.27	1.26	4.24	3.69	4.28	1.18	1.71	142.51	194.51	120.19	132.52	119.48	196.74	182.04
2.86	0.27	1.26	4.24	3.69	4.28	1.18	1.71	152.54	194.51	120.19	132.52	119.48	196.74	182.04

AFOR OS	H-0,1167	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6	Y-Ym	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6
									Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym
2.88	0.27	1.26	4.24	3.69	4.28	1.18	1.71	152.01	194.51	120.19	132.52	119.48	196.74	182.04
2.99	0.27	1.26	4.24	3.69	4.28	1.18	1.71	149.20	194.51	120.19	132.52	119.48	196.74	182.04
2.29	0.27	1.26	4.24	3.69	4.28	1.18	1.71	166.95	194.51	120.19	132.52	119.48	196.74	182.04
2.17	0.27	1.26	4.24	3.69	4.28	1.18	1.71	169.85	194.51	120.19	132.52	119.48	196.74	182.04
6.79	0.28	1.22	4.45	3.88	4.49	1.29	1.82	70.83	195.65	115.64	128.20	114.92	193.53	179.30
3.04	0.28	1.22	4.45	3.88	4.49	1.29	1.82	148.08	195.65	115.64	128.20	114.92	193.53	179.30
2.97	0.28	1.22	4.45	3.88	4.49	1.29	1.82	149.76	195.65	115.64	128.20	114.92	193.53	179.30
3.24	0.28	1.22	4.45	3.88	4.49	1.29	1.82	143.23	195.65	115.64	128.20	114.92	193.53	179.30
3.58	0.28	1.22	4.45	3.88	4.49	1.29	1.82	135.07	195.65	115.64	128.20	114.92	193.53	179.30
3.82	0.28	1.22	4.45	3.88	4.49	1.29	1.82	129.57	195.65	115.64	128.20	114.92	193.53	179.30
3.80	0.28	1.22	4.45	3.88	4.49	1.29	1.82	130.09	195.65	115.64	128.20	114.92	193.53	179.30
3.19	0.28	1.22	4.45	3.88	4.49	1.29	1.82	144.50	195.65	115.64	128.20	114.92	193.53	179.30
3.05	0.28	1.22	4.45	3.88	4.49	1.29	1.82	147.67	195.65	115.64	128.20	114.92	193.53	179.30
2.92	0.28	1.22	4.45	3.88	4.49	1.29	1.82	150.94	195.65	115.64	128.20	114.92	193.53	179.30
3.50	0.28	1.22	4.45	3.88	4.49	1.29	1.82	137.10	195.65	115.64	128.20	114.92	193.53	179.30
3.43	0.28	1.22	4.45	3.88	4.49	1.29	1.82	138.58	195.65	115.64	128.20	114.92	193.53	179.30
2.73	0.28	1.22	4.45	3.88	4.49	1.29	1.82	155.55	195.65	115.64	128.20	114.92	193.53	179.30
3.33	0.28	1.22	4.45	3.88	4.49	1.29	1.82	141.06	195.65	115.64	128.20	114.92	193.53	179.30
3.45	0.28	1.22	4.45	3.88	4.49	1.29	1.82	138.18	195.65	115.64	128.20	114.92	193.53	179.30
3.20	0.28	1.22	4.45	3.88	4.49	1.29	1.82	144.12	195.65	115.64	128.20	114.92	193.53	179.30
3.47	0.28	1.22	4.45	3.88	4.49	1.29	1.82	137.80	195.65	115.64	128.20	114.92	193.53	179.30
2.99	0.28	1.22	4.45	3.88	4.49	1.29	1.82	149.14	195.65	115.64	128.20	114.92	193.53	179.30
3.02	0.28	1.22	4.45	3.88	4.49	1.29	1.82	148.46	195.65	115.64	128.20	114.92	193.53	179.30
2.91	0.28	1.22	4.45	3.88	4.49	1.29	1.82	151.09	195.65	115.64	128.20	114.92	193.53	179.30
2.98	0.28	1.22	4.45	3.88	4.49	1.29	1.82	149.39	195.65	115.64	128.20	114.92	193.53	179.30
2.98	0.28	1.22	4.45	3.88	4.49	1.29	1.82	149.44	195.65	115.64	128.20	114.92	193.53	179.30

AFOR OS	H-0,1167	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6	Y-Ym	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6
									Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym
2.38	0.28	1.22	4.45	3.88	4.49	1.29	1.82	164.43	195.65	115.64	128.20	114.92	193.53	179.30
2.41	0.28	1.22	4.45	3.88	4.49	1.29	1.82	163.84	195.65	115.64	128.20	114.92	193.53	179.30
3.68	0.29	1.20	4.56	3.98	4.59	1.35	1.87	132.78	196.06	113.36	126.03	112.64	191.87	177.91
4.03	0.29	1.20	4.56	3.98	4.59	1.35	1.87	124.88	196.06	113.36	126.03	112.64	191.87	177.91
3.47	0.29	1.20	4.56	3.98	4.59	1.35	1.87	137.66	196.06	113.36	126.03	112.64	191.87	177.91
3.27	0.29	1.19	4.67	4.08	4.70	1.42	1.92	142.44	196.37	111.09	123.85	110.36	190.17	176.51
3.29	0.29	1.19	4.67	4.08	4.70	1.42	1.92	142.11	196.37	111.09	123.85	110.36	190.17	176.51
3.90	0.29	1.19	4.67	4.08	4.70	1.42	1.92	127.91	196.37	111.09	123.85	110.36	190.17	176.51
2.80	0.29	1.19	4.67	4.08	4.70	1.42	1.92	153.93	196.37	111.09	123.85	110.36	190.17	176.51
3.43	0.29	1.19	4.67	4.08	4.70	1.42	1.92	138.72	196.37	111.09	123.85	110.36	190.17	176.51
3.25	0.29	1.19	4.67	4.08	4.70	1.42	1.92	142.92	196.37	111.09	123.85	110.36	190.17	176.51
3.68	0.29	1.19	4.67	4.08	4.70	1.42	1.92	132.78	196.37	111.09	123.85	110.36	190.17	176.51
3.34	0.29	1.19	4.67	4.08	4.70	1.42	1.92	140.87	196.37	111.09	123.85	110.36	190.17	176.51
3.56	0.29	1.19	4.67	4.08	4.70	1.42	1.92	135.67	196.37	111.09	123.85	110.36	190.17	176.51
3.40	0.29	1.19	4.67	4.08	4.70	1.42	1.92	139.46	196.37	111.09	123.85	110.36	190.17	176.51
3.08	0.30	1.19	4.72	4.13	4.75	1.45	1.95	146.94	196.49	109.95	122.77	109.22	189.31	175.80
3.58	0.30	1.19	4.72	4.13	4.75	1.45	1.95	135.18	196.49	109.95	122.77	109.22	189.31	175.80
3.33	0.30	1.19	4.77	4.18	4.81	1.48	1.97	141.04	196.58	108.82	121.68	108.08	188.43	175.09
2.39	0.30	1.19	4.77	4.18	4.81	1.48	1.97	164.17	196.58	108.82	121.68	108.08	188.43	175.09
2.40	0.30	1.19	4.77	4.18	4.81	1.48	1.97	163.94	196.58	108.82	121.68	108.08	188.43	175.09
3.38	0.30	1.19	4.77	4.18	4.81	1.48	1.97	139.88	196.58	108.82	121.68	108.08	188.43	175.09
3.25	0.30	1.18	4.88	4.27	4.92	1.54	2.03	142.94	196.68	106.55	119.50	105.81	186.66	173.66
3.81	0.30	1.18	4.88	4.27	4.92	1.54	2.03	129.87	196.68	106.55	119.50	105.81	186.66	173.66
3.54	0.30	1.18	4.88	4.27	4.92	1.54	2.03	136.09	196.68	106.55	119.50	105.81	186.66	173.66
3.50	0.30	1.18	4.88	4.27	4.92	1.54	2.03	137.14	196.68	106.55	119.50	105.81	186.66	173.66
3.57	0.30	1.18	4.88	4.27	4.92	1.54	2.03	135.37	196.68	106.55	119.50	105.81	186.66	173.66

AFOR OS	H-0,1167	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6	Y-Ym	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6
									Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym
3.28	0.30	1.18	4.88	4.27	4.92	1.54	2.03	142.27	196.68	106.55	119.50	105.81	186.66	173.66
3.77	0.30	1.18	4.88	4.27	4.92	1.54	2.03	130.80	196.68	106.55	119.50	105.81	186.66	173.66
3.64	0.30	1.18	4.88	4.27	4.92	1.54	2.03	133.77	196.68	106.55	119.50	105.81	186.66	173.66
2.67	0.30	1.18	4.88	4.27	4.92	1.54	2.03	157.20	196.68	106.55	119.50	105.81	186.66	173.66
3.54	0.31	1.18	4.99	4.37	5.03	1.61	2.08	136.07	196.68	104.29	117.32	103.54	184.84	172.22
4.24	0.31	1.19	5.11	4.48	5.14	1.68	2.14	120.21	196.57	102.03	115.14	101.28	182.99	170.77
3.89	0.31	1.19	5.11	4.48	5.14	1.68	2.14	128.07	196.57	102.03	115.14	101.28	182.99	170.77
3.44	0.31	1.19	5.11	4.48	5.14	1.68	2.14	138.55	196.57	102.03	115.14	101.28	182.99	170.77
3.68	0.31	1.19	5.11	4.48	5.14	1.68	2.14	132.87	196.57	102.03	115.14	101.28	182.99	170.77
3.56	0.31	1.19	5.11	4.48	5.14	1.68	2.14	135.60	196.57	102.03	115.14	101.28	182.99	170.77
	0.31	1.19	5.11	4.48	5.14	1.68	2.14	231.22	196.57	102.03	115.14	101.28	182.99	170.77
3.29	0.31	1.19	5.11	4.48	5.14	1.68	2.14	142.11	196.57	102.03	115.14	101.28	182.99	170.77
3.75	0.31	1.19	5.11	4.48	5.14	1.68	2.14	131.21	196.57	102.03	115.14	101.28	182.99	170.77
3.86	0.31	1.19	5.11	4.48	5.14	1.68	2.14	128.65	196.57	102.03	115.14	101.28	182.99	170.77
3.87	0.31	1.19	5.11	4.48	5.14	1.68	2.14	128.46	196.57	102.03	115.14	101.28	182.99	170.77
4.46	0.32	1.20	5.27	4.63	5.31	1.78	2.22	115.54	196.21	98.65	111.86	97.89	180.14	168.57
3.80	0.32	1.20	5.33	4.68	5.37	1.82	2.25	130.16	196.04	97.52	110.77	96.77	179.17	167.83
3.31	0.32	1.20	5.33	4.68	5.37	1.82	2.25	141.44	196.04	97.52	110.77	96.77	179.17	167.83
4.01	0.32	1.20	5.33	4.68	5.37	1.82	2.25	125.37	196.04	97.52	110.77	96.77	179.17	167.83
2.83	0.32	1.20	5.33	4.68	5.37	1.82	2.25	153.09	196.04	97.52	110.77	96.77	179.17	167.83
3.67	0.33	1.22	5.44	4.79	5.48	1.89	2.31	133.14	195.62	95.28	108.59	94.52	177.20	166.35
3.44	0.33	1.22	5.44	4.79	5.48	1.89	2.31	138.46	195.62	95.28	108.59	94.52	177.20	166.35
3.74	0.33	1.24	5.56	4.89	5.60	1.97	2.30	131.44	195.10	93.04	106.41	92.29	175.20	166.52
3.75	0.33	1.24	5.56	4.89	5.60	1.97	2.30	131.26	195.10	93.04	106.41	92.29	175.20	166.52
3.76	0.33	1.24	5.56	4.89	5.60	1.97	2.30	131.10	195.10	93.04	106.41	92.29	175.20	166.52
3.88	0.33	1.24	5.56	4.89	5.60	1.97	2.30	128.34	195.10	93.04	106.41	92.29	175.20	166.52

AFOR OS	H-0,1167	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6	Y-Ym	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6
									Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym
2.98	0.33	1.24	5.56	4.89	5.60	1.97	2.30	149.37	195.10	93.04	106.41	92.29	175.20	166.52
2.85	0.33	1.24	5.56	4.89	5.60	1.97	2.30	152.57	195.10	93.04	106.41	92.29	175.20	166.52
4.36	0.33	1.24	5.56	4.89	5.60	1.97	2.30	117.61	195.10	93.04	106.41	92.29	175.20	166.52
4.29	0.33	1.24	5.56	4.89	5.60	1.97	2.30	119.26	195.10	93.04	106.41	92.29	175.20	166.52
4.41	0.33	1.24	5.56	4.89	5.60	1.97	2.30	116.53	195.10	93.04	106.41	92.29	175.20	166.52
3.89	0.33	1.24	5.56	4.89	5.60	1.97	2.30	128.03	195.10	93.04	106.41	92.29	175.20	166.52
3.72	0.33	1.24	5.56	4.89	5.60	1.97	2.30	131.88	195.10	93.04	106.41	92.29	175.20	166.52
3.77	0.33	1.24	5.56	4.89	5.60	1.97	2.30	130.87	195.10	93.04	106.41	92.29	175.20	166.52
4.02	0.33	1.24	5.56	4.89	5.60	1.97	2.30	125.21	195.10	93.04	106.41	92.29	175.20	166.52
4.06	0.33	1.24	5.56	4.89	5.60	1.97	2.30	124.23	195.10	93.04	106.41	92.29	175.20	166.52
5.02	0.33	1.24	5.56	4.89	5.60	1.97	2.30	103.77	195.10	93.04	106.41	92.29	175.20	166.52
4.04	0.33	1.24	5.56	4.89	5.60	1.97	2.30	124.65	195.10	93.04	106.41	92.29	175.20	166.52
4.09	0.34	1.25	5.62	4.94	5.66	2.01	2.34	123.61	194.80	91.93	105.32	91.17	174.19	165.49
4.14	0.34	1.26	5.68	5.00	5.72	2.05	2.38	122.52	194.47	90.82	104.23	90.06	173.16	164.45
4.03	0.34	1.26	5.68	5.00	5.72	2.05	2.38	124.97	194.47	90.82	104.23	90.06	173.16	164.45
3.79	0.34	1.26	5.68	5.00	5.72	2.05	2.38	130.35	194.47	90.82	104.23	90.06	173.16	164.45
3.40	0.34	1.26	5.68	5.00	5.72	2.05	2.38	139.47	194.47	90.82	104.23	90.06	173.16	164.45
4.16	0.34	1.29	5.79	5.10	5.83	2.13	2.46	122.03	193.74	88.60	102.05	87.83	171.09	162.34
4.34	0.34	1.29	5.79	5.10	5.83	2.13	2.46	118.15	193.74	88.60	102.05	87.83	171.09	162.34
4.27	0.34	1.29	5.79	5.10	5.83	2.13	2.46	119.70	193.74	88.60	102.05	87.83	171.09	162.34
4.81	0.34	1.29	5.79	5.10	5.83	2.13	2.46	108.16	193.74	88.60	102.05	87.83	171.09	162.34
4.06	0.34	1.29	5.79	5.10	5.83	2.13	2.46	124.32	193.74	88.60	102.05	87.83	171.09	162.34
3.90	0.34	1.29	5.79	5.10	5.83	2.13	2.46	127.87	193.74	88.60	102.05	87.83	171.09	162.34
4.09	0.34	1.29	5.79	5.10	5.83	2.13	2.46	123.52	193.74	88.60	102.05	87.83	171.09	162.34
7.94	0.35	1.32	5.91	5.21	5.95	2.21	2.55	52.87	192.91	86.38	99.88	85.62	168.98	160.21
2.61	0.35	1.32	5.91	5.21	5.95	2.21	2.55	158.73	192.91	86.38	99.88	85.62	168.98	160.21

AFOR OS	H-0,1167	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6	Y-Ym	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6
									Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym
4.51	0.35	1.32	5.91	5.21	5.95	2.21	2.55	114.51	192.91	86.38	99.88	85.62	168.98	160.21
3.91	0.35	1.32	5.91	5.21	5.95	2.21	2.55	127.49	192.91	86.38	99.88	85.62	168.98	160.21
2.64	0.35	1.35	6.03	5.32	6.07	2.29	2.63	158.00	191.98	84.18	97.71	83.42	166.83	158.05
4.63	0.35	1.35	6.03	5.32	6.07	2.29	2.63	111.89	191.98	84.18	97.71	83.42	166.83	158.05
4.16	0.35	1.35	6.03	5.32	6.07	2.29	2.63	121.94	191.98	84.18	97.71	83.42	166.83	158.05
7.07	0.35	1.35	6.03	5.32	6.07	2.29	2.63	66.18	191.98	84.18	97.71	83.42	166.83	158.05
4.26	0.36	1.39	6.15	5.43	6.19	2.37	2.72	119.75	190.94	81.99	95.54	81.23	164.65	155.86
4.34	0.36	1.43	6.27	5.54	6.31	2.46	2.81	118.04	189.81	79.81	93.38	79.05	162.44	153.64
4.06	0.36	1.43	6.27	5.54	6.31	2.46	2.81	124.19	189.81	79.81	93.38	79.05	162.44	153.64
4.44	0.36	1.43	6.27	5.54	6.31	2.46	2.81	115.86	189.81	79.81	93.38	79.05	162.44	153.64
5.42	0.36	1.43	6.27	5.54	6.31	2.46	2.81	95.80	189.81	79.81	93.38	79.05	162.44	153.64
4.21	0.36	1.43	6.27	5.54	6.31	2.46	2.81	120.94	189.81	79.81	93.38	79.05	162.44	153.64
4.59	0.36	1.43	6.27	5.54	6.31	2.46	2.81	112.65	189.81	79.81	93.38	79.05	162.44	153.64
4.88	0.36	1.43	6.27	5.54	6.31	2.46	2.81	106.68	189.81	79.81	93.38	79.05	162.44	153.64
4.60	0.37	1.47	6.39	5.65	6.44	2.55	2.90	112.45	188.58	77.65	91.23	76.88	160.19	151.40
4.32	0.37	1.50	6.46	5.71	6.50	2.59	2.95	118.48	187.93	76.57	90.15	75.80	159.06	150.27
4.41	0.37	1.52	6.52	5.77	6.56	2.64	2.99	116.66	187.25	75.49	89.08	74.73	157.92	149.13
4.40	0.37	1.52	6.52	5.77	6.56	2.64	2.99	116.79	187.25	75.49	89.08	74.73	157.92	149.13
5.06	0.37	1.52	6.52	5.77	6.56	2.64	2.99	103.00	187.25	75.49	89.08	74.73	157.92	149.13
5.02	0.38	1.60	6.70	5.94	6.75	2.78	3.14	103.85	185.07	72.28	85.87	71.52	154.44	145.67
4.66	0.38	1.63	6.77	6.00	6.81	2.83	3.18	111.28	184.30	71.22	84.81	70.46	153.26	144.50
4.70	0.38	1.63	6.77	6.00	6.81	2.83	3.18	110.46	184.30	71.22	84.81	70.46	153.26	144.50
5.15	0.38	1.63	6.77	6.00	6.81	2.83	3.18	101.18	184.30	71.22	84.81	70.46	153.26	144.50
4.62	0.38	1.63	6.77	6.00	6.81	2.83	3.18	112.12	184.30	71.22	84.81	70.46	153.26	144.50
4.68	0.38	1.63	6.77	6.00	6.81	2.83	3.18	110.75	184.30	71.22	84.81	70.46	153.26	144.50
5.16	0.38	1.63	6.77	6.00	6.81	2.83	3.18	100.92	184.30	71.22	84.81	70.46	153.26	144.50

AFOR OS	H-0,1167	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6	Y-Ym	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6
									Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym
5.09	0.38	1.63	6.77	6.00	6.81	2.83	3.18	102.41	184.30	71.22	84.81	70.46	153.26	144.50
4.88	0.38	1.63	6.77	6.00	6.81	2.83	3.18	106.56	184.30	71.22	84.81	70.46	153.26	144.50
8.80	0.39	1.69	6.89	6.11	6.94	2.92	3.28	40.98	182.68	69.11	82.68	68.35	150.89	142.16
3.49	0.39	1.75	7.02	6.23	7.07	3.02	3.38	137.38	180.97	67.01	80.57	66.25	148.49	139.78
5.19	0.39	1.75	7.02	6.23	7.07	3.02	3.38	100.26	180.97	67.01	80.57	66.25	148.49	139.78
6.52	0.39	1.75	7.02	6.23	7.07	3.02	3.38	75.44	180.97	67.01	80.57	66.25	148.49	139.78
3.58	0.40	1.82	7.15	6.35	7.20	3.12	3.48	135.28	179.17	64.93	78.46	64.17	146.05	137.39
4.74	0.40	1.89	7.28	6.47	7.32	3.22	3.59	109.49	177.28	62.86	76.37	62.11	143.59	134.97
4.63	0.40	1.89	7.28	6.47	7.32	3.22	3.59	111.91	177.28	62.86	76.37	62.11	143.59	134.97
4.86	0.40	1.89	7.28	6.47	7.32	3.22	3.59	107.08	177.28	62.86	76.37	62.11	143.59	134.97
4.88	0.40	1.89	7.28	6.47	7.32	3.22	3.59	106.68	177.28	62.86	76.37	62.11	143.59	134.97
5.31	0.40	1.89	7.28	6.47	7.32	3.22	3.59	98.01	177.28	62.86	76.37	62.11	143.59	134.97
4.92	0.40	1.89	7.28	6.47	7.32	3.22	3.59	105.88	177.28	62.86	76.37	62.11	143.59	134.97
5.07	0.40	1.89	7.28	6.47	7.32	3.22	3.59	102.69	177.28	62.86	76.37	62.11	143.59	134.97
5.36	0.41	2.04	7.54	6.71	7.59	3.43	3.80	96.92	173.23	58.79	72.21	58.04	138.59	130.07
5.40	0.41	2.04	7.54	6.71	7.59	3.43	3.80	96.24	173.23	58.79	72.21	58.04	138.59	130.07
5.24	0.41	2.04	7.54	6.71	7.59	3.43	3.80	99.26	173.23	58.79	72.21	58.04	138.59	130.07
4.00	0.42	2.13	7.67	6.83	7.72	3.54	3.91	125.66	171.08	56.78	70.15	56.04	136.05	127.59
5.24	0.42	2.13	7.67	6.83	7.72	3.54	3.91	99.32	171.08	56.78	70.15	56.04	136.05	127.59
5.15	0.42	2.21	7.80	6.95	7.85	3.65	4.02	101.20	168.85	54.79	68.10	54.06	133.49	125.09
5.37	0.42	2.21	7.80	6.95	7.85	3.65	4.02	96.72	168.85	54.79	68.10	54.06	133.49	125.09
5.42	0.42	2.21	7.80	6.95	7.85	3.65	4.02	95.70	168.85	54.79	68.10	54.06	133.49	125.09
5.47	0.42	2.21	7.80	6.95	7.85	3.65	4.02	94.88	168.85	54.79	68.10	54.06	133.49	125.09
5.32	0.42	2.21	7.80	6.95	7.85	3.65	4.02	97.77	168.85	54.79	68.10	54.06	133.49	125.09
5.26	0.42	2.21	7.80	6.95	7.85	3.65	4.02	98.88	168.85	54.79	68.10	54.06	133.49	125.09
5.66	0.43	2.30	7.94	7.08	7.99	3.76	4.13	91.08	166.53	52.83	66.07	52.09	130.90	122.57

AFOR OS	H-0,1167	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6	Y-Ym	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6
									Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym
5.64	0.43	2.30	7.94	7.08	7.99	3.76	4.13	91.45	166.53	52.83	66.07	52.09	130.90	122.57
5.50	0.43	2.30	7.94	7.08	7.99	3.76	4.13	94.26	166.53	52.83	66.07	52.09	130.90	122.57
5.59	0.43	2.39	8.07	7.20	8.12	3.88	4.25	92.52	164.13	50.88	64.06	50.15	128.30	120.04
5.72	0.43	2.39	8.07	7.20	8.12	3.88	4.25	89.98	164.13	50.88	64.06	50.15	128.30	120.04
6.51	0.43	2.39	8.07	7.20	8.12	3.88	4.25	75.58	164.13	50.88	64.06	50.15	128.30	120.04
7.05	0.43	2.39	8.07	7.20	8.12	3.88	4.25	66.45	164.13	50.88	64.06	50.15	128.30	120.04
5.39	0.43	2.39	8.07	7.20	8.12	3.88	4.25	96.39	164.13	50.88	64.06	50.15	128.30	120.04
5.47	0.44	2.49	8.21	7.33	8.26	4.00	4.37	94.84	161.66	48.96	62.05	48.24	125.67	117.49
9.28	0.44	2.59	8.35	7.46	8.40	4.11	4.49	35.14	159.11	47.06	60.07	46.34	123.02	114.93
4.32	0.44	2.59	8.35	7.46	8.40	4.11	4.49	118.44	159.11	47.06	60.07	46.34	123.02	114.93
5.75	0.44	2.59	8.35	7.46	8.40	4.11	4.49	89.49	159.11	47.06	60.07	46.34	123.02	114.93
5.78	0.44	2.59	8.35	7.46	8.40	4.11	4.49	88.90	159.11	47.06	60.07	46.34	123.02	114.93
6.63	0.44	2.59	8.35	7.46	8.40	4.11	4.49	73.49	159.11	47.06	60.07	46.34	123.02	114.93
5.88	0.44	2.59	8.35	7.46	8.40	4.11	4.49	86.89	159.11	47.06	60.07	46.34	123.02	114.93
5.52	0.45	2.80	8.62	7.71	8.68	4.36	4.73	93.78	153.80	43.34	56.15	42.63	117.66	109.76
6.63	0.45	2.80	8.62	7.71	8.68	4.36	4.73	73.54	153.80	43.34	56.15	42.63	117.66	109.76
5.91	0.45	2.80	8.62	7.71	8.68	4.36	4.73	86.45	153.80	43.34	56.15	42.63	117.66	109.76
5.96	0.45	2.80	8.62	7.71	8.68	4.36	4.73	85.47	153.80	43.34	56.15	42.63	117.66	109.76
6.08	0.45	2.80	8.62	7.71	8.68	4.36	4.73	83.23	153.80	43.34	56.15	42.63	117.66	109.76
5.88	0.45	2.80	8.62	7.71	8.68	4.36	4.73	87.03	153.80	43.34	56.15	42.63	117.66	109.76
6.22	0.45	2.80	8.62	7.71	8.68	4.36	4.73	80.80	153.80	43.34	56.15	42.63	117.66	109.76
6.94	0.45	2.80	8.62	7.71	8.68	4.36	4.73	68.32	153.80	43.34	56.15	42.63	117.66	109.76
3.65	0.45	2.80	8.62	7.71	8.68	4.36	4.73	133.44	153.80	43.34	56.15	42.63	117.66	109.76
6.53	0.46	2.92	8.76	7.84	8.82	4.48	4.85	75.22	151.04	41.51	54.22	40.82	114.96	107.16
6.11	0.46	2.92	8.76	7.84	8.82	4.48	4.85	82.81	151.04	41.51	54.22	40.82	114.96	107.16
7.29	0.46	2.92	8.76	7.84	8.82	4.48	4.85	62.74	151.04	41.51	54.22	40.82	114.96	107.16

AFOR OS	H-0,1167	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6	Y-Ym	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6
									Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym
6.41	0.46	2.92	8.76	7.84	8.82	4.48	4.85	77.37	151.04	41.51	54.22	40.82	114.96	107.16
5.99	0.46	3.03	8.90	7.97	8.96	4.61	4.98	85.02	148.21	39.71	52.31	39.03	112.24	104.55
6.06	0.46	3.03	8.90	7.97	8.96	4.61	4.98	83.64	148.21	39.71	52.31	39.03	112.24	104.55
7.08	0.47	3.21	9.12	8.17	9.17	4.81	5.18	66.11	143.85	37.07	49.48	36.40	108.14	100.62
6.46	0.47	3.27	9.19	8.24	9.24	4.87	5.24	76.42	142.37	36.20	48.55	35.53	106.77	99.30
6.56	0.47	3.27	9.19	8.24	9.24	4.87	5.24	74.84	142.37	36.20	48.55	35.53	106.77	99.30
6.53	0.47	3.27	9.19	8.24	9.24	4.87	5.24	75.27	142.37	36.20	48.55	35.53	106.77	99.30
6.19	0.47	3.27	9.19	8.24	9.24	4.87	5.24	81.28	142.37	36.20	48.55	35.53	106.77	99.30
6.24	0.47	3.27	9.19	8.24	9.24	4.87	5.24	80.39	142.37	36.20	48.55	35.53	106.77	99.30
6.38	0.48	3.53	9.48	8.51	9.54	5.14	5.51	77.98	136.30	32.81	44.87	32.16	101.25	94.03
6.43	0.48	3.53	9.48	8.51	9.54	5.14	5.51	77.10	136.30	32.81	44.87	32.16	101.25	94.03
7.58	0.48	3.53	9.48	8.51	9.54	5.14	5.51	58.09	136.30	32.81	44.87	32.16	101.25	94.03
6.95	0.48	3.53	9.48	8.51	9.54	5.14	5.51	68.17	136.30	32.81	44.87	32.16	101.25	94.03
6.17	0.48	3.53	9.48	8.51	9.54	5.14	5.51	81.57	136.30	32.81	44.87	32.16	101.25	94.03
6.92	0.49	3.67	9.62	8.64	9.68	5.28	5.65	68.67	133.19	31.16	43.07	30.52	98.48	91.39
7.04	0.49	3.67	9.62	8.64	9.68	5.28	5.65	66.75	133.19	31.16	43.07	30.52	98.48	91.39
6.88	0.49	3.67	9.62	8.64	9.68	5.28	5.65	69.37	133.19	31.16	43.07	30.52	98.48	91.39
6.65	0.49	3.67	9.62	8.64	9.68	5.28	5.65	73.29	133.19	31.16	43.07	30.52	98.48	91.39
11.65	0.49	3.80	9.77	8.78	9.83	5.42	5.79	12.64	130.03	29.54	41.29	28.91	95.71	88.75
11.62	0.49	3.80	9.77	8.78	9.83	5.42	5.79	12.87	130.03	29.54	41.29	28.91	95.71	88.75
6.81	0.49	3.80	9.77	8.78	9.83	5.42	5.79	70.47	130.03	29.54	41.29	28.91	95.71	88.75
8.41	0.49	3.80	9.77	8.78	9.83	5.42	5.79	46.17	130.03	29.54	41.29	28.91	95.71	88.75
6.77	0.49	3.80	9.77	8.78	9.83	5.42	5.79	71.18	130.03	29.54	41.29	28.91	95.71	88.75
6.58	0.49	3.80	9.77	8.78	9.83	5.42	5.79	74.41	130.03	29.54	41.29	28.91	95.71	88.75
7.74	0.50	3.87	9.84	8.85	9.90	5.49	5.86	55.77	128.43	28.74	40.41	28.12	94.32	87.43
5.61	0.50	4.09	10.07	9.06	10.13	5.71	6.07	92.10	123.57	26.40	37.81	25.79	90.15	83.47

AFOR OS	H-0,1167	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6	Y-Ym	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6
									Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym
8.23	0.50	4.09	10.07	9.06	10.13	5.71	6.07	48.66	123.57	26.40	37.81	25.79	90.15	83.47
8.10	0.50	4.09	10.07	9.06	10.13	5.71	6.07	50.56	123.57	26.40	37.81	25.79	90.15	83.47
7.15	0.50	4.09	10.07	9.06	10.13	5.71	6.07	64.97	123.57	26.40	37.81	25.79	90.15	83.47
7.22	0.50	4.09	10.07	9.06	10.13	5.71	6.07	63.75	123.57	26.40	37.81	25.79	90.15	83.47
7.13	0.50	4.09	10.07	9.06	10.13	5.71	6.07	65.24	123.57	26.40	37.81	25.79	90.15	83.47
7.08	0.51	4.24	10.22	9.20	10.28	5.86	6.22	66.11	120.28	24.88	36.11	24.28	87.36	80.83
7.40	0.51	4.24	10.22	9.20	10.28	5.86	6.22	60.92	120.28	24.88	36.11	24.28	87.36	80.83
7.00	0.51	4.39	10.37	9.34	10.43	6.01	6.36	67.40	116.95	23.40	34.43	22.81	84.58	78.20
7.05	0.51	4.39	10.37	9.34	10.43	6.01	6.36	66.60	116.95	23.40	34.43	22.81	84.58	78.20
7.13	0.51	4.39	10.37	9.34	10.43	6.01	6.36	65.20	116.95	23.40	34.43	22.81	84.58	78.20
8.58	0.51	4.39	10.37	9.34	10.43	6.01	6.36	43.97	116.95	23.40	34.43	22.81	84.58	78.20
8.15	0.51	4.39	10.37	9.34	10.43	6.01	6.36	49.78	116.95	23.40	34.43	22.81	84.58	78.20
7.23	0.52	4.71	10.67	9.62	10.74	6.32	6.66	63.65	110.20	20.54	31.17	19.98	79.02	72.95
8.47	0.52	4.71	10.67	9.62	10.74	6.32	6.66	45.32	110.20	20.54	31.17	19.98	79.02	72.95
7.79	0.52	4.71	10.67	9.62	10.74	6.32	6.66	55.02	110.20	20.54	31.17	19.98	79.02	72.95
5.55	0.52	4.71	10.67	9.62	10.74	6.32	6.66	93.32	110.20	20.54	31.17	19.98	79.02	72.95
7.95	0.52	4.71	10.67	9.62	10.74	6.32	6.66	52.59	110.20	20.54	31.17	19.98	79.02	72.95
10.97	0.52	4.71	10.67	9.62	10.74	6.32	6.66	17.92	110.20	20.54	31.17	19.98	79.02	72.95
5.66	0.53	4.87	10.83	9.77	10.89	6.47	6.82	91.12	106.79	19.17	29.59	18.63	76.26	70.34
9.33	0.53	5.04	10.98	9.91	11.05	6.63	6.97	34.51	103.35	17.84	28.03	17.31	73.50	67.75
8.87	0.53	5.04	10.98	9.91	11.05	6.63	6.97	40.21	103.35	17.84	28.03	17.31	73.50	67.75
8.33	0.53	5.04	10.98	9.91	11.05	6.63	6.97	47.33	103.35	17.84	28.03	17.31	73.50	67.75
7.82	0.54	5.21	11.14	10.06	11.20	6.79	7.13	54.58	99.89	16.54	26.51	16.03	70.75	65.16
8.55	0.55	5.75	11.61	10.50	11.68	7.29	7.62	44.37	89.46	12.91	22.14	12.45	62.59	57.51
8.85	0.55	5.75	11.61	10.50	11.68	7.29	7.62	40.42	89.46	12.91	22.14	12.45	62.59	57.51
9.31	0.55	5.75	11.61	10.50	11.68	7.29	7.62	34.80	89.46	12.91	22.14	12.45	62.59	57.51

AFOR OS	H-0,1167	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6	Y-Ym	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6
									Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym
6.28	0.56	5.84	11.69	10.58	11.76	7.38	7.71	79.76	87.72	12.35	21.44	11.89	61.24	56.26
8.42	0.56	5.93	11.77	10.65	11.84	7.47	7.79	46.02	85.97	11.79	20.75	11.34	59.90	55.00
9.74	0.56	5.93	11.77	10.65	11.84	7.47	7.79	29.91	85.97	11.79	20.75	11.34	59.90	55.00
8.44	0.56	6.12	11.93	10.80	12.00	7.64	7.96	45.82	82.48	10.71	19.40	10.28	57.24	52.52
11.18	0.57	6.22	12.01	10.88	12.08	7.73	8.04	16.20	80.74	10.19	18.73	9.77	55.92	51.28
10.66	0.57	6.51	12.26	11.11	12.33	8.00	8.31	20.67	75.53	8.69	16.81	8.30	51.99	47.62
9.48	0.57	6.51	12.26	11.11	12.33	8.00	8.31	32.75	75.53	8.69	16.81	8.30	51.99	47.62
7.11	0.57	6.51	12.26	11.11	12.33	8.00	8.31	65.48	75.53	8.69	16.81	8.30	51.99	47.62
8.88	0.57	6.51	12.26	11.11	12.33	8.00	8.31	40.08	75.53	8.69	16.81	8.30	51.99	47.62
12.52	0.58	6.82	12.50	11.34	12.57	8.27	8.57	7.21	70.36	7.30	14.96	6.93	48.13	44.03
10.90	0.58	6.92	12.59	11.41	12.66	8.36	8.66	18.51	68.64	6.86	14.37	6.50	46.86	42.85
11.86	0.58	6.92	12.59	11.41	12.66	8.36	8.66	11.23	68.64	6.86	14.37	6.50	46.86	42.85
9.03	0.59	7.34	12.92	11.73	12.99	8.74	9.02	38.15	61.84	5.23	12.10	4.91	41.86	38.21
9.48	0.60	7.78	13.26	12.04	13.33	9.12	9.40	32.76	55.18	3.80	10.00	3.53	37.02	33.73
8.61	0.60	7.78	13.26	12.04	13.33	9.12	9.40	43.57	55.18	3.80	10.00	3.53	37.02	33.73
10.29	0.61	8.00	13.43	12.20	13.50	9.32	9.59	24.14	51.91	3.17	9.01	2.92	34.67	31.55
6.32	0.61	8.23	13.60	12.36	13.67	9.52	9.78	78.99	48.69	2.59	8.07	2.36	32.36	29.42
11.76	0.62	8.69	13.94	12.69	14.01	9.92	10.17	11.87	42.41	1.60	6.33	1.42	27.91	25.32
7.00	0.63	8.93	14.12	12.85	14.19	10.13	10.37	67.34	39.36	1.19	5.54	1.03	25.76	23.35
11.86	0.63	9.17	14.29	13.02	14.36	10.34	10.58	11.19	36.38	0.84	4.79	0.71	23.68	21.43
11.27	0.64	9.42	14.47	13.18	14.54	10.55	10.78	15.51	33.48	0.55	4.09	0.44	21.66	19.58
11.94	0.64	9.42	14.47	13.18	14.54	10.55	10.78	10.69	33.48	0.55	4.09	0.44	21.66	19.58
13.13	0.64	9.42	14.47	13.18	14.54	10.55	10.78	4.30	33.48	0.55	4.09	0.44	21.66	19.58
12.14	0.64	9.67	14.64	13.35	14.72	10.77	10.99	9.39	30.65	0.32	3.44	0.24	19.71	17.79
13.85	0.65	9.92	14.82	13.52	14.90	10.98	11.20	1.84	27.91	0.15	2.85	0.10	17.82	16.06
13.61	0.65	9.92	14.82	13.52	14.90	10.98	11.20	2.56	27.91	0.15	2.85	0.10	17.82	16.06

AFOR OS	H-0,1167	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6	Y-Ym	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6
									Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym
9.12	0.65	10.18	15.00	13.69	15.08	11.20	11.41	37.07	25.26	0.04	2.31	0.02	16.01	14.41
9.36	0.65	10.18	15.00	13.69	15.08	11.20	11.41	34.22	25.26	0.04	2.31	0.02	16.01	14.41
12.96	0.65	10.18	15.00	13.69	15.08	11.20	11.41	5.03	25.26	0.04	2.31	0.02	16.01	14.41
12.64	0.65	10.18	15.00	13.69	15.08	11.20	11.41	6.58	25.26	0.04	2.31	0.02	16.01	14.41
12.59	0.66	10.44	15.18	13.86	15.26	11.43	11.62	6.86	22.71	0.00	1.82	0.00	14.28	12.83
13.93	0.66	10.44	15.18	13.86	15.26	11.43	11.62	1.64	22.71	0.00	1.82	0.00	14.28	12.83
9.12	0.66	10.44	15.18	13.86	15.26	11.43	11.62	37.07	22.71	0.00	1.82	0.00	14.28	12.83
12.80	0.66	10.70	15.36	14.03	15.44	11.65	11.84	5.77	20.26	0.02	1.39	0.05	12.62	11.32
11.39	0.66	10.70	15.36	14.03	15.44	11.65	11.84	14.58	20.26	0.02	1.39	0.05	12.62	11.32
11.22	0.66	10.70	15.36	14.03	15.44	11.65	11.84	15.92	20.26	0.02	1.39	0.05	12.62	11.32
9.34	0.66	10.70	15.36	14.03	15.44	11.65	11.84	34.41	20.26	0.02	1.39	0.05	12.62	11.32
10.07	0.67	10.97	15.54	14.20	15.62	11.88	12.06	26.36	17.92	0.11	1.01	0.17	11.05	9.89
9.67	0.67	10.97	15.54	14.20	15.62	11.88	12.06	30.67	17.92	0.11	1.01	0.17	11.05	9.89
14.45	0.68	11.52	15.91	14.55	15.99	12.35	12.51	0.57	13.58	0.49	0.44	0.61	8.18	7.28
9.04	0.70	12.66	16.65	15.25	16.73	13.31	13.43	38.07	6.48	2.09	0.00	2.34	3.60	3.15
8.97	0.70	12.66	16.65	15.25	16.73	13.31	13.43	38.91	6.48	2.09	0.00	2.34	3.60	3.15
15.79	0.70	12.95	16.84	15.43	16.92	13.56	13.67	0.35	5.07	2.67	0.05	2.95	2.72	2.36
10.75	0.70	12.95	16.84	15.43	16.92	13.56	13.67	19.87	5.07	2.67	0.05	2.95	2.72	2.36
11.37	0.72	14.17	17.61	16.15	17.69	14.57	14.64	14.75	1.08	5.76	0.90	6.18	0.40	0.32
11.09	0.73	14.80	17.99	16.52	18.08	15.10	15.15	16.97	0.17	7.77	1.73	8.27	0.01	0.00
18.31	0.73	14.80	17.99	16.52	18.08	15.10	15.15	9.62	0.17	7.77	1.73	8.27	0.01	0.00
12.44	0.74	15.44	18.39	16.89	18.47	15.64	15.66	7.65	0.06	10.12	2.85	10.68	0.19	0.21
12.61	0.75	15.77	18.58	17.08	18.67	15.91	15.92	6.74	0.32	11.41	3.52	12.02	0.50	0.51
13.52	0.78	17.81	19.79	18.23	19.88	17.61	17.54	2.85	6.80	21.02	9.13	21.87	5.79	5.47
13.23	0.78	17.81	19.79	18.23	19.88	17.61	17.54	3.90	6.80	21.02	9.13	21.87	5.79	5.47
13.71	0.78	18.17	20.00	18.42	20.09	17.91	17.82	2.23	8.77	22.94	10.34	23.83	7.29	6.85

AFOROS	H-0,1167	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6	Y-Ym	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6
									Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym
13.11	0.78	18.17	20.00	18.42	20.09	17.91	17.82	4.40	8.77	22.94	10.34	23.83	7.29	6.85
19.96	0.79	18.89	20.41	18.81	20.50	18.50	18.39	22.59	13.54	27.06	13.02	28.04	10.87	10.15
20.25	0.81	19.99	21.03	19.41	21.13	19.42	19.26	25.42	22.91	33.96	17.67	35.08	17.76	16.48
14.93	0.81	20.37	21.24	19.61	21.34	19.73	19.56	0.08	26.65	36.46	19.40	37.63	20.48	18.97
20.58	0.82	20.75	21.46	19.81	21.55	20.05	19.86	28.84	30.72	39.05	21.21	40.27	23.43	21.67
20.79	0.83	21.52	21.88	20.22	21.98	20.69	20.47	31.14	39.85	44.56	25.12	45.88	30.03	27.69
22.44	0.85	23.51	22.96	21.37	23.03	22.34	22.04	52.30	68.97	60.18	38.01	61.24	50.85	46.66
20.77	0.87	24.75	23.63	22.57	23.58	23.37	23.01	30.93	91.11	70.88	54.20	70.16	66.58	60.94
39.95	0.87	25.17	23.85	22.97	23.78	23.71	23.34	612.10	99.32	74.68	60.35	73.53	72.40	66.22
16.13	0.87	25.17	23.85	22.97	23.78	23.71	23.34	0.85	99.32	74.68	60.35	73.53	72.40	66.22
41.50	0.88	26.02	24.30	23.80	24.20	24.42	24.01	691.24	117.04	82.62	73.85	80.93	84.95	77.59
18.77	0.90	27.33	24.97	25.07	24.89	25.51	25.04	12.68	147.03	95.43	97.23	93.81	106.14	96.77
42.78	0.90	27.33	24.97	25.07	24.89	25.51	25.04	760.56	147.03	95.43	97.23	93.81	106.14	96.77
24.46	0.91	28.22	25.43	25.93	25.39	26.25	25.74	85.71	169.40	104.59	115.02	103.72	121.94	111.05
20.71	0.92	29.13	25.89	26.81	25.92	27.00	26.46	30.24	193.77	114.24	134.67	114.79	139.14	126.58
22.12	0.93	30.51	26.59	28.16	26.77	28.16	27.55	47.76	234.25	129.70	167.79	133.79	167.70	152.35
43.68	0.93	30.51	26.59	28.16	26.77	28.16	27.55	810.95	234.25	129.70	167.79	133.79	167.70	152.35
41.00	0.96	33.38	28.02	30.96	28.69	30.55	29.82	665.49	330.37	164.24	248.25	181.75	235.55	213.45
20.18	0.98	35.37	28.99	32.91	30.12	32.22	31.39	24.77	406.60	190.08	313.38	222.40	289.46	261.92
41.85	1.02	38.99	31.77	36.46	32.92	35.27	34.27	709.91	565.83	274.33	451.93	313.89	402.41	363.29
40.19	1.03	40.60	33.41	38.05	34.24	36.62	35.55	624.01	644.94	331.32	521.72	362.33	458.72	413.76
36.82	1.04	41.69	34.52	39.12	35.16	37.55	36.42	467.13	701.54	373.04	571.95	398.09	499.09	449.93
50.45	1.06	43.36	36.22	40.76	36.59	38.96	37.75	1242.29	792.47	441.48	653.13	457.39	564.10	508.12
40.40	1.09	46.79	39.72	44.15	39.67	41.87	40.50	634.75	997.30	600.74	837.72	598.51	711.18	639.66
48.07	1.12	50.35	43.35	47.68	43.03	44.92	43.37	1079.92	1235.04	792.29	1054.34	774.05	883.00	793.14
43.07	1.12	50.35	43.35	47.68	43.03	44.92	43.37	776.13	1235.04	792.29	1054.34	774.05	883.00	793.14

AFOR OS	H-0,1167	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6	Y-Ym	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6
									Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym
53.55	1.14	52.80	45.86	50.11	45.42	47.03	45.35	1470.12	1413.23	939.43	1218.01	912.94	1012.52	908.74
59.35	1.14	52.80	45.86	50.11	45.42	47.03	45.35	1948.71	1413.23	939.43	1218.01	912.94	1012.52	908.74
60.80	1.16	55.31	48.42	52.60	47.94	49.19	47.39	2078.46	1608.21	1103.20	1398.14	1071.40	1154.94	1035.77
40.18	1.17	56.59	49.73	53.87	49.24	50.29	48.43	623.76	1712.26	1191.61	1494.67	1158.54	1231.23	1103.79
53.34	1.17	56.59	49.73	53.87	49.24	50.29	48.43	1454.21	1712.26	1191.61	1494.67	1158.54	1231.23	1103.79
65.31	1.18	58.53	51.71	55.80	51.26	51.98	50.02	2510.13	1876.88	1332.74	1647.87	1299.84	1352.33	1211.71
76.74	1.20	61.17	54.42	58.43	54.06	54.28	52.18	3786.08	2112.91	1537.43	1868.48	1509.30	1526.79	1367.12
60.56	1.21	62.52	55.79	59.77	55.50	55.45	53.28	2057.38	2238.28	1647.14	1986.06	1623.65	1619.83	1449.98
66.05	1.23	64.56	57.88	61.81	57.73	57.24	54.97	2585.13	2435.87	1821.26	2171.88	1807.93	1766.98	1580.98
54.07	1.23	65.25	58.59	62.50	58.48	57.85	55.54	1510.42	2504.33	1881.92	2236.40	1872.90	1818.12	1626.49
68.02	1.25	67.34	60.72	64.58	60.80	59.68	57.26	2789.23	2717.74	2071.95	2437.94	2078.94	1977.97	1768.75
72.53	1.28	72.34	65.85	69.58	66.48	64.10	61.42	3285.49	3264.50	2564.59	2956.83	2629.27	2390.58	2135.75
68.03	1.31	76.03	69.62	73.27	70.77	67.38	64.50	2790.39	3699.28	2961.22	3371.64	3087.67	2721.64	2430.08
67.84	1.33	79.04	72.71	76.29	74.34	70.07	67.03	2770.82	4075.21	3307.04	3731.65	3497.40	3009.87	2686.26
67.71	1.35	82.12	75.86	79.38	78.04	72.83	69.63	2756.61	4477.30	3679.45	4117.91	3948.22	3320.10	2961.92
33.36	1.38	87.64	81.53	84.92	84.81	77.81	74.32	329.61	5247.22	4398.67	4860.52	4844.36	3919.36	3494.26
86.79	1.39	88.45	82.35	85.73	85.80	78.54	75.00	5124.44	5364.37	4508.73	4973.83	4984.24	4011.12	3575.76
79.56	1.39	88.45	82.35	85.73	85.80	78.54	75.00	4141.84	5364.37	4508.73	4973.83	4984.24	4011.12	3575.76
98.46	1.40	90.07	84.01	87.36	87.82	80.01	76.39	6930.59	5604.22	4734.53	5206.05	5273.34	4199.45	3743.02
84.36	1.40	90.07	84.01	87.36	87.82	80.01	76.39	4782.44	5604.22	4734.53	5206.05	5273.34	4199.45	3743.02
78.36	1.42	93.35	87.38	90.66	91.95	83.00	79.20	3988.07	6106.65	5209.36	5693.43	5890.27	4595.89	4095.08
189.72	1.47	102.69	96.96	100.06	103.95	91.57	87.26	30455.89	7653.17	6684.14	7200.58	7875.90	5831.58	5192.22
89.76	1.49	105.31	99.66	102.71	107.39	94.00	89.55	5558.32	8119.29	7131.91	7656.61	8497.40	6208.28	5526.64
97.29	1.50	107.08	101.47	104.49	109.72	95.64	91.09	6737.81	8441.12	7441.83	7971.88	8932.17	6469.45	5758.50
110.60	1.55	117.07	111.73	114.58	119.77	104.97	99.88	9099.28	10377.10	9317.42	9874.86	10933.57	8058.23	7168.94
107.82	1.58	122.71	117.53	120.28	125.40	110.29	104.88	8577.38	11558.04	10469.52	11040.33	12142.03	9041.24	8041.67

AFOR OS	H-0,1167	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6	Y-Ym	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6
									Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym
120.61	1.62	130.44	125.47	128.10	133.12	117.63	111.79	11110.04	13279.61	12157.75	12744.58	13902.82	10491.52	9329.37
89.69	1.63	131.43	126.48	129.09	134.10	118.57	112.68	5548.19	13507.10	12381.51	12970.20	14135.43	10684.62	9500.83
142.64	1.66	138.41	133.66	136.17	141.08	125.27	118.98	16239.47	15179.30	14030.64	14631.35	15844.97	12113.86	10770.10
154.78	1.72	150.81	146.40	148.74	153.50	137.28	130.30	19481.79	18387.80	17212.89	17830.22	19124.23	14901.59	13246.56
134.39	1.73	152.93	148.58	150.89	155.62	139.35	132.25	14205.82	18966.79	17789.28	18408.88	19715.93	15410.59	13698.84
147.68	1.73	152.93	148.58	150.89	155.62	139.35	132.25	17549.67	18966.79	17789.28	18408.88	19715.93	15410.59	13698.84
129.86	1.76	158.29	154.10	156.33	160.99	144.60	137.20	13145.81	20472.16	19290.58	19915.20	21254.32	16741.99	14882.05
217.03	1.81	169.29	165.41	167.50	172.03	155.46	147.44	40732.19	23741.30	22562.59	23194.40	24595.27	19671.01	17486.00
161.36	1.81	169.29	165.41	167.50	172.03	155.46	147.44	21361.04	23741.30	22562.59	23194.40	24595.27	19671.01	17486.00
220.73	1.83	174.93	171.22	173.24	177.70	161.07	152.74	42240.18	25511.21	24339.86	24973.83	26404.23	21277.02	18914.31
157.91	1.87	184.15	180.71	182.61	186.96	170.31	161.45	20364.48	28540.78	27390.08	28025.45	29501.04	24056.81	21387.44
166.24	1.91	192.41	189.21	191.02	195.27	178.65	169.32	22810.41	31400.27	30277.24	30911.74	32424.60	26714.14	23752.66
230.98	1.92	196.00	192.91	194.69	198.89	182.30	172.77	46559.35	32687.74	31579.47	32212.98	33741.12	27920.69	24826.92
222.29	1.98	210.72	208.07	209.69	213.72	197.36	186.99	42882.19	38227.17	37196.60	37822.46	39407.13	33179.14	29511.21
187.98	1.99	211.97	209.36	210.96	214.98	198.65	188.21	29850.91	38717.87	37695.18	38320.14	39909.17	33649.97	29930.82
216.13	2.01	217.02	214.55	216.10	220.06	203.85	193.13	40370.52	40726.99	39738.13	40359.04	41964.95	35585.91	31656.45
246.71	2.07	233.81	231.85	233.24	237.00	221.33	209.66	53594.18	47787.29	46934.85	47537.92	49191.98	42487.72	37812.45
218.67	2.08	236.45	234.57	235.93	239.66	224.10	212.28	41397.67	48948.25	48120.60	48720.28	50380.79	43636.62	38837.78
331.17	2.13	249.87	248.40	249.64	253.21	238.26	225.68	99832.72	55066.87	54379.26	54959.46	56648.01	49752.75	44298.76
234.79	2.26	285.05	284.66	285.61	288.78	276.02	261.45	48217.64	72815.73	72607.60	73120.20	74845.12	68021.75	60635.45
278.94	2.26	285.05	284.66	285.61	288.78	276.02	261.45	69556.24	72815.73	72607.60	73120.20	74845.12	68021.75	60635.45
386.66	2.32	302.76	302.93	303.75	306.72	295.36	279.80	137978.20	82689.01	82784.34	83254.90	84977.93	78486.60	70008.46
285.21	2.38	322.56	323.34	324.02	326.77	317.23	300.56	72902.25	94464.66	94948.61	95366.68	97071.69	91219.09	81425.76
310.35	2.48	354.24	356.03	356.50	358.90	352.77	334.33	87110.08	114942.61	116158.01	116481.40	118122.85	113947.84	101839.32

AFOR OS	H-0,1167	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6	Y-Ym	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6
									Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym	Yest-Ym
427.35	2.66	413.26	416.94	417.09	418.84	420.62	398.93	169862.81	158448.77	161389.17	161507.91	162917.96	164359.99	147242.91
535.86	2.96	525.06	532.37	532.05	532.61	554.44	526.75	271080.76	259947.03	267462.29	267127.94	267701.96	290771.26	261674.71
Media=	15.2						$\Sigma=$	1679885.30	1630237.76	1583244.94	1615303.22	1645487.56	1557692.33	1397306.43
								r2=	0.985	0.971	0.981	0.990	0.963	0.912

Salidas programa HYFRAN:

PRECIPITACIONES

Estadística base:

Titulo del proyecto	
Precipitaciones San Antonio	
Numero de datos [n] :	5844
Mínimo :	0.00
Máximo :	87.9
Promedio :	2.17
Desviación estandar :	6.24
Mediana :	0.00
Coefficiente de variación [Cv] :	2.87
Coefficiente de asimetría [Cs] :	5.03
Coefficiente de curtosis [Ck] :	37.9

Estacionaridad de Kendall:

Nombre de la prueba	Prueba de estacionaridad (Kendall)	Subdividir
Titulo del proyecto		
Precipitaciones San Antonio		
Hipótesis		
H0	No hay tendencia en las observaciones.	
H1	Hay una tendencia en las observaciones.	
Resultados		
Valor de la estadística	|K| = 2.53	
valor-p	p = 0.0113	
Conclusión		
Debemos RECHAZAR H0. a un nivel de significado de 5%, pero aceptamos a un nivel de significado de 1%		

Homogeneidad de Wilcoxon:

Nombre de la prueba

Título del proyecto

Hipótesis

H0

H1

Resultados

Valor de la estadística	<input type="text" value=" W = 2.19"/>
valor-p	<input type="text" value="p = 0.0283"/>
Fecha inicial del primer	<input type="text" value="1994"/>
Fin del primer grupo	<input type="text" value="2000"/>

Conclusión

Debemos RECHAZAR H0. a un nivel de significado de 5%, pero aceptamos a un nivel de significado de 1%
 Atención : las dos sub-muestras podrían ser no-homogéneas.

CAUDALES

Estadística base:

Título del proyecto

Numero de datos [n] :	<input type="text" value="5844"/>
Mínimo :	<input type="text" value="0.200"/>
Máximo :	<input type="text" value="633"/>
Promedio :	<input type="text" value="7.99"/>
Desviación estandar :	<input type="text" value="22.2"/>
Mediana :	<input type="text" value="2.27"/>
Coficiente de variación [Cv] :	<input type="text" value="2.78"/>
Coficiente de asimetría [Cs] :	<input type="text" value="13.3"/>
Coficiente de curtosis [Ck] :	<input type="text" value="259"/>

Estacionaridad de Kendall:

Nombre de la prueba	Prueba de estacionaridad (Kendall)	
Título del proyecto	Caudales San Antonio	
Hipótesis		
H0	No hay tendencia en las observaciones.	
H1	Hay una tendencia en las observaciones.	
Resultados		
Valor de la estadística		|K| = 30.3
valor-p		p = 3.80E-201
Conclusión		
Debemos RECHAZAR H0. a un nivel de significado de 1%.		

Homogeneidad de Wilcoxon:

Nombre de la prueba	Prueba de homogeneidad a escala anual (Wilcoxon)		
Título del proyecto	Caudales San Antonio		
Hipótesis			
H0	Los promedios de las muestras son iguales.		
H1	Los promedios de las muestras son diferentes.		
Resultados			
Valor de la estadística		|W| = 14.7	
valor-p		p = 1.49E-048	
Fecha inicial del primer		1994	
Fin del primer grupo		1999	
Conclusión			
Debemos RECHAZAR H0. a un nivel de significado de 1%. Se puede concluir que las dos sub-muestras NO SON homogéneos.			

Como no verifica homogeneidad ni estacionaridad, se cambia el paso de tiempo a un dato por mes durante el mismo periodo de tiempo y se realizan las pruebas nuevamente.

Estadística base:

Titulo del proyecto	
Caudales San Antonio	
Numero de datos [n] :	192
Mínimo :	0.400
Máximo :	99.3
Promedio :	8.00
Desviación estandar :	10.8
Mediana :	3.11
Coficiente de variación [Cv] :	1.35
Coficiente de asimetría [Cs] :	3.85
Coficiente de curtosis [Ck] :	28.5

Estacionaridad de Kendall:

Nombre de la prueba	Prueba de estacionaridad (Kendall)
Titulo del proyecto	Caudales San Antonio
Hipótesis	
H0	No hay tendencia en las observaciones.
H1	Hay una tendencia en las observaciones.
Resultados	
Valor de la estadística	|K| = 4.15
valor-p	p = 3.31E-005
Conclusión	
Debemos RECHAZAR H0. a un nivel de significado de 1%.	

Homogeneidad de Wilcoxon:

Nombre de la prueba	Prueba de homogeneidad a escala anual (Wilcoxon)
Titulo del proyecto	
Caudales San Antonio	
Hipótesis	
H0	Los promedios de las muestras son iguales.
H1	Los promedios de las muestras son diferentes.
Resultados	
Valor de la estadística	|W| = 1.35
valor-p	p = 0.178
Fecha inicial del primer	1994
Fin del primer grupo	1999
Conclusión	
Acceptamos H0. a un nivel de significado de 5 %.	
No se puede concluir que los promedios de las dos sub-muestras son diferentes.	