



Título del Trabajo Fin de Máster:

***ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE
RECURSOS HÍDRICOS EN LAS
SUBCUENCAS DE LOS RÍOS
TOMBAMBÁ Y PINDILIG
(PROVINCIAS AZUAY Y CAÑAR -
ECUADOR)***

Intensificación:

RECURSOS HÍDRICOS

Autor:

AVILÉS AÑAZCO, ALEX

Director:

DR. SOLERA SOLERA, ABEL

Fecha: MAYO, 2011

Título del Trabajo Fin de Máster:
**ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS EN LAS
SUBCUENCAS DE LOS RÍOS TOMBAMBA Y PINDILIG
(PROVINCIAS AZUAY Y CAÑAR - ECUADOR)**

Autor: **AVILÉS AÑAZCO, ALEX**

Tipo	A <input type="checkbox"/> B <input checked="" type="checkbox"/>	Lugar de Realización	VALENCIA
Director	DR. SOLERA SOLERA, ABEL	Fecha de Lectura	MAYO, 2011

Resumen

La cuenca del río Paute ubicada en la zona centro sur del Ecuador, tiene gran importancia por sus abastecimientos urbanos e hidroeléctricos. Sin embargo adolece de una ausencia de infraestructuras de regulación en la mayoría de subcuencas pertenecientes a la misma. La ausencia de regulación hace necesario una planificación y gestión de acciones futuras, de tal manera de enfrentar sobre todo las épocas de sequía. Dada esta situación se ha planteado investigar y aplicar metodologías para el análisis de sistemas de recursos hídricos, para lo cual se ha recurrido a la modelación estocástica para la síntesis de aportaciones y los métodos de simulación de sistemas de recursos hídricos con escenarios estocásticos y con un enfoque de riesgo.

Se ha explorado profundamente las técnicas de análisis estadísticos más habituales en la bibliografía, además se ha realizado comparaciones entre modelos que toman en cuenta la estacionalidad en el año hidrológico y otros modelos que no lo hacen. Se puede decir que el presente trabajo es un primer ensayo de la tesis doctoral, cuyo objetivo primordial será la modelación estocástica para predicción de caudales, con el propósito de optimizar la operación de embalses para garantizar el abastecimiento para las demandas consuntivas y para la generación de energía.

Se realizaron dos casos de estudio en las subcuencas del río Tomebamba y río Pindilig, en donde se han derivado algunas enseñanzas, como la ventaja de introducir el concepto de estacionalidad para mejorar la reproducción de estadísticos de la muestra histórica y el conocimiento del funcionamiento de los sistemas cuando se realizaron las distintas simulaciones. Los resultados de la simulación mostraron la necesidad de planificar infraestructura de regulación y sus reglas de gestión futura en la subcuenca del río

Tomebamba, mientras que no se necesitaría ninguna acción en la subcuenca del río Pindilig, dado que el análisis actual y futuro mostró la total satisfacción de las demandas.

Por último se han propuesto distintas líneas de investigación que surgieron como idea para próximos trabajos y para la tesis de Doctorado.

Abstract

The river basin of the Paute river located in the zone South center of Ecuador, has great importance by its urban and hydroelectric supplying. Nevertheless it suffers from an absence of infrastructures of regulation in most of subriver basins pertaining to the same one. The regulation absence makes a planning and management necessary of future actions, of such way to face the times of drought mainly. Given this situation one has considered to investigate and to apply methodologies for the analysis of systems of hydric resources, for which one has resorted to the stochastic modeling for the synthesis of hydrologic data and the methods of simulation of systems of hydric resources with stochastic scenes and an approach of risk.

One has deeply explored the techniques of more habitual statistical analyses in the bibliography, in addition it has been made comparisons between models that take into account the seasonal in the hydrologic year and other models that do not do it. It can to say that the present work is a first examination of the doctoral thesis, whose fundamental objective will be the stochastic modeling for prediction of streamflow, in order to optimize the operation of dams for the energy generation.

Two cases of study were made in the subriver basins of the Tomebamba river and Pindilig river, in where some lessons have been derived, as the advantage to introduce seasonal concept to improve the reproduction historical statistical sample and the knowledge of the behavior of the systems when the different simulations were made. The results of the simulation showed the necessity to plan infrastructure of regulation and its rules of future management in the subriver basin of the Tomebamba river, whereas any action in the subriver basin would not be needed the Pindilig river, since the present and future analysis showed the total satisfaction of the demands.

Finally different lines of investigation have seted out that arose like idea for next works and the thesis of Doctorate.

Resum

La conca del riu Paute ubicada en la zona centre sud de l'Ecuador, té una gran importància per els seus abastiments urbans i hidroelèctrics. Aixina i tot adolix d'una absència d'infraestructures de regulació en la majoria de subconques pertenyents a la mateixa. L'absència de regulació fa necessari una planificació i gestió d'accions futures, de tal manera d'enfrontar sobre tot les èpoques de sequera. Donada esta situació s'ha plantejat investigar i aplicar metodologies per l'anàlisi de sistemes de recursos hídrics, per a lo qual s'ha recurrit a la modelació estocàstica per a la síntesi d'aportacions i els mètodes de simulació de sistemes de recursos hídrics amb escenaris estocàstics i amb un enfocament de risc.

S'ha explorat profundament les tècniques d'anàlisi estadístic més habituals en la bibliografia, a més s'ha realitzat comparacions entre models que prenen en compte la estacionalitat en l'any hidrològic i altres models que no lo fan. Se pot dir que el present treball és un primer ensaig de la tesi doctoral, del qual com objectiu primordial serà la modelació estocàstica per a predicció de caudals, amb el propòsit d'optimitzar l'operació d'embassaments per a garantir l'abastiment per a les demandes consuntives i per a la generació d'energia.

S'han realitzat dos casos d'estudi en les subconques del riu Tomebamba i riu Pindilig, a on s'han derivat algunes ensenyances, com el avantatge d'introduir el concepte d'estacionalitat per a millorar la reproducció d'estadístics de la mostra històrica i el coneiximent del funcionament dels sistemes quan es realitzen les distintes simulacions. Els resultats de la simulació mostren la necessitat de planificar la infraestructura de regulació i les seues regles de gestió futura en la subconca del riu Tomebamba, mentres que no es necessitaria cap acció en la subconca del riu Pindilig, donat que l'anàlisi actual i futur va mostrar la total satisfacció de les demandes.

Per últim s'han proposat distintes línies d'investigació que surgiren com idea per a pròxims treballs i per a la tesi de Doctorat.

Palabras clave: Modelación Estocástica, Simulación, Gestión, Planificación, Riesgo



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Máster en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

*A Dios, Jheimy y
Joaquín, para ellos mi
amor y esfuerzo.*

AGRADECIMIENTOS:

El autor agradece al Dr. Abel Solera Solera, por su guía y apoyo en la realización de este trabajo, además agradecimientos a los profesores del Máster en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente por compartir su experiencia y conocimientos y por último agradecer al personal administrativo del Máster que fueron de gran ayuda en el transcurso de mi formación.

CONTENIDO

1. INTRODUCCION	1
1.1. OBJETIVOS	2
1.2. METODOLOGÍA.....	4
1.3. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.....	5
2. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN.....	7
2.1. INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA	7
2.2. INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA	8
2.3. INFORMACIÓN DE LOS INVENTARIOS HÍDRICOS y CONCESIONES DE AGUA	11
3. ANÁLISIS DE LA CALIDAD Y PROCESAMIENTO INICIAL DE LOS DATOS HIDROMETEOROLÓGICOS..	13
3.1. ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE LOS DATOS.....	13
3.2. PROCESAMIENTO DE LOS DATOS	16
4. MODELACIÓN ESTOCASTICA	18
4.1 ANÁLISIS DE LOS DATOS	19
4.1.1 Subcuenca del río Tomebamba	20
4.1.1.1. Normalización.....	20
4.1.1.2. Estadísticas básicas de la series.....	24
4.1.1.3. Estadísticas de almacenamiento, sequía y superávit de la series	27
4.1.1.4. Estandarización de la serie transformada	29
4.1.2 Subcuenca del río Pindilig.....	30
4.1.2.1. Normalización.....	30
4.1.2.2. Estadísticas básicas de la series.....	31
4.1.2.3. Estadísticas de almacenamiento, sequía y superávit de la series	35
4.1.2.4. Estandarización de la serie transformada	36
4.2 MODELOS PARA SERIES DE TIEMPO	37
4.2.1 Modelo autoregresivo de media móvil (ARMA).....	37
4.2.1.1 Aplicación subcuenca del Tomebamba – Escala Anual	39
4.2.1.2 Aplicación subcuenca del Tomebamba – Escala Mensual	41
4.2.1.3 Aplicación subcuenca del río Pindilig – Escala Anual	48
4.2.1.4 Aplicación subcuenca del río Pindilig – Escala Mensual	49
4.2.2 Modelo autoregresivo de media móvil periódico (PARMA).....	50
4.2.2.1 Estado del arte de los modelos PARMA	52
4.2.2.2 Aplicación subcuenca del Tomebamba	55
4.2.2.3 Aplicación subcuenca del río Pindilig	60

4.2.3	Generación de series sintéticas.....	61
4.2.3.1	Aplicación subcuena del río Tomebamba – Series Sintéticas Anuales	62
4.2.3.2	Aplicación subcuena del río Pindilig – Series Sintéticas Anuales.....	65
4.2.3.3	Aplicación subcuena del río Tomebamba – Series Sintéticas Mensuales	67
4.2.3.4	Aplicación subcuena del río Pindilig – Series Sintéticas Mensuales	70
5.	EVALUACIÓN DE LA DEMANDA	73
5.1.	DEMANDA ACTUAL.....	73
5.1.1	Subcuena del río Tomebamba	73
5.1.1.1	Agrupación de demandas de la subcuena del río Tomebamba.	78
5.1.2	Subcuena del río Pindilig.....	81
5.1.2.1	Agrupación de demandas de la subcuena del río Pindilig.	83
5.2.	DEMANDA FUTURA	84
5.2.1	Subcuena del río Tomebamba	85
5.2.2	Subcuena del río Pindilig.....	87
5.3.	GARANTÍAS DE LAS DEMANDAS	90
6.	SIMULACIÓN DE LOS SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS	93
6.1.	SIMULACIÓN DEL ESCENARIO ACTUAL.....	94
6.1.1	Subcuena del río Tomebamba	94
6.1.2	Subcuena del río Pindilig.....	99
6.2.	SIMULACIÓN DEL ESCENARIO FUTURO	100
6.2.1	Subcuena del río Tomebamba	101
6.2.2	Subcuena del río Pindilig.....	102
6.3.	ANÁLISIS DE IMPLEMENTACIÓN DE INFRAESTRUCTURA DE REGULACIÓN	103
6.3.1	Subcuena del río Tomebamba	105
6.4.	GESTIÓN EN ESCENARIOS ESTOCÁSTICOS CON ENFOQUE DE RIESGO	111
6.4.1	Subcuena del río Tomebamba	112
7.	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	129
7.1.	MODELACIÓN ESTOCÁSTICA	129
7.2.	SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS.....	130
7.3	APLICACIÓN EN CASOS DE ESTUDIO.....	131
7.4	LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACION.....	133

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.1: Ubicación de cuenca del río Paute	2
Figura 1.2: Ubicación de la subcuencas Tomebamba y Pindilig	3
Figura 2.1: Ubicación de las estaciones hidrológicas y meteorológicas del INAMHI	8
Figura 2.2: Ubicación de estaciones hidrológicas de la subcuenca del río Tomebamba	10
Figura 2.3: Ubicación de estaciones hidrológicas de la subcuenca del río Pindilig	11
Figura 3.1: Serie histórica de la estación meteorológica Surucucho Lulluchis	13
Figura 3.2 Serie histórica de la estación meteorológica Quinoas	14
Figura 3.3: Serie histórica de la estación meteorológica Chanín	14
Figura 3.4: Serie histórica de la estación meteorológica Pindilig	15
Figura 3.5: Serie histórica de la estación hidrológica Dudas en Pindilig	15
Figura 3.6: Pantalla de inicio del Software HYDRACCESS	16
Figura 4.1: Aportaciones anuales de la estación Matadero en Sayausi	20
Figura 4.2: Grafico en papel normal de la serie anual de la estación Matadero en Sayausi.	21
Figura 4.3: Media mensual de la serie original - Matadero en Sayausi	26
Figura 4.4: Media mensual de la serie transformada - Matadero en Sayausi	26
Figura 4.5: Sesgo mensual de la serie original - Matadero en Sayausi	27
Figura 4.6: Sesgo mensual de la serie transformada - Matadero en Sayausi	27
Figura 4.7: Aportaciones medias anuales de la estación Dudas en Pindilig	30
Figura 4.8: Prueba de normalidad de sesgo de la serie transformada mensual de la estación Dudas en Pindilig.	31
Figura 4.9: Media mensual de la serie original – Dudas en Pindilig	33
Figura 4.10: Media mensual de la serie transformada – Dudas en Pindilig	33
Figura 4.11: Sesgo mensual de la serie original – Dudas en Pindilig	33
Figura 4.12: Sesgo mensual de la serie transformada – Dudas en Pindilig	34
Figura 4.13: Función de autocorrelación (ACF) de toda la serie mensual original – Dudas en Pindilig	35
Figura 4.14: Función de autocorrelación de toda la serie mensual transformada – Dudas en Pindilig	35
Figura 4.15: Función de autocorrelación de toda la serie mensual transformada y tipificada – Dudas en Pindilig	37
Figura 4.16: Serie anual normalizada y estandarizada - Estación Matadero en Sayausi	39
Figura 4.17: Función de autocorrelación para la serie normalizada y estandarizada de las aportaciones anuales de la estación Matadero en Sayausi	40
Figura 4.18: Función de autocorrelación parcial para la serie normalizada y estandarizada de las aportaciones anuales de la estación Matadero en Sayausi	40

Figura 4.19: Función de autocorrelación para la serie normalizada y estandarizada de las aportaciones mensuales de la estación Matadero en Sayausi	42
Figura 4.20: Función de autocorrelación parcial para la serie normalizada y estandarizada de las aportaciones mensuales de la estación Matadero en Sayausi	43
Figura 4.21: Serie residual del modelo ARMA (1,4) ajustado - Matadero en Sayausi	44
Figura 4.22: Histograma - Serie residual Modelo ARMA (1,4) ajustado - Matadero en Sayausi.....	44
Figura 4.23: Función de autocorrelación de la serie residual del modelo ARMA (1,4) ajustado a la estación Matadero en Sayausi	45
Figura 4.24: Serie anual estandarizada - Estación Dudas en Pindilig	48
Figura 4.25: Función de autocorrelación de la serie histórica anual y serie generada anual por el modelo ARMA (1,1) ajustado a la estación Matadero en Sayausi	65
Figura 4.26: Función de autocorrelación de la serie histórica anual y serie generada anual por el modelo MA (0,3) ajustado a la estación Dudas en Pindilig	67
Figura 5.1: Variación mensual de la demanda en la subcuenca del río Tomebamba	80
Figura 6.1: Esquema del sistema de recursos hídricos en la subcuenca del río Tomebamba	95
Figura 6.2: Déficit de suministro de la demanda actual ciudad de Cuenca.	97
Figura 6.3: Déficit de suministro de la demanda actual otros usos domésticos.....	97
Figura 6.4: Déficit de suministro de la demanda actual de riego Sayausi.....	98
Figura 6.5: Déficit de suministro de la demanda actual de riego San Joaquín.....	98
Figura 6.6: Déficit de suministro de la demanda actual otros usos.....	98
Figura 6.7: Esquema del sistema de recursos hídricos en la subcuenca del río Pindilig	99
Figura 6.8: Función de probabilidad para los valores de capacidad de almacenamiento en la Subcuenca del río Tomebamba	106
Figura 6.9: Esquema del sistema de recursos hídricos en la subcuenca del río Tomebamba incluido el embalse virtual	108
Figura 6.10: Pantalla de ingreso de información del modelo Simrisk	113
Figura 6.11: Probabilidad de estado del embalse [21 Hm ³] – Escenario futuro – Subcuenca Tomebamba	117
Figura 6.12: Probabilidad de estado del embalse [21 Hm ³] de los niveles 0-2 ; 2-4 y 4-6	118
Figura 6.13: Probabilidad promedio mensual de fallo de la demanda futura ciudad de Cuenca [21 Hm ³] – Escenario futuro – Subcuenca Tomebamba.....	119
Figura 6.14: Probabilidad promedio mensual de fallo de la demanda futura de riego de Sayausi y San Joaquín [21 Hm ³] – Escenario futuro – Subcuenca Tomebamba	120
Figura 6.15: Probabilidad promedio mensual de fallo de la demanda futura otros usos [21 Hm ³] – Escenario futuro – Subcuenca Tomebamba.....	120
Figura 6.16: Probabilidad de estado del embalse [10 Hm ³] – Escenario futuro – Subcuenca Tomebamba	123

Figura 6.17: Probabilidad de estado del embalse de los niveles 0-1 Hm ³ ; 1-2 y 2-3 Hm ³	124
Figura 6.18: Probabilidad promedio mensual de fallo de la demanda futura ciudad de Cuenca [10 Hm ³] – Escenario futuro – Subcuenca Tomebamba.....	124
Figura 6.19: Probabilidad promedio mensual de fallo de la demanda futura de riego de Sayausi y San Joaquín [10 Hm ³] – Escenario futuro – Subcuenca Tomebamba	125
Figura 6.20: Probabilidad promedio mensual de fallo de la demanda futura otros usos [10 Hm ³] – Escenario futuro – Subcuenca Tomebamba.....	126
Figura 6.21: Probabilidad promedio mensual de fallo de la demanda futura ciudad de Cuenca [10 Hm ³] – Escenario futuro con restricciones – Subcuenca Tomebamba	127

LISTADO DE TABLAS

Tabla 2.1: Resumen Estaciones Meteorológicas INAMHI	9
Tabla 4.1: Pruebas de normalidad de las series mensuales de la estación Matadero en Sayausi.....	22
Tabla 4.2: Resumen de la normalización de las series mensuales de la estación Matadero en Sayausi con la función logarítmica.	23
Tabla 4.3: Resumen de la normalización de las series mensuales de la estación Matadero en Sayausi con la función potencia	24
Tabla 4.4: Estadísticas básicas serie anual y mensual original [Y=X] - Matadero en Sayausi.....	25
Tabla 4.5: Estadísticas básicas series mensuales transformadas [Y = (X) ^{0.5}] - Matadero en Sayausi	25
Tabla 4.6: Estadísticas relacionadas de almacenamiento, sequía y superávit para la serie de aportaciones anuales originales de la estación Matadero en Sayausi.....	28
Tabla 4.7: Estadísticas relacionadas de almacenamiento, sequía y superávit para la serie de aportaciones mensuales originales de la estación Matadero en Sayausi	28
Tabla 4.8: Estadísticas básicas series anual y mensual original [Y=X] – Dudas en Pindilig.....	32
Tabla 4.9: Estadísticas básicas series mensuales transformadas [Y = (X) ^{1/2} ; Y = Ln (X-1)] – Dudas en Pindilig	32
Tabla 4.10: Estadísticas relacionadas de almacenamiento, sequía y superávit para la serie de aportaciones anuales originales de la estación Dudas en Pindilig	36
Tabla 4.11: Estadísticas relacionadas de almacenamiento, sequía y superávit para la serie de aportaciones mensuales originales de la estación Dudas en Pindilig	36
Tabla 4.12: Valores del criterio de información de Akaike corregido para varios modelos ARMA ajustados en la serie anual de aportaciones de la estación Matadero en Sayausi	41
Tabla 4.13: Parámetros estimados para el modelo ARMA (1,4) ajustado a la estación Matadero en Sayausi.....	44
Tabla 4.14: Comparación de estadísticos básicos de la serie histórica y la serie ajustada mediante el modelo ARMA (1,4) en la estación Matadero en Sayausi	45

Tabla 4.15: Comparación de estadísticos básicos de la serie histórica y la serie ajustada mediante el modelo AR (1) en la estación Matadero en Sayausi.....	46
Tabla 4.16: Comparación de estadísticos básicos de la serie histórica y la serie ajustada mediante el modelo ARMA (1,1) en la estación Matadero en Sayausi.....	47
Tabla 4.17: Estimación de parámetros y valores del criterio de información de Akaike corregido para varios modelos ARMA, AR y MA ajustados a la serie anual de aportaciones de la estación Dudas en Pindilig.....	49
Tabla 4.18: Estimación de parámetros y valores del criterio de información de Akaike corregido para varios modelos ARMA, AR y MA ajustados a la serie mensual de aportaciones de la estación Dudas en Pindilig.....	50
Tabla 4.19: Parámetros estimados para el modelo PARMA (1,0) o PAR (1) – Matadero en Sayausi ...	55
Tabla 4.20: Parámetros estimados para el modelo PARMA (1,1) – Matadero en Sayausi.....	56
Tabla 4.21: Parámetros estimados para el modelo PARMA (1,2) – Matadero en Sayausi.....	56
Tabla 4.22: Parámetros estimados para el modelo PARMA (1,3) – Matadero en Sayausi.....	56
Tabla 4.23: Parámetros estimados para el modelo PARMA (1,4) – Matadero en Sayausi.....	57
Tabla 4.24: Parámetros estimados para el modelo PARMA (2,1) – Matadero en Sayausi.....	57
Tabla 4.25: Parámetros estimados para el modelo PARMA (2,2) – Matadero en Sayausi.....	57
Tabla 4.26: Parámetros estimados para el modelo PARMA (3,2) – Matadero en Sayausi.....	58
Tabla 4.27: Parámetros estimados para el modelo PARMA (3,3) – Matadero en Sayausi.....	58
Tabla 4.28: Parámetros estimados para el modelo PARMA (4,3) – Matadero en Sayausi.....	58
Tabla 4.29: Parámetros estimados para el modelo PARMA (4,4) – Matadero en Sayausi.....	59
Tabla 4.30: Valores del criterio de información de Akaike corregido – AICC – Modelos PARMA - Matadero en Sayausi.....	59
Tabla 4.31: Valores del criterio de información de Akaike corregido – AICC – Modelos PARMA – Dudas en Pindilig.....	60
Tabla 4.32: Comparación de estadísticos básicos de la Serie Histórica Anual y la Serie Sintética Anual Generada – Aportaciones de la estación Matadero en Sayausi.....	62
Tabla 4.33: Comparación de estadísticos de sequía, superávit y almacenamiento de la Serie Histórica y la Serie Generada [Anual] – Nivel de demanda de 100% y 90% de la media de aportaciones anuales de la estación Matadero en Sayausi.....	62
Tabla 4.34: Comparación de estadísticos de sequía, superávit y almacenamiento de la Serie Histórica y la Serie Generada [Anual] – Nivel de demanda de 80% y 70% de la media de aportaciones anuales de la estación Matadero en Sayausi.....	63
Tabla 4.35: Comparación de estadísticos de sequía, superávit y almacenamiento de la Serie Histórica y la Serie Generada [Anual] – Nivel de demanda de 60% y 50% de la media de aportaciones anuales de la estación Matadero en Sayausi.....	63

Tabla 4.36: Comparación de estadísticos de sequía, superávit y almacenamiento de la Serie Histórica y la Serie Generada [Anual] – Nivel de demanda de 40% y 30% de la media de aportaciones anuales de la estación Matadero en Sayausi.....	64
Tabla 4.37: Comparación de estadísticos básicos de la Serie Histórica Anual y la Serie Sintética Anual Generada – Aportaciones de la estación Dudas en Pindilig.....	65
Tabla 4.38: Comparación de estadísticos de sequía, superávit y almacenamiento de la Serie Histórica y la Serie Generada [Anual] – Nivel de demanda 26% de la media de aportaciones anuales de la estación Dudas en Pindilig.....	66
Tabla 4.39: Comparación de estadísticos básicos de la Serie Histórica Mensual y la Serie Sintética Mensual Generada – Aportaciones de la estación Matadero en Sayausi.....	68
Tabla 4.40: Comparación de estadísticos de sequía y almacenamiento de la Serie Histórica y la Serie Generada [mensual] – Nivel de demanda de 100% y 90% de la media de aportaciones mensuales de la estación Matadero en Sayausi.....	68
Tabla 4.41: Comparación de estadísticos de sequía y almacenamiento de la Serie Histórica y la Serie Generada [mensual] – Nivel de demanda de 80% y 70% de la media de aportaciones mensuales de la estación Matadero en Sayausi	69
Tabla 4.42: Comparación de estadísticos de sequía y almacenamiento de la Serie Histórica y la Serie Generada [mensual] – Nivel de demanda de 60% y 50% de la media de aportaciones mensuales de la estación Matadero en Sayausi	69
Tabla 4.43: Comparación de estadísticos de sequía y almacenamiento de la Serie Histórica y la Serie Generada [mensual] – Nivel de demanda de 40% y 30% de la media de aportaciones mensuales de la estación Matadero en Sayausi	69
Tabla 4.44: Comparación de estadísticos de la Serie Histórica Mensual y la Serie Sintética Mensual Generada - Modelos MA y PARMA - Estación Dudas en Pindilig	71
Tabla 4.45: Comparación de estadísticos de sequía y almacenamiento de la Serie Histórica y la Serie Generada [mensual] – Nivel de demanda [26%] de la media de aportaciones mensuales de la estación Dudas en Pindilig - Modelos MA y PARMA	71
Tabla 5.1: Uso doméstico en la subcuenca del río Tomebamba.....	73
Tabla 5.2: Registro del volumen mensual de agua cruda que ingresa a la planta de potabilización de agua perteneciente a ETAPA (2000 – 2009).....	75
Tabla 5.3: Uso destinado para riego en la subcuenca del río Tomebamba	76
Tabla 5.4: Uso destinado para abrevaderos de ganado en la subcuenca del río Tomebamba.....	77
Tabla 5.5: Uso destinado para piscícolas en la subcuenca del río Tomebamba	78
Tabla 5.6: Demanda de uso doméstico para la ciudad de Cuenca.....	78
Tabla 5.7: Agrupación de las demandas de riego en la subcuenca del río Tomebamba	79
Tabla 5.8: Valores de demandas actuales en la subcuenca del río Tomebamba.....	80
Tabla 5.9: Uso doméstico en la subcuenca del río Pindilig	81
Tabla 5.10: Uso destinado para riego en la subcuenca del río Pindilig.....	82

Tabla 5.11: Uso destinado para abrevaderos de ganado en la subcuenca del río Pindilig	83
Tabla 5.12: Uso destinado para piscícolas en la subcuenca del río Pindilig.....	83
Tabla 5.13: Valores de demandas actuales en la subcuenca del río Pindilig	84
Tabla 5.14: Usos de agua y dotaciones en la subcuenca del río Tomebamba	85
Tabla 5.15: Datos poblacionales de las parroquias contenidas en la subcuenca del río Tomebamba .	86
Tabla 5.16: Valores de demandas futuras en la subcuenca del río Tomebamba.....	87
Tabla 5.17: Usos de agua y dotaciones en la subcuenca del río Pindilig.....	88
Tabla 5.18: Datos poblacionales de las parroquias Pindilig y Taday en la subcuenca del río Pindilig ..	88
Tabla 5.19: Valores de demandas futuras en la subcuenca del río Pindilig	89
Tabla 5.20: Índices basados en la severidad de los fallos utilizados en diversos organismos	91
Tabla 5.21: Índices basados en la ocurrencia de los fallos de varios organismos.....	91
Tabla 5.22: Índices basados en la severidad de los fallos utilizados en algunos planes hidrológicos de España	91
Tabla 6.1: Resultados de la simulación en el escenario actual del sistema de recursos hídricos de la subcuenca del río Tomebamba	96
Tabla 6.2: Resultados de la simulación en el escenario actual del sistema de recursos hídricos de la subcuenca del río Pindilig.....	100
Tabla 6.3: Resultados de la simulación en el escenario futuro del sistema de recursos hídricos de la subcuenca del río Tomebamba	102
Tabla 6.4: Ajuste de los valores de capacidad de almacenamiento a una función de probabilidad normal – Subcuenca del río Tomebamba.....	106
Tabla 6.5: Resultados de la simulación en el escenario futuro incluyendo el embalse de 21 Hm ³ en el sistema de recursos hídricos de la subcuenca del río Tomebamba.....	107
Tabla 6.6: Resultados de la simulación en el escenario futuro incluyendo el embalse de 20 Hm ³ en el sistema de recursos hídricos de la subcuenca del río Tomebamba.....	109
Tabla 6.7: Resultados de la simulación en el escenario futuro incluyendo el embalse de 19 Hm ³ en el sistema de recursos hídricos de la subcuenca del río Tomebamba.....	110
Tabla 6.8: Probabilidades máximas del estado del embalse [21 Hm ³] según el nivel en la simulación del sistema de recursos hídricos de las subcuenca del río Tomebamba	116
Tabla 6.9: Probabilidades máximas del estado del embalse [10 Hm ³] según cada nivel en la simulación del sistema de recursos hídricos de la subcuenca del río Tomebamba.....	122

1. INTRODUCCION

El recurso hídrico se encuentra bajo presión creciente debido al incremento de la población, las actividades económicas y la mayor competencia entre usuarios. Además la contaminación del agua agudiza aún más esta situación, provocando que exista escasez del recurso.

Es evidente que un mayor desarrollo implica un impacto del recurso hídrico, y esto sumado a los escenarios potenciales futuros de los modelos de cambio climático, muestran que existirá una disminución de los recursos hídricos, debido a la reducción de precipitaciones y un aumento de la evapotranspiración debido al aumento de la temperatura¹.

Es por esto que se hace necesaria una gestión del agua tanto desde el punto de vista de la oferta como también de la demanda, de tal manera que cubra los requerimientos de los usuarios.

En las cuencas hidrográficas ecuatorianas existe la necesidad de una gestión y planificación hídrica, debido al constante crecimiento de la población que demandará más recursos hídricos para nuevos servicios de agua potable, actividades productivas, actividades recreativas, etc.; esto sumado algunas veces a una desordenada e inequitativa repartición del agua, que crea conflictos entre los usuarios.

La cuenca del río Paute ubicada en la zona centro sur del Ecuador (Figura 1.1), tiene gran importancia por sus abastecimientos urbanos e hidroeléctricos. Sin embargo adolece de una ausencia de infraestructuras de regulación en la mayoría de subcuencas (pertenecientes a la cuenca del río Paute), y los medios de aforo de caudales son escasos. La ausencia de regulación hace necesario una planificación y gestión de acciones futuras, de tal manera de enfrentar sobre todo las épocas de sequía.

¹ Centro Cambio Global, Universidad Católica de Chile, Informe: Evaluación inicial del impacto en aguas andinas producto del Cambio Climático, 2010 <http://cambioglobal.uc.cl/>

Por lo expuesto, para el presente trabajo se ha planteado los objetivos que se describen en el siguiente punto.

Figura 1.1: Ubicación de cuenca del río Paute



FUENTE: CG PAUTE

1.1. OBJETIVOS

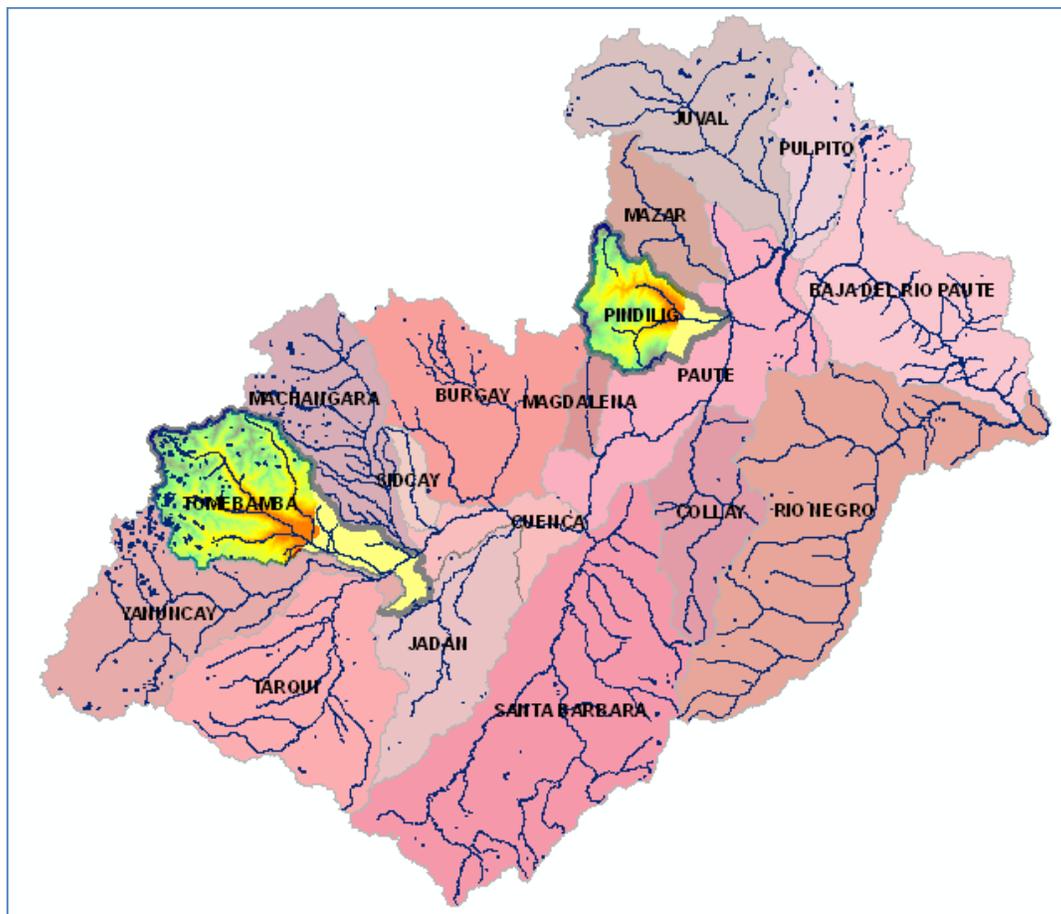
El objetivo del trabajo de fin de Máster es investigar y aplicar metodologías para el análisis de los sistemas de recursos hídricos, para lo cual se recurrirá a la modelación estocástica para la síntesis de aportaciones y los métodos de simulación de sistemas de recursos hídricos con escenarios estocásticos y con un enfoque de riesgo.

Los objetivos específicos del presente trabajo son:

- Realizar dos casos de aplicación en dos subcuencas representativas del río Paute (Figura 1.2).
- Analizar el comportamiento de los sistemas con distintos modelos estocásticos y hacer comparaciones de los resultados.
- Generar alternativas de planificación y gestión futura de los sistemas.
- Introducir el enfoque de riesgo en la simulación de la gestión futura.

Este trabajo explora profundamente las técnicas de análisis estadísticos más habituales en la bibliografía, además se puede encontrar comparaciones entre modelos que toman en cuenta la estacionalidad en el año hidrológico y otros modelos que no lo hacen. Entonces, el presente trabajo contiene una revisión exhaustiva del estado del arte en la materia del tratamiento estadístico de series hidrológicas, con el propósito de servir de base para el proyecto de tesis de doctorado, cuyo objetivo será generar aportaciones originales en esta materia.

Figura 1.2: Ubicación de la subcuencas Tomebamba y Pindilig



FUENTE: CG PAUTE

1.2. METODOLOGÍA

La metodología que se realizará en el presente trabajo comprende las siguientes actividades principales:

- i. Análisis de la situación actual. Cruce de oferta y demanda actual y determinar si cumple o no cumple las garantías de las demandas.
- ii. Realización de modelación estocástica para la generación de series sintéticas de aportaciones para los análisis futuros de planificación y gestión en los sistemas de recursos hídricos de las subcuencas de los ríos Tomebamba y Pindilig. Investigando el desenvolvimiento de los modelos ARMA periódicos (PARMA) y realizando comparaciones con los modelos ARMA comunes.
- iii. Análisis de la situación futura. Cruce de la oferta y demanda futura y determinar si cumple o no cumple las garantías de las demandas.
- iv. En el supuesto caso de incumplimiento, se planificaría alternativas de infraestructura con la finalidad de cubrir el déficit del recurso, como por ejemplo la construcción de uno o varios embalses (regulación del recurso), la implementación de sistemas de bombeo y otras alternativas factibles de ser el caso. Sin embargo, dada la topografía de las cuencas estudiadas y el no muy explotado campo del bombeo, se optará por la opción de los embalses (hay que hacer notar que no se tomará en cuenta análisis económicos-financieros para el presente estudio). Por lo tanto se determinaría el volumen máximo de embalses que cumpla el objetivo de regular el recurso para cumplir las garantías de las demandas futuras. Este cálculo se realizará mediante un análisis probabilístico.
- v. Examinar la factibilidad sobre la implementación de embalses con la capacidad máxima calculada y plantearse un análisis probabilístico de cumplimiento de garantías de las demandas con la implementación de un embalse de menor capacidad.

- vi. Dados los análisis anteriores, concluir con las recomendaciones de planificación y gestión de los sistemas hídricos en su estado actual y tomando en cuenta el riesgo de incumplir con las garantías de las demandas en el futuro.

Como ya se menciona en los objetivos, el segundo punto de la metodología es el comienzo del trabajo futuro de doctorado del autor, dado que se piensa seguir en la línea de investigación de modelación estocástica pero esta vez para predicción de caudales, explorando nuevos tipos de modelación que añada variables exógenas (lluvia, evapotranspiración, humedad del suelo, etc.) y el concepto de estacionalidad en las series temporales (por ejemplo modelos PARMAX, PTFN, SARIMA, etc.). Además añadiendo otra rama muy amplia como son las técnicas de optimización para operación de embalses para la generación de energía. El sistema hidroeléctrico que se pretende operar es el Paute Integral ubicado al final de la cuenca del río Paute (Figura 1.2), el mismo que produce el 50% de la producción hidroenergética del Ecuador, y debido a la importancia de este proyecto se pretende investigar, elegir e implementar un modelo de predicción y operación que mejor se ajuste a esta realidad, con la finalidad de optimizar la operación del sistema de embalses que maximice la generación de energía.

1.3. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

La memoria del trabajo de fin de Máster se ha estructurado en 7 capítulos, los mismos que se listan a continuación y se enmarcan en los análisis de los sistemas de recursos hídricos de las subcuencas.

- El primer capítulo comprende una introducción del estudio, describiendo las problemática, las necesidades, los objetivos y la metodología utilizada.
- El segundo capítulo describe la recolección de información que se realizó en las diferentes instituciones para cumplir las actividades propuestas.

- El tercer capítulo se ha destinado para determinar la calidad de la información hidrometeorológica recolectada, además un procesamiento inicial para generar las series de datos para la modelación estocástica.
- El cuarto capítulo expone la modelación estocástica para la síntesis de aportaciones que ingresarán al modelo de simulación del sistema.
- El quinto capítulo contiene la evaluación de la demanda de los sistemas de recursos hídricos estudiados.
- El sexto capítulo muestra la simulación de los sistemas de recursos hídricos de las subcuencas, generando alternativas de planificación y gestión.
- El séptimo capítulo se destina para las conclusiones sobre la metodología utilizada y conclusiones sobre los casos de aplicación. En este capítulo también se exponen las recomendaciones y las futuras líneas de investigación.

Todos los capítulos se han construido de tal manera de alcanzar los componentes propuestos y fundamentalmente cumplir el objetivo del trabajo de fin de Máster.

2. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Se ha intentado recopilar y analizar toda la información relevante disponible y de libre acceso de las subcuencas Tomebamba y Pindilig, como también de las zonas alrededor de estas. Entre los tipos de información recopilada se encuentran:

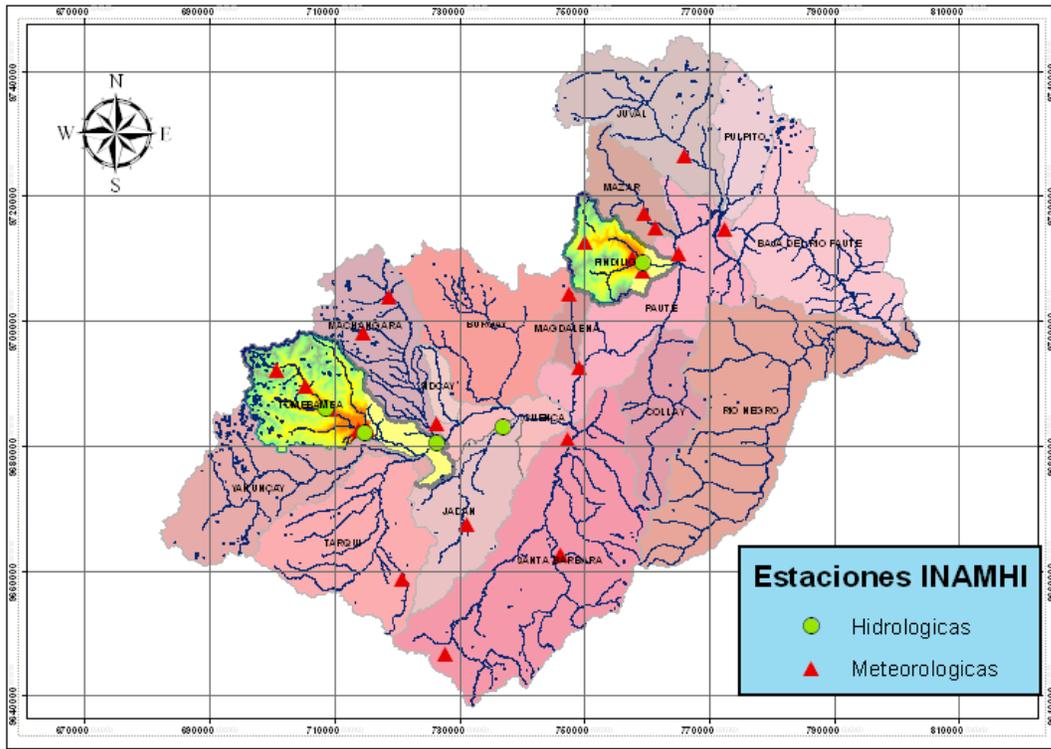
- (i) Información cartográfica digital de la cuenca del río Paute (Información del Consejo de Gestión de Aguas de la cuenca del Paute – CG PAUTE)
- (ii) Registros históricos hidrometeorológicos de las subcuencas Tomebamba, Pindilig y sus alrededores (Información que fue facilitada por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador - INAMHI).
- (iii) Informes de estudios hidrometeorológicos (Información del CG PAUTE y de la Empresa Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de la ciudad de Cuenca - ETAPA)
- (iv) Información de los inventarios de recursos hídricos (Información del CG PAUTE y el Municipio de la ciudad de Cuenca)
- (v) Información de las concesiones (permisos) de agua de los diferentes usos en las subcuencas de estudio. (Información facilitada por la Secretaría Nacional del Agua del Ecuador – SENAGUA).

Toda esta información ha sido analizada y procesada para su utilización en la modelación estocástica, en la simulación de la gestión y para todos los análisis que se han realizado en los sistemas hídricos. A continuación se describe la información disponible.

2.1. INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA

La información cartográfica de la cuenca del río Paute se utilizó para captar la información de cada una de las subcuencas de estudio, como sus límites, áreas, ríos, quebradas, lagunas, demandas, etc. Además sirvió para ubicar las estaciones hidrológicas y meteorológicas del INAMHI, las mismas que se muestran en la siguiente figura.

Figura 2.1: Ubicación de las estaciones hidrológicas y meteorológicas del INAMHI



FUENTE: CG PAUTE - INAMHI

La superficie total de la cuenca del río Paute es de 6442 Km², en donde la subcuenca del río Tomebamba tiene un área de 380 Km² y la subcuenca del río Pindilig tiene un área de 168 Km².

2.2. INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA

La información hidrometeorológica son registros diarios de precipitación recolectados del INAMHI, la misma que consta de 22 estaciones meteorológicas que se encuentran en las subcuencas de estudio, así como en sus alrededores. Además se ha recopilado información de 5 estaciones hidrológicas, las mismas que servirán para los diferentes análisis. Hay que hacer notar que la subcuenca del Tomebamba tiene 3 estaciones hidrológicas, donde solo una estación servirá para los análisis (Matadero en Sayausi), no obstante las otras estaciones sirvieron para corregir incongruencias en los registros de esta estación. También indicar que la información meteorológica sirvió para rellenar vacíos de información en las series de

tiempo de caudales de las estaciones hidrológicas, mediante un modelo lluvia-escorrentía (no se detallará el desarrollo de este procedimiento). Un resumen de las estaciones meteorológicas se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1: Resumen Estaciones Meteorológicas INAMHI

CODIGO	ESTACION	X_SAM56	Y_SAM56	ELEVACION	LATITUD	LONGITUD
M050	ARENALES-COLA DE SAN PABLO	772530	9714807	2200	-2.577811	-78.549225
M539	BUENOS AIRES - AZUAY	715283	9682763	2810	-2.868439	-79.063342
M414	CHANIN	747717	9704550	3270	-2.670950	-78.772075
M414V	CHANIN VIRTUAL	750084	9712831	3270	-2.596050	-78.750933
MA41	CHANLUD	718863	9703970	3336	-2.676639	-79.031467
M541	COCHAPAMBA-QUINGEO	731219	9667617	2760	-3.005122	-78.919792
M418	CUMBE	720977	9658861	2720	-3.084461	-79.011753
M669	GIMA	727753	9646695	2770	-3.194339	-78.950594
M139	GUALACEO	747310	9681074	2230	-2.883181	-78.775336
M671	HUANGRA	766001	9726700	2680	-2.470422	-78.608100
M222	INGAPATA	765196	9710874	2360	-2.613489	-78.615069
M141	EL LABRADO	714571	9698309	3335	-2.727886	-79.069972
M672	MANZANAHUAICO	759533	9717326	2650	-2.555261	-78.666075
M723	MANZANAPATA	759300	9708201	2740	-2.637753	-78.668019
M410	RIO MAZAR-RIVERA	761390	9715175	2450	-2.574536	-78.649350
M138	PAUTE	749260	9692625	2289	-2.778725	-78.758006
M583	PINDILIG	757700	9710200	2700	-2.619708	-78.682433
M417	PISCICOLA CHIRIMICHAY	705473	9689614	3270	-2.806639	-79.151658
M430	QUINOAS	700925	9692287	3200	-2.782531	-79.192592
M426	RICAURTE-CUENCA	726423	9683746	2545	-2.859378	-78.963183
M427	SAYAUSI (MATADERO DJ.)	713921	9682855	2780	-2.867628	-79.075589
M664	SIGSIG INECEL	746258	9662702	2440	-3.049286	-78.784464
M429	SURUCUCHO (LLULLUCHIS)	709379	9685883	2800	-2.840317	-79.116478

FUENTE: INAMHI

En la subcuenca del río Tomebamba se ha tomado en cuenta las estaciones meteorológicas El Labrado, Piscícola Chirimichay, Sayausi Matadero DJ, Surucucho Llulluchis, Quinoas y Buenos Aires, de las cuales las estaciones con el mayor número de registros (años) son El Labrado y Surucucho Llulluchis, estas estaciones tienen registros desde 1964 hasta el 2010. Por el contrario las estaciones con el menor número de registros son Quinoas y Buenos Aires.

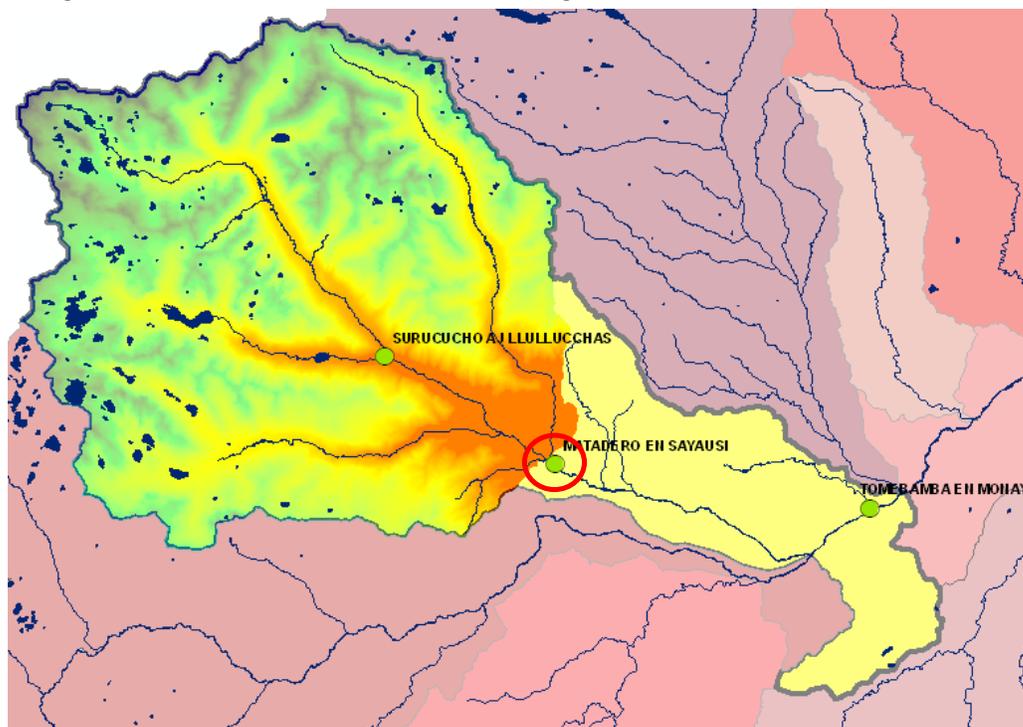
En la subcuenca del río Pindilig se ha tomado en cuenta las estaciones meteorológicas Arenales Cola de San Pablo, Ingapata, Río Mazar Rivera, Chanín, Pindilig, Huangra, Manzanapata y Manzanahuaico. La estación con el mayor número de años de registro es la

Río Mazar Rivera (47 años) y la estación con el menor número de registros es Manzanapata (5 años).

Con respecto a las estaciones hidrológicas que se utilizarán para los diferentes análisis, son registros diarios de caudales de estaciones que se encuentran ubicadas al final de áreas consideradas naturales, o sea zonas donde no existe un uso considerable del recurso, por lo tanto para la subcuenca del río Tomebamba se utilizará la estación Matadero en Sayausi (Figura 2.2) y para la subcuenca del río Pindilig se utilizará la estación Dudas en Pindilig (Figura 2.3).

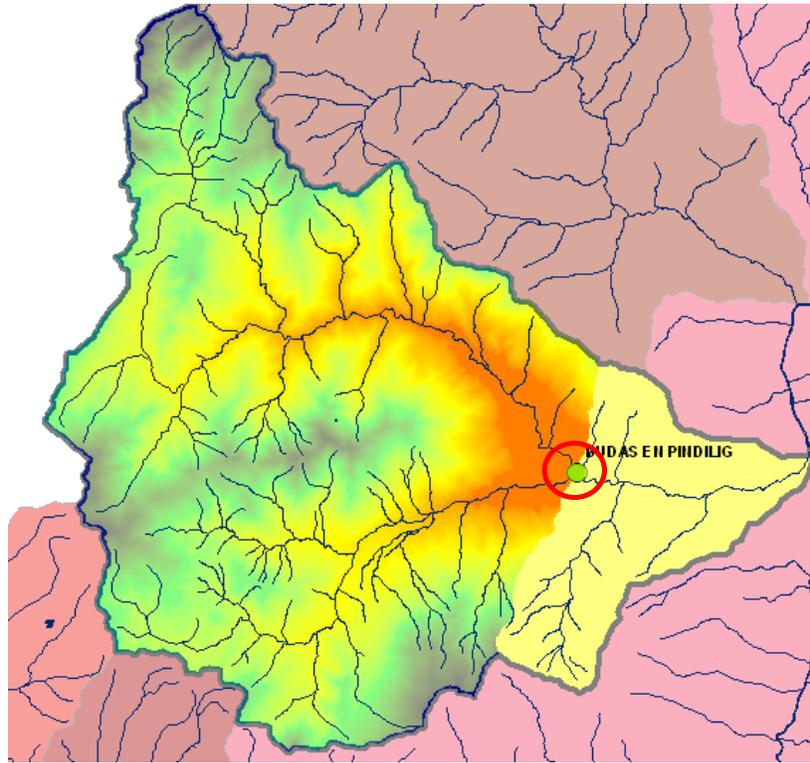
En general se puede indicar que tanto las estaciones hidrológicas y meteorológicas tienen registros diarios con varios vacíos en diferentes periodos, los mismos que son el resultado de un funcionamiento inadecuado de las estaciones porque han dejado de tomar datos por alzamiento de la estación, vandalismo, o daño de los sensores, sin embargo en algunos casos se ha puesto nuevamente en funcionamiento en tiempos posteriores.

Figura 2.2: Ubicación de estaciones hidrológicas de la subcuenca del río Tomebamba



FUENTE: CG PAUTE - INAMHI

Figura 2.3: Ubicación de estaciones hidrológicas de la subcuenca del río Pindilig



FUENTE: CG PAUTE - INAMHI

2.3. INFORMACIÓN DE LOS INVENTARIOS HÍDRICOS y CONCESIONES DE AGUA

La información del inventario hídrico realizado en la subcuenca Pindilig está disponible y completa, por otro lado la información del inventario realizado en la subcuenca del Tomebamba está incompleta, dado que faltan algunas zonas que no se ha levantado ninguna información. En general los inventarios hídricos se realizaron con una metodología común, realizando el levantamiento de información de fuentes hídricas, sistemas de agua potable y sistemas de riego, en donde los datos que se necesitan para el presente estudio están relacionados con las fuentes hídricas, específicamente se necesita información de caudales captados de la fuente hídrica, uso predestinado (agua consumo humano, riego, etc.), población servida, hectáreas bajo riego, etc.

Al no existir información completa en las zonas de estudio, se ha optado por utilizar la información de la SENAGUA, dado que la base de datos que la institución maneja contiene

todas las concesiones de agua (permisos) que se otorgan para los diferentes usos en la cuenca del Paute, donde están incluidas las subcuencas de estudio. En la base de datos incluye información de los permisos de uso del agua, uso específico del agua, el caudal concesionado, población servida, hectáreas bajo riego y otro tipo de información. Por lo tanto, para trabajar con una sola fuente de información se escogió la base de datos de SENAGUA para cuantificar la demanda.

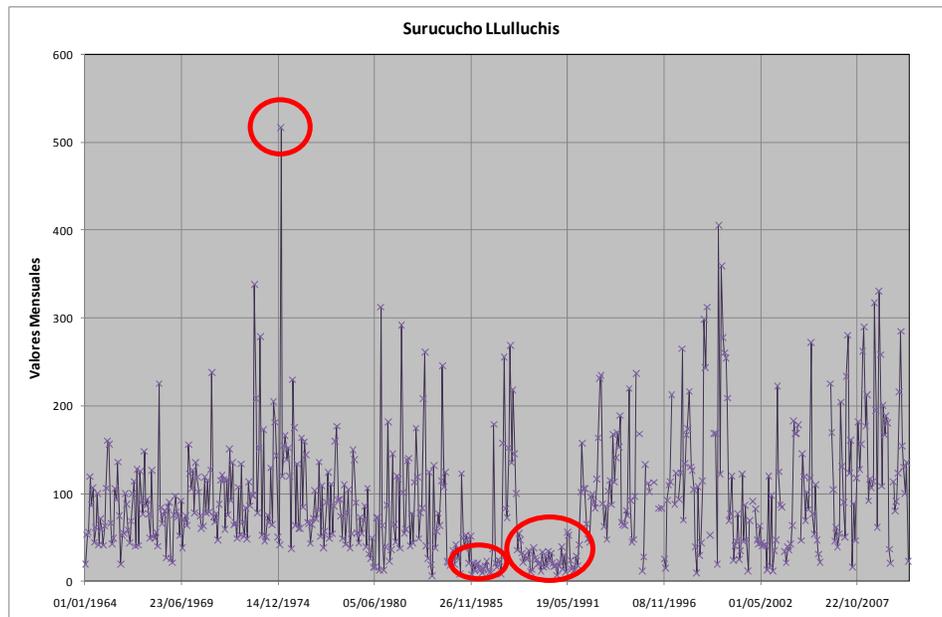
3. ANÁLISIS DE LA CALIDAD Y PROCESAMIENTO INICIAL DE LOS DATOS HIDROMETEOROLÓGICOS

Se ha realizado un análisis de la calidad de los datos hidrometeorológicos recopilados, de tal manera que la generación de información para ingresar a los modelos sea lo más coherente posible. Este proceso se llevo a cabo con la información del INAMHI, la misma que consistió en determinar datos erróneos que puedan afectar en la evaluación del recurso hídrico. Como resultado de este proceso se obtuvo las series de caudales para ser incorporadas en los modelos.

3.1. ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE LOS DATOS

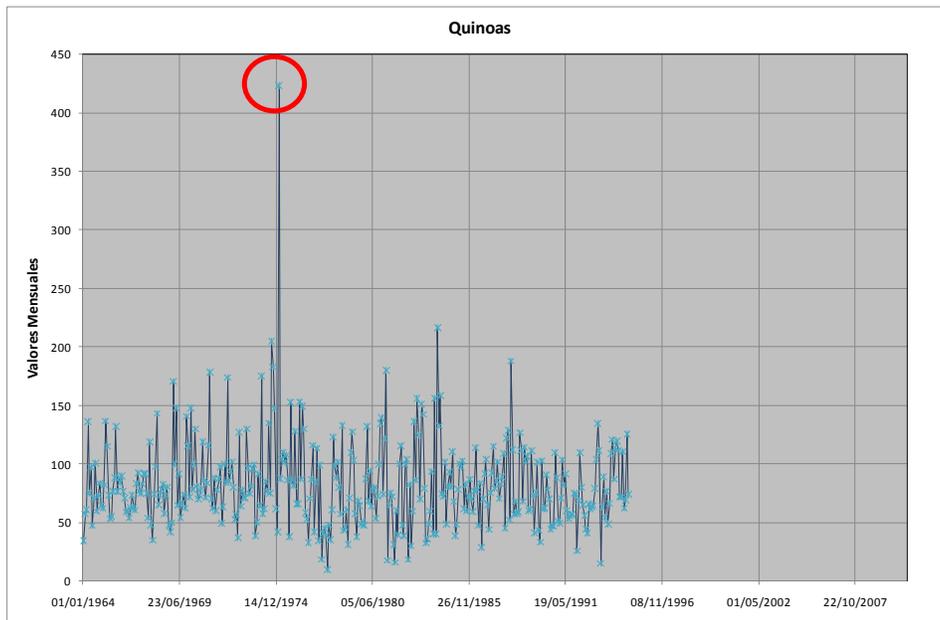
En la revisión de las series históricas se han encontrado valores que llaman la atención como picos que se alejan mucho de la media de la serie de datos, valores ceros, vacíos de información, etc. Unos ejemplos de estos valores se muestran en las siguientes figuras.

Figura 3.1: Serie histórica de la estación meteorológica Surucucho Llulluchis



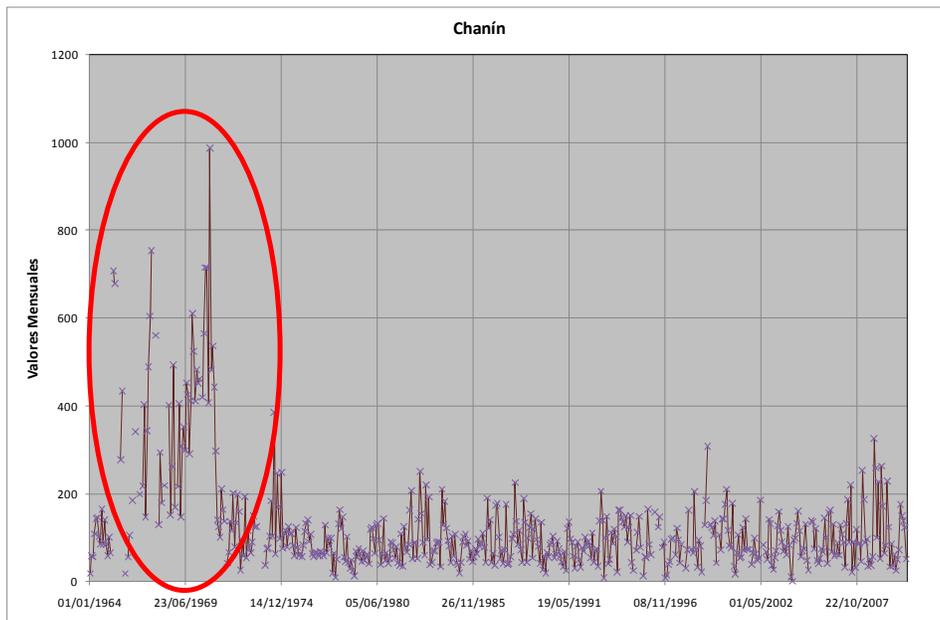
FUENTE: INAMHI

Figura 3.2 Serie histórica de la estación meteorológica Quinoas



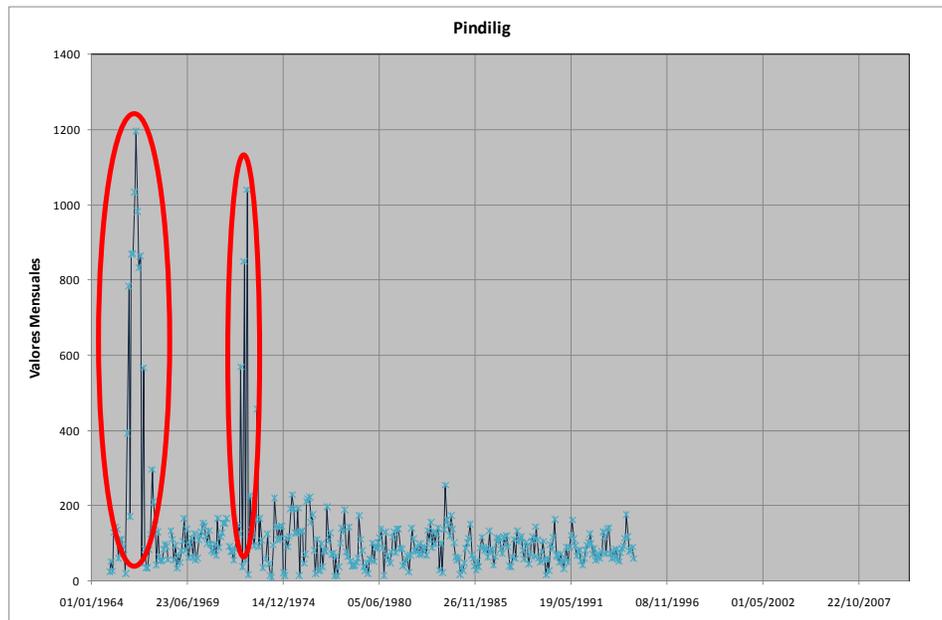
FUENTE: INAMHI

Figura 3.3: Serie histórica de la estación meteorológica Chanín



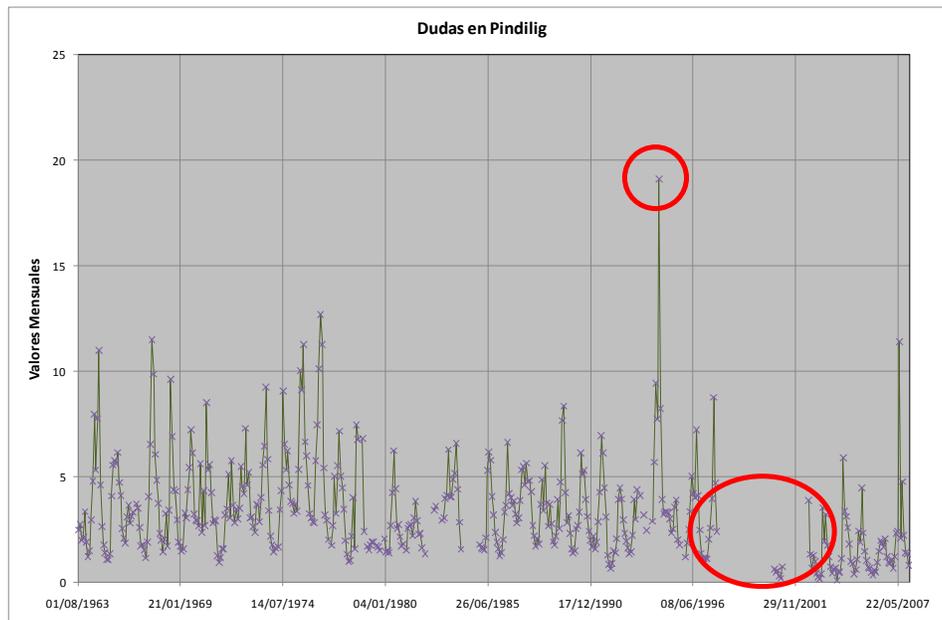
FUENTE: INAMHI

Figura 3.4: Serie histórica de la estación meteorológica Pindilig



FUENTE: INAMHI

Figura 3.5: Serie histórica de la estación hidrológica Dudas en Pindilig



FUENTE: INAMHI

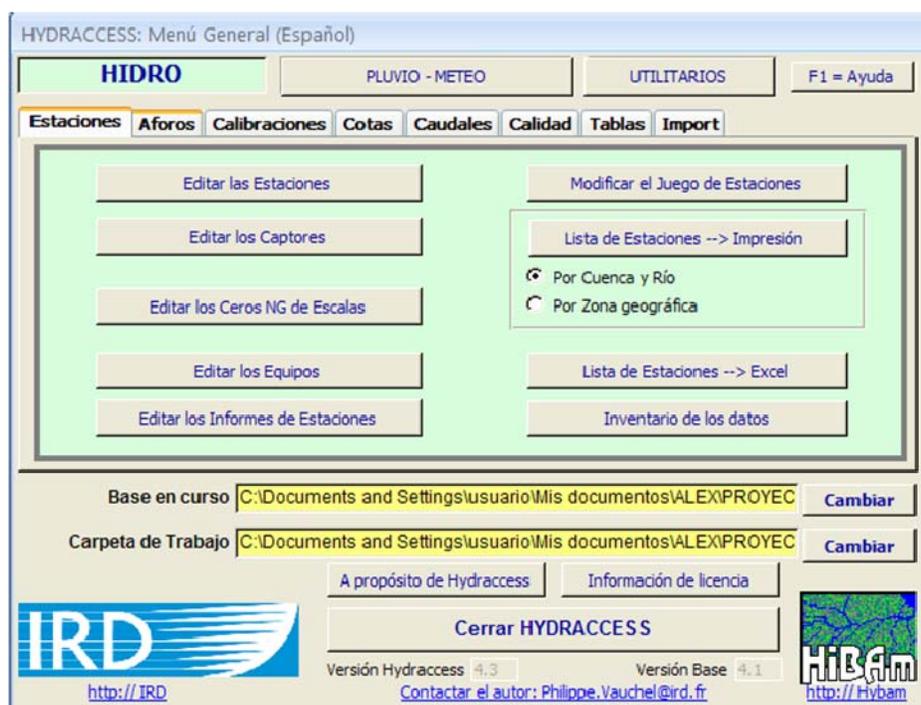
Estos ejemplos muestran información faltante e información que puede estar errada, y con la finalidad de asegurarnos que las muestras que ingresará en los modelos sea lo más fiable, se ha procedido en algunos casos rellenar la serie de caudales mediante un modelo lluvia-

escorrentía (no se detallara este proceso) y en otros casos se ha intentado rellenar los vacíos de información con las relaciones que existen entre estaciones cercanas.

3.2. PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

Toda la información validada se ha ingresado en un software hidrológico denominado HYDRACCESS, el mismo que es propiedad de la IRD². La pantalla del menú general se muestra en la figura 3.7

Figura 3.6: Pantalla de inicio del Software HYDRACCESS



Fuente: IRD

La información se ingresó al programa de acuerdo a un formato propio del mismo, los datos cronológicos fueron organizados por tablas y vinculados a cada una de las estaciones, para lo cual cada estación se codifico.

² IRD: Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo - <http://es.ird.fr/>

Una vez ingresados los datos se procedió a generar las series de información para el ingreso a los modelos, las cuales constan de la agregación mensual de caudales en las estaciones que se ubican en la salida de los sistemas hídricos estudiados.

4. MODELACIÓN ESTOCASTICA

Los modelos estocásticos han sido utilizados para diversos problemas y necesidades relacionados con la gestión y planificación de los recursos hídricos, como por ejemplo, la determinación de la dimensión de un embalse, construcción de reglas de gestión para la operación de un sistema de embalses, estrategias de gestión para la adecuada distribución del recurso hídrico para los diferentes usos, realización de balances hídricos (oferta vs demanda) en cuencas hidrológicas, y otras más.

Estos se fundamentan principalmente en el máximo aprovechamiento de la información de la serie histórica de una variable determinada (caudales, lluvias, etc.), es decir reproducir las estadísticas históricas de las series de tiempo. El concepto clave en este tipo de modelos es la dependencia entre los datos.

Algunas aplicaciones de los modelos estocásticos en los sistemas de recursos hídricos son el análisis de series de información, completado de series de tiempo, generación de series sintéticas y predicción de valores probables en una variable de salida (por ejemplo caudales) dados una información de entrada.

En la literatura existen varios modelos estocásticos que se han utilizado en hidrología, entre los principales tenemos, modelos autoregresivos (AR), modelos de media móvil (MA), modelos mixtos autoregresivos de media móvil (ARMA), modelos mixtos autoregresivos de media móvil con parámetros periódicos (PARMA), modelos mixtos autoregresivos integrados de media móvil (ARIMA), modelos autoregresivos de media móvil con variable exógena (ARMAX), modelos de desagregación temporal y modelos de desagregación espacial. Estos modelos pueden ser univariados (una sola serie temporal), multivariados (múltiples series temporales), estacionarios (propiedades estocásticas constantes en el tiempo) y no estacionarios (propiedades estocásticas variables en el tiempo).

La estructura general del modelo se muestra a continuación (Estrela, 1993):

$$Y_t = f(Y_{t-1}, Y_{t-2}, \dots, Y_{t-n}, X_t, X_{t-1}, \dots, X_{t-m}, \theta) + \epsilon_t$$

Donde

Y_{t-i} : vector formado por las variables de salida del sistema en el instante $t-i$, $i=0,..n$

X_{t-j} : vector formado por las variables de entrada del sistema en el instante $t-j$, $j=0,..m$

Θ : vector de parámetros del modelo

E_t : vector de residuos o errores del modelo en el instante t

El proceso de modelado se puede resumir en los tres pasos siguientes (Salas et al, 1980):

1. Identificación de la composición, forma y el tipo de modelo
2. Ajuste del modelo (estimación de parámetros)
3. Diagnóstico del modelo (comprobación de la bondad de ajuste del modelo).

En general la mayoría de técnicas estadísticas y la teoría de probabilidades aplicados en hidrología son desarrolladas asumiendo variables normalmente distribuidas, porque la mayoría de curvas de frecuencia de variables hidrológicas son asimétricamente distribuidas, por eso a menudo es necesario transformar estas variables a una distribución normal antes de iniciar la modelación (Salas et al, 1980).

Por otro lado se asume que la serie a modelar debe ser estacionaria, al menos en media y varianza (Estrela 1993), si esta hipótesis no es satisfecha inicialmente, se debería realizar la estacionarización (estandarización en media y varianza) de la serie de tiempo.

4.1 ANÁLISIS DE LOS DATOS

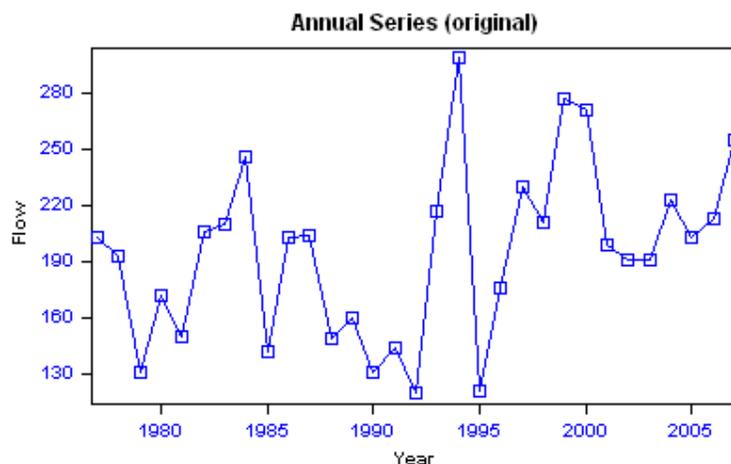
El análisis de la información es una actividad previa para la identificación y el ajuste de los modelos. Mediante este análisis se puede observar gráficamente el comportamiento de la serie de tiempo, las transformaciones iniciales a los datos, los principales estadísticos de la serie de tiempo y las correlaciones entre las distintas series o autocorrelaciones de la serie

misma. Esto servirá para deducir criterios para los pasos posteriores de los modelos. En esta actividad se utilizó como ayuda el software SAMS³.

4.1.1 Subcuenca del río Tomebamba

La serie de tiempo de aportaciones anuales de la estación limnimétrica Matadero en Sayausi (subcuenca del Tomebamba) se muestra en la figura 4.1.

Figura 4.1: Aportaciones anuales de la estación Matadero en Sayausi



Donde el flujo representa los hectómetros cúbicos por año. Las series de aportaciones medias mensuales se muestran en el APÉNDICE 1, de igual forma el flujo representa hectómetros cúbicos por mes.

4.1.1.1. Normalización

Se realizó la comprobación de normalidad de la serie anual y de las series mensuales originales, mediante el trazado de las mismas en papel de probabilidad normal, y también mediante la prueba de normalidad de sesgo⁴ y la prueba de normalidad de Filliben⁵. Los

³ SAMS: Stochastic Analysis Modeling and Simulation - <http://www.sams.colostate.edu/>

⁴ Salas et al (1980). Applied modeling of hydrologic time series, p 92-93

⁵ Filliben, J.J. (1975). The probability plot correlation coefficient test for normality. Technometrics. 17(1):pp. 111-117.

resultados muestran que la serie anual cumple las pruebas de normalidad, sin embargo algunos meses de la serie original no cumplen las pruebas de normalidad (Febrero, Mayo, Junio, Agosto, Noviembre y Diciembre) con un 10% de nivel de significancia igual ± 0.6527 para la prueba de normalidad de sesgo y $+0.9711$ para la prueba de normalidad de Filliben. Algunos resultados de este análisis se muestran en la figura 4.2 y la tabla 4.1.

La prueba de normalidad de sesgo es basada sobre el hecho de que el coeficiente de sesgo es cero para una variable normal y la prueba de normalidad de Filliben es la correlación que existe entre los cuantiles muestrales y los cuantiles que se esperaría de una distribución normal.

Figura 4.2: Grafico en papel normal de la serie anual de la estación Matadero en Sayausi.

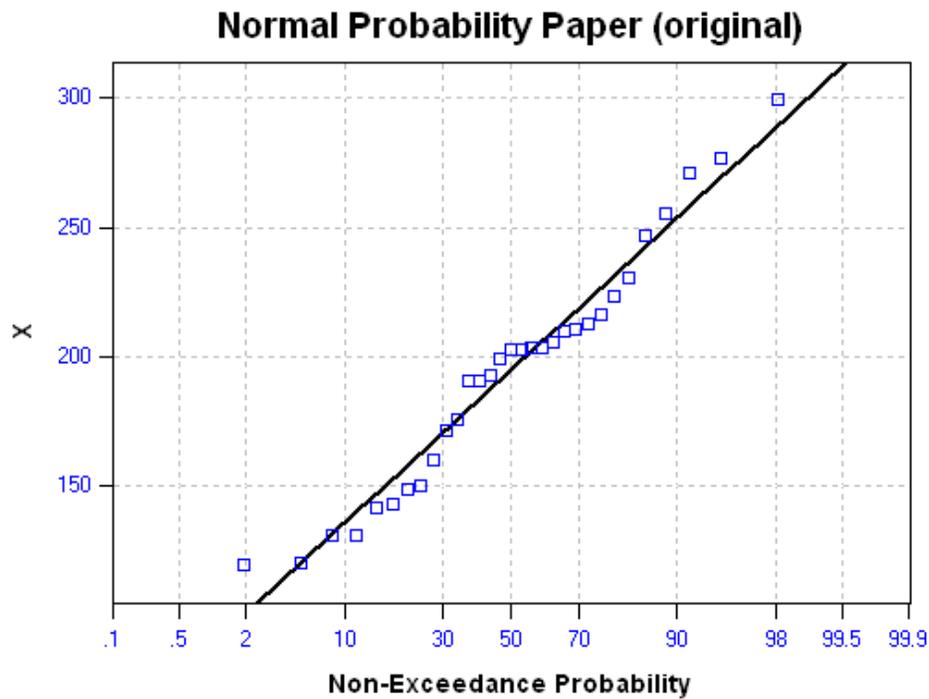


Tabla 4.1: Pruebas de normalidad de las series mensuales de la estación Matadero en Sayausi.

Mes	Prueba Normalidad de sesgo		Prueba de normalidad de Filliben	
	Valor	Resultado	Valor	Resultado
ENE	0.2296	aceptado	0.9845	aceptado
FEB	0.9517	rechazado	0.9605	rechazado
MAR	0.2694	aceptado	0.9777	aceptado
ABR	0.4144	aceptado	0.9899	aceptado
MAY	1.0418	rechazado	0.9423	rechazado
JUN	0.6917	rechazado	0.9775	aceptado
JUL	-0.0553	aceptado	0.9832	aceptado
AGO	0.7133	rechazado	0.9625	rechazado
SEP	0.3673	aceptado	0.9854	aceptado
OCT	0.1466	aceptado	0.9928	aceptado
NOV	0.7523	rechazado	0.9674	rechazado
DIC	0.6677	rechazado	0.9718	aceptado

Por lo tanto, al no cumplir todas las series mensuales la normalidad, se intento realizar una transformación logarítmica a las series mensuales originales, mediante la fórmula $Y = \ln(X+a)$, con valores del coeficiente [a] iguales a 0, 1 y 2.

Los resultados muestran que para $a=0$, la serie mensual de mayo cumple la normalidad, pero las otras series no cumplen. Para $a=1$, cumplen la normalidad las series mensuales de febrero, mayo, junio, noviembre y diciembre, sin embargo la serie del mes de agosto no cumple. Para $a=2$, cumplen la normalidad las series mensuales de febrero, mayo, junio, agosto, noviembre y diciembre. Hay que hacer notar que las series anuales cumplen las pruebas de normalidad en estos tres casos.

Entonces se estaría cumpliendo la normalidad de la serie de datos mensuales, si trabajamos con la serie original para los meses de enero, marzo, abril, julio, septiembre y octubre y con la serie transformada en los demás meses del año. Un resumen de este proceso se muestra en la tabla 4.2.

Tabla 4.2: Resumen de la normalización de las series mensuales de la estación Matadero en Sayausi con la función logarítmica.

Mes	Transformacion	Coeficiente [a]	Prueba Normalidad de sesgo		Prueba de normalidad de Filliben	
ENE	Ninguna		0.2296	aceptado	0.9845	aceptado
FEB	$Y = \ln(X+a)$	2	-0.4421	aceptado	0.9819	aceptado
MAR	Ninguna		0.2694	aceptado	0.9777	aceptado
ABR	Ninguna		0.4144	aceptado	0.9899	aceptado
MAY	$Y = \ln(X+a)$	2	0.1981	aceptado	0.9846	aceptado
JUN	$Y = \ln(X+a)$	2	-0.5178	aceptado	0.9813	aceptado
JUL	Ninguna		-0.0553	aceptado	0.9832	aceptado
AGO	$Y = \ln(X+a)$	2	-0.4917	aceptado	0.9726	aceptado
SEP	Ninguna		0.3673	aceptado	0.9854	aceptado
OCT	Ninguna		0.1466	aceptado	0.9928	aceptado
NOV	$Y = \ln(X+a)$	2	-0.3646	aceptado	0.9847	aceptado
DIC	$Y = \ln(X+a)$	2	-0.4582	aceptado	0.9808	aceptado

Ahora, con la finalidad de probar otro tipo de transformación se realizó el intento con la función potencia $Y=(X+a)^b$. También se comprobó la normalidad con un 10% de nivel de significancia igual ± 0.6527 para la prueba de normalidad de sesgo y $+0.9711$ para la prueba de normalidad de Filliben.

Los resultados presentados en la tabla 4.3, muestran que las series mensuales cumplieron la normalidad cuando $a=0$ y $b=0.5$. Hay que indicar que la serie anual también cumplió las pruebas de normalidad con esta transformación.

Tabla 4.3: Resumen de la normalización de las series mensuales de la estación Matadero en Sayausi con la función potencia

Mes	Transformación	Coficiente [a]	Coficiente [b]	Prueba Normalidad de sesgo		Prueba de normalidad de Filliben	
ENE	$Y = (X+a)^b$	0	0.5	-0.2810	aceptado	0.9811	aceptado
FEB	$Y = (X+a)^b$	0	0.5	0.0867	aceptado	0.9882	aceptado
MAR	$Y = (X+a)^b$	0	0.5	-0.4158	aceptado	0.9754	aceptado
ABR	$Y = (X+a)^b$	0	0.5	-0.1696	aceptado	0.9926	aceptado
MAY	$Y = (X+a)^b$	0	0.5	0.6184	aceptado	0.9713	aceptado
JUN	$Y = (X+a)^b$	0	0.5	0.0761	aceptado	0.9902	aceptado
JUL	$Y = (X+a)^b$	0	0.5	-0.5566	aceptado	0.9749	aceptado
AGO	$Y = (X+a)^b$	0	0.5	-0.0034	aceptado	0.9787	aceptado
SEP	$Y = (X+a)^b$	0	0.5	-0.2616	aceptado	0.9880	aceptado
OCT	$Y = (X+a)^b$	0	0.5	-0.4369	aceptado	0.9875	aceptado
NOV	$Y = (X+a)^b$	0	0.5	0.0410	aceptado	0.9907	aceptado
DIC	$Y = (X+a)^b$	0	0.5	-0.0415	aceptado	0.9890	aceptado

Finalmente se escogió la función potencia como función transformación de la serie histórica mensual con la finalidad de tener una sola función, así cuando se realice la desnormalización se lo haga también con una sola expresión con el objeto de uniformidad en los cálculos. Hay que hacer notar que se puede realizar diferentes transformaciones para cada mes, sin embargo esto hay que realizarlo con mucho tino, dado que podría aumentar el número de parámetros en el modelo. Por otro lado para la modelación de la serie anual no se realizó ningún tipo de transformación, dado que la serie histórica original cumple las pruebas de normalidad.

4.1.1.2. Estadísticas básicas de la series

Siguiendo con el análisis de los datos se calcularon las estadísticas básicas de las serie anual y mensual original $[Y=X]$ y de la serie mensual transformada $[Y = (X)^{0.5}]$. Estas se muestran en las tablas 4.4 y 4.5 y contienen la media, la desviación estándar, el coeficiente de variación, el sesgo, el valor mínimo, el valor máximo, la función de autocorrelación con retraso 1 [ACF (1)] y la función de autocorrelación con retraso 2 [ACF (2)].

Además en las figuras 4.3 a 4.6 se muestran las medias y sesgos mensuales de la serie original y transformada. Hay que notar que la serie media mensual (original y transformada) muestra que el mes de abril tiene una magnitud considerable de aportación, también hay que ver que los meses de menores aportaciones son enero, febrero, agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre.

Tabla 4.4: Estadísticas básicas serie anual y mensual original $[Y=X]$ - Matadero en Sayausi

Mes	Media	Desviación Estándar	Coefficiente Variación (CV)	Sesgo	Valor Min	Valor Max	ACF (1)	ACF (2)
ANUAL	194.7	45.74	0.2349	0.2459	119.4	299.6	0.2146	-0.0083
ENE	9.542	4.991	0.5231	0.2296	2.073	21.58	0.1126	-0.1636
FEB	14	8.729	0.6237	0.9517	0.8903	41.82	0.0228	-0.2175
MAR	20.68	9.746	0.4714	0.2694	3.361	40.82	-0.1288	-0.1016
ABR	26.02	9.498	0.365	0.4144	6.488	50.65	0.2158	-0.0898
MAY	23.1	10.3	0.446	1.0418	7.69	48.88	0.2234	0.0427
JUN	19.16	8.108	0.4231	0.6917	3.914	40.1	0.1589	0.0629
JUL	19.37	6.015	0.3105	-0.0553	6.265	34.71	0.2468	0.2443
AGO	12.91	6.204	0.4805	0.7133	2.092	31.69	-0.1782	-0.0629
SEP	10.11	5.054	0.4998	0.3673	0.8891	21.05	0.03	-0.2111
OCT	14.26	6.491	0.4552	0.1466	2.204	27.48	-0.0753	0.172
NOV	12.19	8.189	0.6717	0.7523	1.159	33.72	-0.0067	0.0547
DIC	13.33	7.948	0.5963	0.6677	1.953	36.75	0.0454	0.262

Tabla 4.5: Estadísticas básicas series mensuales transformadas $[Y = (X)^{0.5}]$ - Matadero en Sayausi

Mes	Media	Desviación Estándar	Coefficiente Variación (CV)	Sesgo	Valor Min	Valor Max	ACF (1)	ACF (2)
ENE	2.965	0.8671	0.2925	-0.281	1.44	4.646	0.1935	-0.1002
FEB	3.548	1.185	0.334	0.0867	0.9435	6.467	0.0529	-0.2357
MAR	4.399	1.153	0.2622	-0.4158	1.833	6.389	-0.1483	-0.085
ABR	5.011	0.9538	0.1903	-0.1696	2.547	7.117	0.1631	-0.0621
MAY	4.697	1.02	0.2172	0.6184	2.773	6.991	0.2589	0.0479
JUN	4.278	0.9288	0.2171	0.0761	1.978	6.333	0.1536	0.0694
JUL	4.342	0.7211	0.1661	-0.5566	2.503	5.892	0.2195	0.1806
AGO	3.484	0.8775	0.2518	-0.0034	1.446	5.629	-0.1581	-0.0196
SEP	3.067	0.8408	0.2742	-0.2616	0.9429	4.589	-0.0023	-0.1947
OCT	3.661	0.926	0.253	-0.4369	1.485	5.242	-0.1039	0.1662
NOV	3.273	1.216	0.3714	0.041	1.076	5.807	0.0566	0.1181
DIC	3.471	1.132	0.3261	-0.0415	1.397	6.062	0.0214	0.299

Figura 4.3: Media mensual de la serie original - Matadero en Sayausi

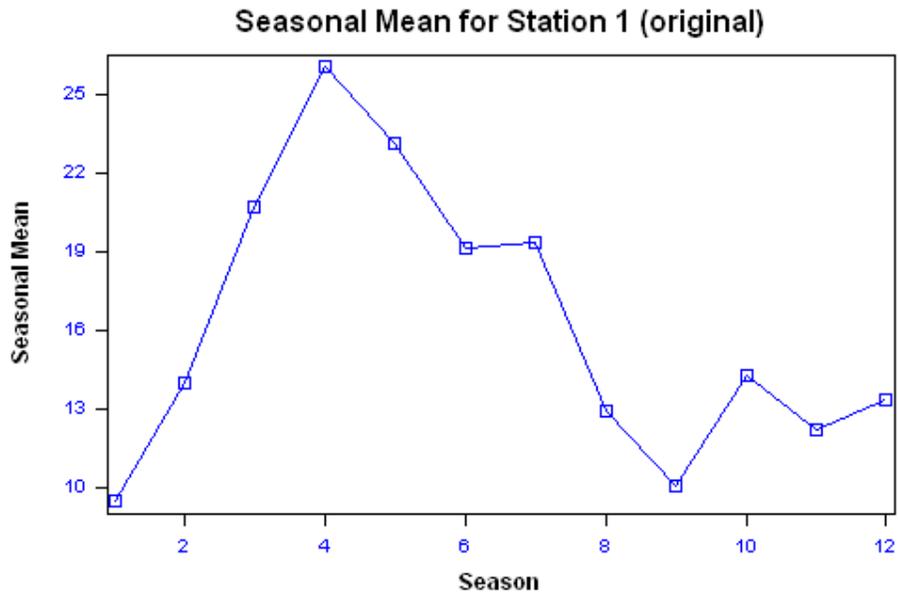


Figura 4.4: Media mensual de la serie transformada - Matadero en Sayausi

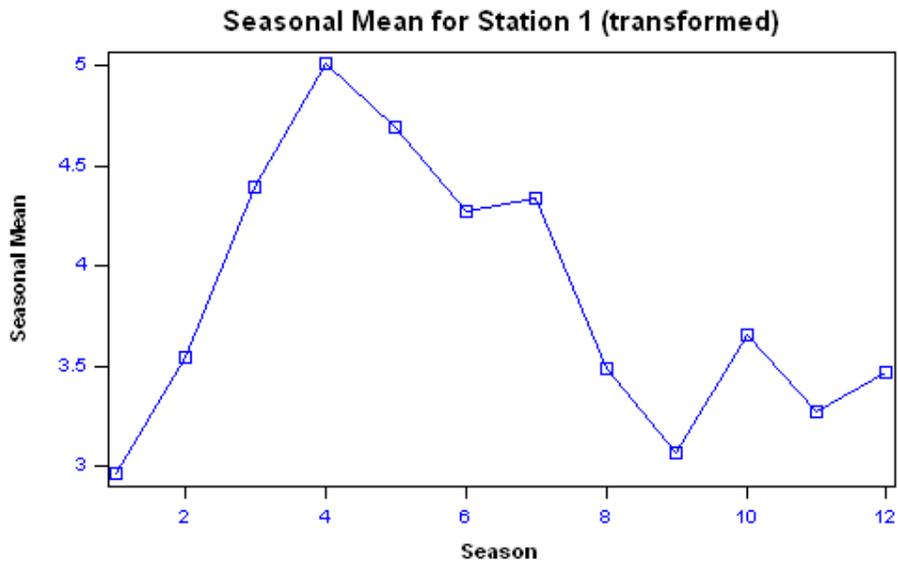


Figura 4.5: Sesgo mensual de la serie original - Matadero en Sayausi

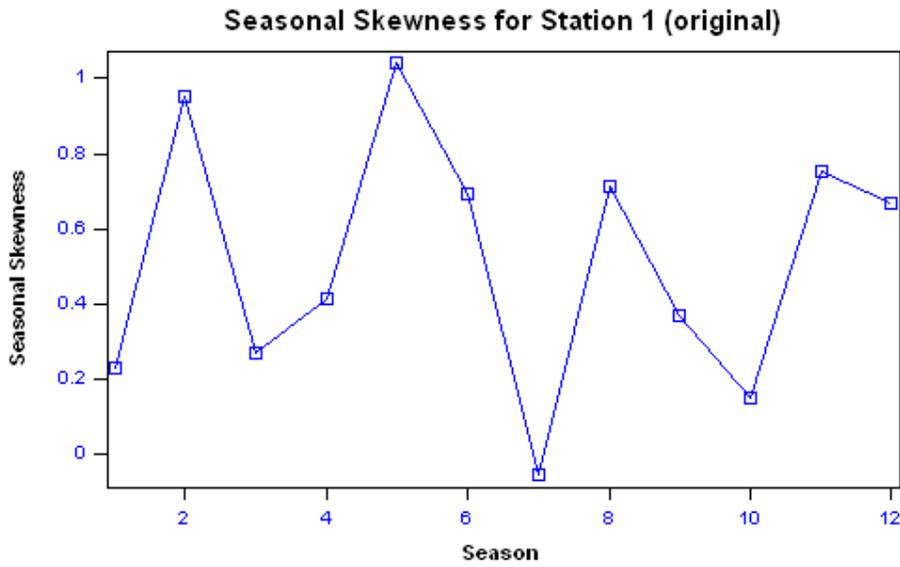
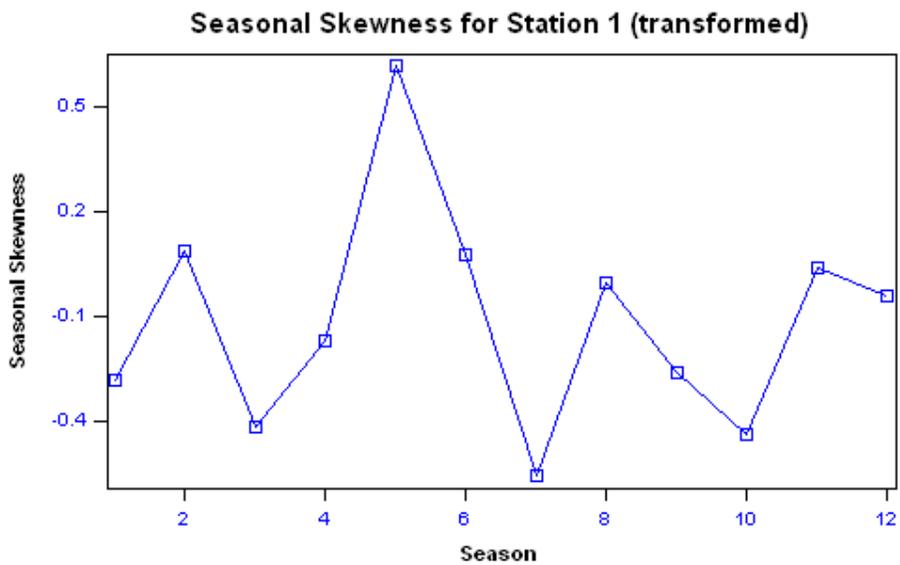


Figura 4.6: Sesgo mensual de la serie transformada - Matadero en Sayausi



4.1.1.3. Estadísticas de almacenamiento, sequía y superávit de la series

Se realizaron los cálculos de las estadísticas relacionadas con el almacenamiento, sequía y superávit, los mismos que se muestran en la tabla 4.6 y 4.7. Para el cálculo de los estadísticos se ha considerado ocho niveles de demanda, comenzando cuando el valor de demanda sea igual al valor medio de la serie de tiempo de aportaciones, luego tomando

como valor demanda igual al 90%, 80%, 70%, 60%, 50%, 40%, y 30% del valor medio de la serie de tiempo de aportaciones. Las tablas contiene la más larga duración de la sequía y superávit, además de la magnitud máxima de sequía y superávit, también contiene la capacidad de almacenamiento, el rango reajustado y el coeficiente de Hurst .

Tabla 4.6: Estadísticas relacionadas de almacenamiento, sequía y superávit para la serie de aportaciones anuales originales de la estación Matadero en Sayausi

Serie de Tiempo	Nivel de Demanda	Máxima duración déficit	Máxima magnitud déficit	Máxima duración superávit	Máxima magnitud superávit	Capacidad de Almacenamiento	Rango Reajustado	Coeficiente de Hurst
		AÑOS	HM3	AÑOS	HM3	HM3		
Matadero en Sayausi	1.00*mean	5	271.3768	5	214.761	363.1805	7.9409	0.756
Matadero en Sayausi	0.90*mean	5	174.0356	12	535.9557	174.0356	7.9409	0.756
Matadero en Sayausi	0.80*mean	3	73.7957	12	769.5746	76.6944	7.9409	0.756
Matadero en Sayausi	0.70*mean	1	16.9231	12	1003.1935	16.9231	7.9409	0.756
Matadero en Sayausi	0.60*mean	0	0	31	2414.0622	0	7.9409	0.756
Matadero en Sayausi	0.50*mean	0	0	31	3017.5777	0	7.9409	0.756
Matadero en Sayausi	0.40*mean	0	0	31	3621.0933	0	7.9409	0.756
Matadero en Sayausi	0.30*mean	0	0	31	4224.6088	0	7.9409	0.756

Tabla 4.7: Estadísticas relacionadas de almacenamiento, sequía y superávit para la serie de aportaciones mensuales originales de la estación Matadero en Sayausi

Serie de Tiempo	Nivel de Demanda	Máxima duración déficit	Máxima magnitud déficit	Máxima duración superávit	Máxima magnitud superávit	Capacidad de Almacenamiento	Rango Reajustado	Coeficiente de Hurst
		MESES	HM3	MESES	HM3	HM3		
Matadero en Sayausi	1.00*media	9	84.2986	10	111.1598	395.8377	42.5401	0.7177
Matadero en Sayausi	0.90*media	8	71.3198	10	122.5163	192.3921	42.5401	0.7177
Matadero en Sayausi	0.80*media	8	58.3409	11	138.3962	94.3605	42.5401	0.7177
Matadero en Sayausi	0.70*media	8	45.3621	11	152.9974	45.3621	42.5401	0.7177
Matadero en Sayausi	0.60*media	8	32.3833	24	282.5635	32.3833	42.5401	0.7177
Matadero en Sayausi	0.50*media	5	19.5825	30	321.4999	19.5825	42.5401	0.7177
Matadero en Sayausi	0.40*media	4	14.2830	30	361.9554	14.2830	42.5401	0.7177
Matadero en Sayausi	0.30*media	3	9.4160	38	482.8385	9.4160	42.5401	0.7177

A continuación se definirá los estadísticos relacionados con el almacenamiento (Sveinsson et al, 2007). Consideremos la serie de tiempo y_i , $i=1, \dots, N$ y la submuestra y_1, y_2, \dots, y_n con $n \leq N$. La parcial suma $[S_i]$ está dada por

$$S_i = S_{i-1} + (Y_i - \bar{Y}_n) \quad i= 1, \dots, n$$

Donde $S_0 = 0$ y \bar{Y}_n es la media de la muestra y_1, y_2, \dots, y_n . Entonces el rango ajustado R_n^* y el rango reajustado R_n^{**} son calculados por

$$Rn^* = \max (S_0, S_1, \dots, S_n) - \min (S_0, S_1, \dots, S_n)$$

$$Rn^{**} = \frac{Rn^*}{sn}$$

Donde sn es la desviación estándar de la muestra. De igual manera, el coeficiente de Hurst es calculado por

$$K = \frac{\ln(Rn^{**})}{\ln(\frac{n}{2})}, n > 2$$

Por último el cálculo de la capacidad de almacenamiento es calculado en base del nivel de demanda d y una nueva suma parcial $[S'_i]$ aplicada a la serie de tiempo $y_i, i=1, \dots, N$. Por lo tanto $[S'_i] = S'_{i-1} + d - y_i$ si es positivo y $[S'_i] = 0$ cuando es negativo, donde $S'_0 = 0$. Entonces la capacidad de almacenamiento es determinada por $S_c = \max (S'_1, \dots, S'_N)$.

4.1.1.4. Estandarización de la serie transformada

Se realizó la estandarización de las series anuales originales y de las series mensuales transformadas, mediante la sustracción de la media y la división de la desviación típica. La fórmula utilizada fue la siguiente (Estrela, 1993):

$$Z_t = Y_t - \mu / \sigma$$

En donde:

μ : es el estimador de la media de la serie transformada Y_t

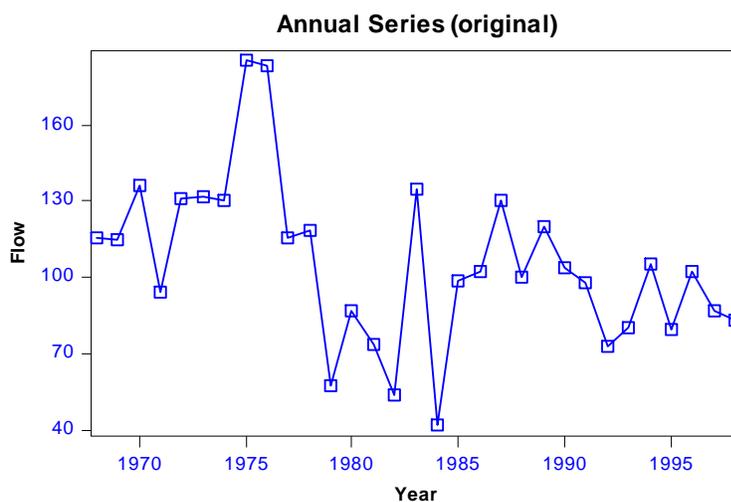
σ : es el estimador de la desviación típica de la serie transformada Y_t

Con ello se tendrá una serie Z_t normalizada y estandarizada de media cero y desviación típica la unidad. Hay que hacer notar que una vez que se ha realizado el ajuste del modelo, se deberá deshacer las operaciones efectuadas a la serie original, mediante las operaciones inversas.

4.1.2 Subcuenca del río Pindilig

La serie de tiempo de aportaciones históricas anuales de la estación limnimétrica Dudas en Pindilig (subcuenca del río Pindilig) se muestra en la figura 4.7.

Figura 4.7: Aportaciones medias anuales de la estación Dudas en Pindilig



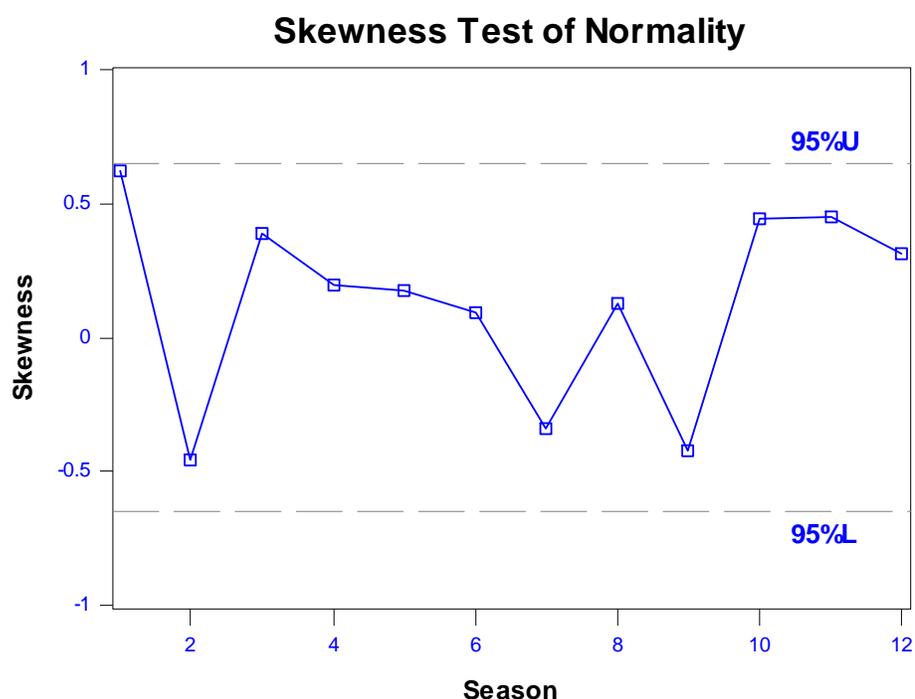
Podemos observar que existen años con una aportación abundante del orden de 185 Hm^3 en 1975-1976 y por el contrario existen años con aportaciones bajas como en 1984 (42 Hm^3). Las series de aportaciones medias mensuales se muestran en el APÉNDICE 2, donde el flujo se representa los hectómetros cúbicos por mes.

4.1.2.1. Normalización

El mejor ajuste de normalización para las series mensuales originales fue realizando mediante la transformación con la función potencia $Y = [X]^{1/2}$ con un 10% de nivel de significancia igual ± 0.6527 para la prueba de normalidad de sesgo y $+0.9711$ para la prueba de normalidad de Filliben. Sin embargo el mes de febrero no cumplió las pruebas de normalidad, por lo que se tanteó el mejor ajuste para este mes, resultando ser una transformación con la función logarítmica $Y = \ln [X-1]$. La serie anual original cumplió las pruebas de normalidad de sesgo y Filliben sin necesidad de ninguna transformación.

Hay que hacer notar que no se pudo realizar la transformación con una sola función dado que el mes de febrero no cumplió las pruebas de normalidad, por lo que se necesitó de otro tipo de transformación para poder cumplir este requisito previo para el ajuste del modelo estocástico. A continuación en la figura 4.8 se muestra un gráfico con la prueba de normalidad de sesgo de la serie transformada mensual de la estación Dudas en Pindilig.

Figura 4.8: Prueba de normalidad de sesgo de la serie transformada mensual de la estación Dudas en Pindilig.



4.1.2.2. Estadísticas básicas de la serie

Las tablas 4.8 y 4.9 muestran las estadísticas básicas de las series anual y mensual original $[Y=X]$ y de las series mensuales transformadas $[Y = (X)^{1/2}$; $Y = \ln (X-1)]$. En las dos últimas columnas de las tablas se exponen los valores de las funciones de autocorrelación con retraso 1 y retraso 2. Además las figuras 4.9 a 4.12 muestran las medias y sesgos mensuales de la serie original y transformada.

Tabla 4.8: Estadísticas básicas series anual y mensual original [Y=X] – Dudas en Pindilig

Mes	Media	Desviación Estándar	Coficiente Variación (CV)	Sesgo	Valor Min	Valor Max	ACF (1)	ACF (2)
ANUAL	105.5	31.77	0.3011	0.484	42.35	185.3	0.3514	0.4106
ENE	5.069	1.928	0.3803	1.0892	1.754	10.02	0.0811	-0.0374
FEB	5.074	2.744	0.5407	2.2604	2.248	16.29	-0.1546	0.0058
MAR	6.094	2.385	0.3913	0.6104	2.981	10.68	-0.173	0.024
ABR	7.943	3.121	0.393	0.5419	3.502	14.7	0.1533	-0.1162
MAY	9.245	4.003	0.433	0.6341	3.34	20	0.0164	-0.1459
JUN	12.45	5.508	0.4423	0.8425	2.921	26.23	0.1899	0.2242
JUL	15.09	6.994	0.4636	0.3899	2.828	33.96	0.3403	0.349
AGO	13.6	6.158	0.4528	0.9167	2.928	30.19	0.3856	0.3182
SEP	9.865	3.598	0.3648	-0.0255	3.046	17.3	0.2833	0.2335
OCT	9.022	4.015	0.445	0.8857	3.455	18.26	-0.0116	0.0512
NOV	6.52	2.425	0.3718	0.7653	3.31	11.95	0.2521	0.1988
DIC	5.559	1.759	0.3164	0.7317	2.282	10.26	0.286	0.038

Tabla 4.9: Estadísticas básicas series mensuales transformadas [$Y = (X)^{1/2}$; $Y = \ln (X-1)$] –

Dudas en Pindilig

Mes	Media	Desviación Estándar	Coficiente Variación (CV)	Sesgo	Valor Min	Valor Max	ACF (1)	ACF (2)
ENE	2.214	0.4087	0.1846	0.6222	1.325	3.166	0.0844	-0.0392
FEB	1.236	0.5596	0.4528	0.4295	0.2211	2.727	-0.1545	-0.0597
MAR	2.423	0.4724	0.195	0.3912	1.727	3.268	-0.1761	0.0033
ABR	2.764	0.5508	0.1993	0.1942	1.871	3.834	0.1421	-0.1001
MAY	2.969	0.6563	0.2211	0.1724	1.828	4.472	-0.004	-0.1158
JUN	3.442	0.7802	0.2267	0.0939	1.709	5.122	0.1557	0.2798
JUL	3.765	0.9553	0.2537	-0.3387	1.682	5.828	0.3067	0.3594
AGO	3.593	0.8317	0.2315	0.1295	1.711	5.494	0.3102	0.3191
SEP	3.082	0.6048	0.1962	-0.4214	1.745	4.16	0.2077	0.2117
OCT	2.933	0.6474	0.2207	0.441	1.859	4.274	-0.0012	0.1444
NOV	2.511	0.4615	0.1837	0.4481	1.819	3.457	0.2479	0.2502
DIC	2.329	0.3664	0.1573	0.3157	1.511	3.202	0.2768	0.0405

Figura 4.9: Media mensual de la serie original – Dudas en Pindilig

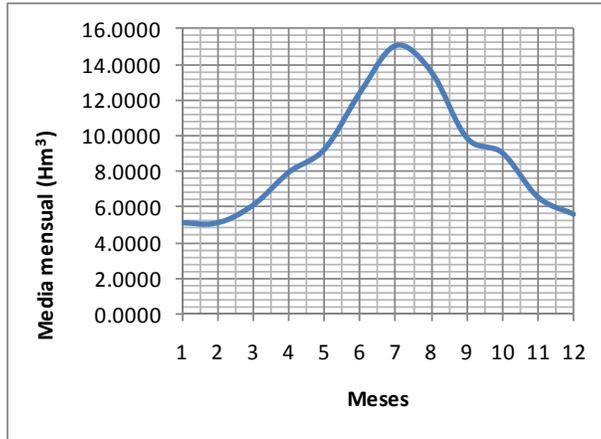


Figura 4.10: Media mensual de la serie transformada – Dudas en Pindilig

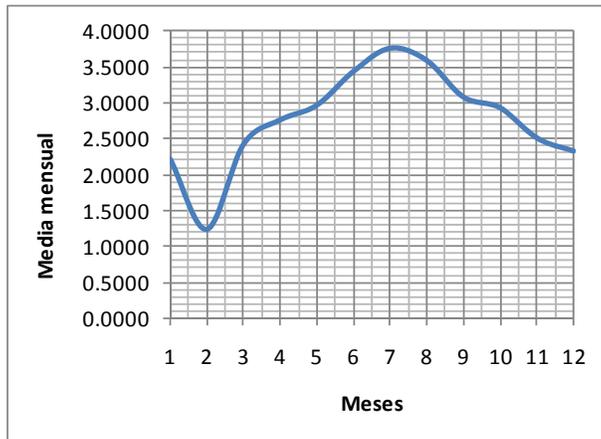


Figura 4.11: Sesgo mensual de la serie original – Dudas en Pindilig

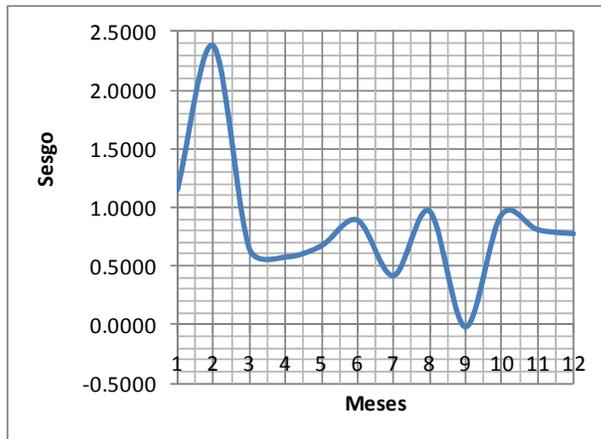
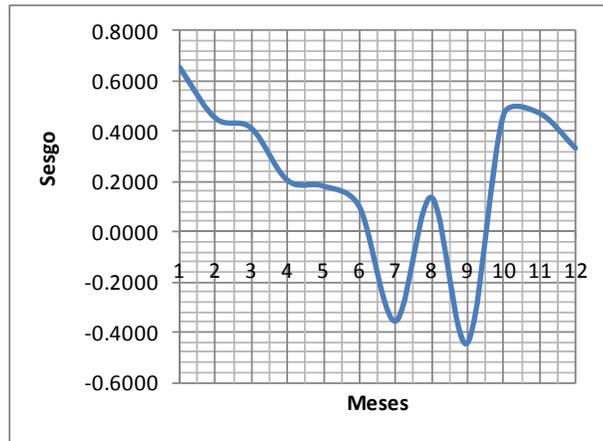


Figura 4.12: Sesgo mensual de la serie transformada – Dudas en Pindilig



Analizando las figuras podemos ver que la serie media mensual original es unimodal, con un solo pico en el mes de julio en donde los meses con menores aportaciones son enero, febrero, marzo, abril, noviembre y diciembre. Además la serie media transformada muestra un cambio notorio en el mes de febrero, debido al otro tipo de transformación que se realizó para este mes. Con respecto a los valores de sesgo, disminuyeron cuando se realizó las transformaciones, sin embargo todavía se puede observar en la serie transformada valores superiores de sesgo en los meses de menores aportaciones.

Finalmente las siguientes figuras muestran las funciones de autocorrelación de la serie mensual original y transformada. Se puede observar la clara variación estacional que tienen las dos series.

Figura 4.13: Función de autocorrelación (ACF) de toda la serie mensual original – Dudas en Pindilig

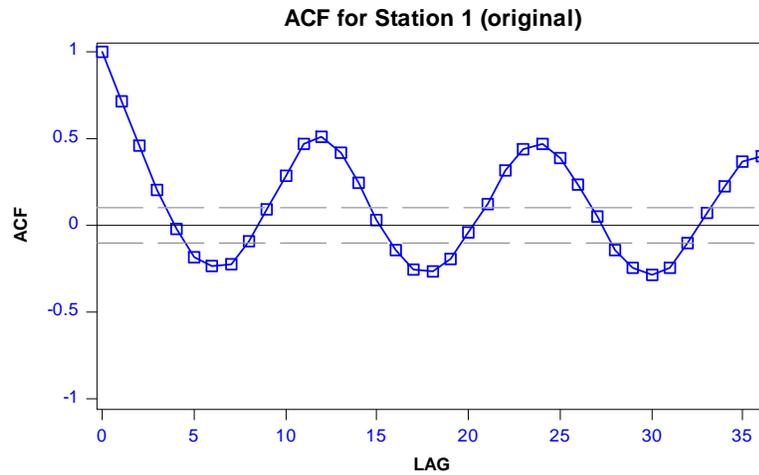
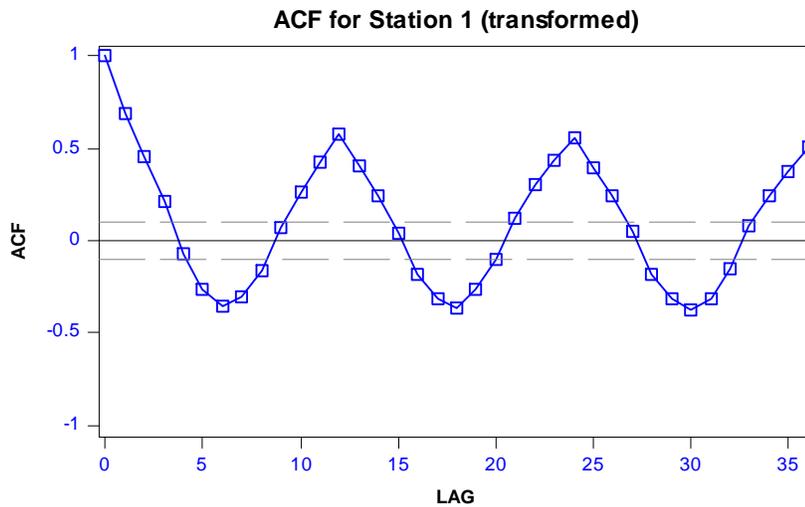


Figura 4.14: Función de autocorrelación de toda la serie mensual transformada – Dudas en Pindilig



4.1.2.3. Estadísticas de almacenamiento, sequía y superávit de la series

Los cálculos de las estadísticas relacionadas con el almacenamiento, sequía y superávit se realizaron para dos niveles de demanda, 100% y 26%. El segundo valor se tomo para el cálculo debido a que la demanda futura del sistema de la subcuenca Pindilig es aproximadamente igual al 26% de la media de aportaciones anuales y mensuales (ver

capítulo 5) y el valor de 100% nos para comparación entre estadísticos de la misma serie. Los resultados se muestran en las tablas 4.10 y 4.11.

Tabla 4.10: Estadísticas relacionadas de almacenamiento, sequía y superávit para la serie de aportaciones anuales originales de la estación Dudas en Pindilig

Serie de Tiempo	Nivel de Demanda	Máxima duración déficit	Máxima magnitud déficit	Máxima duración superávit	Máxima magnitud superávit	Capacidad de Almacenamiento	Rango Reajustado	Coeficiente de Hurst
		AÑOS	HM3	AÑOS	HM3			
Dudas en Pindilig	100%	9	149.8455	7	257.159	296.5124	9.3321	0.8149
Dudas en Pindilig	26%	0	0	31	2420.9667	0	9.3321	0.8149

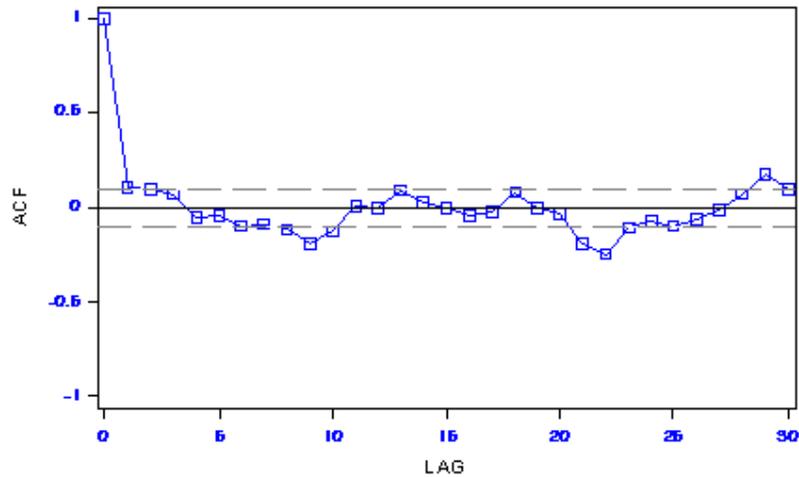
Tabla 4.11: Estadísticas relacionadas de almacenamiento, sequía y superávit para la serie de aportaciones mensuales originales de la estación Dudas en Pindilig

Serie de Tiempo	Nivel de Demanda	Máxima duración déficit	Máxima magnitud déficit	Máxima duración superávit	Máxima magnitud superávit	Capacidad de Almacenamiento	Rango Reajustado	Coeficiente de Hurst
		MESES	HM3	MESES	HM3			
Dudas en Pindilig	100%	25	85.5679	9	86.002	302.52	61.1495	0.7871
Dudas en Pindilig	26%	3	0.5759	287	2002.4803	0.5759	61.1495	0.7871

4.1.2.4. Estandarización de la serie transformada

Se realizó la estandarización de las series anuales originales y de las series mensuales transformadas, mediante la sustracción de la media y la división de la desviación típica. La función de autocorrelación para la serie mensual transformada y tipificada se muestra a continuación.

Figura 4.15: Función de autocorrelación de toda la serie mensual transformada y tipificada –
Dudas en Pindilig



4.2 MODELOS PARA SERIES DE TIEMPO

Los modelos que se describirán a continuación son procesos lineales donde la dependencia temporal es el concepto clave para su análisis.

Los modelos que se han aplicado para las series de tiempo de los casos de estudio son los autoregresivos de media móvil - ARMA [incluyendo los modelos autoregresivos (AR) y los modelos de media móvil (MA)] y los modelos autoregresivos de media móvil periódicos – PARMA [incluyendo los modelos autoregresivos periódicos (PAR) y los modelos de media móvil (PMA)]. Los mismos que se detallaran a continuación; hay que hacer notar que en algunas actividades de la modelación se utilizó como ayuda el software SAMS 2007 (Sveinsson et al, 2007).

4.2.1 Modelo autoregresivo de media móvil (ARMA)

Los modelos autoregresivos son como su nombre indica, regresiones de sí mismo. Un modelo autoregresivo del p ésimo orden $\{Y_t\}$ satisface la siguiente ecuación

$$Y_t = \phi_1 Y_{t-1} + \phi_2 Y_{t-2} + \dots + \phi_p Y_{t-p} + e_t$$

O sea el valor actual de la serie Y_t es una combinación lineal de los valores pasados más recientes (p) de la serie, más un término (e_t) que incorpora todo lo nuevo en la serie en el tiempo t que no se explica por los valores pasados.

Por otro lado el modelo de media móvil es una combinación lineal ponderada de términos presentes y pasados (q) del ruido blanco (e_t), por lo tanto satisface la siguiente ecuación

$$Y_t = e_t - \theta_1 e_{t-1} - \theta_2 e_{t-2} - \dots - \theta_q e_{t-q}$$

Entonces si asumimos que la serie es en parte autoregresiva y en parte media móvil, obtenemos un modelo de series de tiempo bastante general denominado ARMA, el mismo que satisface la siguiente ecuación

$$Y_t = \phi_1 Y_{t-1} + \phi_2 Y_{t-2} + \dots + \phi_p Y_{t-p} + e_t - \theta_1 e_{t-1} - \theta_2 e_{t-2} - \dots - \theta_q e_{t-q}$$

Las órdenes del modelo p y q son respectivamente las órdenes de la parte autoregresiva y media móvil y representan los retrasos en cada modelo. Por lo tanto la denominación para estos modelos es ARMA (p,q).

Un buen indicador de la orden del proceso ARMA, se lo realiza mediante las funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial de la serie de tiempo. Según la literatura revisada (Cryer y Chan, 2008) la función de autocorrelación se hace cero para intervalos más allá de q retrasos y la función de autocorrelación parcial se hace cero para intervalos más allá de p retrasos, por lo tanto para iniciar el ajuste del modelo se puede comenzar con las órdenes que nos indican estas funciones.

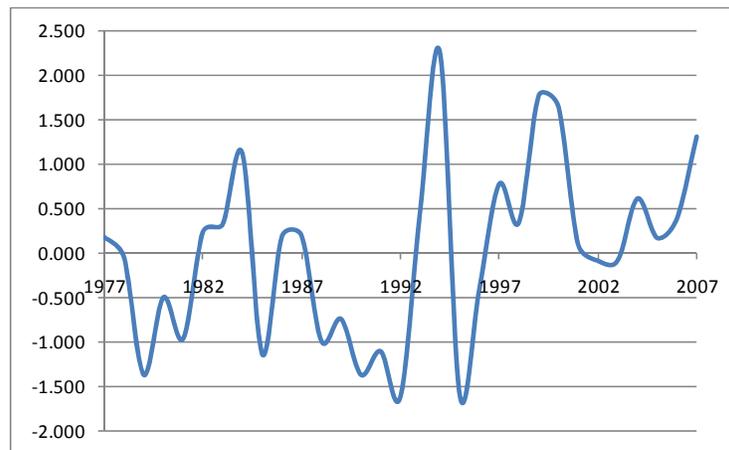
El ajuste del modelo no es más que la determinación de los parámetros del mismo, y como punto final de la modelación sería la comprobación de la bondad de ajuste. Hay que indicar que existirán muchos modelos ARMA que cumplirían las suposiciones iniciales, es decir, que el modelo es capaz de reproducir las propiedades estadísticas históricas de los datos y esencialmente las suposiciones claves de los residuos como la normalidad y la

independencia. Por lo tanto cuando existan múltiples modelos que hayan pasado las pruebas de las suposiciones iniciales, se puede aplicar otro enfoque muy utilizado como el criterio de información de Akaike corregido (Hurvich y Tsai, 1989)⁶, el mismo que es derivado del criterio de información de Akaike (Akaike, 1974)⁷. Los dos se basan en una penalización de los modelos con mayor número de parámetros.

4.2.1.1 Aplicación subcuenca del Tomebamba – Escala Anual

La serie histórica anual de aportaciones de la estación Matadero en Sayausi tiene 31 años de datos, la misma que cumple la condición de normalidad y la condición de estacionaridad se realizó mediante la estandarización, restando la media de la serie anual y dividiendo por la desviación estándar de la serie anual. Entonces la serie que se intentará ajustar a un modelo ARMA, es la que se muestra en la siguiente figura.

Figura 4.16: Serie anual normalizada y estandarizada - Estación Matadero en Sayausi

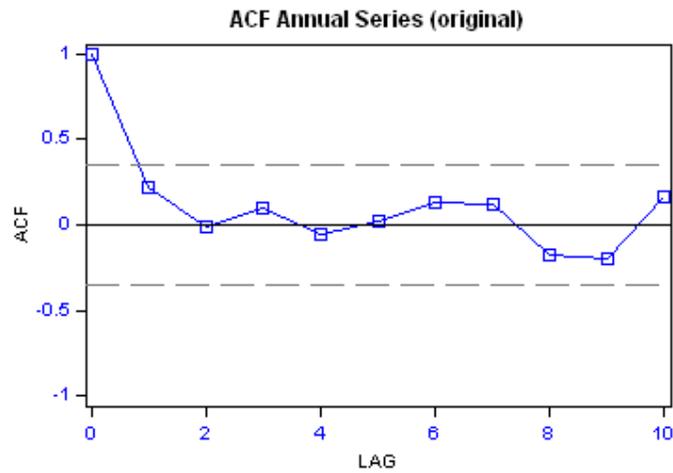


Como primer paso se intentará identificar las órdenes p y q del modelo ARMA, para lo cual se trazarán las funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial de la serie con distintos retrasos. Estas funciones se muestran en las figuras 4.17 y 4.18.

⁶ Hurvich, C.M. and Tsai, C.-L., 1989. Regression and time series model selection in small samples. *Biometrika*, 76(2):297–307.

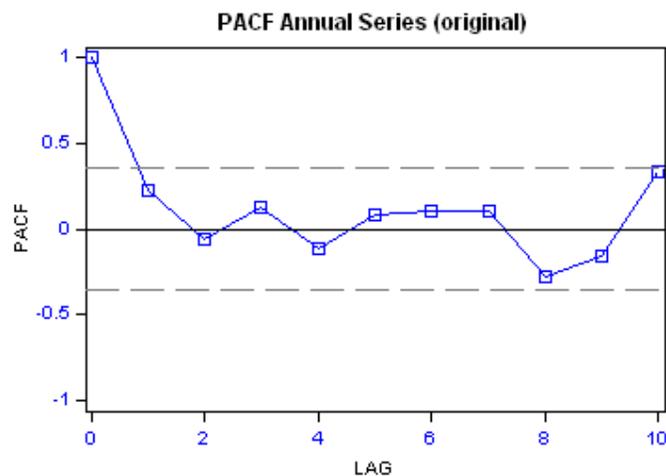
⁷ Akaike, H. 1974. "A new look at the statistical model identification", *IEEE Trans: on Automatic Control*, AS19, 6, 716-723

Figura 4.17: Función de autocorrelación para la serie normalizada y estandarizada de las aportaciones anuales de la estación Matadero en Sayausi



La figura muestra que todos los valores de la función de autocorrelación están dentro del intervalo de confianza del 95% [límites críticos igual a $\pm 2/\sqrt{N}$, N es el número de datos disponibles en la serie, (Salas et al,1980)]. Por lo tanto estamos hablando de una serie independiente.

Figura 4.18: Función de autocorrelación parcial para la serie normalizada y estandarizada de las aportaciones anuales de la estación Matadero en Sayausi



La figura muestra que todos los valores de la función de autocorrelación parcial están dentro del intervalo de confianza del 95%.

Por lo tanto al no tener un indicio de las órdenes del modelo ARMA, se probó varios modelos con diferentes órdenes y al final se escogió el mejor modelo mediante el criterio de información de Akaike corregido (Hurvich y Tsai, 1989), cuya formulación es la siguiente:

$$AICC = n \ln \hat{\sigma}^2(\varepsilon) + n + \frac{2(k+1)n}{n-k-2}$$

Dónde n es el tamaño de la muestra usada para el ajuste, k es el número de parámetros excluyendo términos constante ($k = p + q$ para el modelo ARMA (p, q)), y $\hat{\sigma}^2(\varepsilon)$ es la máxima estimación de probabilidad de la varianza residual. Se debe escoger el modelo con el menor valor de AICC

Los resultados se muestran en la tabla 4.12, en donde el modelo ARMA (1,1) fue el mejor según el criterio de información de Akaike corregido. Los modelos AR (autoregresivos) y MA (media móvil), no se probaron en este primer ensayo, los mismos que podrían ser mejores que el modelo ARMA elegido, sin embargo éstos se probarán para la escala mensual y para la modelación en la subcuenca del río Pindilig.

Tabla 4.12: Valores del criterio de información de Akaike corregido para varios modelos ARMA ajustados en la serie anual de aportaciones de la estación Matadero en Sayausi

Modelo	AICC
ARMA(1,1)	34.6880
ARMA(1,2)	38.0020
ARMA(1,3)	39.8790
ARMA(2,1)	37.8700
ARMA(2,3)	43.1820
ARMA(3,3)	46.7190

Los parámetros para el modelo elegido son $\phi = -0.2867$ y $\theta = -0.5507$, además la serie residual es normalmente distribuida y no correlacionada consigo misma.

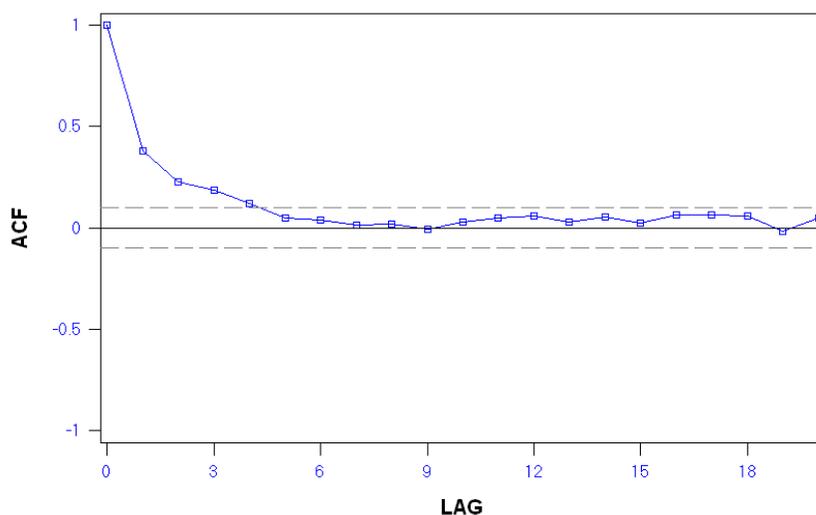
4.2.1.2 Aplicación subcuenca del Tomebamba – Escala Mensual

La serie histórica mensual de aportaciones de la estación Matadero en Sayausi tiene 372 registros (31 años), la misma que cumple la condición de normalidad bajo la transformación

$X=Y^{0.5}$ y la condición de estacionaridad mediante la estandarización. Esta serie normalizada y estandarizada se intentará ajustar un modelo ARMA, cuyo proceso se describe a continuación.

La función de autocorrelación para los datos normalizados y estandarizados de la serie de tiempo de aportaciones mensuales de la estación Matadero en Sayausi se muestra a continuación.

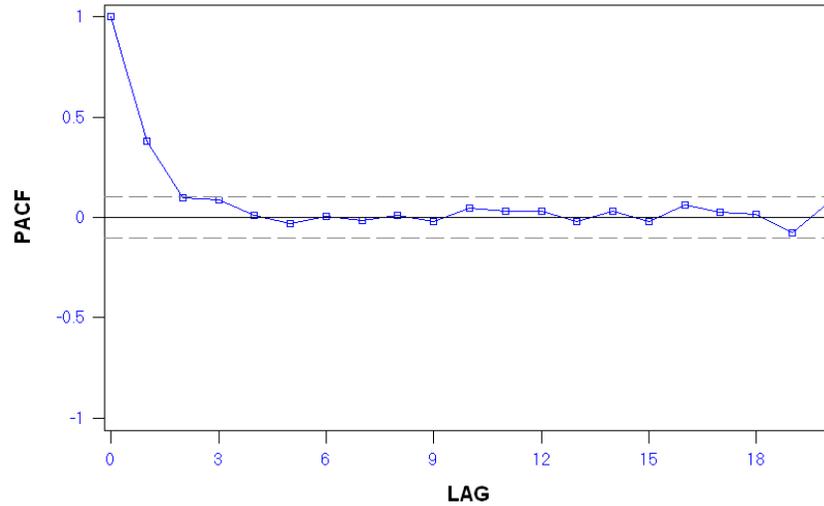
Figura 4.19: Función de autocorrelación para la serie normalizada y estandarizada de las aportaciones mensuales de la estación Matadero en Sayausi



La figura muestra que para un retraso igual a 4 la función de autocorrelación se acerca a cero [con un intervalo de confianza del 95% los límites críticos son aproximadamente $\pm 2/\sqrt{N}$, (Salas,1980)], por lo tanto una idea inicial para la orden del proceso de media móvil sería cuando $q=4$.

La función de autocorrelación parcial para los datos normalizados y estandarizados de la serie de tiempo de aportaciones mensuales de la estación Matadero en Sayausi se muestra a continuación.

Figura 4.20: Función de autocorrelación parcial para la serie normalizada y estandarizada de las aportaciones mensuales de la estación Matadero en Sayausi



Esta figura nos muestra que para un retraso igual 2 la función de autocorrelación parcial se acerca mucho a los límites de confianza ($\pm 2/\sqrt{N}$), sin embargo realizando los cálculos el valor de la función de autocorrelación con retraso 2 es menor que los límites de confianza, por lo que se asume inicialmente que la orden del modelo autoregresivo sea igual a $p=1$.

Entonces se intentará aplicar un modelo ARMA (1,4) para el ajuste del modelo, el cual debe cumplir la siguiente ecuación.

$$Y_t = \phi_1 Y_{t-1} + \epsilon_t - \theta_1 \epsilon_{t-1} - \theta_2 \epsilon_{t-2} - \theta_3 \epsilon_{t-3} - \theta_4 \epsilon_{t-4}$$

Donde los parámetros a estimar serían θ_1 , θ_2 , θ_3 , θ_4 y ϕ_1 , además hay que comprobar que el ruido sea normalmente distribuido, que tenga media cero y varianza 1.

El ajuste se realizó por la minimización de los errores cuadrados, cuyos resultados se muestran en la tabla 4.13

Tabla 4.13: Parámetros estimados para el modelo ARMA (1,4) ajustado a la estación Matadero en Sayausi

$\phi_1=$	0.3882
$\theta_1=$	0.0677
$\theta_2=$	-0.0069
$\theta_3=$	0.0317
$\theta_4=$	-0.0475

Además analizando los residuales se tiene que su media es cero y su varianza es 1, son normalmente distribuidos y la serie no está correlacionada consigo misma. Las figuras 4.21, 4.22 y 4.23, muestran la serie residual, el histograma residual y la función de autocorrelación residual.

Figura 4.21: Serie residual del modelo ARMA (1,4) ajustado - Matadero en Sayausi

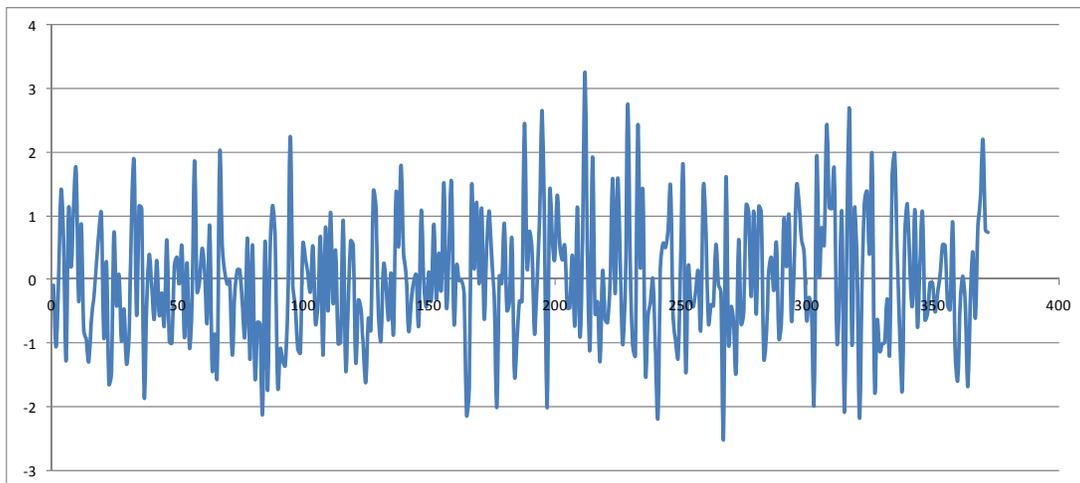


Figura 4.22: Histograma - Serie residual Modelo ARMA (1,4) ajustado - Matadero en Sayausi

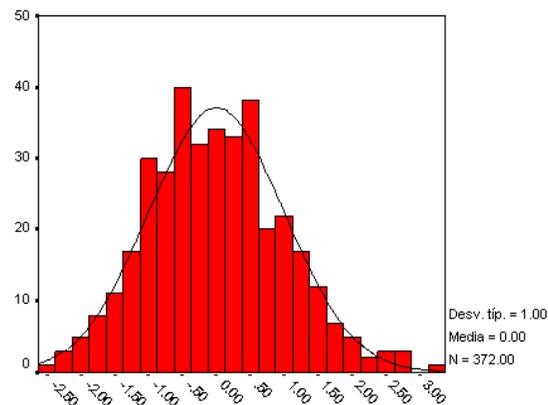
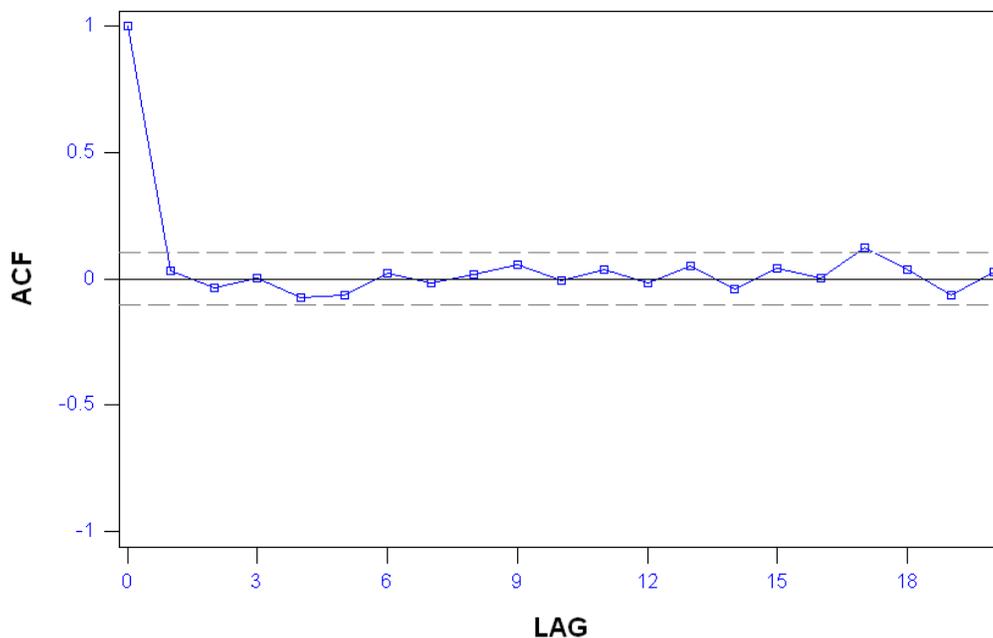


Figura 4.23: Función de autocorrelación de la serie residual del modelo ARMA (1,4) ajustado a la estación Matadero en Sayausi



El modelo expuesto cumple satisfactoriamente los supuestos iniciales, además haciendo una comparación entre los estadísticos básicos de la serie histórica y la serie ajustada, tienen bastante similitud como se ve en la tabla 4.14

Tabla 4.14: Comparación de estadísticos básicos de la serie histórica y la serie ajustada mediante el modelo ARMA (1,4) en la estación Matadero en Sayausi

ESTADÍSTICOS BÁSICOS	SERIE HISTORICA	SERIE AJUSTADA
PROMEDIO	16.2235	16.2891
DESV.STAN	9.3176	10.0090
VARIANZA	86.8171	100.1792
SESGO	0.8388	1.0890

Con la finalidad de realizar otros ajustes con otros modelos ARMA para poder realizar una comparación con el modelo recién expuesto, se ha intentado modelar la serie aportaciones

mensuales históricas de la estación Matadero en Sayausi con los modelos AR(1) y ARMA (1,1). El procedimiento y los resultados, se muestran a continuación.

El modelo AR(1) tiene la siguiente ecuación $Y_t = \phi_1 Y_{t-1} + \epsilon_t$, en donde el parámetro a estimar es ϕ_1 , al final del ajuste se debe comprobar que la serie residual sea independiente y normalmente distribuida, con media cero y varianza 1. Por lo tanto al realizar el ajuste (minimización del error cuadrático) salió como resultado un $\phi_1 = 0.3869$, además la serie residual cumplió las hipótesis iniciales. La comparación entre estadísticos básicos entre la serie histórica y serie ajustada se muestra a continuación.

Tabla 4.15: Comparación de estadísticos básicos de la serie histórica y la serie ajustada mediante el modelo AR (1) en la estación Matadero en Sayausi

ESTADÍSTICOS BÁSICOS	SERIE HISTORICA	SERIE AJUSTADA
PROMEDIO	16.2235	16.3639
DESV.STAN	9.3176	10.0553
VARIANZA	86.8171	101.1092
SESGO	0.8388	1.0752

Por otro parte el modelo ARMA (1,1) debe cumplir la ecuación $Y_t = \phi_1 Y_{t-1} + \epsilon_t - \theta_1 \epsilon_{t-1}$, donde los parámetros a estimar son ϕ_1 y θ_1 , además se deben comprobar que el ruido sea normalmente distribuido de media cero y varianza 1 y la serie residual no sea autocorrelacionada consigo misma. Realizado el ajuste (por mínimos cuadrados) se obtuvo que el parámetro $\phi_1 = 0.3912$ y el parámetro $\theta_1 = 0.0668$. Analizando la serie residual resultó normalmente distribuida con media cero y varianza 1, además no está correlacionada consigo misma. Comparando los estadísticos básicos, no existe una diferencia significativa, al menos en media y desviación estándar, los mismo que se muestran en la tabla 4.16

Tabla 4.16: Comparación de estadísticos básicos de la serie histórica y la serie ajustada mediante el modelo ARMA (1,1) en la estación Matadero en Sayausi

ESTADÍSTICOS BÁSICOS	SERIE HISTORICA	SERIE AJUSTADA
PROMEDIO	16.2235	16.3724
DESV.STAN	9.3176	10.0844
VARIANZA	86.8171	101.6959
SESGO	0.8388	1.0788

Dado que los tres modelos cumplen las pruebas de bondad de ajuste, se realizará la comparación del modelo ARMA (1,4) y los modelos AR(1) y ARMA (1,1), mediante el criterio de información de Akaike corregido – AICC (Hurvich y Tsai, 1989), resultando que el mejor modelo es el AR (1) con un valor de AICC igual a 376.0325, mientras que los valores del AICC calculados para los modelos ARMA (1,1) y ARMA (1,4) fueron iguales a 378.0652 y 384.2301, respectivamente.

Hay que resaltar que las funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial dan una idea de las posibles órdenes para el ajuste de los modelos pero no son definitivos, dado que puede existir modelos con menor número de parámetros que sean mejores para la modelación, como el caso expuesto del modelo ARMA (1,4) propuesto inicialmente versus los modelos AR(1) y ARMA (1,1) analizados.

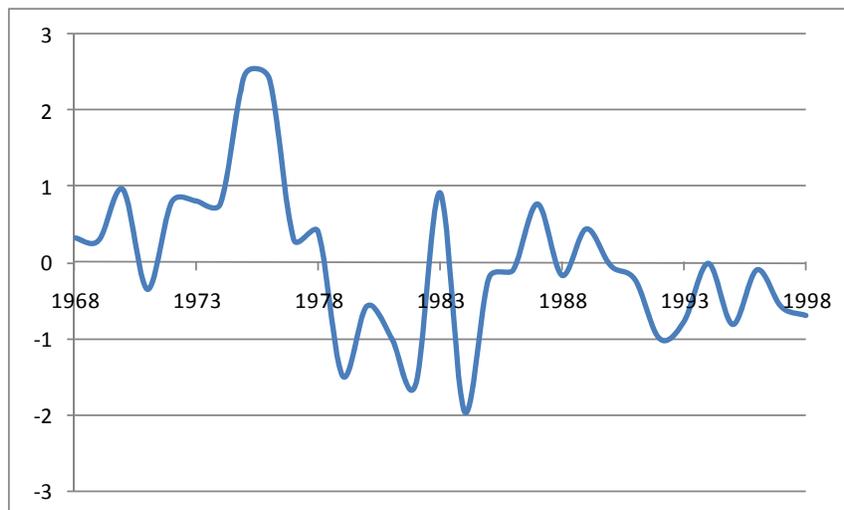
A pesar de que los modelos AR(1) y ARMA (1,1) reproducen de una manera aceptable las propiedades estadísticas históricas de los datos, algunos autores recomiendan realizar una modelización con parámetros periódicos cuando la serie histórica es mensual (Salas, et al, 1980) y los estadísticos básicos (media, desviación típica y autocorrelación) presentan significantes variaciones estacionales.

Por lo tanto con la finalidad de investigar y experimentar con este otro tipo de modelos, se realizará el análisis con la misma serie mensual histórica de aportaciones en la subcuenca del Tomebamba. En el apartado 4.2.2 se describirá el modelo autoregresivo de media móvil periódico, denominado PARMA.

4.2.1.3 Aplicación subcuenca del río Pindilig – Escala Anual

La serie histórica anual estandarizada de la estación Dudas en Pindilig se muestra en la figura 4.22. La serie tiene 31 años y se intentará ajustar a los siguientes modelos: ARMA (1,1), AR (1), AR (2), AR (3), MA (1), MA (2) y MA (3), al final se escogerá el modelo con el menor valor del criterio de información de Akaike corregido (Hurvich y Tsai, 1989). Hay que recordar que la serie original anual pasó las pruebas de normalidad sin necesidad de ningún tipo de transformación.

Figura 4.24: Serie anual estandarizada - Estación Dudas en Pindilig



La estimación de parámetros autoregresivos (ϕ) y parámetros de media móvil (θ) de los modelos se realizó mediante el método de mínimos cuadrados y sus resultados se muestran en la tabla 4.17, en donde el modelo MA (3) fue el mejor según el criterio de información de Akaike corregido.

Tabla 4.17: Estimación de parámetros y valores del criterio de información de Akaike corregido para varios modelos ARMA, AR y MA ajustados a la serie anual de aportaciones de la estación Dudas en Pindilig

Modelo	AICC	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	θ_1	θ_2	θ_3
ARMA(1,1)	33.0040	0.2775			-0.0305		
AR (1)	30.2540	0.3571					
AR (2)	29.0110	0.2408	0.3385				
AR (3)	31.5780	0.2587	0.3506	-0.0530			
MA(1)	32.1820				-0.2742		
MA(2)	29.3450				-0.2379	-0.4724	
MA(3)	27.1020				-0.2252	-0.5891	-0.3395

Además se comprobó que la serie residual sea normalmente distribuida y no correlacionada consigo misma.

4.2.1.4 Aplicación subcuena del río Pindilig – Escala Mensual

Se trabajo con la serie mensual normalizada y estandarizada de la estación Dudas en Pindilig, la misma que tiene 372 registros (31 años). La estandarización se realizó restando la media de la muestra y dividiendo por la división estándar de la muestra.

Los siguientes modelos fueron probados para el ajuste de la serie mensual de la estación Dudas en Pindilig: ARMA (1,1), AR (1), AR (2), AR (3), MA (1), MA (2) y MA (3), al final se escogió el mejor modelo según el criterio de información de Akaike corregido.

En la siguiente tabla se muestra la estimación de parámetros autoregresivos y de media móvil, también los valores del criterio de información de Akaike corregido.

Tabla 4.18: Estimación de parámetros y valores del criterio de información de Akaike corregido para varios modelos ARMA, AR y MA ajustados a la serie mensual de aportaciones de la estación Dudas en Pindilig

Modelo	AICC	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	θ_1	θ_2	θ_3
ARMA(1,1)	362.8790	0.7693			0.6648		
AR (1)	359.1840	0.1115					
AR (2)	358.0750	0.1012	0.0918				
AR (3)	359.2550	0.0968	0.0870	0.0483			
MA(1)	359.9300				-0.1028		
MA(2)	358.6380				-0.0962	-0.1019	
MA(3)	357.9810				-0.0988	-0.1033	-0.0811

Como se puede observar el modelo de media móvil MA (3) fue escogido con mejor modelo. Además se comprobó las hipótesis iniciales de la serie residual, resultando ser apropiadas.

A pesar de tener un buen ajuste con el modelo MA (3), se intentará modelar con modelos autoregresivos de media móvil periódicos - PARMA (incluidos los autoregresivos periódicos - PAR y los de media móvil periódicos - PMA), dado que la función de autocorrelación de la serie mensual normalizada y estandarizada de la estación Dudas en Pindilig todavía tiene una variación estacional según se puede observar en la figura 4.15.

4.2.2 Modelo autoregresivo de media móvil periódico (PARMA)

Para las series hidrológicas estacionales, las estadísticas estacionales como la media y la desviación estándar pueden ser reproducidas por un modelo ARMA periódico (PARMA). El enfoque de este método es la dependencia temporal estación-estación, por ejemplo las correlaciones de las temporadas de invierno, verano, etc. Un modelo PARMA (p,q) puede expresarse como (Salas et al, 1980)

$$Y_{v,\tau} = \sum_{i=1}^p \phi_{i,\tau} Y_{v,\tau-i} + \varepsilon_{v,\tau} - \sum_{j=1}^q \theta_{j,\tau} \varepsilon_{v,\tau-j}$$

Donde $Y_{v,\tau}$ representa el proceso del flujo para el año v y la estación τ . Para cada estación τ , es un proceso normalmente distribuido con media cero y varianza σ^2 (Y). El $\varepsilon_{v,\tau}$ es el término de ruido no correlacionado para cada estación τ normalmente distribuido con media cero y varianza σ^2 (ε). Los $\{\phi_{1,\tau}, \dots, \phi_{p,\tau}\}$ son los parámetros periódicos del modelo autoregresivo y los $\{\theta_{1,\tau}, \dots, \theta_{q,\tau}\}$ son los parámetros periódicos de las medias móviles. Si queremos trabajar a escala mensual, cada estación τ se traduce a un mes.

Estos modelos se pueden ajustar de dos maneras, la primera mediante coeficientes constantes, que prácticamente es lo mismo que se realizó anteriormente con los modelos mensuales ARMA, solo que la variable $Y_{v,\tau}$ se transformaría a Y_t , donde $t=(v-1)*12 + \tau$ (Salas et al, 1980). La segunda forma de modelar es mediante coeficientes periódicos, esto quiere decir que los valores de los coeficientes de los parámetros variarían en cada mes. Por lo tanto haciendo un reconocimiento de estos últimos se realizó el ajuste de varios modelos PARMA con coeficientes periódicos para diferentes órdenes, al final se escogió el modelo con el menor valor del criterio de información de Akaike corregido (Hurvich y Tsai, 1989).

Hay que hacer notar que la estandarización se realizó mediante la fórmula

$$Z_{v,\tau} = Y_{v,\tau} - \mu_{\tau} / \sigma$$

En donde:

μ_{τ} y σ : son los estimadores de la media y la desviación típica de la serie transformada $Y_{v,\tau}$, los mismos que se pueden obtener mediante el ajuste de series de Fourier, por lo tanto se tendría 12 estimadores de medias y 12 estimadores de desviación típica. Sin embargo según lo recomendado la literatura consultada (Salas et al, 1980) se puede aproximar los estimadores de media y desviación típica por \bar{Y}_{τ} y S_{τ} (o sea la media y desviación típica de la muestra por cada estación τ) cuando se modela a escala mensual. No obstante, cuando se modela a escala semanal y diaria, es necesario el ajuste de series de Fourier para determinar los estimadores μ_{τ} y σ .

Antes de realizar la modelación se repasará una breve historia de estos modelos, para lo cual se ha revisado publicaciones y artículos científicos cuyas referencias se citan al final de la memoria.

4.2.2.1 Estado del arte de los modelos PARMA

Según la bibliografía y referencias revisadas, los modelos estocásticos periódicos, han sido estudiados hace 40 años y siguen siendo estudiados en el presente. Se intentará resumir la evolución de estos modelos en los siguientes párrafos.

En el año 1967 autores como Jones R. y Brelsford W., estudiaron el comportamiento de series temporales con estructura periódica, dado que mostraron la necesidad de dividir al año en partes para analizar los datos por separado dada la variación estacional en épocas de invierno y verano.

Pagano (1978) aportó con una metodología para analizar múltiples autoregresiones periódicas, demostrando la utilidad del prelavado para un inicial ajuste de autoregresiones periódicas.

Salas et al (1981) realizó la identificación de un tipo de modelo estocástico basado en una representación física conceptual de una cuenca, mediante la incorporación de modelos autoregresivos de media móvil para representar la precipitación, las aguas subterráneas y el flujo. Luego Salas y otros autores en 1982 mostraron una metodología para la estimación de los modelos ARMA con parámetros estacionales mediante las ecuaciones de Yule-Walker. Con respecto a la modelación multivariada de series de tiempo, Salas, Tabios y Bartolini (1985) mostraron enfoques alternativos y ejemplos de modelación bivariada y trivariada.

Vecchia (1985) presentó resultados de estimación de propiedades y parámetros de correlación para modelos autoregresivos de media móvil con parámetros periódicos. Se realizó el análisis de una serie de flujo mensual incorporando una representación multivariada, con una estimación de parámetros por el método de máxima verosimilitud y la

realización de análisis de Fourier con criterios de selección del número óptimo de armónicos a incluirse.

Vecchia y Ballerini (1991) presentaron un procedimiento estadístico para decidir si existen periodicidades en la función de autocorrelación de una serie de tiempo estacional después de remover las media y desviación estándar estacionales.

Salas y Obeysekera (1992) en una publicación de la Asociación de Ingenieros Civiles Americanos (ASCE), expusieron los conceptos básicos de series de tiempo de caudales estacionales y analizaron el comportamiento de modelos PARMA para representar los procesos estacionales de precipitación, el almacenamiento de aguas subterráneas y los caudales.

Ula T. A. (1990), investigó sobre las condiciones de estacionaridad en procesos periódicos multivariados. Tres años después Ula T. A. (1993) publicó un estudio sobre la predicción de procesos multivariados periódicos autoregresivos de media móvil, en donde se obtienen los valores predichos y sus errores mediante la minimización del error cuadrático medio.

Anderson y Meerschaert (1997) establecieron una teoría básica asintótica para variables aleatorias periódicas de media móvil con diferentes colas y analizan el comportamiento del cuarto momento (curtosis). En el mismo año Ula y Smadi (1997) demostraron una nueva técnica para determinar las condiciones de estacionaridad periódica para los modelos PARMA.

Lund y Basawa (2000) analizaron la predicción recursiva y técnicas de evaluación de probabilidad para modelos de series de tiempo PARMA, en donde los resultados de la predicción fueron utilizados para desarrollar un eficiente y exacto algoritmo de evaluación de probabilidad para series gaussianas PARMA.

Ula y Smadi (2003) demostraron una técnica de identificación de la orden del modelo periódico de media móvil (PMA), en donde utilizan la función de autocorrelación periódica, además simularon un ejemplo donde coinciden con los resultados teóricos.

Mondal y Wasimi (2005) presentaron el modelo función de transferencia del ruido periódico (PTFN) para predicción, el mismo que fue desarrollado por una extensión de los modelos de función de transferencia del ruido (TFN), además realizaron una aplicación en el río Ganges utilizando datos de precipitación mensuales. El mismo año Mondal y Wasimi (2005) demostraron las bondades del modelo periódico autoregresivo PAR para capturar la variabilidad del flujo en el río Ganges, preservando los estadísticos importantes en corto y largo plazo.

Tesfaye y otros autores (2006) desarrollaron técnicas de identificación y simulación de modelo, basadas en un modelo periódico autoregresivo de media móvil (PARMA) para capturar las variaciones estacionales estadísticas del flujo de un río, además incluyeron un análisis estadístico de los residuales del modelo PARMA.

Anderson, Tesfaye y otros autores (2007) desarrollaron un método de ajuste de parámetros para modelos PARMA de alta resolución, usando transformaciones de Fourier discretas para representar el conjunto de coeficientes del modelo periódico autoregresivo de media móvil. Además realizan la modelación del flujo del río Fraser con series mensuales y con series semanales, sacando como conclusión principal que el método Fourier-Parma produce resultados superiores en comparación con un modelo PARMA convencional, a pesar de usar menos parámetros.

Shao y otros autores (2009) consideran el uso de modelos con coeficientes funcionales con componentes periódicas para pronóstico de caudales a corto plazo. Por último Sarnaglia y otros autores (2010) sugiere un procedimiento para la estimación de parámetro de modelos autoregresivos (PAR) cuando hay la presencia de datos atípicos (outliers).

Estos son algunos artículos que describen el estado del arte de los modelos periódicos autoregresivos de media móvil, unos autores se han concentrado en la metodología para la identificación, ajuste y pruebas de bondad de los modelos, otros autores han desarrollado nuevas técnicas de estimación de parámetros, en cambio otros autores han visto la necesidad de introducir las variaciones estacionales en el año hidrológico para simulación y

predicción de caudales en los ríos y resaltan las ventajas de modelar con este tipo de modelos con respecto a otros.

Una vez revisado la formulación y el estado del arte de los modelos PARMA se aplicará en las series de aportaciones históricas de las salidas de las subcuencas Tomebamba y Pindilig, con la finalidad de generar series sintéticas indistinguibles de las series de tiempo históricas en cada subcuenca.

4.2.2.2 Aplicación subcuenca del Tomebamba

A continuación se muestra los resultados de 11 modelos PARMA aplicados en la subcuenca del Tomebamba. El método de ajuste para la estimación de parámetro fue el de mínimos cuadrados.

Tabla 4.19: Parámetros estimados para el modelo PARMA (1,0) o PAR (1) – Matadero en Sayausi

Mes	Φ_1
1	0.3498
2	0.4886
3	0.4559
4	0.5876
5	0.4535
6	0.2189
7	0.2128
8	0.3899
9	0.5974
10	0.2648
11	0.0031
12	0.5402

Tabla 4.20: Parámetros estimados para el modelo PARMA (1,1) – Matadero en Sayausi

Mes	Φ_1	θ_1
1	0.5487	0.3232
2	0.1363	-0.4118
3	0.1762	-0.3778
4	1.0074	0.5490
5	0.1610	-0.4871
6	0.2422	0.0316
7	1.7026	1.5651
8	1.5951	1.4304
9	0.7050	0.1866
10	0.3720	0.1690
11	-0.0846	-0.0950
12	-11.6185	-12.1666

Tabla 4.21: Parámetros estimados para el modelo PARMA (1,2) – Matadero en Sayausi

Mes	Φ_1	θ_1	θ_2
1	0.5781	0.4132	-0.0796
2	0.3204	-0.2100	0.0276
3	1.3368	0.7945	0.6529
4	0.3764	-0.1089	-0.3185
5	0.1281	-0.5254	-0.0077
6	2.4783	2.2630	1.5100
7	0.5161	0.3954	-0.3721
8	1.0052	0.8163	-0.3598
9	0.6637	0.1312	-0.0586
10	-0.2845	-0.5075	-0.7435
11	0.3430	0.3616	0.4827
12	0.0572	-0.5526	0.1793

Tabla 4.22: Parámetros estimados para el modelo PARMA (1,3) – Matadero en Sayausi

Mes	Φ_1	θ_1	θ_2	θ_3
1	0.1853	0.0080	-0.2929	0.1088
2	-1.3788	-1.9281	-0.2590	-0.7376
3	1.3098	0.8141	0.6441	-0.0926
4	0.3946	-0.0887	-0.3409	-0.1914
5	0.8814	0.2430	0.3835	0.4173
6	0.1571	-0.0604	-0.0132	-0.4503
7	0.0259	-0.1241	-0.5285	-0.0657
8	5.4136	5.2537	0.3321	2.3890
9	0.5804	0.0168	-0.1170	-0.0285
10	-0.0295	-0.2353	-0.5246	0.0676
11	0.9262	0.9243	0.5862	0.2895
12	1.5595	0.9434	0.1196	-0.7563

Tabla 4.23: Parámetros estimados para el modelo PARMA (1,4) – Matadero en Sayausi

Mes	ϕ_1	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4
1	0.3132	0.1313	-0.2177	0.0808	0.0948
2	2.1731	1.6302	0.4162	0.7120	-0.5323
3	0.6148	0.0937	0.2552	-0.0909	-0.1463
4	0.2928	-0.1830	-0.3863	-0.1959	-0.3121
5	0.7991	0.2353	0.3268	0.3260	-0.0453
6	0.5573	0.3532	0.2686	-0.4038	0.2042
7	-1.4566	-1.6915	-0.8277	-0.1229	-0.6495
8	-0.6811	-0.9201	-0.6294	-0.8642	-0.2878
9	0.8886	0.3689	-0.1264	0.1578	0.1571
10	0.2579	0.0396	-0.3836	0.1703	0.1759
11	0.8498	0.8669	0.5767	0.2724	0.0807
12	1.4426	0.8605	0.1266	-0.6776	-0.0100

Tabla 4.24: Parámetros estimados para el modelo PARMA (2,1) – Matadero en Sayausi

Mes	ϕ_1	ϕ_2	θ_1
1	0.2925	0.2335	0.0974
2	0.7074	-0.1609	0.1960
3	-0.7378	0.4851	-1.2733
4	1.2453	-0.0771	0.8151
5	0.2861	-0.0794	-0.3731
6	-0.5276	0.4237	-0.7530
7	0.4588	0.2834	0.3376
8	1.0512	0.3202	0.8779
9	0.6555	0.0628	0.1523
10	-2.7352	1.8903	-2.9695
11	0.4144	-0.2494	0.4309
12	-0.1336	-0.0001	-0.7032

Tabla 4.25: Parámetros estimados para el modelo PARMA (2,2) – Matadero en Sayausi

Mes	ϕ_1	ϕ_2	θ_1	θ_2
1	-0.0449	0.0704	-0.2552	-0.3935
2	1.2634	-0.5008	0.7753	-0.2398
3	0.9215	0.1472	0.4188	0.5803
4	-0.3017	0.3940	-0.8182	-0.3196
5	0.4895	-0.2807	-0.1587	-0.1129
6	-2.8206	0.8338	-3.0458	-1.1520
7	0.2623	0.1038	0.1429	-0.3009
8	1.3772	-0.4602	1.1944	-0.8299
9	0.7393	-0.0949	0.2499	-0.1533
10	-0.9329	0.5415	-1.1819	-0.5322
11	0.1464	0.2734	0.1366	0.7206
12	0.1764	0.4913	-0.4303	0.6515

Tabla 4.26: Parámetros estimados para el modelo PARMA (3,2) – Matadero en Sayausi

Mes	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	θ_1	θ_2
1	-0.0498	0.0750	-0.1323	-0.3028	-0.4016
2	0.0831	-0.6956	0.5502	-0.4241	-0.7956
3	0.5341	-0.0800	0.1422	-0.0035	0.1355
4	0.6379	0.0174	0.1160	0.1873	-0.1813
5	0.0249	-0.3553	0.2948	-0.6120	-0.3942
6	-1.2112	-0.2770	0.5850	-1.4712	-1.1341
7	-0.1385	-0.3052	0.2688	-0.2684	-0.8145
8	-0.4762	0.1520	0.6613	-0.6618	-0.4386
9	0.8282	-0.0865	-0.0778	0.3598	-0.1220
10	5.0202	-3.3083	-0.3718	4.8071	-1.4770
11	0.3285	0.5725	-0.2171	0.3641	1.0752
12	0.5300	0.2751	0.2375	-0.0364	0.4448

Tabla 4.27: Parámetros estimados para el modelo PARMA (3,3) – Matadero en Sayausi

Mes	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	θ_1	θ_2	θ_3
1	0.3746	0.1399	-0.3638	0.1423	-0.0732	-0.3129
2	-0.8305	-0.3883	0.5633	-1.3664	-0.6517	-0.2350
3	0.7503	-0.1785	0.2298	0.2215	0.1586	0.1295
4	1.6006	-0.9474	-0.1577	1.1331	-0.6496	-0.7815
5	0.6820	-0.6399	0.1513	0.0581	-0.3842	0.0710
6	-1.1815	0.9115	-0.7143	-1.4235	0.0906	-0.8069
7	-0.1036	-0.3887	0.2868	-0.2353	-0.8950	-0.0239
8	-1.7743	0.4542	0.7427	-1.9820	-0.2743	-0.4780
9	0.7058	-0.0093	-0.0633	0.2193	-0.0766	-0.0445
10	13.6086	-9.1811	0.1847	13.3881	-3.1372	1.2589
11	0.9524	-0.5021	0.5914	1.0538	0.1323	0.7025
12	1.3782	-0.2406	0.0736	0.8519	-0.1717	-0.6649

Tabla 4.28: Parámetros estimados para el modelo PARMA (4,3) – Matadero en Sayausi

Mes	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	ϕ_4	θ_1	θ_2	θ_3
1	0.2757	0.0551	-0.0999	0.0791	0.0000	0.0000	0.0000
2	-3.7590	1.1679	0.2133	-0.0879	-4.2962	0.0000	0.0000
3	-0.0094	-2.6390	0.8572	0.2774	-0.5122	-2.7612	0.0000
4	-1.2490	1.2523	-0.9730	0.6072	-1.7137	0.0693	-0.6634
5	0.6022	-0.1899	-0.1665	0.1906	-0.0246	0.0380	-0.0152
6	1.5062	-0.4194	0.5746	-0.3570	1.3070	0.4651	-0.0211
7	0.2601	-1.6520	1.2993	-0.6334	0.0301	-2.1142	0.2260
8	1.1345	0.7171	1.3984	-0.6486	0.9433	0.4982	1.6464
9	0.0541	-0.0132	0.1340	0.3051	-0.4887	-0.1903	-0.1731
10	0.4708	0.3974	-0.3407	-0.4648	0.2515	0.1057	-0.1007
11	0.8964	0.3250	0.0325	-0.0163	0.9747	0.9414	0.5060
12	1.6619	-0.2729	-0.5034	0.3137	1.1366	-0.1770	-1.3772

Tabla 4.29: Parámetros estimados para el modelo PARMA (4,4) – Matadero en Sayausi

Mes	Φ_1	Φ_2	Φ_3	Φ_4	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4
1	1.2807	0.3629	-0.3754	-0.5178	1.0780	0.7213	-0.3619	-0.5545
2	2.0455	-1.5028	-0.0552	0.7653	1.5633	-1.1224	-0.3088	0.4225
3	0.7619	-0.1818	0.5698	-0.2264	0.2555	0.1587	0.4908	-0.0354
4	0.8290	-0.3218	0.0480	-0.2236	0.3537	-0.5143	-0.2818	-0.4808
5	0.5749	-1.2802	0.2745	0.4942	-0.0317	-1.0986	-0.1912	0.4924
6	1.0806	-0.0231	1.5201	-0.6639	0.8698	0.5483	1.1718	0.4435
7	-0.4112	0.7547	-0.4122	0.4674	-0.6401	0.2040	-0.0485	0.1342
8	-1.4108	-0.0747	1.0901	0.0985	-1.5856	-0.9287	-0.0812	0.3733
9	1.1136	0.7156	-0.1827	-0.4232	0.6382	0.7613	0.1678	0.0604
10	-1.5438	1.5787	0.0012	-0.8368	-1.7786	0.2955	0.1308	-0.5076
11	0.6358	0.8562	-0.4203	0.2356	0.7073	1.4843	0.1474	0.3278
12	1.7367	-0.2579	-1.0069	0.6636	1.2199	-0.1767	-1.9466	0.2040

Para escoger el mejor modelo según el criterio de información de Akaike corregido - AICC (Hurvich y Tsai, 1989) se ha confeccionado una tabla con estos valores para los 11 modelos PARMA ajustados.

Tabla 4.30: Valores del criterio de información de Akaike corregido – AICC – Modelos PARMA - Matadero en Sayausi

Mes	PARMA(1,0)	PARMA(1,1)	PARMA(1,2)	PARMA(1,3)	PARMA(1,4)	PARMA(2,1)	PARMA(2,2)	PARMA(3,2)	PARMA(3,3)	PARMA(4,3)	PARMA(4,4)
1	31.385	33.0550	34.2360	37.1570	40.4360	34.7070	37.0520	38.7910	43.3800	49.0000	55.0020
2	26.971	28.5660	31.7460	31.4410	33.0640	31.6750	33.7420	34.7420	39.6350	39.9880	44.5760
3	28.207	29.5750	31.4100	32.7890	37.0120	32.1810	33.3720	37.5770	40.8930	44.4680	49.7440
4	22.299	22.0790	25.4240	26.2940	26.7450	23.3230	24.6810	30.0040	34.6090	34.1540	32.7940
5	28.29	28.4450	30.8100	33.0750	37.0640	31.0430	34.0530	36.9260	40.3290	43.3870	46.0850
6	33.907	36.3610	37.7920	37.2900	39.0920	37.6970	38.6070	39.3830	42.9390	43.8660	46.7180
7	33.993	32.5790	33.7170	35.4750	33.6280	34.7980	37.0870	39.8790	42.9050	43.1380	50.5610
8	30.318	20.8210	23.2960	23.7440	26.6800	21.5760	22.6180	23.8090	25.7960	30.5250	32.2160
9	21.747	23.7940	26.4570	29.1890	31.1050	26.2160	28.9260	31.8260	35.4450	38.7860	41.4850
10	33.175	35.4140	31.6630	37.6910	39.8770	33.6690	34.7170	38.1940	40.6910	44.5240	46.6080
11	35.428	37.8690	36.2000	39.4340	41.9660	39.2140	38.4770	40.4860	40.7960	45.8620	50.9360
12	24.733	22.6810	27.2710	27.0840	30.1470	28.9640	27.7800	29.4190	31.8250	33.6100	37.8880

En la tabla anterior están sombreados los modelos escogidos para cada uno de las series periódicas (mensuales), el modelo PARMA (1,0) se utilizará para los meses de enero, febrero, marzo, mayo, junio, septiembre y noviembre; el modelo PARMA (1,1) se utilizará en los meses de abril, julio, agosto y diciembre; y por último el modelo PARMA (1,2) se utilizará en el mes de octubre.

4.2.2.3 Aplicación subcuena del río Pindilig

Se ajusto 7 modelos periódicos autoregresivos de media móvil [PARMA (1,1), PAR (1), PAR (2), PAR (3), PMA (1), PMA (2) y PMA (3)] a la serie de tiempo mensual normalizada y estandarizada de la estación Dudas en Pindilig, al final se escogió el mejor modelo según el criterio de información de Akaike corregido - AICC (Hurvich y Tsai, 1989). El método de ajuste para estimar los parámetros fue el de los mínimos cuadrados y los resultados se muestran a continuación.

Tabla 4.31: Valores del criterio de información de Akaike corregido – AICC – Modelos PARMA – Dudas en Pindilig

Mes	PARMA(1,0)	PARMA(2,0)	PARMA(3,0)	PARMA(0,1)	PARMA(0,2)	PARMA(0,3)	PARMA(1,1)
1	6.871	9.127	11.718	23.648	20.766	6.594	9.2870
2	1.428	3.871	3.571	13.412	20.095	-1.601	3.8840
3	14.684	16.49	18.482	31.735	14.565	23.767	16.4710
4	21.26	23.454	25.719	24.496	25.463	22.396	23.3240
5	19.632	16.913	14.119	28.615	31.021	20.192	15.2920
6	20.964	22.109	24.751	26.789	24.58	26.27	22.5670
7	15.352	17.534	20.139	23.326	22.457	22.796	17.6990
8	11.553	11.324	13.637	24.989	20.726	18.253	11.1500
9	-2.612	-0.277	1.826	17.794	7.17	10.132	-0.1590
10	19.238	21.397	23.795	29.163	26.389	24.599	21.3840
11	5.192	6.274	8.376	20.27	14.96	15.49	6.5590
12	-11.764	-13.761	-13.669	11.467	-0.487	-3.04	-15.3330

Los campos sombreados de la tabla anterior muestran los mejores modelos según AICC. Entonces el modelo PARMA (1,0) se aplicará para los meses de abril, junio, julio, septiembre, octubre y noviembre; el modelo PARMA (3,0) se aplicará para el mes de mayo; el modelo PARMA (0,2) se aplicará para el mes marzo; el modelo PARMA (0,3) se aplicará para los meses de enero y febrero; y finalmente el modelo PARMA (1,1) se aplicará para los meses de agosto y diciembre.

4.2.3 Generación de series sintéticas

La generación de series sintéticas se lo realiza pensando para el fin que se las quiere destinar, en este trabajo por ejemplo se utilizará las series sintéticas para la planificación y gestión de los sistemas de recursos hídricos de las subcuencas de los ríos Tomebamba y Pindilig. Lo esencial de esta generación es la conservación de las propiedades estadísticas de la muestra histórica, como resultado cada muestra generada son igualmente probables que ocurran en el futuro (Sveinsson et al, 2007).

Los modelos ajustados anteriormente serán adecuados cuando las estadísticas importantes históricas y generadas son comparables, así comenzaremos por generar series sintéticas anuales y luego series sintéticas mensuales a partir de la serie histórica anual y mensual de aportaciones y los mejores modelos ajustados para cada escala temporal.

Hay que hacer notar que la finalidad de la generación sintética anual será para analizar la posibilidad de implementar infraestructura para la regulación de los sistemas hídricos del río Tomebamba y río Pindilig. Por otro lado, la generación de las series sintéticas mensuales tendrá la finalidad de construir escenarios futuros para la gestión de la infraestructura planificada. Por supuesto que estos análisis estarán supeditados al cumplimiento de las garantías de las demandas de los sistemas.

Se generará 100 series sintéticas, dado que son sistemas sencillos con un solo punto de generación, por lo tanto no es necesario un número elevado de series para obtener resultados significativos (Sánchez et al, 2001).

Además con la finalidad de demostrar las ventajas e inconvenientes de introducir la estacionalidad en la modelación estocástica cuando se modela a escala mensual, se realizó una comparación de los estadísticos principales de las series sintéticas generadas para la subcuenca del río Pindilig con los dos modelos MA y PARMA (coeficientes periódicos) con los estadísticos principales de la serie histórica de la estación Dudas en Pindilig.

4.2.3.1 Aplicación subcuenca del río Tomebamba – Series Sintéticas Anuales

Con el modelo ARMA (1,1) ajustado anteriormente para los registros anuales de la estación Matadero en Sayausi, se ha generado 100 series sintéticas de 31 años cada una (suponiendo que es el periodo de diseño de la infraestructura de regulación), cuyos estadísticos resultantes han sido comparados con los estadísticos de la serie histórica, los mismos que se presentan a continuación.

Tabla 4.32: Comparación de estadísticos básicos de la Serie Histórica Anual y la Serie Sintética Anual Generada – Aportaciones de la estación Matadero en Sayausi

Estadísticos	Serie Histórica	Serie Generada
Media	194.7000	192.9000
Desv_Estand	45.7400	45.5000
CV	0.2349	0.2341
Sesgo	0.2459	-0.0307
Min	119.4000	96.9400
Max	299.6000	288.1000
acf(1)	0.2146	0.1603
acf(2)	-0.0083	-0.1420

La tabla nos muestra que los estadísticos básicos de la serie histórica y la serie generada tienen bastante similitud, sobre todo en la media y desviación estándar. Con respecto a los valores mínimos y máximos de la serie generada son inferiores a los valores mínimos y máximos de la serie histórica, por lo tanto se esperaría que la mayoría de valores de aportaciones anuales en las series generadas sean inferiores a los valores de la serie histórica, lo cual no representa una desventaja dado que el análisis se realizará en las condiciones más desfavorables.

Tabla 4.33: Comparación de estadísticos de sequía, superávit y almacenamiento de la Serie Histórica y la Serie Generada [Anual] – Nivel de demanda de 100% y 90% de la media de aportaciones anuales de la estación Matadero en Sayausi

Estadísticos	Serie Histórica	Serie Generada	Serie Histórica	Serie Generada
Nivel de Demanda	100%	100%	90%	90%
Máxima duración déficit	5	4.76	5	3.18
Máxima magnitud déficit	271.40	210.00	174.00	126.60
Máxima duración superávit	5	4.43	12	7.26
Máxima magnitud superávit	214.80	190.10	536.00	345.90
Capacidad de Almacenamiento	363.20	312.40	174.00	145.20
Rango Reajustado	7.941	6.562	7.941	6.562
Coeficiente de Hurst	0.756	0.679	0.756	0.679

Tabla 4.34: Comparación de estadísticos de sequía, superávit y almacenamiento de la Serie Histórica y la Serie Generada [Anual] – Nivel de demanda de 80% y 70% de la media de aportaciones anuales de la estación Matadero en Sayausi

Estadísticos	Serie Histórica	Serie Generada	Serie Histórica	Serie Generada
Nivel de Demanda	80%	80%	70%	70%
Máxima duración déficit	3	2.24	1	1.45
Máxima magnitud déficit	73.80	77.55	16.92	43.91
Máxima duración superávit	12	10.58	12	16.21
Máxima magnitud superávit	769.60	606.60	1003.00	1108.00
Capacidad de Almacenamiento	76.69	79.91	16.92	44.24
Rango Reajustado	7.941	6.562	7.941	6.562
Coeficiente de Hurst	0.756	0.679	0.756	0.679

Tabla 4.35: Comparación de estadísticos de sequía, superávit y almacenamiento de la Serie Histórica y la Serie Generada [Anual] – Nivel de demanda de 60% y 50% de la media de aportaciones anuales de la estación Matadero en Sayausi

Estadísticos	Serie Histórica	Serie Generada	Serie Histórica	Serie Generada
Nivel de Demanda	60%	60%	50%	50%
Máxima duración déficit	0	0.91	0	0.45
Máxima magnitud déficit	0.00	22.81	0.00	9.89
Máxima duración superávit	31	22.31	31	27.1
Máxima magnitud superávit	2414.00	1816.00	3018.00	2645.00
Capacidad de Almacenamiento	0.00	22.81	0.00	9.89
Rango Reajustado	7.941	6.562	7.941	6.562
Coeficiente de Hurst	0.756	0.679	0.756	0.679

Tabla 4.36: Comparación de estadísticos de sequía, superávit y almacenamiento de la Serie Histórica y la Serie Generada [Anual] – Nivel de demanda de 40% y 30% de la media de aportaciones anuales de la estación Matadero en Sayausi

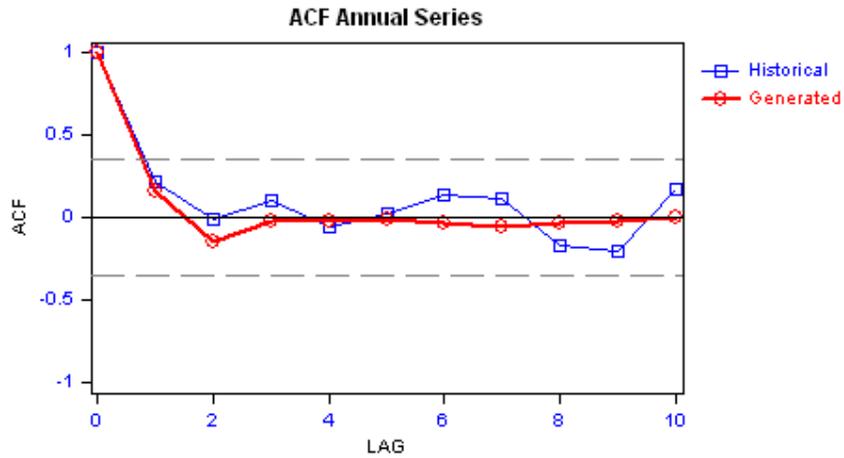
Estadísticos	Serie Histórica	Serie Generada	Serie Histórica	Serie Generada
Nivel de Demanda	40%	40%	30%	30%
Máxima duración déficit	0	0.22	0	0.05
Máxima magnitud déficit	0.00	4.04	0.00	1.44
Máxima duración superávit	31	29.22	31	30.44
Máxima magnitud superávit	3621.00	3392.00	4225.00	4103.00
Capacidad de Almacenamiento	0.00	4.04	0.00	1.44
Rango Reajustado	7.941	6.562	7.941	6.562
Coefficiente de Hurst	0.756	0.679	0.756	0.679

Haciendo un resumen de la información mostrada en las tablas tenemos que el Rango Reajustado y el Coeficiente de Hurst para todos los niveles de demanda no difieren significativamente, estamos hablando de un 17% para el Rango Reajustado y un 10% el coeficiente de Hurst. Por otro lado la máxima duración de déficit, la máxima magnitud de déficit y la capacidad de almacenamiento son menores para las series generadas en niveles de demanda del 100% y 90%, para niveles de demanda del 80% aproximadamente se equilibran, sin embargo para niveles de demanda del 70% al 30% estos estadísticos son mayores para las series generadas (de igual forma sería una ventaja pensando en las condiciones más desfavorables).

Tomando como referencia la media, la desviación estándar, el rango reajustado y el coeficiente de Hurst, podemos decir que la serie anual generada conserva las propiedades estadísticas de la muestra histórica anual.

Hay que indicar que los valores de los estadísticos de la serie generada se calcularon con un promedio de los valores correspondientes en las 100 series generadas. En la figura 4.25 se muestra la función de autocorrelación de la muestra histórica y la muestra generada.

Figura 4.25: Función de autocorrelación de la serie histórica anual y serie generada anual por el modelo ARMA (1,1) ajustado a la estación Matadero en Sayausi



4.2.3.2 Aplicación subcuena del río Pindilig – Series Sintéticas Anuales

Se generó 100 series sintéticas de 31 años cada una, suponiendo que es mi periodo de diseño para las estructuras de regulación, mediante el mejor modelo MA (3) ajustado a la serie anual de la estación Dudas en Pindilig. Los estadísticos resultantes se muestran a continuación, además se realiza una comparación con los estadísticos de la serie histórica de la estación.

Tabla 4.37: Comparación de estadísticos básicos de la Serie Histórica Anual y la Serie Sintética Anual Generada – Aportaciones de la estación Dudas en Pindilig

Estadísticos	Serie Histórica	Serie Generada
Media	105.5000	105.5000
Desv_Estand	31.7700	30.3000
CV	0.3011	0.2857
Sesgo	0.4840	-0.0361
Min	42.3500	42.8100
Max	185.3000	166.5000

En la tabla podemos observar la muy poca variación entre los estadísticos básicos de la serie histórica y la serie generada. Hay que destacar que el valor medio fue el mismo valor, el

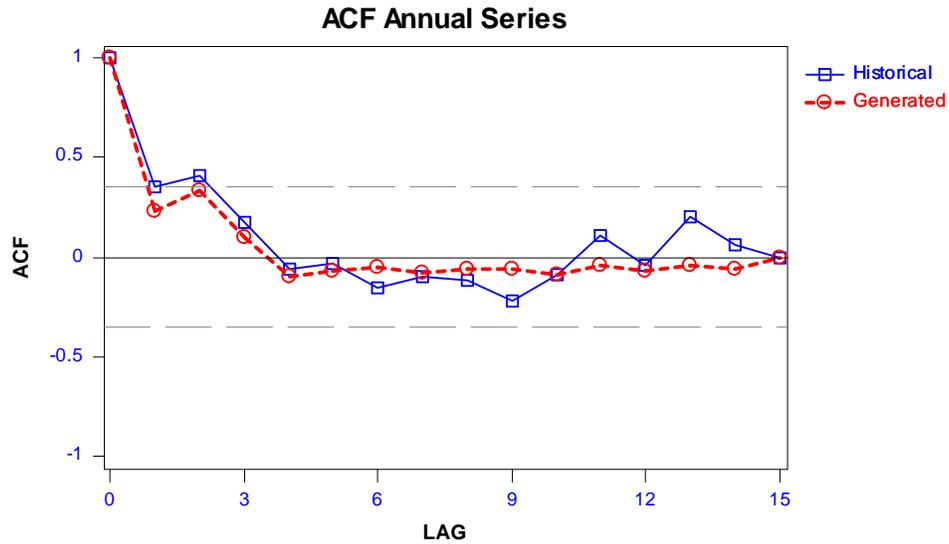
valor de sesgo es el que tiene la máxima variación y el valor máximo tuvo una variación del 11% en defecto aproximadamente, todos los demás estadísticos tuvieron una variación no muy significativa.

Tabla 4.38: Comparación de estadísticos de sequía, superávit y almacenamiento de la Serie Histórica y la Serie Generada [Anual] – Nivel de demanda 26% de la media de aportaciones anuales de la estación Dudas en Pindilig

Estadísticos	Serie Histórica	Serie Generada
Nivel de Demanda	26%	26%
Máxima duración déficit	0	0.17
Máxima magnitud déficit	0.00	2.17
Capacidad de Almacenamiento	0.00	2.17
Rango Reajustado	9.332	8.379
Coefficiente de Hurst	0.815	0.768

Tomando en cuenta la información de la tabla anterior cuando el nivel de demanda es el 26% de la media de aportaciones anuales (similar a la demanda futura del sistema), tenemos que existe una variación no significativa del Rango Reajustado (11%) y del Coeficiente de Hurst (6%). Con respecto a la máxima duración de déficit, la máxima magnitud de déficit y la capacidad de almacenamiento son mayores para las series generadas, lo cual sería una ventaja pensando que vamos a modelar en las condiciones más desfavorables. Por último, en la figura 4.26 se muestra la función de autocorrelación de la muestra anual histórica y generada.

Figura 4.26: Función de autocorrelación de la serie histórica anual y serie generada anual por el modelo MA (0,3) ajustado a la estación Dudas en Pindilig



Tomando en cuenta lo observado y anotado anteriormente, podemos decir que las series generadas son equiprobables a la serie histórica.

4.2.3.3 Aplicación subcuenca del río Tomebamba – Series Sintéticas Mensuales

Con los modelos PARMA (1,0) [enero, febrero, marzo, mayo, junio, septiembre y noviembre], PARMA (1,1) [abril, julio, agosto y diciembre] y PARMA (1,2) [octubre] ajustado para la serie histórica mensual la estación Matadero en Sayausi, se ha generado 100 series sintéticas de 372 meses cada una (31 años), cuyos estadísticos resultantes han sido comparados con los estadísticos de la serie histórica, los mismos que se presentan a continuación.

Tabla 4.39: Comparación de estadísticos básicos de la Serie Histórica Mensual y la Serie Sintética Mensual Generada – Aportaciones de la estación Matadero en Sayausi

Estadísticos	Serie Histórica	Serie Generada	Variación
Media	16.2236	16.0820	0.87%
Desv_Estand	9.3176	9.2917	0.28%
Varianza	86.8170	86.5936	0.26%
Sesgo	0.8388	0.8553	-1.97%
Min	0.8890	0.3542	60.16%
Max	50.6480	52.5421	-3.74%

En la tabla observamos que existe variaciones no importantes en todos los estadísticos básicos excepto en los valores mínimos de la serie. Sin embargo, dado que esperaríamos menores valores de aportaciones en algunas series generadas (escenarios futuros), los análisis de cumplimiento de garantías de las demandas se los realizaría en las condiciones más desfavorables y por lo tanto del lado de la seguridad.

Tabla 4.40: Comparación de estadísticos de sequía y almacenamiento de la Serie Histórica y la Serie Generada [mensual] – Nivel de demanda de 100% y 90% de la media de aportaciones mensuales de la estación Matadero en Sayausi

Estadísticos	Serie Histórica	Serie Generada	Serie Histórica	Serie Generada
Nivel de Demanda	100%	100%	90%	90%
Máxima duración déficit	9	9.83	8	8.69
Máxima magnitud déficit	84.30	74.11	71.32	58.39
Capacidad de Almacenamiento	395.84	223.21	192.39	94.36
Rango Reajustado	42.483	25.992	42.483	25.992
Coefficiente de Hurst	0.717	0.618	0.717	0.618

Tabla 4.41: Comparación de estadísticos de sequía y almacenamiento de la Serie Histórica y la Serie Generada [mensual] – Nivel de demanda de 80% y 70% de la media de aportaciones mensuales de la estación Matadero en Sayausi

Estadísticos	Serie Histórica	Serie Generada	Serie Histórica	Serie Generada
Nivel de Demanda	80%	80%	70%	70%
Máxima duración déficit	8	7.52	8	6.34
Máxima magnitud déficit	58.34	44.72	45.36	32.49
Capacidad de Almacenamiento	94.36	55.44	45.36	37.05
Rango Reajustado	42.483	25.992	42.483	25.992
Coeficiente de Hurst	0.717	0.618	0.717	0.618

Tabla 4.42: Comparación de estadísticos de sequía y almacenamiento de la Serie Histórica y la Serie Generada [mensual] – Nivel de demanda de 60% y 50% de la media de aportaciones mensuales de la estación Matadero en Sayausi

Estadísticos	Serie Histórica	Serie Generada	Serie Histórica	Serie Generada
Nivel de Demanda	60%	60%	50%	50%
Máxima duración déficit	8	5.09	5	4.11
Máxima magnitud déficit	32.38	22.78	19.58	15.91
Capacidad de Almacenamiento	32.38	25.23	19.58	16.84
Rango Reajustado	42.483	25.992	42.483	25.992
Coeficiente de Hurst	0.717	0.618	0.717	0.618

Tabla 4.43: Comparación de estadísticos de sequía y almacenamiento de la Serie Histórica y la Serie Generada [mensual] – Nivel de demanda de 40% y 30% de la media de aportaciones mensuales de la estación Matadero en Sayausi

Estadísticos	Serie Histórica	Serie Generada	Serie Histórica	Serie Generada
Nivel de Demanda	40%	40%	30%	30%
Máxima duración déficit	4	3.24	3	2.4
Máxima magnitud déficit	14.28	10.65	9.42	6.47
Capacidad de Almacenamiento	14.28	10.98	9.42	6.54
Rango Reajustado	42.483	25.992	42.483	25.992
Coeficiente de Hurst	0.717	0.618	0.717	0.618

Podemos observar que la máxima duración del déficit tiene su máxima variación cuando la demanda es igual al 60% de la media de aportaciones mensuales históricas, además este estadístico es superior en las series generadas cuando los niveles de demanda son de 100% y 90% e inferior en los demás niveles de demanda. Con respecto a la máxima magnitud del déficit, tenemos que la máxima variación se produce cuando el nivel de demanda es del 30%, además este estadístico es menor en las series generadas para todos los niveles de demanda (lo cual puede ser un inconveniente, sin embargo se deberá realizar un análisis más profundo cuando se cuantifique la demanda y se realice la gestión del sistema).

El Rango Reajustado es menor en la serie generada con una variación del 39% y el Coeficiente de Hurst es menor para la serie generada con una variación del 14%. Con respecto a la capacidad de almacenamiento tendrá su propio análisis más adelante, solo mencionar que la mayor variación de este estadístico se produjo cuando el nivel de demanda fue de 90%.

Tomando como base los estadísticos básicos, podemos decir que las series sintéticas generadas mensuales son equiprobables que la serie histórica mensual. Sin embargo, debido a la variabilidad de los estadísticos de sequía con diferentes niveles de demanda, se deberá realizar un análisis más detallado de éste estadístico cuando se estime la demanda real y se realice la gestión del sistema.

4.2.3.4 Aplicación subcuenca del río Pindilig – Series Sintéticas Mensuales

Con la finalidad de realizar una comparación entre los estadísticos de la muestra histórica y los estadísticos de las series sintéticas, se han generado 100 series de 372 meses cada una (31 años), tanto para el modelo de media móvil MA (3) ajustado a la serie histórica mensual de la estación Dudas en Pindilig (Apartado 4.2.1.4 “Aplicación subcuenca del río Pindilig – Escala Mensual”) como para los modelos PARMA ajustados a la serie histórica mensual de la estación Dudas en Pindilig (Apartado 4.2.2.3 “Aplicación subcuenca del río Pindilig”).

Hay que recordar que los modelos PARMA se ajustaran según cada mes, o sea el modelo PARMA (1,0) se aplicará para los meses abril, junio, julio, septiembre, octubre y noviembre,

el modelo PARMA (3,0) se aplicará para el mes de mayo, el modelo PARMA (0,2) se aplicará para el mes de marzo, el modelo PARMA (0,3) se aplicará para los meses de enero y febrero y el modelo PARMA (1,1) para los meses agosto y diciembre. Los resultados se muestran a continuación.

Tabla 4.44: Comparación de estadísticos de la Serie Histórica Mensual y la Serie Sintética Mensual Generada - Modelos MA y PARMA - Estación Dudas en Pindilig

Estadísticos	Serie Histórica	Serie Generada (MA)	Variación (MA)	Serie Generada (PARMA)	Variación (PARMA)
Media	8.7946	8.7392	0.63%	8.6910	1.19%
Desv_Estand	5.2256	5.1484	1.50%	5.1449	1.57%
Varianza	27.3068	26.5064	3.02%	26.6341	2.53%
Sesgo	1.4906	1.5201	-1.94%	1.5507	-3.87%
Min	1.7544	1.2197	43.83%	1.2650	38.69%
Max	33.9621	33.7891	0.51%	33.6229	1.01%

Podemos observar que los dos modelos muestran una buena reproducción de los estadísticos de la muestra histórica, no obstante los valores mínimos presentan una variación considerable para los dos modelaciones, pero esto no es una desventaja, dado que las series están generando valores menores, en cuyo caso estaríamos en las condiciones más desfavorables. Por otro lado el modelo MA muestra una mejor reproducción de los estadísticos de la muestra histórica comparados con los modelos PARMA.

Tabla 4.45: Comparación de estadísticos de sequía y almacenamiento de la Serie Histórica y la Serie Generada [mensual] – Nivel de demanda [26%] de la media de aportaciones mensuales de la estación Dudas en Pindilig - Modelos MA y PARMA

Estadísticos	Serie Histórica	Serie Generada (MA)	Variación (MA)	Serie Generada (PARMA)	Variación (PARMA)
Nivel de Demanda	26%	26%		26%	
Máxima duración déficit	3	1.2	150.00%	1.71	75.44%
Máxima magnitud déficit	0.58	1.08	-46.77%	1.28	-55.15%
Capacidad de Almacenamiento	0.58	1.08	-46.77%	1.28	-55.16%
Rango Reajustado	61.067	23.112	164.22%	30.787	98.36%
Coeficiente de Hurst	0.787	0.597	31.75%	0.650	21.09%

Con respecto a la información de la tabla tenemos que los estadísticos de las series generadas con los modelos PARMA representan de mejor manera a los estadísticos de la muestra histórica. Además podemos observar que la máxima duración del déficit es inferior en las dos series generadas (MA y PARMA), esto puede ser un inconveniente cuando se realice una gestión con anticipación a los periodos de sequía, sin embargo no es una variación muy amplia. En cambio la máxima magnitud del déficit y la capacidad de almacenamiento son superiores en ambas series generadas lo cual hace pensar que existirán escenarios con magnitudes superiores de déficit y de capacidades de almacenamiento, no obstante tampoco son variaciones muy amplias.

El Rango Reajustado y el Coeficiente de Hurst tienen la menor variación cuando se modela con los modelos PARMA, sin embargo existe una amplia variación en los valores del Rango Reajustado y una variación baja para el Coeficiente de Hurst.

Por lo expuesto y tomando en cuenta que no existe una variación considerable de los estadísticos de las series generadas con los modelos PARMA con respecto a los estadísticos de la serie histórica, se ha elegido estas series para trabajar en la gestión mensual con escenarios estocásticos.

Como conclusión de este procedimiento tenemos que la ventaja de introducir el concepto de estacionalidad implica una mejor reproducción de los estadísticos de la muestra histórica. Ahora si comparamos la modelación ARMA periódica con coeficientes constantes o variables, hay que hacer un análisis muy exhaustivo sobre la periodicidad marcada en los estadísticos de la serie histórica antes de proceder con una u otra modelación. Solo hacer notar que el ajuste de los modelos ARMA periódicos con coeficientes variables es largo y complejo y hay que poner en la balanza el costo que representa este trabajo con la mejora que se obtiene en la reproducción de los estadísticos de la serie histórica.

5. EVALUACIÓN DE LA DEMANDA

Como ya se mencionó en el capítulo 2, la información que contiene el detalle de la demanda en las subcuencas de estudio se encuentra dentro la base de datos que administra la Secretaria Nacional del Agua (SENAGUA). La base de datos básicamente contiene información sobre el uso del agua, caudal concesionado, número de personas servidas, número de hectáreas regadas, ubicación de la fuente de agua, y otra información que caracteriza la demanda. En los siguientes apartados se realizará un análisis de esta información para extraer los datos que servirán para nuestro modelo de simulación de la gestión.

5.1. DEMANDA ACTUAL

5.1.1 Subcuenca del río Tomebamba

En la subcuenca del río Tomebamba existen usos diversos (uso doméstico, riego, abrevaderos de ganado, etc.), el uso que predomina es el uso doméstico, seguido por el uso de riego y en menor cantidad los otros usos. En las tablas siguientes se resume esta información.

Tabla 5.1: Uso doméstico en la subcuenca del río Tomebamba

NOMBRE APROVECHAMIENTO	PERSONAS	CAUDAL (Lt/seg)	COTA	LATITUD	LONGITUD
RIO CULEBRILLAS	14500	92.00	2950	9685580	713540
RIO SAYAUSI	200000	400.00	2850	9683274	712589
RIO SAYAUSI	1512	2.00	2850	9683050	712990
RIO SAYAUSI	50000	100.00	2850	9683050	712990
RIO TOMBAMBAMBA	244000	1000.00	2728	9683150	712900
VERTIENTE SARACANCHI	4062	9.00	3300	9686850	713700
RIO CAPILLA	50	0.20	3040	9682800	711300
QUEBRADA SHUAJAPINA	150	0.45	3610	9688350	714250
RIO AMARILLO, QUEBRADA DUDAHUAYCO, VERTIENTE INGAPOYO, CARPIO Y PAGOL.	1075	2.26	3700	9685350	714750
VERTIENTE RIO NEGRO	1200	3.00	3010	9685950	709450

NOMBRE APROVECHAMIENTO	PERSONAS	CAUDAL (Lt/seg)	COTA	LATITUD	LONGITUD
VERTIENTE RIO NEGRO	1200	3.00	3010	9685950	709450
QUEBRADA SARACANCHE	165	0.50	3750	9688550	714450
VERTIENTES AURORA 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 Y 12	5	0.10	3440	9685150	708350
QUEBRADA CUCHEROS	5	0.01	3480	9692450	700200
QUEBRADA CUCHEROS	5	0.01	3480	9692450	700200
QUEBRADA SITICAY	175	0.48	2910	9685244	710523
VERTIENTE MINAS 1 Y 2	195	0.40	3640	9681168	704184
QUEBRADA EL LIRIO	402	1.75	2920	9686403	715189
QUEBRADA VENTANILLAS	5	0.01	3060	9680200	708800
VERTIENTE ZURROCUCHO	5	0.02	3080	9686050	706950
VERTIENTE ARROYO VENTANILLAS	5	0.02	3050	9686200	708800
RIO NEGRO	5	0.02	3050	9686180	709600
RIO CURIQUINGA	12	0.02	3360	9689730	706820
RIO LIRIO	450	0.70	3125	9684872	712344
QUEBRADA EL FOCTO	6	0.01	3150	9682760	711460
RIO CULEBRILLAS	1890	5.00	2875	9684950	714820
RIO TOMBAMBAMBA	100000	200.00	2736	9683058	713145
RIO CAPILLA	156	0.20	3000	9682663	710735
VERTIENTE SURO PUGRO	30	0.04	2880	9685720	700855
RIO LEÑATE	500	1.00	2915	9681493	712277
RIO CURIQUINGA	15	0.03	3330	9689500	706750
QUEBRADA CURIQUINGA	23	0.03	3200	9689106	706514

Según esta tabla se tiene un consumo actual de 4.7346 hectómetros cúbicos mensuales por uso doméstico, en donde hay que notar que las 6 concesiones otorgadas a la empresa municipal de agua potable de la ciudad de Cuenca (ETAPA) suman 4.6500 hectómetros cúbicos mensuales, un 98% del caudal total concesionado para consumo doméstico en la subcuenca.

Por lo tanto al ser este dato fundamental para nuestro análisis, se recopiló información de ETAPA, con la finalidad de tomar el valor que realmente está utilizando para consumo humano. La información recopilada se resume en la tabla siguiente.

Tabla 5.2: Registro del volumen mensual de agua cruda que ingresa a la planta de potabilización de agua perteneciente a ETAPA (2000 – 2009)

Año	Unidad	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2000	m ³	2,288,561	2,201,800	2,321,308	2,365,116	2,427,198	2,288,805	2,404,070	2,408,508	2,203,263	2,373,818	2,220,010	2,365,986
2001	m ³	2,331,697	2,221,711	2,426,896	2,353,384	2,356,881	2,334,091	2,362,051	2,309,450	2,298,479	2,371,342	2,398,025	2,299,331
2002	m ³	2,280,226	2,080,155	2,306,083	2,154,314	2,147,944	2,062,931	2,089,848	2,404,024	2,162,453	2,126,615	2,034,107	2,053,974
2003	m ³	2,119,284	2,045,676	2,195,618	2,099,105	2,139,372	2,076,624	2,111,789	2,097,013	2,091,990	2,161,723	2,070,464	2,119,257
2004	m ³	2,075,224	1,997,339	2,153,634	2,084,007	2,022,339	1,788,688	1,820,207	1,820,789	1,733,065	1,791,457	1,740,062	1,817,742
2005	m ³	1,772,270	1,592,538	1,718,054	1,666,589	1,753,323	1,720,847	1,729,138	1,734,954	1,664,691	1,719,040	1,961,970	1,730,310
2006	m ³	1,805,248	1,538,532	1,803,802	1,688,765	1,795,602	1,725,872	1,780,566	1,734,713	1,647,433	1,728,919	1,761,970	1,697,178
2007	m ³	1,752,228	1,537,213	1,679,431	1,544,696	1,708,814	1,608,064	1,649,197	1,579,078	1,549,235	1,652,908	1,611,507	1,676,238
2008	m ³	1,729,059	1,632,083	1,735,706	1,712,605	1,703,206	1,522,919	1,644,752	1,609,197	1,399,302	1,632,092	1,632,092	1,632,092
2009	m ³	1,682,228	1,547,203	1,732,431	1,691,696	1,778,814	1,733,064	1,799,197	1,801,078	1,791,235	1,621,807	1,806,454	1,789,991

La tabla muestra que el mayor volumen de agua cruda ingresado a la planta de potabilización es de 2.4272 hectómetros cúbicos que corresponde al mes de mayo del año 2000 (volumen menor al caudal concesionado), además muestra un descenso marcado durante los 5 primeros años y los 5 últimos años se mantiene aproximadamente constante. Esto es debido porque la ciudad de Cuenca se ha ido abasteciendo de agua de otras fuentes ubicadas en las subcuencas vecinas de la subcuenca del Tomebamba (Machangara y Yanuncay), provocando esta disminución en el uso del recurso.

Por lo tanto, como el análisis que se va a realizar es en el estado actual, se asumirá la última fila de la tabla anterior (año 2009) sumada un 20% (asumiendo que esas son las pérdidas de recurso desde la captación hasta la planta potabilizadora) como la información de la demanda actual en la ciudad de Cuenca que ingresará al modelo de simulación de la gestión.

La siguiente tabla muestra las concesiones destinadas para el riego en la subcuenca, la cantidad total de volumen de agua concesionado es de 0.7800 hectómetros cúbicos por mes, teniendo como mayores consumidores las zonas agrícolas que se encuentran en la parroquia San Joaquín (aproximadamente las dos terceras partes del caudal concesionado para riego en la subcuenca).

Tabla 5.3: Uso destinado para riego en la subcuenca del río Tomebamba

NOMBRE APROVECHAMIENTO	HECTAREAS	CAUDAL (Lt/seg)	COTA	LATITUD	LONGITUD
QUEBRADAS MINAS 1 Y 2	50.00	20.00	3655	9686000	711600
RIO CAPILLA	0.15	0.30	3040	9682800	711300
QUEBRADA DUDUNA HUAYCO Y DUCO	90.00	8.76	2950	9685100	715000
RIO TOMBAMBA	240.00	63.00	2710	9682291	713736
RIO TOMBAMBA	157.50	96.00	2650	9682291	713736
RIO AMARILLO, QUEBRADA DUDAHUAYCO, VERTIENTE INGAPOYO, CARPIO Y PAGOL.	220.00	18.00	3700	9685350	714750
VERTIENTES AURORA 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 Y 12	50.00	5.71	3440	9685150	708350
QUEBRADA CUCHEROS	4.00	1.60	3480	9692450	700200
QUEBRADA CUCHEROS	4.00	1.60	3480	9692450	700200
VERTIENTE PUCARA	0.50	0.02	2865	9683200	713900
QUEBRADA VENTANILLAS	5.00	2.54	3060	9680200	708800
VERTIENTE ZURROCUCHO	20.00	0.69	3080	9686050	706950
VERTIENTE ARROYO VENTANILLAS	0.09	0.08	3050	9686200	708800
VERTIENTE QUEBRADA VERDECOCHA	8.00	1.56	3474	9688975	705047
QUEBRADA VENTANILLAS	1.05	0.52	3060	9686240	708720
RIO NEGRO	5.00	1.75	3050	9686180	709600
RIO TOMBAMBA Y QUEBRADAS: DOS CHORRERAS, AGUAS REGADAS	78.25	4.50	3340	9694716	704051
RIO CURIQUINGA	1.80	0.88	3360	9689730	706820
QUEBRADA EL FOCTO	2.50	0.92	3150	9682760	711460
QUEBRADA EL LIRIO	1.50	0.50	3080	9685056	712592
VERTIENTES VELACRUZ, SAGRARUMI, TAQUI RUMI, MONTENEGRO, PUMA MAQUI, SUMILLANO, PALLCARRUMI	43.00	12.91	3400	9679896	711811
QUEBRADA TRANCAS HUAYCO	105.01	32.00	2965	9681845	712880
RIO LEÑATE	9.84	3.00	2950	9681480	713420
VERTIENTES LAGUNAS PATOCOCHA CHICO, PATOCOCHA GRANDE, BARRANCOS Y VERDECOCHA	50.00	17.50	3350	9689111	712599

NOMBRE APROVECHAMIENTO	HECTAREAS	CAUDAL (Lt/seg)	COTA	LATITUD	LONGITUD
RIO CURIQUINGA	12.00	4.66	3330	9689500	706750
QUEBRADA CURIQUINGA	5.00	1.50	3200	9689106	706514

Otros usos como abrevaderos de ganado no son muy significativo con un caudal total igual a 1.26 lt/seg, el mismo que se reparte según la siguiente tabla.

Tabla 5.4: Uso destinado para abrevaderos de ganado en la subcuenca del río Tomebamba

NOMBRE APROVECHAMIENTO	SEMOVIENTES	CAUDAL (Lt/seg)	COTA	LATITUD	LONGITUD
RIO CAPILLA	50	0.10	3040	9682800	711300
QUEBRADA SHUAJAPINA	210	0.35	3610	9688350	714250
VERTIENTES AURORA 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 Y 12	80	0.20	3440	9685150	708350
QUEBRADA CUCHEROS	10	0.02	3480	9692450	700200
QUEBRADA CUCHEROS	10	0.02	3480	9692450	700200
VERTIENTE PUCARA	5	0.01	2865	9683200	713900
QUEBRADA VENTANILLAS	25	0.05	3060	9680200	708800
VERTIENTE ZURROCUCHO	80	0.15	3080	9686050	706950
VERTIENTE ARROYO VENTANILLAS	2	0.00	3050	9686200	708800
QUEBRADA VENTANILLAS	41	0.08	3060	9686240	708720
RIO NEGRO	25	0.05	3050	9686180	709600
VERTIENTE ZHIÑAPAMBA	6	0.04	2970	9684300	713500
QUEBRADA EL FOCTO	35	0.07	3150	9682760	711460
RIO CURIQUINGA	60	0.11	3330	9689500	706750
QUEBRADA CURIQUINGA	18	0.01	3200	9689106	706514

Y finalmente otro uso es el destinado a las piscícolas, haciendo notar que dos concesiones abarcan el 83% del caudal concesionado, estas son las piscícolas pertenecientes al Ministerio de Industrias y Productividad del Ecuador (MIPRO) ubicadas en Chirimachay. La tabla siguiente lista las concesiones para piscícolas en la subcuenca.

Tabla 5.5: Uso destinado para piscícolas en la subcuenca del río Tomebamba

NOMBRE APROVECHAMIENTO	PISCINAS	CAUDAL (Lt/seg)	COTA	LATITUD	LONGITUD
LAGUNA DE LLAVIUCU		0.60	3140	9686202	706632
RIO TOMBAMBA Y QUEBRADA VERDE COCHA	6	100.00	3310	9690150	705250
QUEBRADA GALLO CANTANA	5	70.00	3600	9689889	706267
VERTIENTE AVILAHUAYCO	4	2.00	3776	9693278	700280
VERTIENTE TARQUIHURCO	8	4.00	3720	9691189	700339
VERTIENTES LAGUNAS PATOCOCHA CHICO, PATOCOCHA GRANDE, BARRANCOS Y VERDECOCHA	5	17.50	3350	9689111	712599
RIO QUINOAS	1	0.60	3660	9693277	700558
VERTIENTE CUCHEROS	11	9.40	3790	9690669	698855

5.1.1.1 Agrupación de demandas de la subcuenca del río Tomebamba.

Con la finalidad de que sea un esquema de fácil introducción en el modelo de simulación de la gestión, se realizó una agrupación de las demandas por prioridad en uso y por el peso que tienen las demandas que utilizan un mayor volumen de recurso. Así, se comenzó con la demanda para consumo doméstico de la ciudad de Cuenca (mayor usuario de la cuenca del río Tomebamba), la misma que se tomó individualmente por tener un volumen considerable solicitado, resultando la información que se muestra en la tabla 5.6 (derivada de la tabla 5.2).

Tabla 5.6: Demanda de uso doméstico para la ciudad de Cuenca

MES	VOLUMEN (HM3/MES)
ENERO	2.0187
FEBRERO	1.8566
MARZO	2.0789
ABRIL	2.0300
MAYO	2.1346
JUNIO	2.0797
JULIO	2.1590
AGOSTO	2.1613
SEPTIEMBRE	2.1495
OCTUBRE	1.9462
NOVIEMBRE	2.1677
DICIEMBRE	2.1480

Los otros usos de agua domésticos en la subcuenca se han agrupado de tal manera que sean otra demanda para ingresar al modelo de simulación de la gestión, por lo tanto realizando la adición de estos usos dio como resultado la cantidad de 0.0846 hectómetros cúbicos por mes, la misma que se ha asumido constante en todos los meses del año, debido a que no se tiene otra información.

Siguiendo con los usos para riego, se han dividido en dos demandas, una para las zonas agrícolas de la Parroquia San Joaquín, y otra para las zonas agrícolas de la Parroquia Sayausí. Los resultados de estas agrupaciones se muestran en la tabla 5.7, también se asumen constantes en el año.

Tabla 5.7: Agrupación de las demandas de riego en la subcuenca del río Tomebamba

ZONAS AGRICOLAS	VOLUMEN HM3/MES
PARROQUIA SAN JOAQUIN	0.5770
PARROQUIA SAYAUSI	0.2029
TOTAL	0.7799

Por otro lado se ha tomado como una sola demanda los usos restantes, los mismos que se han agrupado dando un volumen de consumo igual a 0.5323 hectómetros cúbicos, de igual manera se considera constante en el año.

Por último, y con la finalidad de atender los requerimientos ambientales de los ecosistemas del entorno, se ha considerado un caudal ecológico. Este caudal debería ser el que imite de mejor manera el régimen natural, por lo tanto su cálculo debe ser detallado y bien fundamentado, sin embargo debido al alcance del presente trabajo se ha asumido un caudal de 10% de los caudales medios mensuales ($0.617 \text{ m}^3/\text{seg}$), considerando el registro histórico de caudales.

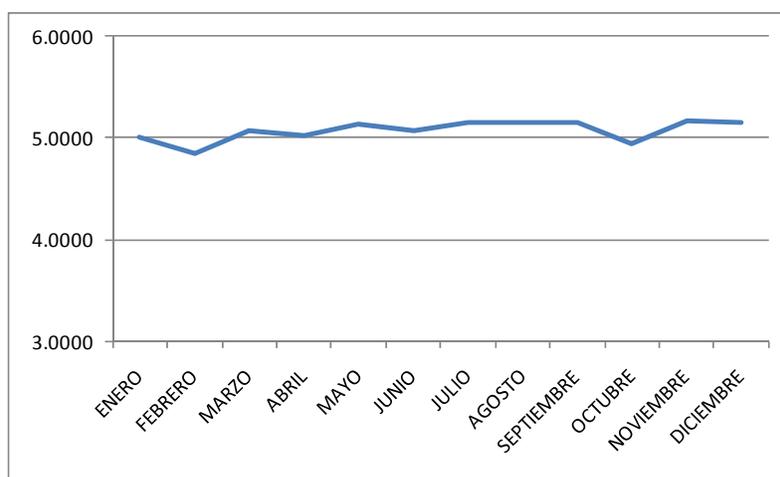
El resumen de todas las demandas que ingresarán al modelo de simulación de la gestión de la subcuenca del río Tomebamba se muestra en la tabla 5.8.

Tabla 5.8: Valores de demandas actuales en la subcuenca del río Tomebamba

MES	Demanda consumo humano ciudad de Cuenca (HM3/MES)	Demanda consumo humano otros usos (HM3/MES)	Demanda riego parroquia San Joaquín (HM3/MES)	Demanda riego parroquia Sayausi (HM3/MES)	Demanda otros usos (HM3/MES)	TOTAL (HM3/MES)
ENERO	2.0187	0.0846	0.5770	0.2029	0.5323	3.4154
FEBRERO	1.8566	0.0846	0.5770	0.2029	0.5323	3.2534
MARZO	2.0789	0.0846	0.5770	0.2029	0.5323	3.4757
ABRIL	2.0300	0.0846	0.5770	0.2029	0.5323	3.4268
MAYO	2.1346	0.0846	0.5770	0.2029	0.5323	3.5313
JUNIO	2.0797	0.0846	0.5770	0.2029	0.5323	3.4764
JULIO	2.1590	0.0846	0.5770	0.2029	0.5323	3.5558
AGOSTO	2.1613	0.0846	0.5770	0.2029	0.5323	3.5581
SEPTIEMBRE	2.1495	0.0846	0.5770	0.2029	0.5323	3.5462
OCTUBRE	1.9462	0.0846	0.5770	0.2029	0.5323	3.3429
NOVIEMBRE	2.1677	0.0846	0.5770	0.2029	0.5323	3.5645
DICIEMBRE	2.1480	0.0846	0.5770	0.2029	0.5323	3.5448

En la figura 5.1 se muestra un gráfico de la variación mensual de la demanda en la subcuenca sumado los requerimientos ambientales. Se puede observar que prácticamente no existe variación considerable en los meses del año.

Figura 5.1: Variación mensual de la demanda en la subcuenca del río Tomebamba



5.1.2 Subcuenca del río Pindilig

En la subcuenca del río Pindilig existen los usos siguientes: doméstico, riego, abrevaderos de ganado y uso para piscícolas, los usos que predominan son el uso doméstico y el uso para riego, los mismo que pertenecen al Proyecto de uso múltiple del agua para Paute y Azogues (PUMA), los otros usos tienen un caudal mucho menor comparado con los caudales del PUMA. En las tablas siguientes se resume esta información.

Tabla 5.9: Uso doméstico en la subcuenca del río Pindilig

NOMBRE APROVECHAMIENTO	PERSONAS	CAUDAL (Lt/seg)	COTA	LATITUD	LONGITUD
VERTIENTE PLAN DE ROSAS-PASO AMARILLO	25	0.0500	3520	9706300	756350
VERTIENTE GALSAO	10	0.0500	2680	9710429	758811
VERTIENTE ZHUNGZHUNCAI	5	0.0100	3275	9706541	755552
VERTIENTES YACUSHARINA Y ALBERJILLAS	5	0.0500	3490	9708200	752300
VERTIENTE PILZHUN	80	0.1600	3410	9706200	748650
VERTIENTE QUINCAY - SAN JOSE	190	0.3000	2900	9710170	758177
VERTIENTE MANGLAR ALTO	5	0.0100	3905	9712800	757360
QUEBRADA DUDAS VAQUERIA	15	0.0300	2890	9711600	756450
VERTIENTE ESCALERA DE LA VIRGEN 1	1	0.0022	3040	9711993	755896
VERTIENTE ESCALERA DE LA VIRGEN 2	10	0.0289	3010	9711768	755765
VERTIENTE ESCALERA DE LA VIRGEN 3	10	0.0289	3015	9711843	755787
VERTIENTE MAPAYACU	150	0.1960	2750	9710063	757833
VERTIENTE CHONTA CHACA No. 3	61	0.0110	2695	9710017	757373
VERTIENTE LAS CABECERAS DE VERDELLANO 1, 2 Y 3	95	0.1090	2530	9703433	751502
VERTIENTES YUNGUILLA, HUACHARIN, ALVERJILLAS 1,2,3, MACHOPASANA, QUESERA, MACHOPASANA PUCUN Y R CACHI CORRAL	5	0.0100	3283	9708539	753005
VERTIENTE MOROCHO QUIGUA 1	332	0.1800	2920	9709587	757465
RIO NINGAR Y OTROS	91587	159.0000	3320	9715485	750383
VERTIENTE HUICHICELA 1	171	0.1970	2900	9709742	754642

Como se anoto anteriormente el mayor uso es para el PUMA con un caudal concesionado de 159 lt/seg que utilizan aproximadamente 90000 personas. Los otros usos domésticos suman 1.423 lt/seg que representa 1.25% del caudal concesionado total para uso doméstico en la subcuena del río Pindilig.

Tabla 5.10: Uso destinado para riego en la subcuena del río Pindilig

NOMBRE APROVECHAMIENTO	HECTAREAS	CAUDAL (Lt/seg)	COTA	LATITUD	LONGITUD
VERTIENTE PLAN DE ROSAS-PASO AMARILLO	1	0.3380	3520	9706300	756350
VERTIENTE ZHUNGZHUNCAI	10	4.9200	3275	9706541	755552
VERTIENTES YACUSHARINA Y ALBERJILLAS	80	3.4900	3490	9708200	752300
VERTIENTE MANGLAR ALTO	20	4.4000	3905	9712800	757360
QUEBRADA DUDAS VAQUERIA	10	3.5850	2890	9711600	756450
VERTIENTE ESCALERA DE LA VIRGEN 1	1	0.0249	3040	9711993	755896
VERTIENTE ESCALERA DE LA VIRGEN 2	11	0.3325	3010	9711768	755765
VERTIENTE ESCALERA DE LA VIRGEN 3	11	0.3325	3015	9711843	755787
VERTIENTE GUZGUZ	10	1.0400	3030	9713915	752850
VERTIENTE LAS CABECERAS DE VERDELLANO 1, 2 Y 3	1	0.3700	2530	9703433	751502
VERTIENTES YUNGUILLA, HUACHARIN, ALVERJILLAS 1,2,3, MACHOPASANA, QUESERA, MACHOPASANA PUCUN Y R CACHI CORRAL	16	7.7230	3283	9708539	753005
VERTIENTE TAURI GRANDE Y TAURI CHICO	40	20.0000	3100	9719580	749549
RIO NINGAR Y OTROS	370	259.3240	3320	9715485	750383

La tabla anterior muestra las concesiones destinadas para el riego en la subcuena del río Pindilig, el caudal total concesionada es de 314 lt/seg, donde el 83% se destina para el proyecto PUMA y el 17% para los otros usos de riego.

Existen otros usos del agua para piscícolas y abrevaderos de ganado, pero estos no son significativos, tiene un caudal total concesionado de 4.11 lt/seg. Las tablas siguientes muestran la repartición de este caudal.

Tabla 5.11: Uso destinado para abrevaderos de ganado en la subcuenca del río Pindilig

NOMBRE APROVECHAMIENTO	SEMOVIENTES	CAUDAL (Lt/seg)	COTA	LATITUD	LONGITUD
QUEBRADA DUDAS VAQUERIA	25	0.0450	2890	9711600	756450
VERTIENTE ESCALERA DE LA VIRGEN 1	1	0.0029	3040	9711993	755896
VERTIENTE ESCALERA DE LA VIRGEN 2	19	0.0386	3010	9711768	755765
VERTIENTE ESCALERA DE LA VIRGEN 3	19	0.0386	3015	9711843	755787
VERTIENTE LAS CABECERAS DE VERDELLANO 1, 2 Y 3	85	0.0390	2530	9703433	751502
VERTIENTE MANGLAR ALTO	50	0.0800	3905	9712800	757360
VERTIENTE PLAN DE ROSAS-PASO AMARILLO	26	0.0120	3520	9706300	756350
VERTIENTE ZHUNGZHUNCA Y	80	0.0700	3275	9706541	755552
VERTIENTES YACUSHARINA Y ALBERJILLAS	40	0.0700	3490	9708200	752300
VERTIENTES YUNGUILLA, HUACHARIN, ALVERJILLAS 1,2,3, MACHOPASANA, QUESERA, MACHOPASANA PUCUN Y R CACHI CORRAL	58	0.0270	3283	9708539	753005

Tabla 5.12: Uso destinado para piscícolas en la subcuenca del río Pindilig

NOMBRE APROVECHAMIENTO	PISCINAS	CAUDAL (Lt/seg)	COTA	LATITUD	LONGITUD
VERTIENTE ZHUNGZHUNCA Y	1	3.0000	3275	9706541	755552

5.1.2.1 Agrupación de demandas de la subcuenca del río Pindilig.

Pensando en un esquema de fácil introducción en el modelo de simulación de la gestión, se ha realizado una agrupación de las demandas por tipo de uso y por la utilización mayoritaria del recurso hídrico. De esta manera se dividió en 5 demandas las mismas que se detallan en la siguiente tabla. Hay que hacer notar que las demandas son constantes durante todo el año.

Tabla 5.13: Valores de demandas actuales en la subcuenca del río Pindilig

MES	Demanda consumo humano PUMA (HM3/MES)	Demanda consumo humano otros usos (HM3/MES)	Demanda riego PUMA (HM3/MES)	Demanda riego otros usos (HM3/MES)	Demanda otros usos (HM3/MES)	TOTAL (HM3/MES)
ENERO	0.4121	0.0052	0.6722	0.1412	0.0107	1.2413
FEBRERO	0.4121	0.0052	0.6722	0.1412	0.0107	1.2413
MARZO	0.4121	0.0052	0.6722	0.1412	0.0107	1.2413
ABRIL	0.4121	0.0052	0.6722	0.1412	0.0107	1.2413
MAYO	0.4121	0.0052	0.6722	0.1412	0.0107	1.2413
JUNIO	0.4121	0.0052	0.6722	0.1412	0.0107	1.2413
JULIO	0.4121	0.0052	0.6722	0.1412	0.0107	1.2413
AGOSTO	0.4121	0.0052	0.6722	0.1412	0.0107	1.2413
SEPTIEMBRE	0.4121	0.0052	0.6722	0.1412	0.0107	1.2413
OCTUBRE	0.4121	0.0052	0.6722	0.1412	0.0107	1.2413
NOVIEMBRE	0.4121	0.0052	0.6722	0.1412	0.0107	1.2413
DICIEMBRE	0.4121	0.0052	0.6722	0.1412	0.0107	1.2413

Por último se ha considerado un caudal ecológico de un 10% de los caudales medios mensuales ($0.33 \text{ m}^3/\text{seg}$), considerando el registro histórico de caudales.

5.2. DEMANDA FUTURA

Se ha considerado un análisis de la demanda futura con la finalidad de trabajar con escenarios futuros para la gestión de los sistemas de recursos hídricos en las subcuencas de estudio en el caso de que se planifique la implementación de estructuras de regulación.

La proyección de la demanda futura se lo ha realizado de una manera muy sencilla sin realizar un análisis profundo, dado que no es el objetivo del presente trabajo, sin embargo se podría afinar los cálculos en próximos trabajos.

Para la proyección de la demanda futura se ha considerado las posibles proyecciones de la población, hectáreas de riego, semovientes y piscícolas según criterios de conocimiento de

las zonas de estudio y también de datos históricos de población que se han logrado conseguir. Además se ha considerado las posibles proyecciones en las dotaciones de los usos del recurso hídrico (consumo humano, riego, abrevaderos de ganado y piscícolas), igualmente según criterios de conocimiento de las zonas de estudio. Las proyecciones se realizarán para el año 2040, tomando como año de inicio el año 2010.

5.2.1 Subcuenca del río Tomebamba

Un resumen de los usos actuales de agua y su dotación actual, se muestra en la tabla 5.9, la misma que fue construida haciendo un análisis de la base de datos total de concesiones de agua (SENAGUA) y los registros de la planta de potabilización de agua perteneciente a ETAPA.

Tabla 5.14: Usos de agua y dotaciones en la subcuenca del río Tomebamba

USO	UNIDAD	CANTIDAD	DOTACIÓN
Doméstico	Habitantes	414862	173.72 lt/hab*dia
Riego	Hectáreas	1165	0.26 lt/seg*ha
Abrevaderos	Semovientes	663	4.91 m ³ /semoviente*mes
Piscícolas	Piscinas	41	4.98 lt/seg*piscina

A continuación se realizará un análisis por cada uso del recurso hídrico, además se considera que en el futuro no existirán otros usos, salvo el uso para hidroelectricidad donde su reintegro de agua se asumirá inmediatamente aguas abajo, como si fuera en el mismo punto de derivación.

Uso doméstico

Se ha logrado conseguir los datos de dos censos de población de los años 1990 y 2001 de las parroquias que están contenidas en la subcuenca del río Tomebamba. Esta información se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 5.15: Datos poblacionales de las parroquias contenidas en la subcuenca del río

Tomebamba

PARROQUIA	CENSO 1990	CENSO 2001
CUENCA	198390	278995
SAN JOAQUIN	5197	5126
SAYAUSI	6743	6643
TOTAL	210330	290764

Haciendo una relación lineal entre los dos datos poblacionales totales se tiene que en 11 años existe un crecimiento de un 38.24%, o sea una tasa de crecimiento anual de 3.48%. Este valor se utilizará para la proyección de la población de uso doméstico en la subcuenca para el año 2040.

Ahora con respecto a la dotación para uso doméstico indicada en la tabla 5.9, se ha asumido que el consumo futuro por familia será igual a 1 m³ por mes (200 lt/hab*día en una familia de 5 personas), dado que es un promedio aproximado de consumo de una familia en una ciudad.

Uso para riego

En la tabla 5.10 muestra que existe un decrecimiento poblacional en las parroquias rurales de San Joaquín y Sayausi debido a la migración de los pobladores a localidades principales como la ciudad de Cuenca. Entonces se presume que no existirán mayores cambios en el sector agrícola y por ende en la demanda de riego. Por lo que se tomará el valor de la demanda actual para la demanda futura.

Uso para abrevaderos de ganado

Debido al no muy explotado sector agropecuario en la zona, se puede asumir que esta demanda no cambiará en el futuro. Por lo que se tomará el valor de la demanda actual.

Uso para piscícolas

Este uso es muy común en la subcuenca, dado que la zona tiene un clima que se presta para esta actividad sobre todo en el criadero de truchas, es por esto que tomando el crecimiento

de permisos en los últimos 11 años para utilización de agua para estos fines, se tiene un crecimiento lineal aproximado de 54.54%, o sea una tasa de crecimiento anual de 4.96%. Por lo tanto este valor se utilizará para la proyección de piscinas utilizadas para uso en piscícolas. Con respecto a la dotación se mantendrá la misma que se muestra en la tabla 5.9

Entonces, realizando los cálculos respectivos para las proyecciones futuras, se construyó la tabla siguiente para la demanda futura, haciendo notar que el caudal ecológico se mantuvo para el futuro (0.617 m³/seg).

Tabla 5.16: Valores de demandas futuras en la subcuenca del río Tomebamba

MES	Demanda consumo humano ciudad de Cuenca (HM3/MES)	Demanda consumo humano otros usos (HM3/MES)	Demanda riego parroquia San Joaquín (HM3/MES)	Demanda riego parroquia Sayausi (HM3/MES)	Demanda otros usos (HM3/MES)	TOTAL (HM3/MES)
ENERO	4.8313	0.2024	0.5770	0.2029	1.3462	7.1598
FEBRERO	4.4435	0.2024	0.5770	0.2029	1.3462	6.7720
MARZO	4.9754	0.2024	0.5770	0.2029	1.3462	7.3040
ABRIL	4.8585	0.2024	0.5770	0.2029	1.3462	7.1870
MAYO	5.1087	0.2024	0.5770	0.2029	1.3462	7.4372
JUNIO	4.9773	0.2024	0.5770	0.2029	1.3462	7.3058
JULIO	5.1672	0.2024	0.5770	0.2029	1.3462	7.4957
AGOSTO	5.1726	0.2024	0.5770	0.2029	1.3462	7.5011
SEPTIEMBRE	5.1443	0.2024	0.5770	0.2029	1.3462	7.4729
OCTUBRE	4.6577	0.2024	0.5770	0.2029	1.3462	6.9863
NOVIEMBRE	5.1880	0.2024	0.5770	0.2029	1.3462	7.5166
DICIEMBRE	5.1408	0.2024	0.5770	0.2029	1.3462	7.4693

5.2.2 Subcuenca del río Pindilig

Un resumen de los usos actuales de agua y su dotación actual, se muestra en la tabla 5.17, la misma que fue construida haciendo un análisis de la base de datos total de concesiones de agua (SENAGUA).

Tabla 5.17: Usos de agua y dotaciones en la subcuenca del río Pindilig

USO	UNIDAD	CANTIDAD	DOTACIÓN
Doméstico	Habitantes	92932	149.6957 lt/hab*día
Riego	Hectáreas	707	0.4445 lt/seg*ha
Abrevaderos	Semovientes	860	3.3488 m3/semov*mes
Piscícolas	Piscinas	1	3.0000 lt/seg*piscina

A continuación se realizará un análisis por cada uso del recurso hídrico, además se considera que en el futuro no existirán otros usos, salvo el uso para hidroelectricidad.

Uso doméstico

Mediante la relación lineal de los datos de población de los años 1990 y 2001 de las parroquias Pindilig y Taday que están contenidas en la subcuenca del río Pindilig, se ha realizado una proyección futura de la población hasta el año 2040. La información de población se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 5.18: Datos poblacionales de las parroquias Pindilig y Taday en la subcuenca del río Pindilig

PARROQUIA	CENSO 1990	CENSO 2001
PINDILIG	2151	2262
TADAY	1731	1666
TOTAL	3882	3928

Haciendo una relación lineal entre los valores totales de población se tiene un crecimiento de 1.18% en 11 años, o sea una tasa de crecimiento anual de 0.11%.

Ahora con respecto a la dotación para uso doméstico indicada en la tabla 5.17, se ha asumido que el consumo futuro por familia será de 180 lt/hab*día.

Uso para riego

Se asumirá que la tasa de cambio en el uso de riego sea la misma que la tasa de cambio de la población, debido a que el sector agrícola es una de las fuentes económicas de los pobladores. La dotación se asumirá constante.

Uso para abrevaderos de ganado

De igual forma el sector agropecuario es una de las fuentes de ingreso de los pobladores, por lo que se asumirá una tasa de cambio igual a la tasa de cambio de la población. La dotación se asumirá constante.

Uso para piscícolas

Este uso no es muy común en la subcuenca, por lo que se asumirá constante.

Entonces, una vez realizado los cálculos se obtuvo los resultados que se muestran en la tabla 5.19. Hay que hacer notar que el caudal ecológico se mantuvo para el futuro (0.33 m³/seg).

Tabla 5.19: Valores de demandas futuras en la subcuenca del río Pindilig

MES	Demanda consumo humano PUMA (HM3/MES)	Demanda consumo humano otros usos (HM3/MES)	Demanda riego PUMA (HM3/MES)	Demanda riego otros usos (HM3/MES)	Demanda otros usos (HM3/MES)	TOTAL (HM3/MES)
ENERO	0.5106	0.0075	0.6939	0.1457	0.0107	1.3684
FEBRERO	0.5106	0.0075	0.6939	0.1457	0.0107	1.3684
MARZO	0.5106	0.0075	0.6939	0.1457	0.0107	1.3684
ABRIL	0.5106	0.0075	0.6939	0.1457	0.0107	1.3684
MAYO	0.5106	0.0075	0.6939	0.1457	0.0107	1.3684
JUNIO	0.5106	0.0075	0.6939	0.1457	0.0107	1.3684
JULIO	0.5106	0.0075	0.6939	0.1457	0.0107	1.3684
AGOSTO	0.5106	0.0075	0.6939	0.1457	0.0107	1.3684
SEPTIEMBRE	0.5106	0.0075	0.6939	0.1457	0.0107	1.3684
OCTUBRE	0.5106	0.0075	0.6939	0.1457	0.0107	1.3684
NOVIEMBRE	0.5106	0.0075	0.6939	0.1457	0.0107	1.3684
DICIEMBRE	0.5106	0.0075	0.6939	0.1457	0.0107	1.3684

5.3. GARANTÍAS DE LAS DEMANDAS

Se puede definir garantía como la probabilidad de que el sistema se halle en una situación satisfactoria, entendiendo por tal aquella en que el suministro es superior a la demanda solicitada (Balairón, 2002). A partir de esta definición se encuentra lo que se denomina fallo del sistema, entendiéndose que es la situación de insatisfacción en el suministro [Déficit > % demanda (mensual o anual)].

Para la estimación de las garantías suelen emplearse criterios basados en frecuencia de fallos y déficit en distintos períodos. Por citar algunos se tiene los índices basados en la ocurrencia, duración, severidad y repercusión económica de los fallos (Balairón, 2002).

Los índices basados en la ocurrencia de fallos son los de más amplia utilización (Balairón, 2002), consisten en definir la garantía como la probabilidad de que el sistema se halle en una situación satisfactoria (el suministro es suficiente para satisfacer la demanda). La probabilidad de las situaciones contrarias representa el riesgo de fallo. Por lo tanto a escala mensual y escala anual se tiene que la garantía G se calcula por:

$$G \text{ mensual} = \left(1 - \frac{n^{\circ} \text{ de fallos}}{n^{\circ} \text{ de meses totales}}\right) * 100$$

$$G \text{ anual} = \left(1 - \frac{n^{\circ} \text{ de fallos}}{n^{\circ} \text{ de años totales}}\right) * 100$$

Los índices basados en la severidad de los fallos describen la magnitud de éstos, por ejemplo tenemos al déficit como la representación de la demanda que no ha sido servida (demanda>suministro). El déficit puede referirse tanto a un mes (o año) y/o a n meses (o años) consecutivos.

A continuación las tablas 5.12 Y 5.13 (Recopiladas de Balairón, 2002) muestran algunos índices de garantía más frecuentemente empleados en diferentes instituciones

norteamericanas y la tabla 5.14 muestra algunos criterios utilizados en algunos planes hidrológicos de España.

Tabla 5.20: Índices basados en la severidad de los fallos utilizados en diversos organismos

<i>Organismo</i>	<i>Uso del agua</i>	<i>Déficit 1 año</i>	<i>Déficit 2 años</i>	<i>Déficit 10 años</i>	<i>Déficit 20 años</i>
Harvard Water Program	Regadíos	0,50 D			1,50 D
U.S. Bureau of Reclamation	Regadíos	0,50 D		D	
	Doméstico	0,15 D			
Utah Department of Water Resources	Regadíos	0,50 D	0,75 D	D	
Denver Water Department	Doméstico	0			
California Department of Water Resources	Doméstico	0			

Tabla 5.21: Índices basados en la ocurrencia de los fallos de varios organismos

<i>Organismo</i>	<i>Uso del agua</i>	<i>Garantía</i>
Soil Conservation Service	Regadíos	$G_a = 80\%$
Seattle District Corps of Engineers	Doméstico	$G_a = 98\%$
	Regadíos	$G_a = 95\%$

Tabla 5.22: Índices basados en la severidad de los fallos utilizados en algunos planes hidrológicos de España

% de la demanda anual	UTAH y Libro Blanco (1998)	Orden Ministerial (1992)		Plan Hidrológico del Júcar (1997)		Plan Hidrológico del Tajo (1997)	
	Demanda agrícola	Demanda urbana	Demanda agrícola	Demanda urbana	Demanda agrícola	Demanda urbana	Demanda agrícola
Déficit anual >	50	De 5 a 10	De 20 a 40	10	25	5	20
Déficit de 2 años consecutivos >	75	De 10 a 16	De 30 a 60	16	40	10	30
Déficit de 10 años consecutivos >	100	De 16 a 30	De 40 a 80	30	80	17,5	40

Dado que el suministro de agua para consumo humano es muy susceptible en las poblaciones de las subcuencas de los ríos Tomebamba y Pindilig, se asumió que existe fallo cuando el déficit sea mayor que el 1% de la demanda mensual, para lo cual la garantía se evalúa mediante la fórmula de G mensual y deberá ser mayor o igual que el 95%.

Por otro lado se ha considerado el enfoque similar al departamento de recursos hídricos de Utah (UTAH-DWR) (Andreu et al, 2007) para las demandas anuales, con los siguientes criterios de fallo (existirá fallo si se cumple al menos un criterio):

Déficit anual a 1 año $>$ D% demanda anual

Déficit anual a 2 años consecutivos $>$ E% demanda anual

Déficit anual a 10 años consecutivos $>$ F% demanda anual

Donde D, E y F son iguales a 5, 10 y 16 para las demandas anuales de uso doméstico, y 20, 30 y 40 para las demandas anuales de uso para riego y otros usos.

6. SIMULACIÓN DE LOS SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

En este capítulo se construirá un diseño de los sistemas de recursos hídricos en estudio para la simulación de la gestión de los mismos, para lo cual se trabajará con el modelo SIMGES desarrollado por el Área de Ingeniería de Recursos Hídricos del Instituto de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente – Universidad Politécnica de Valencia. Este modelo forma parte del sistema de soporte de decisiones AQUATOOL⁸.

EL modelo simula la gestión de sistemas de recursos hidráulicos, en los que se dispone de elementos de regulación o almacenamiento, elementos de captación - transporte, elementos de utilización y/o consumo, y otros elementos adicionales que forman parte del sistema. El modelo puede ser utilizado para la determinación de capacidades de embalse, de conducciones, y de instalaciones de bombeo para unos niveles de demanda y de garantía dados, asimismo para la determinación de reglas de explotación más adecuadas para unos niveles de garantías exigidos, también para determinar las garantías que se obtienen para distintas hipótesis de infraestructura y de evolución de demandas, entre otras más (Andreu et al, 2007).

El proceso de simulación realiza una optimización de una red de flujo conservativa, mediante el cumplimiento de una función objetivo (satisfacción de las demandas, operación de embalses, etc.) sujeta a las restricciones de conservación de masa (continuidad) y los límites físicos de transporte de flujo en conducciones (ríos, quebradas, etc.) y capacidades de embalses (reservas) y otros elementos si los hubiere.

Este capítulo se desarrollará primero con la simulación mensual del escenario actual mediante la introducción de la información de la serie de aportaciones mensuales históricas y la demanda actual, luego con la simulación del escenario futuro con la introducción de la demanda futura y la información de la serie de aportaciones mensuales históricas, suponiendo que estas sucederán en el futuro, a continuación con la realización de un análisis de implementación de infraestructura de regulación y por último con una simulación de la

⁸ SSD AQUATOOL - <http://www.upv.es/aquatool/index.html> (Andreu J., Solera A., Paredes J., Pulido M.)

gestión mensual futura (en caso de planificar infraestructura de regulación) mediante la introducción de las series sintéticas mensuales de aportaciones (equiprobables a la serie histórica) y la demanda futura.

Hay que hacer notar que para el presente trabajo no se ha tomado en cuenta la variabilidad climática en el futuro, por lo tanto la simulación de la gestión (en caso de planificar infraestructura de regulación) se lo realizo con series sintéticas de aportaciones indistinguibles de la serie de aportaciones histórica original.

6.1. SIMULACIÓN DEL ESCENARIO ACTUAL

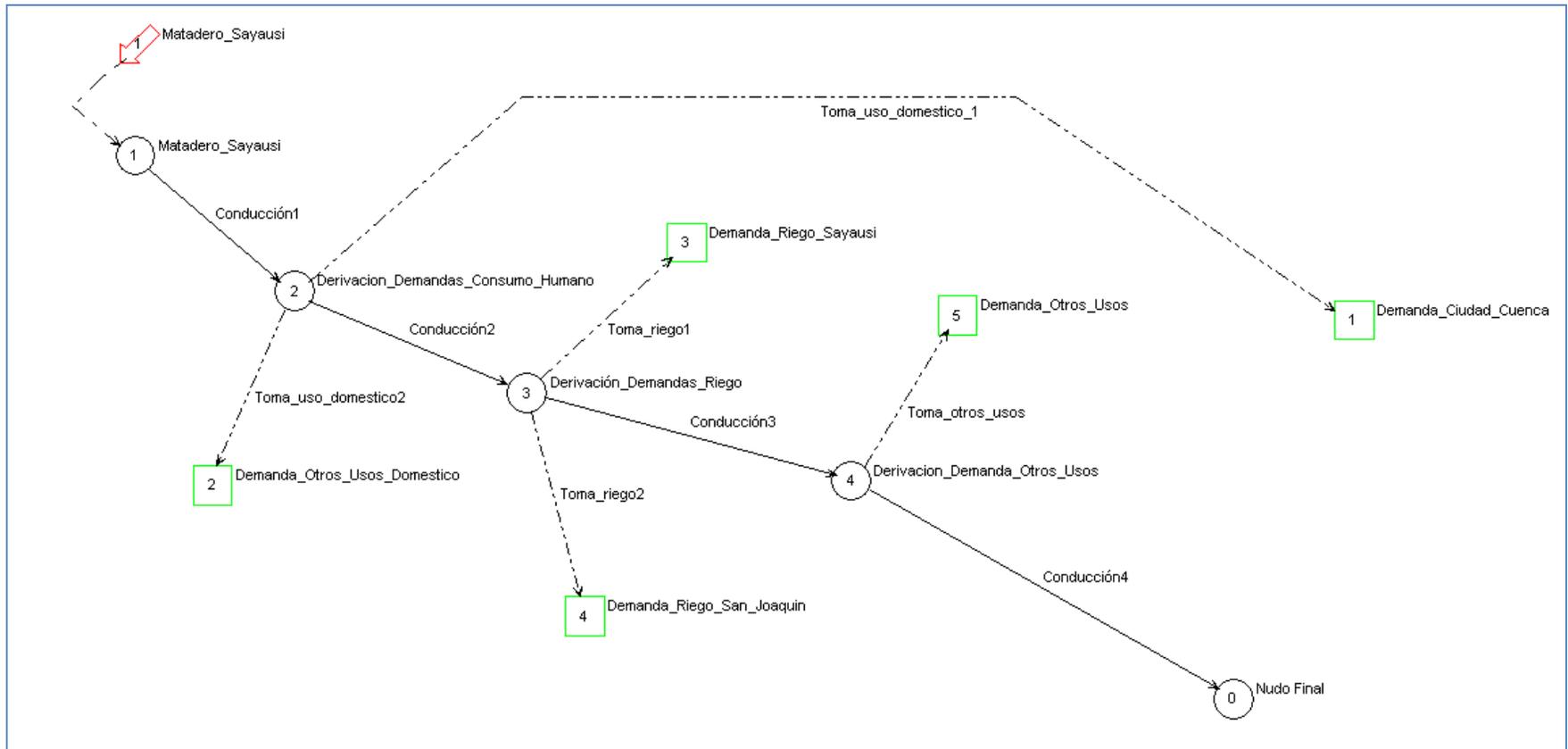
Como se indico anteriormente el escenario actual se simulará con las aportaciones históricas y la demanda actual. La garantía de las demandas se estimará mediante los valores expuestos en el subcapítulo 5.3. Hay que resaltar que la prioridad de utilización de agua ingresada en el modelo es primero el agua para consumo doméstico, luego el riego y al final los otros usos del agua.

A continuación se describe el proceso de simulación de los sistemas de recursos hídricos de las subcuencas de los ríos Tomebamba y Pindilig.

6.1.1 Subcuenca del río Tomebamba

Para la construcción del modelo se ha tomado en cuenta las aportaciones históricas en la estación hidrológica Matadero en Sayausi, las 5 demandas consuntivas evaluadas en el capítulo 5 y el caudal ecológico del sistema. Además se consideró que los retornos se los realice aguas abajo del sistema. El esquema construido para el sistema de recursos hídricos de la subcuenca del río Tomebamba se muestra en la figura 6.1.

Figura 6.1: Esquema del sistema de recursos hídricos en la subcuenca del río Tomebamba



Los resultados de la simulación revelan que todas las demandas tienen déficits en algunos meses, además no cumplen con la garantía (satisfacción de las demandas), un resumen de estos resultados se detalla en la tabla 6.1.

Tabla 6.1: Resultados de la simulación en el escenario actual del sistema de recursos hídricos de la subcuenca del río Tomebamba

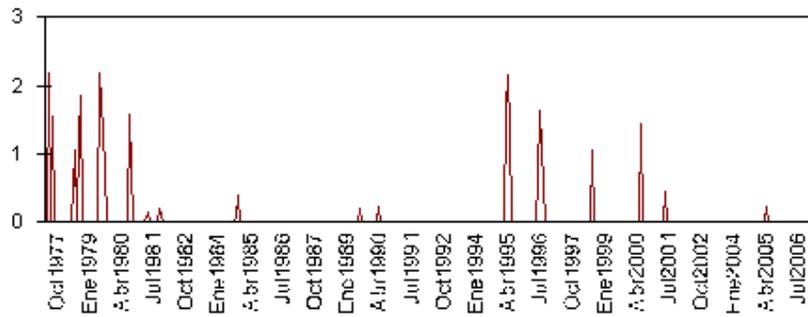
DEMANDAS	Número fallos mensuales	G mensual	Máximo déficit mensual [Hm ³]	Máximo déficit 2 meses [Hm ³]	Enfoque UTAH-DWR		
					D	E	F
Demanda consumo humano ciudad de Cuenca	25	93.1%	2.168	3.975	19.1%	35.8%	60.1%
Demanda consumo humano otros usos	25	93.1%	0.085	0.156	18.6%	36.1%	60.2%
Demanda riego parroquia Sayausi			0.203	0.406	25.0%	50.0%	121.9%
Demanda riego parroquia San Joaquín			0.577	1.154	25.0%	50.0%	121.8%
Demanda otros usos			0.532	1.065	25.0%	50.1%	131.6%

A continuación se realiza un análisis de los resultados de las demandas, incluida la demanda ambiental.

Demanda ciudad de Cuenca

Existen 25 fallos mensuales en los 360 meses de simulación (30 años), con lo cual la garantía mensual fue de 93.1%, incumpliendo la garantía exigida del 95%. El máximo déficit mensual fue de 2.168 Hm³ y el máximo déficit de dos meses consecutivos fue de 3.975 Hm³. Según el enfoque UTAH-DWR la garantía de la demanda no cumple, dando valores superiores a los planteados para uso doméstico [D= 5, E=10 y F=16]. La figura 6.2 muestra el déficit de suministro a la demanda.

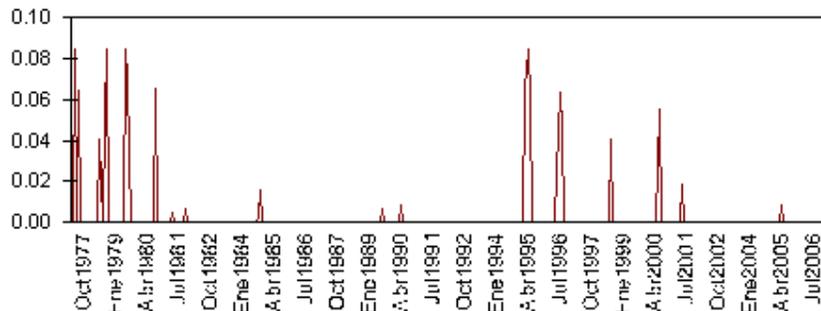
Figura 6.2: Déficit de suministro de la demanda actual ciudad de Cuenca.



Demanda otros usos domésticos

Existen 25 fallos mensuales dando una garantía igual a 93.1%, la misma que es inferior a la exigida del 95%. El máximo déficit mensual fue de 0.085 Hm³ y el máximo déficit de dos meses consecutivos fue de 0.156 Hm³. Según el enfoque UTAH-DWR la garantía de la demanda no cumple, dando valores superiores a los planteados para uso doméstico [D= 5, E=10 y F=16]. La figura 6.3 muestra el déficit de suministro a la demanda.

Figura 6.3: Déficit de suministro de la demanda actual otros usos domésticos



Demandas de riego de las parroquias San Joaquín y Sayausi

Según el enfoque UTAH-DWR las garantías de las demandas para riego en las dos parroquias no cumplen, dando valores superiores a los planteados para uso para riego [D= 20, E=30 y F=40]. El máximo déficit mensual fue de 0.203 y 0.577 Hm³ para el riego en la parroquia Sayausi y parroquia San Joaquín, respectivamente. La figura 6.4 y 6.5 muestran el déficit de suministro a las demandas.

Figura 6.4: Déficit de suministro de la demanda actual de riego Sayausi

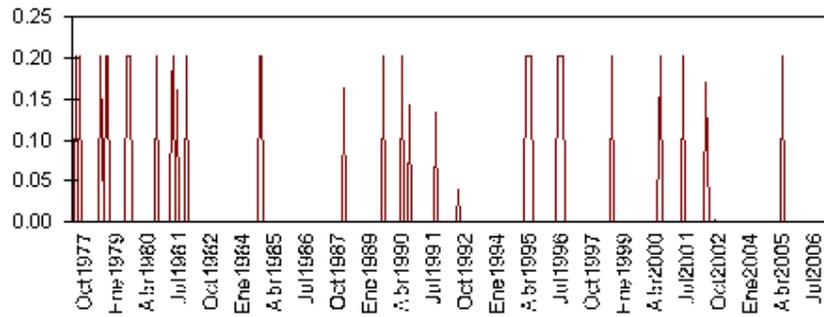
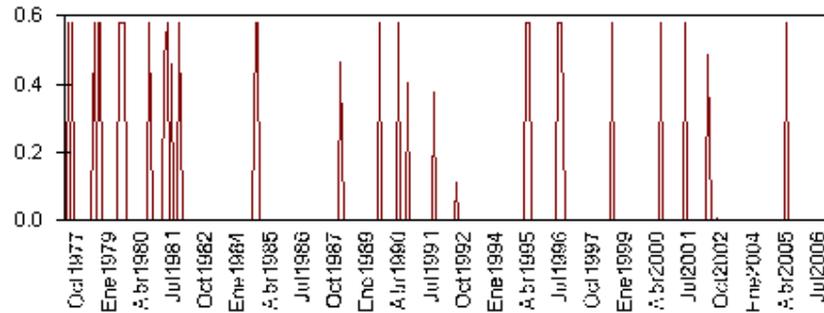


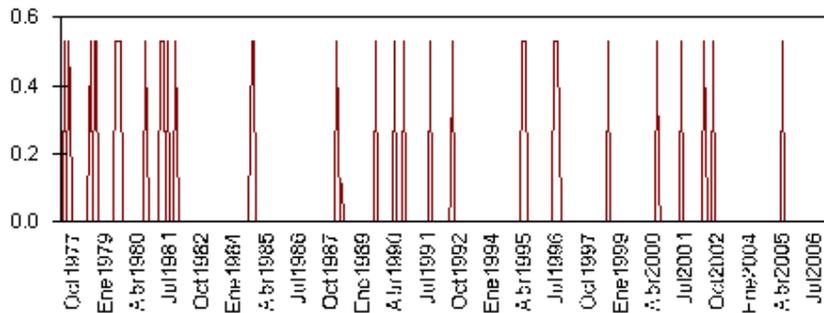
Figura 6.5: Déficit de suministro de la demanda actual de riego San Joaquín



Demanda otros usos

Según el enfoque UTAH-DWR la garantía de la demanda no cumple, dando valores superiores a los planteados para riego y otros usos [D= 20, E=30 y F=40]. El máximo déficit de dos meses consecutivos fue de 1.065 Hm³. La figura 6.6 muestra el déficit de suministro a la demanda.

Figura 6.6: Déficit de suministro de la demanda actual otro usos



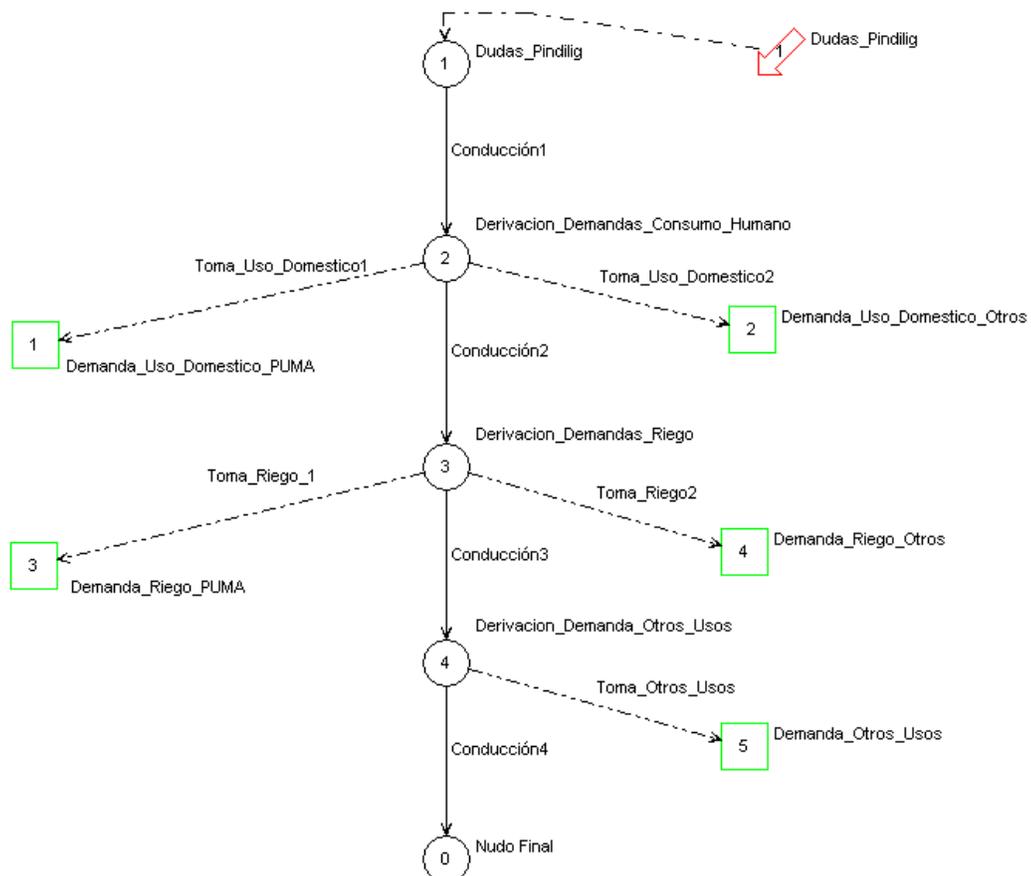
Demanda ambiental

Analizando el cumplimiento del caudal mínimo en las conducciones (ríos, quebrados, etc.), existen 4 fallos (incumplimiento del caudal ecológico), con una garantía mensual igual a 98.9%.

6.1.2 Subcuenca del río Pindilig

Para la construcción del modelo se ha tomado en cuenta las aportaciones históricas en la estación hidrológica Dudas en Pindilig y las demandas evaluadas en el capítulo 5. Se ha considerado que los retornos de las demandas se realicen aguas abajo del sistema. El esquema construido para el sistema de recursos hídricos de la subcuenca del río Pindilig se muestra en figura 6.7.

Figura 6.7: Esquema del sistema de recursos hídricos en la subcuenca del río Pindilig



Los resultados de la simulación se muestran en la tabla 6.2 y revelan que no hay incumplimiento de las garantías de las demandas, además no existen fallos en las demandas de uso doméstico y existe un fallo en el resto de las demandas con magnitudes iguales a 0.274 Hm³ para la demanda de riego PUMA, 0.057 Hm³ para la demanda otros usos de riego y 0.011 Hm³ para la demanda otros usos.

Tabla 6.2: Resultados de la simulación en el escenario actual del sistema de recursos hídricos de la subcuenca del río Pindilig

DEMANDAS	Número fallos mensuales	G mensual	Máximo déficit mensual [Hm ³]	Máximo déficit 2 meses [Hm ³]	Enfoque UTAH-DWR		
					D	E	F
Demanda uso doméstico_PUMA	0	100.0%	0.000	0.000	0.0%	0.0%	0.0%
Demanda uso doméstico_Otros	0	100.0%	0.000	0.000	0.0%	0.0%	0.0%
Demanda Riego_PUMA			0.274	0.274	3.4%	3.5%	3.7%
Demanda Riego_Otros			0.057	0.057	3.5%	3.6%	4.8%
Demanda Otros Usos			0.011	0.011	8.3%	8.3%	8.3%

Finalmente la demanda ambiental (incumplimiento para el caudal ecológico) no tuvo fallos, dando una garantía mensual del 100%.

6.2. SIMULACIÓN DEL ESCENARIO FUTURO

El escenario futuro se simulará con las aportaciones históricas (asumiendo que éstas sucederán en el futuro), en el periodo 2010 – 2040 y con la demanda futura. De igual manera se ha considerado como uso prioritario principal el consumo doméstico, luego

el uso para riego y por último otros usos del agua. La estimación de la garantía se lo realizará como se ha descrito anteriormente.

A continuación se describe el proceso de simulación de los sistemas de recursos hídricos de las subcuencas de los ríos Tomebamba y Pindilig.

6.2.1 Subcuenca del río Tomebamba

Para la construcción del modelo se ha considerado el mismo esquema de la figura 6.1, donde se cambiarían las entradas de datos de demandas y del periodo de simulación de aportaciones (2010-2040). Los retornos se han considerado que se realizan aguas abajo del sistema.

Los resultados como era de esperarse revelan un incumplimiento mayor de las garantías de las demandas, porque hay un déficit mayor. La garantía mensual de la demanda para uso doméstico baja a 84.7%, de igual manera según el enfoque UTAH-DWR el déficit a 1 año, 2 años y 10 años son superiores a los límites supuestos para demandas de uso doméstico. Por otro lado las demandas para riego y otros usos incumplen el enfoque UTAH-DWR dado que sus valores D, E y F son superiores a 20%, 30% y 40%. Un resumen de los resultados se muestra en la tabla 6.3.

Tabla 6.3: Resultados de la simulación en el escenario futuro del sistema de recursos hídricos de la subcuenca del río Tomebamba

DEMANDAS	Número fallos mensuales	G mensual	Máximo déficit mensual [Hm ³]	Máximo déficit 2 meses [Hm ³]	Enfoque UTAH-DWR		
					D	E	F
Demanda consumo humano ciudad de Cuenca	55	84.7%	5.188	9.988	23.7%	45.0%	105.8%
Demanda consumo humano otros usos	55	84.7%	0.202	0.392	23.4%	45.6%	108.0%
Demanda riego parroquia Sayausi			0.203	0.406	34.3%	66.7%	202.2%
Demanda riego parroquia San Joaquín			0.577	1.154	34.3%	66.7%	202.3%
Demanda otros usos			1.346	2.692	51.0%	77.1%	265.0%

Como era evidente los resultados de este escenario subiría aún más el incumplimiento de las garantías de las demandas, dado que se simuló con unos valores de demanda superiores y con la misma serie de aportaciones histórica. Por lo tanto se intentará incluir una infraestructura de regulación virtual (embalse), de tal manera que las garantías de las demandas sean cumplidas.

6.2.2 Subcuenca del río Pindilig

Para la construcción del modelo se ha considerado el mismo esquema de la figura 6.7. Los datos de demandas se han cambiado por los valores futuros calculados en el punto 5.5.2. (Demanda Futura – Subcuenca del río Pindilig); el periodo de simulación es del año 2010 al año 2040; y los retornos se han considerado que se realizarán aguas abajo del sistema.

Una vez simulado el sistema, se tiene que tampoco existe incumplimiento de las garantías de las demandas. Las demandas de uso doméstico no tienen ningún fallo, y el resto de demandas tienen un fallo. En este escenario tampoco existen fallos para la demanda ambiental.

Por lo tanto, en este sistema no haría falta una infraestructura de regulación al menos en los siguientes 30 años (suponiendo que la demanda futura estimada y las aportaciones históricas son las que sucederán en el futuro). No obstante, esta subcuenca como se indicó en la introducción tiene un alto potencial hidroeléctrico, es por esto su importancia en el ámbito de la cuenca del Paute, entonces como primer ensayo hemos simulado el sistema sin incluir este importante uso futuro, quedando como recomendación para próximos trabajos realizar un análisis sobre la inclusión de un embalse y su gestión para cumplimiento de garantías de las demandas actuales y los potenciales usos para hidroenergía.

6.3. ANÁLISIS DE IMPLEMENTACIÓN DE INFRAESTRUCTURA DE REGULACIÓN

El problema de determinar el volumen de embalse necesario para satisfacer ciertas demandas, o su equivalente, obtener el volumen de demanda que es posible atender con una determinada capacidad de embalse, se resuelve adoptando por convención un valor de la garantía. Fijado dicho valor, se calcula el volumen mínimo necesario para satisfacer la demanda de cálculo a partir de las aportaciones naturales disponibles, sin violar el valor de garantía fijado inicialmente (Balairón, 2002).

La convención mediante la cual se fija el valor admisible de garantía ha sido y es objeto de controversia entre los especialistas dedicados a los recursos hidráulicos, pues en realidad constituye una decisión de tipo socioeconómico. Su elección racional se ha de basar en una comparación económica del coste que representa para el organismo responsable del sistema de explotación la adquisición de más seguridad, frente al coste que representa para los usuarios de dicho sistema disponer de una seguridad menor

(Balairón, 2002). Entiéndase el término seguridad en el sentido de estar confiados de la satisfacción de las demandas.

En las etapas iniciales de planificación o predimensionamiento, la información necesaria para llevar a cabo este tipo de análisis no es frecuente que se halle disponible. En tales situaciones, el procedimiento debe limitarse a adoptar de forma convencional unas restricciones de tipo físico, de modo que el suministro se considerará suficientemente seguro si se respeta dichas restricciones (Balairón, 2002).

En la etapa de dimensionamiento definitivo, el procedimiento más recomendable consiste en establecer dicho nivel de acuerdo con consideraciones de tipo económico, de forma que se valoren de una manera objetiva las consecuencias de una mayor o menor seguridad en el suministro (Balairón, 2002).

Por lo expuesto en los párrafos anteriores, en el presente trabajo se intentará dimensionar un embalse virtual en el sistema de recursos hídricos de la subcuenca del río Tomebamba, de tal manera que las garantías de la demanda futura sean cumplidas, estamos hablando de una capacidad de embalse ideal, sin embargo debido a restricciones de tipo físico como la topografía de la zona de estudio, el uso del suelo en las misma y el impacto ambiental que podría causar una infraestructura de esta magnitud, se probará con una capacidad menor acorde a la realidad de la subcuenca, en cuyo caso se incumplirían nuevamente las garantías, por lo que haría falta la elaboración de reglas de gestión para el sistema.

Hay que resaltar que las consideraciones de tipo económico serían una guía adecuada y objetiva para el dimensionamiento del embalse, sin embargo debido al alcance del presente estudio quedaría como recomendación para futuros trabajos.

6.3.1 Subcuenca del río Tomebamba

Realizando la suma de la demanda total mensual futura en la subcuenca del río Tomebamba, se tiene un total de 106.8 hectómetros cúbicos por año, el mismo que representa un 55% de la media de aportaciones anuales de la serie histórica Matadero en Sayausi en la subcuenca del río Tomebamba.

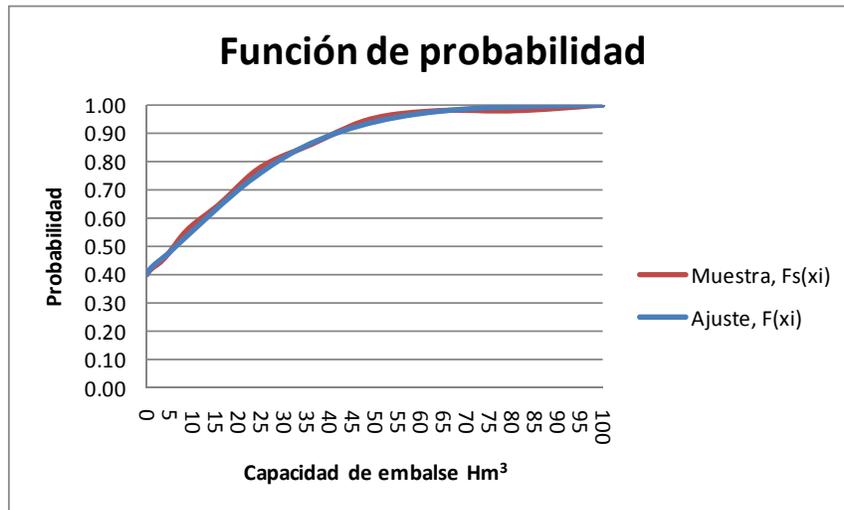
Por lo tanto, con las 100 series sintéticas anuales generadas en el punto 4.2.3.1 (Series Sintéticas Anuales – Subcuenca del río Tomebamba) y con un nivel de demanda igual a 55% se calculó 100 valores de capacidad de almacenamiento, donde 40 valores son igual a cero y 60 valores diferentes de cero. Hay que hacer notar que para la serie histórica y con un nivel de demanda del 55% el valor de la capacidad de almacenamiento es cero. Sin embargo, como ya se observó en la simulación del escenario futuro cuando no se tiene un embalse de regulación (o sea una capacidad de almacenamiento nula) las garantías de las demandas son incumplidas, es por esto que se analizará los 60 valores no nulos de capacidad de almacenamiento con la finalidad de definir un valor de capacidad de embalse para el cumplimiento de las garantías de las demandas en la simulación del sistema incluido el embalse virtual en el escenario futuro.

Se ha intentado ajustar una distribución de probabilidad a los 60 valores de capacidad de almacenamiento, donde el mejor ajuste logrado fue con una distribución normal mediante la transformación potencia de sus valores originales. Los resultados se obtuvieron haciendo la inversa de las funciones de transformación y tomando en cuenta los 40 valores nulos de capacidad de almacenamiento. Estos se muestran en la tabla 6.4 y las figuras 6.8.

Tabla 6.4: Ajuste de los valores de capacidad de almacenamiento a una función de probabilidad normal – Subcuenca del río Tomebamba

Intervalo	Rango	Frecuencia	fs(xi)	Fs(xi)	p(xi)	F(xi)
1	0	40	0.40	0.40	0.40	0.40
2	1	2	0.02	0.42	0.03	0.43
3	4	4	0.04	0.46	0.04	0.47
4	9	10	0.10	0.56	0.07	0.54
5	16	9	0.09	0.65	0.10	0.64
6	25	13	0.13	0.78	0.12	0.76
7	36	8	0.08	0.86	0.10	0.86
8	49	9	0.09	0.95	0.07	0.94
9	64	3	0.03	0.98	0.04	0.98
10	81	0	0.00	0.98	0.02	0.99
11	100	2	0.02	1.00	0.01	1.00
TOTAL		100	1.00	1.00	1.00	1.00

Figura 6.8: Función de probabilidad para los valores de capacidad de almacenamiento en la Subcuenca del río Tomebamba



Con un valor medio de los valores no nulos de capacidad de almacenamiento que corresponde a un valor aproximadamente igual a 21 Hm³ (Probabilidad de no excedencia del 70%) se procedió a simular el sistema de recursos hídricos de la subcuenca del Tomebamba en el escenario futuro, asumiendo que las aportaciones históricas serán las que se espere en el futuro. Aparentemente esta capacidad sería suficiente para cumplir las garantías de las demandas futuras, sin embargo se intentará

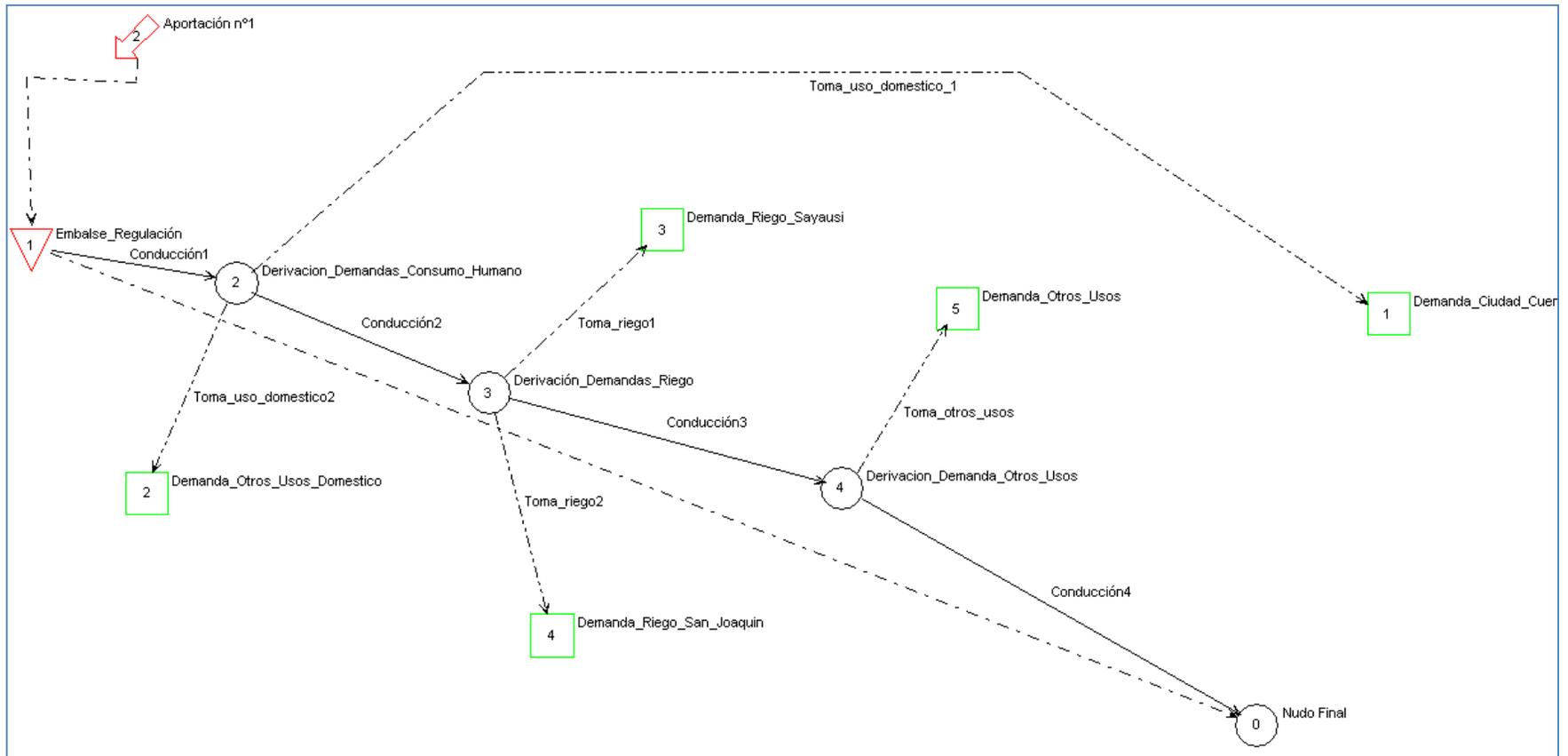
indagar el comportamiento del sistema. El esquema del nuevo sistema incluido el embalse virtual se muestra en la figura 6.9.

La simulación se realizó con un volumen inicial igual al 50% de la capacidad del embalse, dando los resultados mostrados en la tabla 6.5 y como era de esperarse hay un cumplimiento total de las garantías de las demandas mensuales y anuales. También indicar que el caudal ecológico cumplió en todos los meses.

Tabla 6.5: Resultados de la simulación en el escenario futuro incluyendo el embalse de 21 Hm³ en el sistema de recursos hídricos de la subcuenca del río Tomebamba

DEMANDAS	Número fallos mensuales	G mensual	Máximo déficit mensual [Hm ³]	Máximo déficit 2 meses [Hm ³]	Enfoque UTAH-DWR		
					D	E	F
Demanda consumo humano ciudad de Cuenca	1	99.7%	2.258	2.258	3.8%	3.8%	3.8%
Demanda consumo humano otros usos	1	99.7%	0.091	0.092	3.9%	4.1%	5.7%
Demanda riego parroquia Sayausi			0.203	0.203	8.3%	8.3%	9.4%
Demanda riego parroquia San Joaquín			0.577	0.577	8.3%	8.3%	9.4%
Demanda otros usos			1.346	1.346	8.3%	14.8%	23.3%

Figura 6.9: Esquema del sistema de recursos hídricos en la subcuenca del río Tomebamba incluido el embalse virtual



Ahora con la finalidad de ver el comportamiento de las garantías de las demandas se realizó dos simulaciones disminuyendo la capacidad del embalse en 1 Hm³ cada vez (o sea 20 y 19 Hm³) y manteniendo el 50% de la capacidad para el volumen inicial del embalse. Los resultados de este proceso se muestran a continuación.

Tabla 6.6: Resultados de la simulación en el escenario futuro incluyendo el embalse de 20 Hm³ en el sistema de recursos hídricos de la subcuenca del río Tomebamba

DEMANDAS	Número fallos mensuales	G mensual	Máximo déficit mensual [Hm ³]	Máximo déficit 2 meses [Hm ³]	Enfoque UTAH-DWR		
					D	E	F
Demanda consumo humano ciudad de Cuenca	2	99.4%	3.076	3.076	5.2%	5.2%	5.7%
Demanda consumo humano otros usos	2	99.4%	0.124	0.125	5.3%	5.5%	7.7%
Demanda riego parroquia Sayausi			0.203	0.203	8.3%	15.8%	24.1%
Demanda riego parroquia San Joaquín			0.577	0.577	8.3%	15.8%	24.1%
Demanda otros usos			1.346	1.495	9.3%	16.7%	27.7%

Como se observa en la tabla anterior, existe un incumplimiento en las demandas de consumo humano en el enfoque UTAH-DWR, dado que el déficit anual a 1 año es mayor que el 5% de la demanda anual.

De igual manera se observa en la tabla 6.7 el incumplimiento de garantías en la demanda de consumo humano en el enfoque UTAH-DWR, dado que el déficit anual a 1 año es mayor que el 5% de la demanda anual.

Tabla 6.7: Resultados de la simulación en el escenario futuro incluyendo el embalse de 19 Hm³ en el sistema de recursos hídricos de la subcuenca del río Tomebamba

DEMANDAS	Número fallos mensuales	G mensual	Máximo déficit mensual [Hm ³]	Máximo déficit 2 meses [Hm ³]	Enfoque UTAH-DWR		
					D	E	F
Demanda consumo humano ciudad de Cuenca	4	98.9%	3.076	3.076	5.2%	5.2%	8.8%
Demanda consumo humano otros usos	4	98.9%	0.124	0.125	5.3%	5.5%	10.9%
Demanda riego parroquia Sayausi			0.203	0.203	8.3%	16.7%	25.0%
Demanda riego parroquia San Joaquín			0.577	0.577	8.3%	16.7%	25.0%
Demanda otros usos			1.346	1.981	15.5%	16.7%	37.0%

Por lo tanto, cada vez que disminuyamos más la capacidad del embalse, se seguirá incumpliendo las garantías, por lo que la capacidad ideal en el periodo simulado (2010-2040) es de 21 Hm³ con una probabilidad de no excedencia del 70%.

Hay que hacer notar que la capacidad de embalse fue diseñada con las series sintéticas anuales, de tal manera que realice una regulación hiperanual, sin embargo no se considero la regulación dentro del año, dado que puede existir temporadas donde la demanda mensual supere la cantidad del recurso hídrico almacenado, el mismo que depende de la capacidad del embalse. No obstante, en el sistema de la cuenca del río Tomebamba, la máxima demanda mensual es igual a 9.12 Hm³, valor menor al volumen inicial para la simulación del sistema (50% de la capacidad ideal calculada).

Probando bajar la probabilidad de no excedencia a 55%, tenemos una capacidad de embalse igual a 10 Hm³, el mismo que se ha tomado como una capacidad factible futura según las restricciones físicas, ambientales y económicas, para lo cual como se

anotó anteriormente no se cumplirá las garantías y se intentará realizar una gestión futura con el embalse planificado, con escenarios estocásticos y con enfoque de riesgo.

6.4. GESTIÓN EN ESCENARIOS ESTOCÁSTICOS CON ENFOQUE DE RIESGO

Durante la explotación de los sistemas de recursos hídricos, pueden darse inevitablemente situaciones en las que no sea posible suministrar de forma satisfactoria los usos establecidos (fallo del sistema, denominado también sequía operativa), esta situación puede minimizarse mediante una anticipación de la sequía en el sistema en las fases de planificación y explotación, minimizando los valores esperados de duración y magnitud de sequías, mediante la adopción de reglas de gestión (Sánchez et al, 2001).

Las reglas de gestión pueden ser deterministas (sin expresión del riesgo asociado a la decisión), o estocásticas (con expresión del riesgo asociado a la decisión). Cuando se formula una regla de forma explícita, inevitablemente se pierden algunas dimensiones del problema, mientras que con el procedimiento de operación estocástica, el decisor contempla tanto el sistema en su globalidad como cada uno de sus componentes (Sánchez et al, 2001).

Tomando como referencia lo escrito en los dos párrafos anteriores, en el presente estudio se realizará el análisis del sistema hídrico del río Tomebamba con la proyección de implementar un embalse de regulación con una capacidad factible según las restricciones físicas, ambientales y económicas de la subcuenca. Esta capacidad de embalse no será suficiente para cumplir las garantías de las demandas del sistema, por lo tanto se intentará implementar una metodología que planifique la gestión en escenarios estocásticos y valore el riesgo de la gestión planificada.

Para la ejecución de esta metodología se ha requerido la ayuda del modelo SIMRISK (Sánchez S., Andreu J., Solera A., 2001) del sistema de soporte de decisiones

AQUATOOL. El mismo que proporciona al decisor de herramientas para la gestión, como la determinación de las probabilidades de fallos en los sistemas de recursos hídricos y la simulación de medidas de mitigación según el riesgo admisible impuesto.

La metodología que se va implementar en el sistema hídrico de la subcuenca del río Tomebamba se resume en los siguientes pasos (Sánchez et al, 2001):

- a. Generación de múltiples escenarios mediante las series sintéticas mensuales generadas en el punto 4.2.3 “Series Sintéticas”.
- b. Simulación estocástica mensual del comportamiento del sistema con un nivel de suministro dado desde el año 2010 hasta el año 2040. Para lo cual se utilizará el modelo SIMRISK.
- c. Análisis de los resultados del modelo y determinación de la situación.
- d. Decisión sobre el riesgo asumible de fallo del sistema.

6.4.1 Subcuenca del río Tomebamba

Con la finalidad de realizar comparaciones posteriores de probabilidades de fallo, se ha realizado un primer ensayo de simulación estocástica con la capacidad ideal del embalse de 21 Hm³ (para la simulación el volumen inicial del embalse será igual a 50% de su capacidad), mediante el mismo esquema de la figura 6.8 y con las series sintéticas mensuales generadas en el punto 4.2.3.2. Para las simulaciones se utilizó el modelo SIMRISK, la figura 6.10 muestra una pantalla de este modelo.

Entre los resultados de las simulaciones múltiples están las probabilidades de estado del embalse (las mismas que están divididas en 10 niveles), probabilidad de fallo de caudales mínimos, suministros y déficits de las demandas por cada simulación, probabilidad de fallos de las demandas (las mismas que están divididas en 4 niveles) y otras variables más.

Figura 6.10: Pantalla de ingreso de información del modelo Simrisk.

Datos simulación SimRisk

1- Definir periodo de simulación

Año Inicio Simulación: 2010 Mes Inicio Simulación: 10

Número Meses Simulación: 360

2- Obtener series de aportaciones

Generación series estadísticas Extraer series de datos históricos

Número de Simulaciones: 100

Ver archivo generación

Ver datos aportaciones previas Generar

Ver datos series generadas

3- Datos iniciales de la simulación

Volumenes iniciales embalses

Cerrar

Con la finalidad de hacer comprensibles a los resultados, a continuación de detallará el proceso de cálculo para las probabilidades de estado de las demandas y embalses.

DEMANDAS

Durante cada mes [i] de la simulación en cada uno de los escenarios futuros simulados, la demanda [d] recibirá un suministro que podrá ser igual al valor demandado correspondiente a ese mes, o un valor menor, en este último caso se habrá producido un déficit, y por lo tanto se habrá producido un fallo en ese mes. Por otra parte, la intensidad del déficit de ese mes es la diferencia entre la demanda y el suministro (Sánchez et al, 2001).

El modelo SIMRISK divide las demandas en 4 niveles de suministro [n1,n2,n3 y n4]], el nivel 1 es las situación más grave, quiere decir que el déficit supera el 75% de la demanda o sea el suministro se ubica entre el 0 y 25% del valor de la demanda; el nivel 2 quiere decir que el suministro se ubica entre el 25 y 50% del valor de la demanda; el nivel 3 quiere decir que el suministro se ubica entre el 50 y 75% del valor

de la demanda; y el nivel 4 es la situación menos grave, quiere decir que el suministro se ubica entre el 75 y 100%.

Por lo tanto, la fórmula para el cálculo de probabilidad de fallo mensual por nivel de suministro para la demanda [d], mes [i] y nivel de suministro [n] es (Sánchez et al, 2001):

$$P_{d,i,n} = \frac{\text{número de fallos en el nivel } n, \text{ mes } i}{\text{número de series}} \times 100$$

Por ejemplo, si se realizan 100 simulaciones, y se determina que para el vigésimo mes (i=20) el suministro se encuentra entre 50 y 75% [n=3] del valor de la demanda en 5 simulaciones, entonces aplicando la fórmula tenemos:

$$P_{d,20,3} = \frac{\text{número de fallos en el nivel, 3, mes 20}}{100} \times 100 = \frac{5}{100} \times 100 = 5\%$$

Ahora la probabilidad de fallo mensual total se calcula con la siguiente fórmula (Sánchez et al, 2001):

$$PT_{d,i} = \frac{\text{número de fallos en el mes } i}{\text{número de series}} \times 100$$

O sea viene a ser la suma de las probabilidades de fallo de los 4 niveles de suministro en que se divide la demanda. Por ejemplo si para la misma demanda [d], se obtiene que para el vigésimo mes [i=20], el suministro de la demanda falla en 20 simulaciones, entonces se dará como resultado que la probabilidad que falle la demanda d en el vigésimo mes del periodo simulado (360 meses) es igual a:

$$PT_{d,20} = \frac{\text{número de fallos en el mes 20}}{100} \times 100 = \frac{20}{100} \times 100 = 20\%$$

EMBALSES

El modelo SIMRISK divide el volumen de embalse en 10 niveles de estado de embalse, correspondiendo cada nivel de estado de embalse, a 1/10 del volumen máximo.

Entonces, la fórmula para calcular la probabilidad del estado mensual de embalses para cada mes [i] y para cada nivel de estado del almacenamiento [n] del embalse [e] es la siguiente (Sánchez et al, 2001):

$$P_{e,i,n} = \frac{\text{número de series con estado embalse en el nivel } n, \text{ mes } i}{\text{número total de series}} \times 100$$

Por ejemplo, si en las 100 simulaciones, el almacenamiento del embalse [e] se encuentra entre los 3/10 y 4/10 de su capacidad en 8 de ellas (simulaciones), en el mes 3; la probabilidad de estado de almacenamiento del embalse para el cuarto nivel y en el mes tercero del periodo de simulación (360 meses) es:

$$\begin{aligned} P_{e,3,4} &= \frac{\text{número de series con estado embalse en el nivel 4, mes 3}}{100} \times 100 \\ &= \frac{8}{100} \times 100 = 8\% \end{aligned}$$

Ahora la probabilidad de estado mensual total se calcula sumando las probabilidades de estado de los 10 niveles en que se divide el volumen de embalse en un determinado mes de la simulación.

A continuación se hace un resumen de los resultados del proceso de simulación en SIMRISK.

EMBALSE [Capacidad de embalse igual a 21 Hm³]

La probabilidad del estado del embalse se ha dividido en 10 niveles (0-2, 2-4, 4-6, 6-8, 8-11, 11-13, 13-15, 15-17, 17-19, 19-21 Hm³), el gráfico de esta variable se muestra en la figura 6.11. Según se puede observar en la figura el máximo valor estimado de probabilidad total de estado del embalse es de 72% y sucede en Octubre del 2010. A

continuación se muestra en la tabla 6.8 los máximos valores estimados de probabilidad de estado del embalse según el nivel.

Tabla 6.8: Probabilidades máximas del estado del embalse [21 Hm³] según el nivel en la simulación del sistema de recursos hídricos de las subcuenca del río Tomebamba

FECHA						NIVEL	MAXIMA PROBABILIDAD DEL ESTADO (%)
Ene-11						0 - 2 Hm ³	6
Feb-11	Feb-19	Feb-20				2 - 4 Hm ³	4
Nov-10	Ene-12					4 - 6 Hm ³	6
Oct-10						6 - 8 Hm ³	9
Oct-10	Nov-10	Feb-24	Ene-29	Feb-29	Feb-35	8 - 11 Hm ³	8
Oct-10	Dic-32					11 - 13 Hm ³	11
Oct-10	Sep-18	Ene-20				13 - 15 Hm ³	14
Ene-25	Sep-36					15 - 17 Hm ³	21
Sep-20						17 - 19 Hm ³	23
Sep-28						19 - 21 Hm ³	22

Para la gestión del embalse interesará analizar la situación en los niveles inferiores (0 – 2 Hm³ ; 2 – 4 Hm³; 4 – 6 Hm³), dado que son niveles críticos en donde sería más probable el fallo en el suministro de las demandas. Por ejemplo en el sistema estudiado los máximos valores estimados de probabilidad para estos niveles son del 6% (Ene-2011) ; 4% (Feb – 2011, 2019 y 2020) y 6% (Nov-10, Ene-12) respectivamente, y un máximo valor total de probabilidad del 12% en los tres niveles (Figura 6.12). Pareciera ser que estos valores son bajos, sin embargo estos nos servirán para tener una base de comparación con los resultados cuando se realice la simulación estocástica con el embalse factible de 10 Hm³.

Figura 6.11: Probabilidad de estado del embalse [21 Hm³] – Escenario futuro – Subcuenca Tomebamba

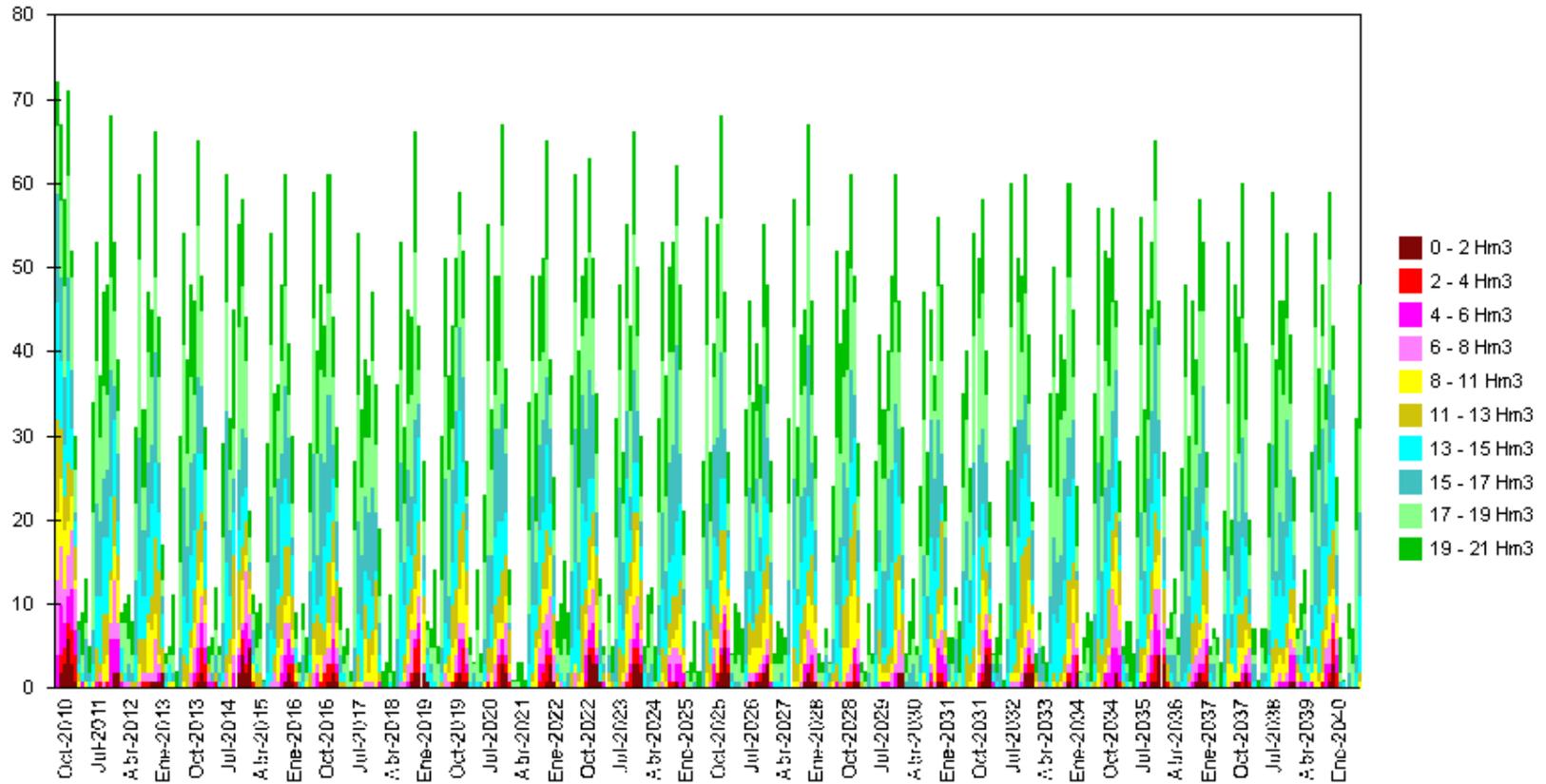
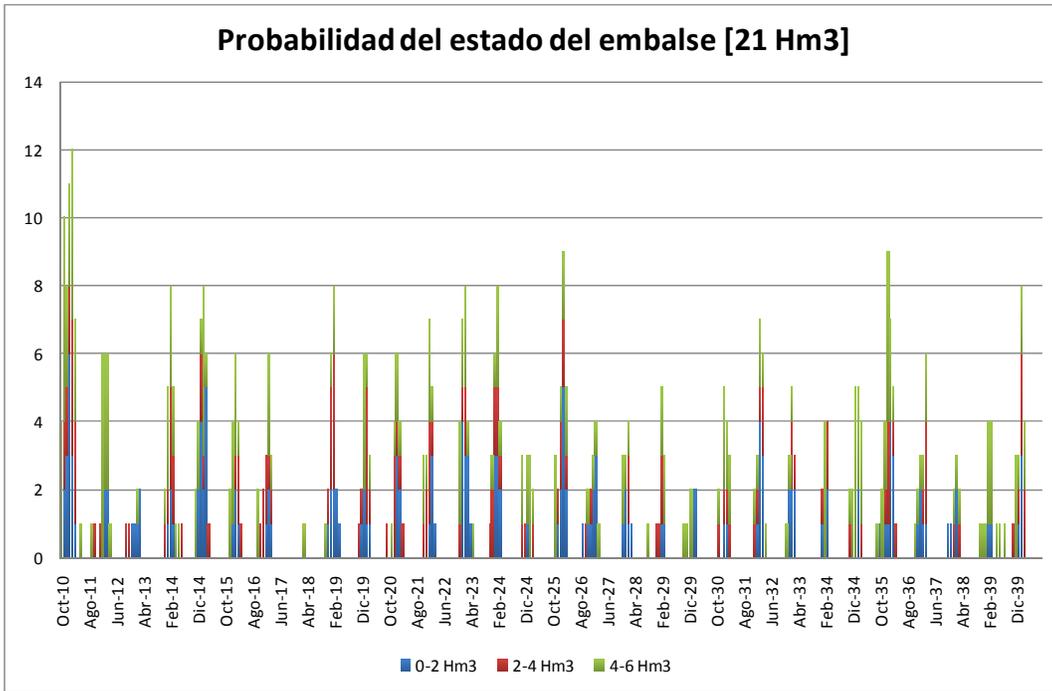


Figura 6.12: Probabilidad de estado del embalse [21 Hm³] de los niveles 0-2 ; 2-4 y 4-6

Hm³



DEMANDAS [Capacidad de embalse igual a 21 Hm³]

A continuación se detallará los resultados de cada una de las demandas del sistema de recursos hídricos de la subcuenca del río Tomebamba. Solo indicar que se realizó un promedio mensual de valores de probabilidad de fallo para cada nivel de suministro [n1,n2,n3,n4] y para cada demanda para que sean más entendibles los resultados.

Demanda de la ciudad de Cuenca

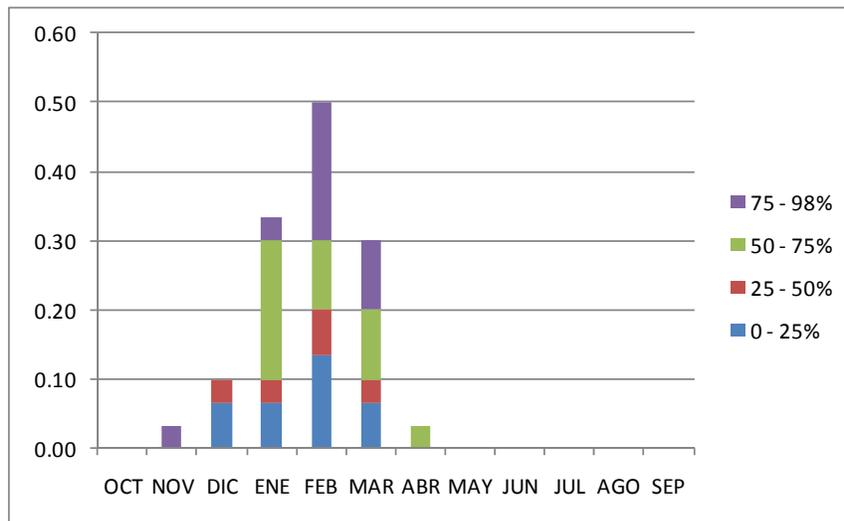
Los valores estimados promedios mensuales de probabilidades de fallo de la demanda de la ciudad de Cuenca se muestran en la figura 6.13. El máximo valor estimado de probabilidad de fallo mensual total de la demanda es del 2% y se produce en Ene-20, Mar-23, Feb-24 y Feb-26.

Demanda otros usos domésticos

Los valores estimados promedios mensuales de probabilidades de fallo de la demanda otros usos domésticos son similares a los valores estimados para la ddemanda de la

ciudad de Cuenca. Esto es debido a que estas demandas tienen la misma prioridad de uso.

Figura 6.13: Probabilidad promedio mensual de fallo de la demanda futura ciudad de Cuenca [21 Hm³] – Escenario futuro – Subcuenca Tomebamba

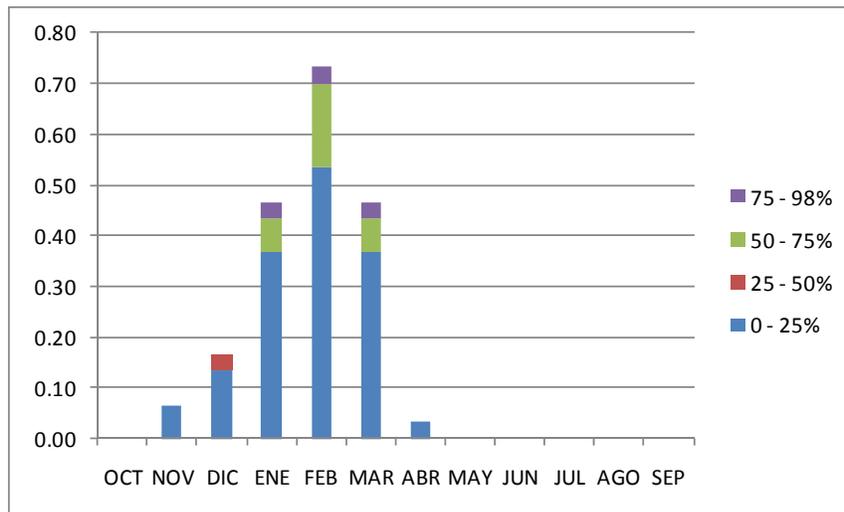


El gráfico anterior muestra en el eje de las abscisas los meses del año hidrológico y en el eje de las ordenadas las probabilidades de fallos en la demanda. Cada color representa los niveles de suministro, por ejemplo el color púrpura indica que el suministro se encuentra entre el 75 al 98% del valor de la demanda. Indicar además que estos valores son un promedio mensual en el periodo de simulación.

Demanda de riego de Sayausi y Demanda de riego de San Joaquín

Los valores estimados promedios mensuales de probabilidades de fallo de las demandas de riego de Sayausi y San Joaquín se muestran en la figura 6.14. El máximo valor estimado de probabilidad total mensual de fallo de la demanda es del 3% y se produce en Ene-21 para las dos demandas de riego. Hay que hacer notar que estas dos demandas tienen la misma prioridad.

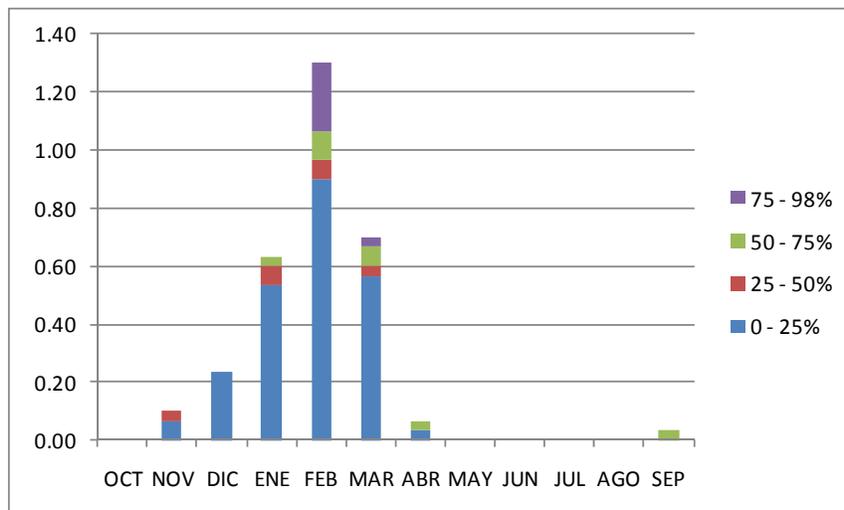
Figura 6.14: Probabilidad promedio mensual de fallo de la demanda futura de riego de Sayausi y San Joaquín [21 Hm³] – Escenario futuro – Subcuenca Tomebamba



Demanda otros usos

Los valores estimados promedios mensuales de probabilidades de fallo de la demanda otros usos se muestran en la figura 6.15. El máximo valor estimado de probabilidad total mensual de fallo de la demanda es del 4% y se produce en Feb-26.

Figura 6.15: Probabilidad promedio mensual de fallo de la demanda futura otros usos [21 Hm³] – Escenario futuro – Subcuenca Tomebamba



Como era de esperarse los valores probables de fallo de todas las demandas son bajos, dado que la modelación se realizó suponiendo una capacidad de embalse ideal de 21 Hm³ , además ocurren especialmente en los meses de noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo (meses con deficientes aportaciones). No obstante estos valores nos servirán de base para ver los cambios que experimentan los valores de probabilidades de fallo de las demandas en la simulación estocástica con el embalse factible de 10 Hm³.

Entonces, asumiendo la capacidad de embalse igual 10 Hm³ se realizó la simulación múltiple futura del sistema con escenarios estocásticos. Hay que hacer notar que la simulación se realizó manteniendo el volumen inicial del embalse igual a 50% de su capacidad. Los resultados se muestran a continuación.

EMBALSE [Capacidad de embalse igual a 10 Hm³]

La probabilidad del estado del embalse se ha dividido en 10 niveles de un hectómetro cúbico cada uno (0-1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6, 6-7, 7-8, 8-9, 9-10 Hm³), el gráfico de esta variable se muestra en la figura 6.16. Según se puede observar en la figura el máximo valor estimado de probabilidad total del estado del embalse es de 69% y sucede en Enero del 2012. A continuación se muestra en la tabla 6.9 los máximos valores estimados de probabilidad del estado del embalse según cada nivel.

Haciendo una comparación entre los valores máximos de probabilidad de los estados de embalse [21 Hm³] vs [10 Hm³] (tablas 6.8 y 6.9), se tiene un incremento de la probabilidad en los estados inferiores, un sostenimiento aproximado de la probabilidad en los estados intermedios y una reducción de la probabilidad en los estados superiores.

Tabla 6.9: Probabilidades máximas del estado del embalse [10 Hm³] según cada nivel en la simulación del sistema de recursos hídricos de la subcuenca del río Tomebamba

FECHA		NIVEL	MAXIMA PROBABILIDAD DEL ESTADO (%)
Feb-11		0 - 1 Hm ³	20
Feb-19		1 - 2 Hm ³	10
Nov-26		2 - 3 Hm ³	11
Ene-37		3 - 4 Hm ³	10
Sep-23	Ene-39	4 - 5 Hm ³	11
Sep-39		5 - 6 Hm ³	14
Ene-26		6 - 7 Hm ³	13
Sep-20		7 - 8 Hm ³	14
Nov-20	Oct-22	8 - 9 Hm ³	12
Sep-17		9 - 10 Hm ³	13

Con respecto a los estados inferiores (0 – 1 ; 1 – 2 y 2 - 3 Hm³), el valor máximo de probabilidad de estado integrando estos tres niveles bordea el 30% (Figura 6.17), este valor comparado con el resultado de la simulación con el embalse ideal [21 Hm³] (Figura 6.12), es 2.5 veces mayor.

Puede interesar bajar estos valores a un valor límite inferior de probabilidad de estado en estos niveles, de tal manera que los suministros a las demandas sean los más convenientes según los objetivos planteados. Para realizar esta acción, manteniendo la capacidad de embalse igual a 10 Hm³, se necesitará realizar una restricción en el suministro de las demandas en un determinado porcentaje, según el nivel de prioridad y el tipo de uso del recurso, de tal manera que la toma de decisiones se lo realice cuantificando el riesgo (fallo en el suministro de las demandas).

DEMANDAS [Capacidad de embalse igual a 10 Hm³]

A continuación se detallará los resultados de las demandas de la simulación estocástica del sistema con una capacidad de embalse de 10 Hm³.

Figura 6.16: Probabilidad de estado del embalse [10 Hm³] – Escenario futuro – Subcuenca Tomebamba

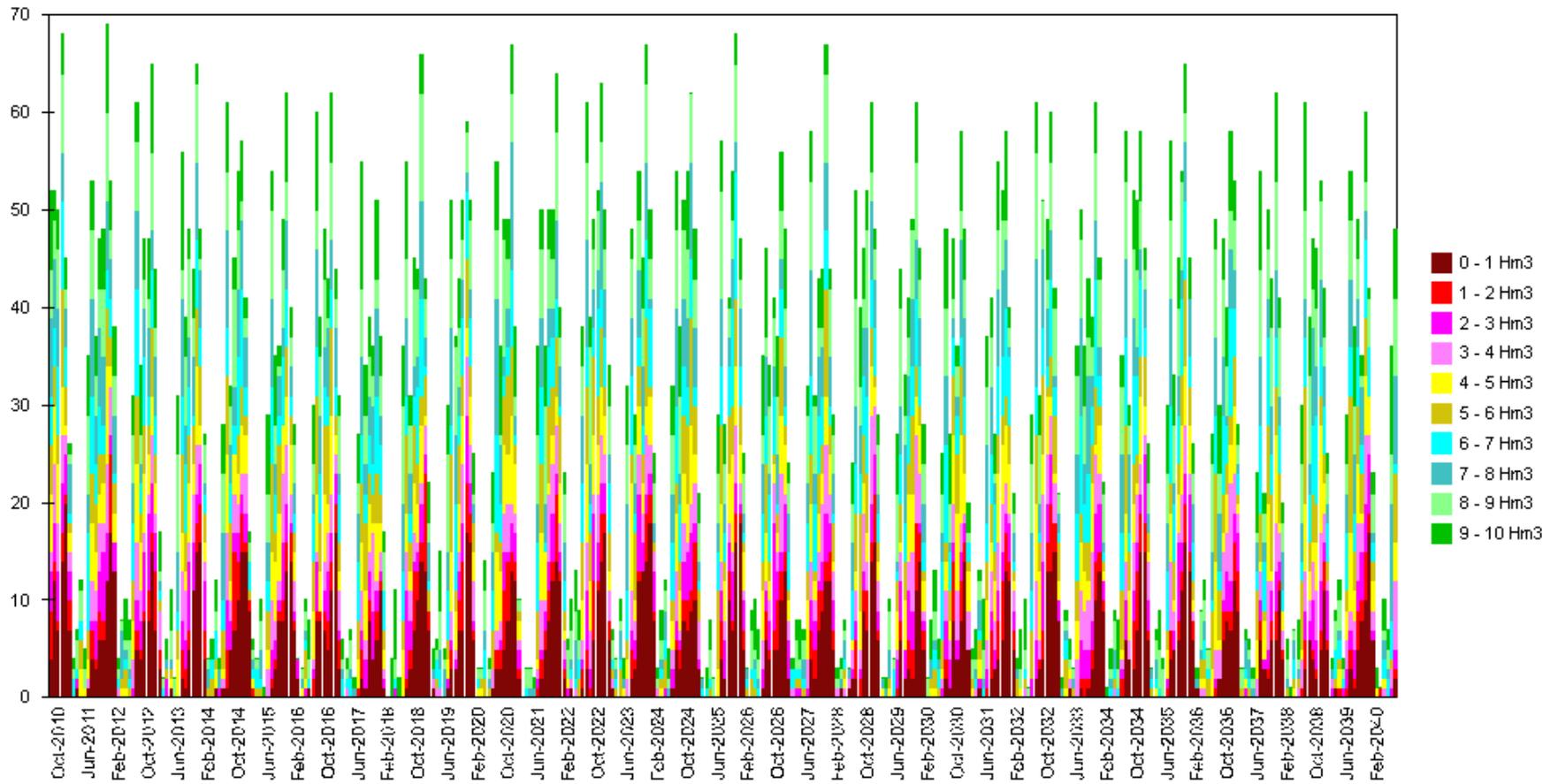
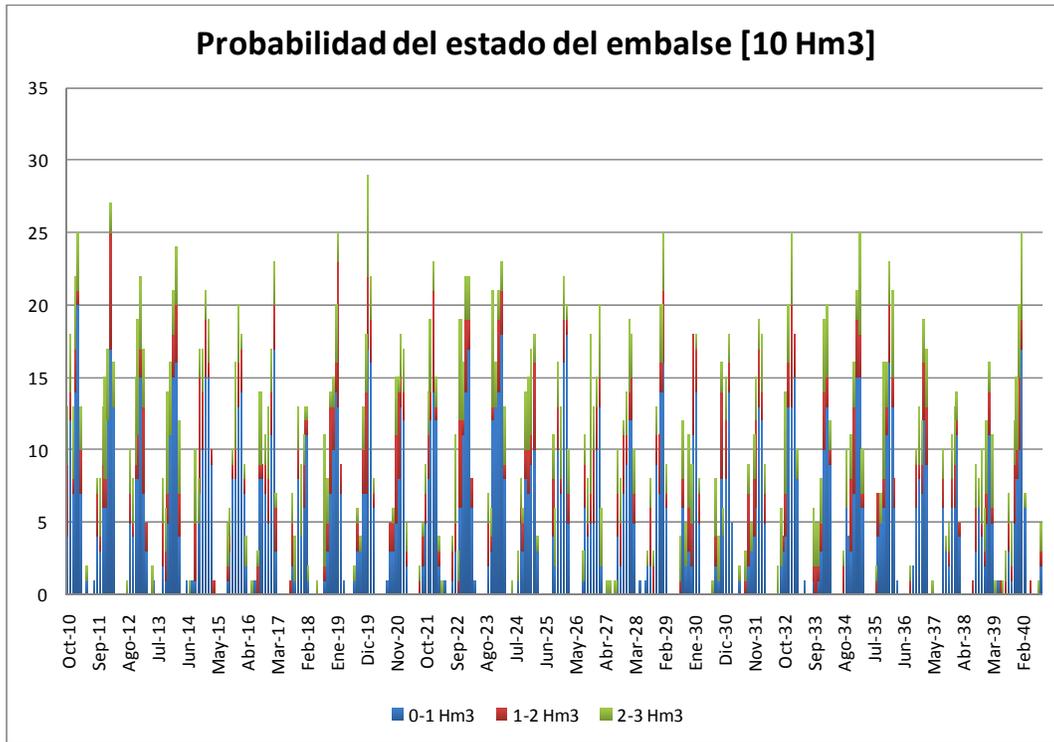


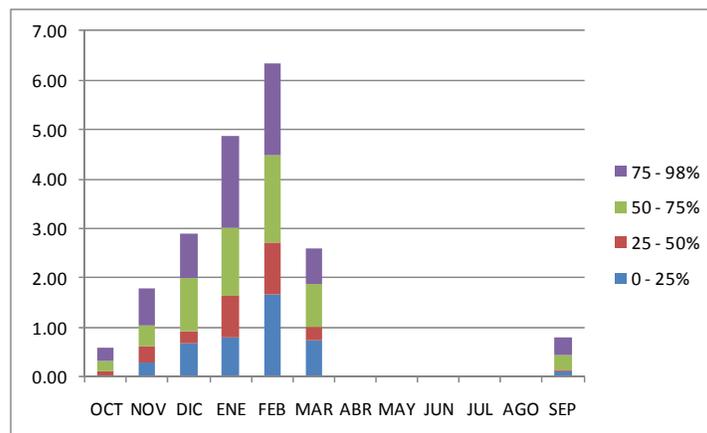
Figura 6.17: Probabilidad de estado del embalse de los niveles 0-1 Hm³ ; 1-2 y 2-3 Hm³



Demanda de la ciudad de Cuenca

Los valores estimados promedios mensuales de probabilidades de fallo de la demanda de la ciudad de Cuenca se muestran en la figura 6.18. El máximo valor estimado de probabilidad mensual total de fallo de la demanda es del 11% y se produce en Feb-26 y Feb-40.

Figura 6.18: Probabilidad promedio mensual de fallo de la demanda futura ciudad de Cuenca [10 Hm³] – Escenario futuro – Subcuenca Tomebamba



Comparando la figura anterior con la figura 6.13 (Simulación embalse 10 Hm³) se nota un incremento en los valores estimados de probabilidad de fallo de la demanda en todos los niveles, incluso aparecen probabilidades de fallo en los meses de septiembre y octubre.

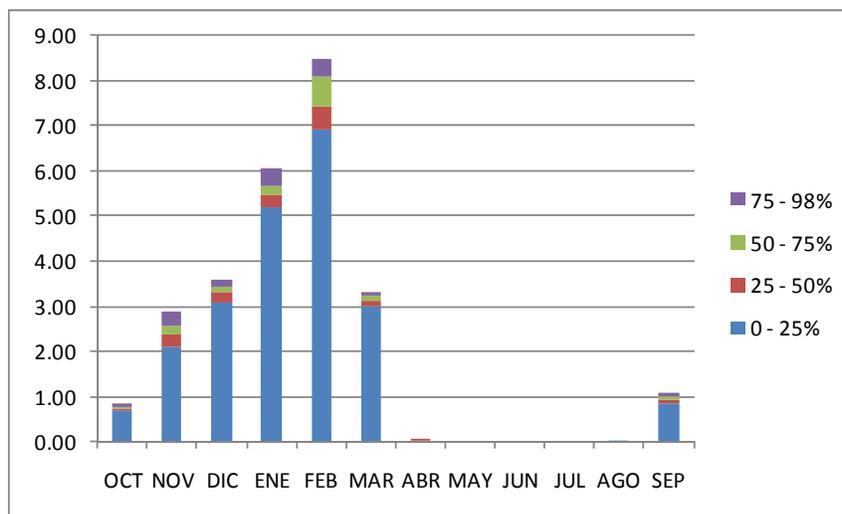
Demanda otros usos domésticos

Los valores estimados promedios mensuales de probabilidades de fallo para la demanda otros usos domésticos son similares a la demanda de la ciudad de Cuenca.

Demanda de riego de Sayausi y Demanda de riego de San Joaquín

Los valores estimados promedios mensuales de probabilidades de fallo de las demandas de riego son similares y se muestran en la figura 6.19. El máximo valor estimado de probabilidad mensual total de fallo de las demandas de riego es del 13% y se produce en los meses de febrero del año 2017 y 2023.

Figura 6.19: Probabilidad promedio mensual de fallo de la demanda futura de riego de Sayausi y San Joaquín [10 Hm³] – Escenario futuro – Subcuenca Tomebamba



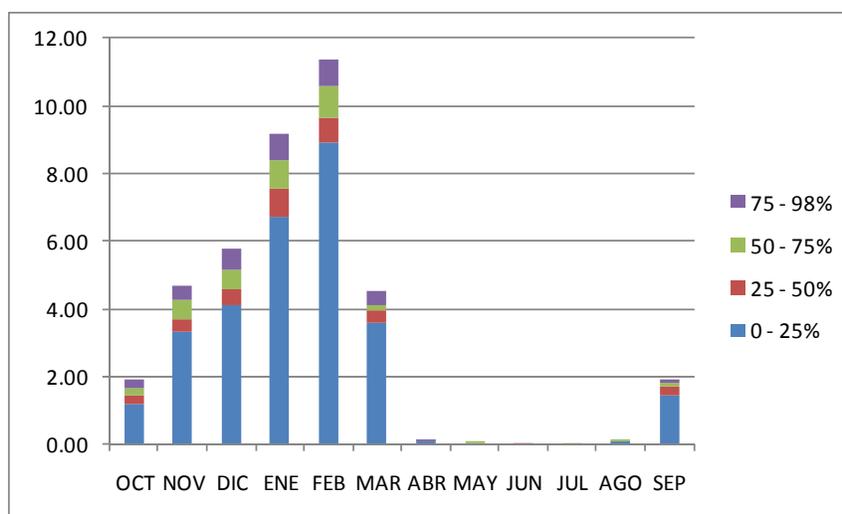
Comparando los gráficos de las dos simulaciones con diferentes capacidades de embalse (ideal y factible), vemos que la probabilidad de fallo en el nivel inferior (más grave) se incrementa considerablemente, mientras que los otros niveles se mantienen

sin cambios considerables. Además aparecen nuevas probabilidades de fallo en los meses de septiembre y octubre.

Demanda otros usos

La figura 6.20 muestra los valores estimados promedios mensuales de probabilidades de fallo de la demanda otros usos. El máximo valor estimado de probabilidad mensual total de fallo de la demanda es del 17% y se produce en febrero de 2024.

Figura 6.20: Probabilidad promedio mensual de fallo de la demanda futura otros usos [10 Hm³] – Escenario futuro – Subcuenca Tomebamba



Al igual que las otras demandas existe un incremento de los valores estimados de probabilidad de fallo cuando se disminuye la capacidad de embalse de 21 a 10 Hm³, especialmente en el nivel inferior.

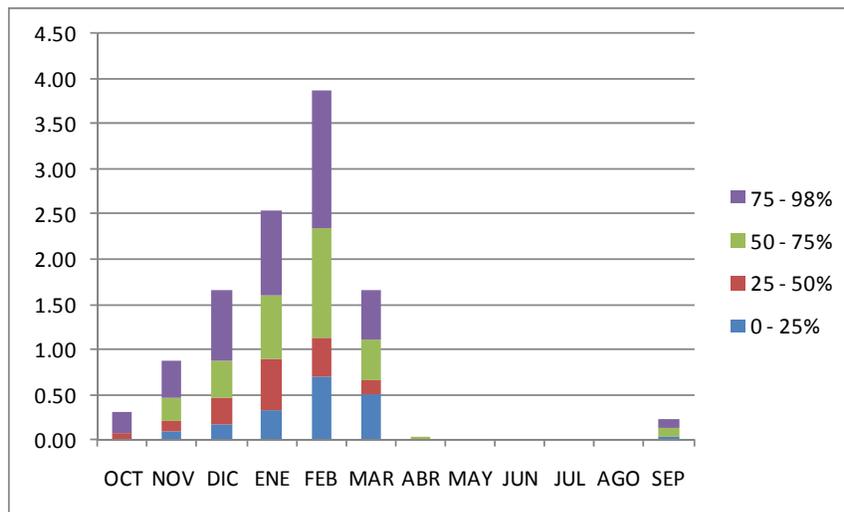
Por último se ha revisado la estimación de probabilidad de fallo de los caudales ecológicos y este valor es máximo en el mes de Febrero de 2026 con un valor de 4%. También hay que hacer notar que las condiciones más graves se producen en el mes de febrero, por lo cual este mes es de suma importancia para la gestión mensual futura del sistema.

Podría interesar para la gestión futura del sistema bajar el valor de estimación de probabilidad de fallo en las demandas, sobre todo de las prioritarias, en el caso de la subcuenca del Tomebamba el uso prioritario es el consumo humano, luego el riego y luego los otros usos, por lo tanto se intentará implementar una restricción en los usos de riego y otros usos de tal manera de bajar la probabilidad de fallo en el suministro para las demandas de consumo humano. Se realizó la simulación múltiple con una restricción del 50% en las demandas de riego y otros usos, manteniendo fija la capacidad del embalse [10 Hm³]. Los resultados de este procedimiento se describen a continuación para la demanda de la ciudad de Cuenca.

Demanda de la ciudad de Cuenca con restricciones en las demandas de riego y otros usos [Capacidad de embalse igual a 10 Hm³]

Los valores estimados promedios mensuales de probabilidades de fallo de la demanda de la ciudad de Cuenca después de simular el sistema con las restricciones en las demandas de riego y demanda otros usos se muestran en la figura 6.21.

Figura 6.21: Probabilidad promedio mensual de fallo de la demanda futura ciudad de Cuenca [10 Hm³] – Escenario futuro con restricciones – Subcuenca Tomebamba



Los valores promedios mensuales de probabilidad total de fallo bajaron, el valor del mes de febrero considerado el mes más crítico en esta subcuenca bajo de 6.2% a 4.8% de igual manera el máximo valor estimado de probabilidad total mensual de fallo bajo

de 11% al 7%. Podríamos asumir estos riesgos como factibles para el sistema, no obstante se debería hacer un análisis más a profundidad sobre la satisfacción del sistema en su conjunto, que debido al alcance del presente estudio queda como recomendación para futuros trabajos.

Como conclusión de este procedimiento se puede indicar que la regla de gestión planificada para este sistema supone una disminución del riesgo de fallo en las demandas para consumo humano en la subcuenca del Tomebamba, sin embargo supone un costo en las demandas de riego y otros usos, dado que no tendrán el suministro total para sus fines. No obstante se pudo también poner restricciones de pequeña magnitud a las demandas prioritarias y así disminuir las restricciones severas en las demandas menos prioritarias, pero esto ya dependerá de la toma de decisiones del gestor del sistema.

Hacer notar que se puede también planificar una mayor capacidad del embalse como se realizó con la capacidad ideal de 21 Hm³, pero como se anotó anteriormente, la capacidad se ha pretendido limitarla (según restricciones físicas, económicas y ambientales), para realizar un procedimiento de gestión con escenarios estocásticos y con un enfoque de riesgo.

Como reflexión final de la simulación estocástica del sistema hídrico de la subcuenca del río Tomebamba, se puede indicar que las reglas de gestión planificadas deberán ser revisadas y perfeccionadas cuando el sistema esté en la fase de explotación. En esta fase se podría realizar una gestión del sistema en periodos muy cortos para la toma de decisiones, como por ejemplo 1, 2 o 3 años, dependiendo de la longitud máxima de las sequías hidrológicas observadas y generadas, unas aplicaciones de este tipo se encuentran en el libro "Gestión de recursos hídricos con decisiones basadas en estimación del riesgo" (Sánchez et al., 2001).

7. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Se ha pretendido realizar un trabajo que explore, analice y aplique metodologías para el análisis de sistemas de recursos hídricos, el mismo que se ha dividido en tres ámbitos:

- Indagación sobre modelación estocástica de series temporales desde lo más conocidos modelos autoregresivos de media móvil (ARMA) hasta los cada vez más explorados y usados modelos periódicos autoregresivos de media móvil (PARMA) para la generación sintética de aportaciones.
- Simulación de sistemas de recursos hídricos para una planificación y gestión futura en las condiciones más desfavorables y con un enfoque de riesgo.
- Aplicación de la metodología en los sistemas de recursos hídricos de las subcuencas de los ríos Tomebamba y Pindilig pertenecientes a la cuenca del río Paute en Ecuador.

Las conclusiones y recomendaciones que se derivan de este trabajo en los tres ámbitos citados se narran a continuación.

7.1. MODELACIÓN ESTOCÁSTICA

La dependencia temporal de las series de tiempo de una variable o varias variables mediante la formulación de modelos lineales, constituyen una manera sencilla y rápida de modelar una realidad donde predominan los procesos aleatorios.

Sin desmerecer lo anotado en el párrafo anterior, conocer la dinámica de variables físicas en un sistema, ayuda considerablemente en la formulación de modelos más competitivos para representar la realidad de un sistema.

La identificación inicial de un modelo estocástico es el proceso más importante en la modelación, dado que se podrían ahorrar cálculos muy laboriosos, con tan solo explorar inicialmente el comportamiento de una serie de tiempo. La normalización y estandarización de los datos, son esenciales en este punto, como también la identificación de las variaciones estacionales en los estadísticos de las series de tiempo.

Los criterios de selección de mejores modelos constituyen cada vez una herramienta fiable para penalizar el exceso número de parámetros en la modelación, es por esto que se debería explorar algunos criterios antes de determinar un modelo ganador.

Por último distinguir la utilidad que se le va a destinar a la modelación estocástica (generación sintética, predicción, etc.), dado que puede haber modelos mejores para determinadas finalidades.

7.2. SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

La simulación de sistemas de recursos hídricos constituye una herramienta para los tomadores de decisiones para alcanzar el objetivo final de satisfacción de la población y del ambiente que la rodea. Entonces podemos decir que es una herramienta para conseguir un desarrollo sustentable en un determinado sistema hídrico.

La metodología que incorpora el riesgo en las decisiones es sumamente necesaria para una planificación y gestión de un sistema hídrico, dado que hay que asegurar el abastecimiento de agua actual y futuro para la población en los distintos usos, además de cumplir con las demandas ambientales y preservarlas para el futuro. En este punto es necesario generar múltiples escenarios futuros que expongan este riesgo de incumplimiento y analicen la información y la decisión de manera probabilística.

En sistemas de explotación de recursos hídricos pueden existir índices de alerta (cuando no son muy graves los fallos) y de alarma (cuando los fallos son

considerables), cuando se presentan estos índices se deberán tomar medidas de gestión y planificación de tal manera de subsanar el estado del sistema.

Como recomendaciones en los casos de alerta pueden implementarse campañas de información donde se estimule el ahorro del recurso o incentivos económicos para quien gaste menos (por ejemplo el que gasta menos es subvencionado por el que gasta más). Por otro lado las empresas suministradoras de agua podrían disminuir la presión de las redes de tuberías en la noche (periodo de menos consumo), de tal manera que existan menos fugas en el sistema y por ende el ahorro del recurso. Y con respecto a la oferta pueden adoptarse medidas a corto y mediano plazo, por ejemplo realizarse importaciones de agua de otros lugares, la explotación de pozos de emergencia, o la implementación de infraestructura de regulación a largo plazo.

Como recomendaciones en los casos de alarma (situación grave de fallos), pueden buscarse otro tipo de fuentes o restringir algunas demandas, por ejemplo las demandas de riego solo podrían suministrarse un determinado volumen de recurso, así los agricultores podrían planificar la producción de productos según la cantidad de agua que tienen. Por otro lado también se podría reducir demandas menos prioritarias o una reducción pequeña pero constante de las demandas prioritarias, de tal manera que la población no sienta el efecto de restricción.

En fin la simulación nos servirá para enfocar todos estos factores en un análisis conjunto y mucho mejor si se introducen escenarios estocásticos para cuantificar el riesgo en la toma de decisiones.

7.3 APLICACIÓN EN CASOS DE ESTUDIO

En la aplicación de los casos de estudios se han extraído algunas enseñanzas, donde las más importantes se ponen a manera de conclusión.

- No se necesita un mayor número de parámetros para obtener un mejor modelo, según los casos de aplicación los mejores modelos fueron con el menor número parámetros.
- La ventaja de introducir el concepto de estacionalidad en el año hidrológico implicó una mejor reproducción de los estadísticos de la muestra histórica. Por otro lado hay que hacer un análisis muy exhaustivo sobre la periodicidad marcada en los estadísticos de la serie histórica antes de proceder con una modelación PARMA con coeficientes constantes o con una modelación PARMA con coeficientes variables. Además hacer notar que el ajuste de los modelos PARMA con coeficientes variables es largo y complejo y hay que poner en la balanza el costo que representa este trabajo con la mejora que se obtiene en la reproducción de los estadísticos de la serie histórica.
- La estimación de la demanda futura mediante métodos más eficientes sería una recomendación importante desde el punto de vista de la simulación con escenarios futuros.
- Las garantías de las demandas adoptadas fueron criterios del autor, sin embargo podrían ser adoptadas o cambiadas según los intereses de los organismos gestores de los sistemas hídricos.
- Los resultados de la simulación de los sistemas mostraron que solo el sistema de la subcuenca del río Tomebamba necesitaría infraestructura de regulación para cumplir con las garantías de las demandas, sin embargo no hay que descartar la posibilidad de implementar embalses en las subcuenca del río Pindilig, dado que los usos potenciales en esta subcuenca son para la generación de energía.
- Indicar además que el proceso de simulación estocástica se podría haber realizado para el caso presente de la subcuencas, o sea los sistemas sin regulación, sin embargo para cumplir los objetivos del presente trabajo, se ha

planificado la implementación de embalses y reglas de gestión para estos, de tal manera de satisfacer en la medida de lo posible las demandas de los sistemas.

- En el presente trabajo se impuso una capacidad de embalse factible, según las supuestas restricciones físicas, económicas y ambientales, sin embargo este procedimiento se lo deberá realizar de una manera más profunda y detallada. Además se deberá poner especial énfasis en los aspectos económicos cuando se realice el estudio de factibilidad y diseño definitivo para la implementación de infraestructuras de regulación.
- Los resultados de la planificación de la gestión muestran que las situaciones más graves se producen en el mes de febrero, por lo cual este mes es de suma importancia para la gestión mensual futura del sistema de recursos hídricos de la subcuenca del río Tomebamba.
- Por último hacer notar que lo realizado en el presente trabajo es una planificación de infraestructura y la gestión futura de esa infraestructura mediante reglas de gestión, las mismas que deberán ser revisadas y perfeccionadas cuando el sistema esté en la fase de explotación. En esta fase se podría realizar una gestión del sistema en periodos muy cortos para la toma de decisiones, realizando una predicción de caudales en base a la información más reciente de las variables hidrológicas y del estado de los embalses.

7.4 LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACION

Las futuras líneas de investigación que se desprenden del presente trabajo se describen a continuación:

- Adentrarse más en nuevos métodos de identificación, ajuste y pruebas de bondad de los modelos periódicos ARMA, introduciendo el concepto de variación estacional en el año hidrológico.
- Explorar los modelos PARMA para predicción, incorporando variables exógenas (lluvia, evapotranspiración, humedad del suelo) como excitación de entrada que mejore los pronósticos de caudales para una gestión de sistemas hídricos en periodos muy cortos para la toma de decisiones.
- Dada la evidencia del cambio global, Incorporar la variación climática en la simulación futura de sistemas de recursos hídricos y producir reglas de adaptación para estas situaciones.
- Incorporar factores económicos a las reglas de decisión en escenarios de riesgo, de tal manera de cuantificar las pérdidas económicas con un determinado nivel de riesgo.
- Extender los análisis de este estudio a toda la cuenca del río Paute, construyendo índices de satisfacción del sistema en su conjunto, derivados de indicadores que se relacionen con las probabilidades de estado de los embalses y probabilidades de fallo de las demandas cuando se realice la simulación en escenarios estocásticos.

REFERENCIAS

Akaike, H., "A new look at the statistical model identification", IEEE Trans: on Automatic Control, AS19, 6, 716-723, 1974

Anderson, P. L. and Meerschaert, M. M., "Periodic moving averages of random variables with regularly varying tails", Annals of Statistics, 25(2), 771–785, 1997

Anderson P. L., Tesfaye Y. G. and Meerschaert M.M., "Fourier-PARMA Models and Their Application to River Flows", Journal of Hydrologic Engineering, 12 (5), 462 - 472, 2007.

Andreu Joaquín, "Conceptos y métodos para la planificación hidrológica", Barcelona – España, CIMNE, 1993.

Andreu et al., J. Andreu, J.Capilla, J.Ferrer y A.Solera, "Modelo Simges para simulación de cuencas : manual de usuario V 3.00", Editorial UPV, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2007

Balairón Luis, "Gestión de recursos hídricos", Cataluña – España, Edición UPC, Universidad Politécnica de Cataluña, 2002.

Box G.E.P., Jenkins G.M., Reinsel G.C., "Time series analysis, Forecasting and Control", Wiley & Sons Inc., Fourth Edition, New Jersey-USA, 2008.

Cryer J. D., Chan Kung-Sic., "Time Series Analysis with applications in R", New York, Springer, Second Edition, 2008

Estrela T., Teodoro Estrela. "Modelos matemáticos para la evaluación de recursos hídricos", Centro de Estudios Hidrográficos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Madrid, 1992.

Filliben, J.J. "The probability plot correlation coefficient test for normality", *Technometrics*, 17(1):pp. 111-117, 1975

Hurvich, C.M. and Tsai, C.-L., "Regression and time series model selection in small samples", *Biometrika*, 76(2):pp. 297-307, 1989

Jones, R. H., and Brelsford, W. M. "Times series with periodic structure", *Biometrika*, 543-4, 403-408, 1967

Lund, R. B. and Basawa, I. V., "Recursive prediction and likelihood evaluation for periodic ARMA models", *Journal Time Series Analysis*, 201, 75-93, 2000

Maidment David R. "Handbook of hydrology", New York - United States of America, McGraw-Hill, 1992.

Marco, J. B., ARMAX and transfer function modelling in hydrology, *Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on stochastic hydrology and its use in water resources systems simulation and optimization*, J. B. Marco et al. (eds.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 117-135, 1993b.

Mondal M. S. and Wasimi S. A., "Periodic Transfer Function-Noise Model for Forecasting", *Journal of Hydrologic Engineering*, 10 (5), 353-362, 2005

Mondal M. S. and Wasimi S. A., "Generating and forecasting monthly flows of the Ganges river with PAR model", *Journal of Hydrologic*, 323, 41-56, 2005

Ochoa, Juan Camilo. "Modelo estocástico de redes neuronales para la síntesis de caudales aplicados a la gestión probabilística de sequías". Tesis Doctoral Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, Valencia-España, Universidad Politécnica de Valencia, 2002, 205 p.

Pagano, M. "On periodic and multiple autoregressions", *Annals of Statistics*, 6 (6), 1310–1317, 1978

Salas, J. D., Delleur, J. W., Yevjevich, V. y Lane, W. L., *Applied modeling of hydrologic time series*. Water Resources Publications, Littleton, Colorado, 1980.

Salas, J. D., Obeysekera, J. T. B. and Smith, R. A., "Identification of streamflow stochastic models", *Journal of the Hydraulics Division*, 1077, 853–866, 1981

Salas, J. D., Boes, D. C. and Smith, R. A., "Estimation of ARMA models with seasonal parameters", *Water Resources Research*, 184, 1006–1010, 1982

Salas, J. D., Tabios, G. Q., and Bartolini, P., "Approaches to multivariate modeling of water resources time series", *Water Resource Bulletin*, 214, 683–708, 1985

Salas J. D. and J. T. B. Obeysekera J. T. B., "Conceptual Basis of Seasonal Streamflow Time Series Models", *Journal of Hydraulic Engineering*, 118:8(1186-1194), 1992.

Sánchez, S. T., Andreu, J. y Solera, A., *Gestión de recursos hídricos con decisiones basadas en estimación del riesgo*, Editorial Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2001.

Sarnaglia A.J.Q., Reisen V.A. and Lévy-Leduc C., "Robust estimation of periodic autoregressive processes in the presence of additive outliers" *Journal of Multivariate Analysis*, 101, 2168-2183, 2010.

Shao Q., Wong H., Ming Li and Wai-Cheung Ip, "Streamflow forecasting using functional-coefficient time series model with periodic variation", *Journal of Hydrology*, 368, 88-95, 2009.

Solera, Abel, "Herramientas y métodos para la ayuda a la decisión en la gestión sistemática de recursos hídricos. Aplicación a las cuencas de los ríos Tajo y Júcar", Tesis

Doctoral Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Valencia - España, Universidad Politécnica de Valencia, Diciembre 2003, 278 p.

Sveinsson, O. G. B., Salas, J. D., Lane, W. L., and Frevert, D. K., Stochastic analysis modeling and simulation (SAMS) - Version 2007 - User's Manual, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 2007.

Tesfaye, Y. G., Meerschaert, M. M. and Anderson, P. L., "Identification of PARMA models and their application to the modeling of river flows", Water Resources Research, 421, 2006

Ula, T. A., "Periodic covariance stationarity of multivariate periodic autoregressive moving average processes", Water Resources Research, 265, 855–861, 1990

Ula, T. A., "Forecasting of multivariate periodic autoregressive moving average processes", Journal Time Series Analysis, 146, 645–657, 1993

Ula, T. A. and Smadi, A. A., "Periodic stationarity conditions for periodic autoregressive moving average processes as eigenvalue problems", Water Resources Research, 338, 1929–1934, 1997

Ula, T. A., and Smadi, A. A., "Identification of periodic moving average models" Communications in Statistics - Theory and Methods, 3212, 2465–2475, 2003

Vecchia, A. V., "Periodic autoregressive-moving average (PARMA) modelling with applications to water resources", Water Resource Bulletin, 21, 721–730, 1985

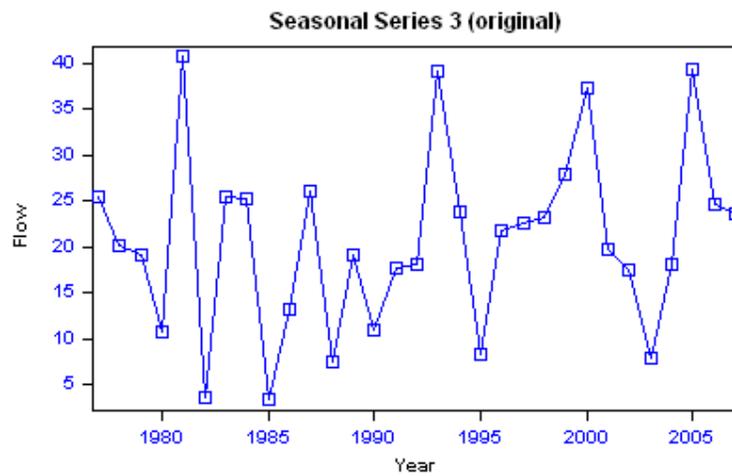
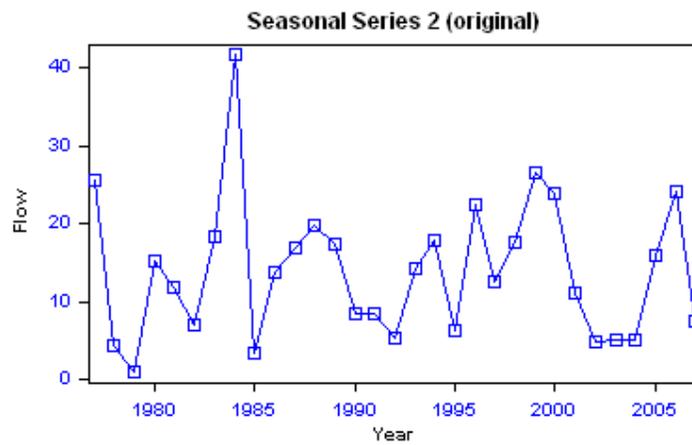
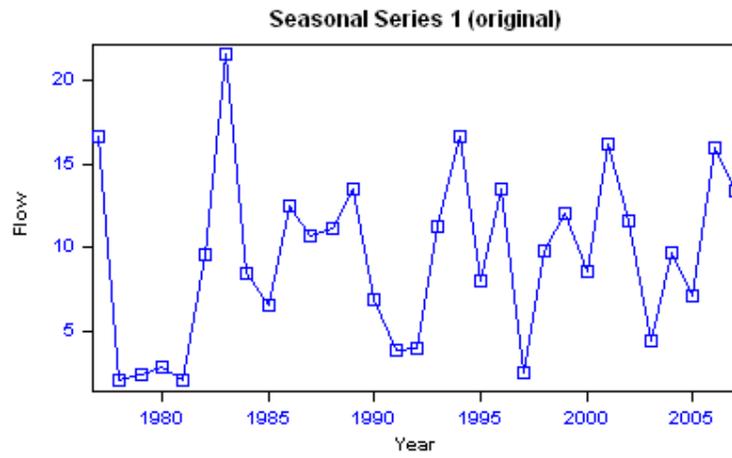
Vecchia, A. V., and Ballerini, R. "Testing for periodic autocorrelations in seasonal time series data", Biometrika, 781, 53–63, 1991

Ven Te Chow, et al, "Hidrología Aplicada", Santa Fe de Bogotá – Colombia, McGraw Hill, 1994

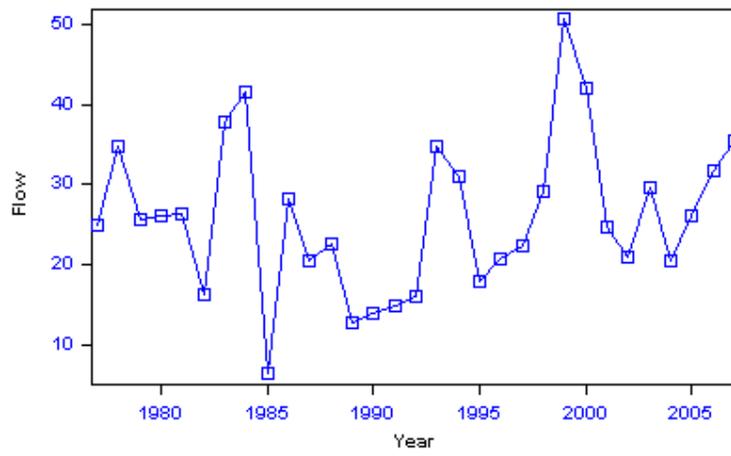
APÉNDICES

APÉNDICE 1

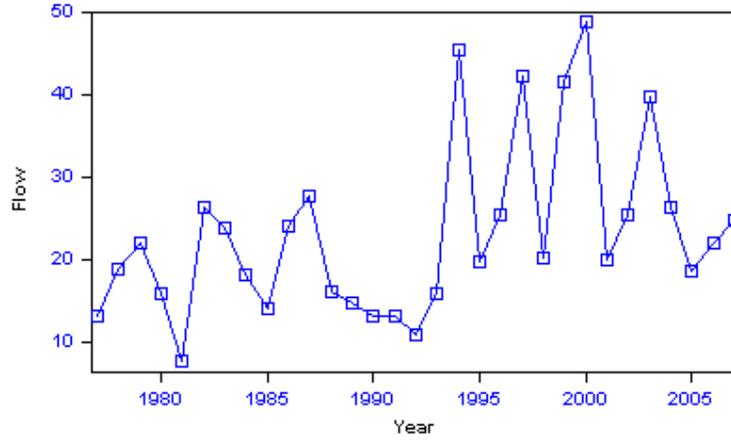
Aportaciones medias mensuales en la Estación Matadero en Sayausi (1977-2007)



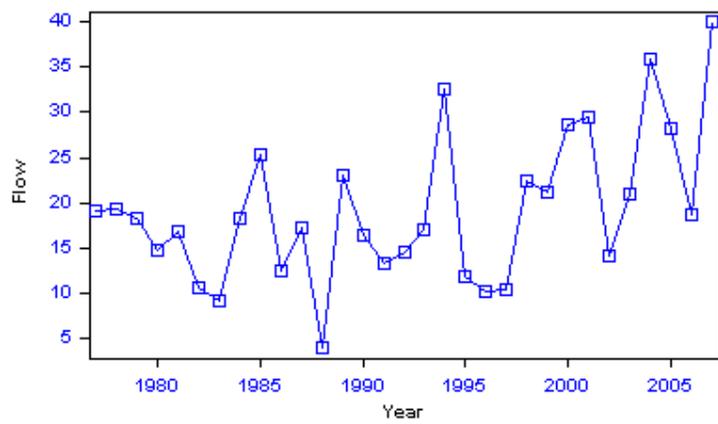
Seasonal Series 4 (original)

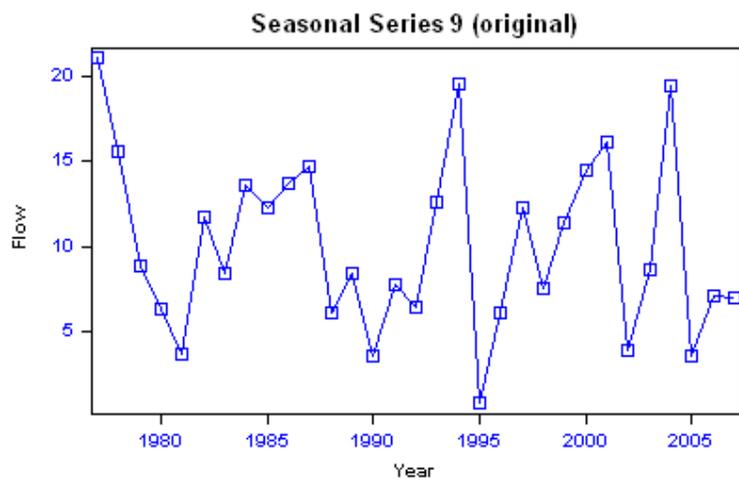
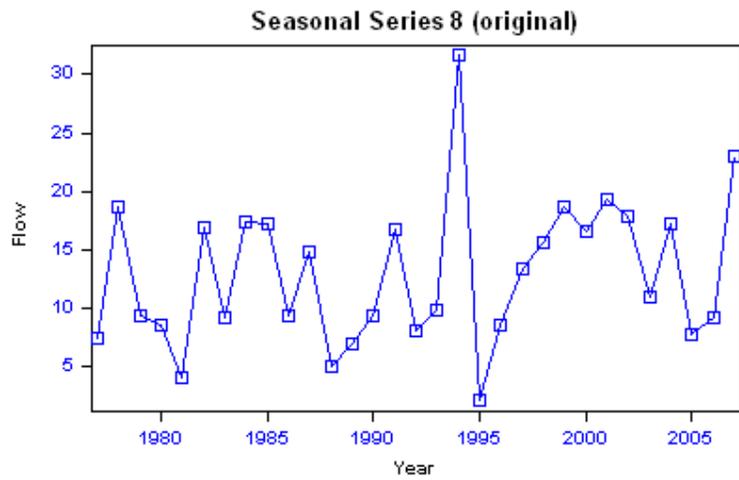
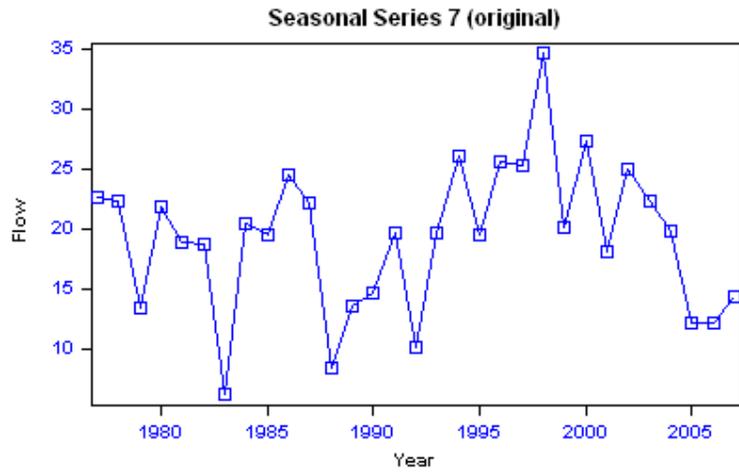


Seasonal Series 5 (original)

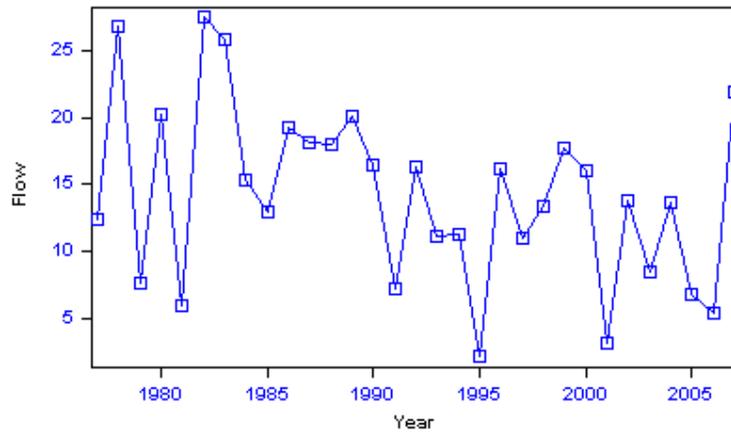


Seasonal Series 6 (original)

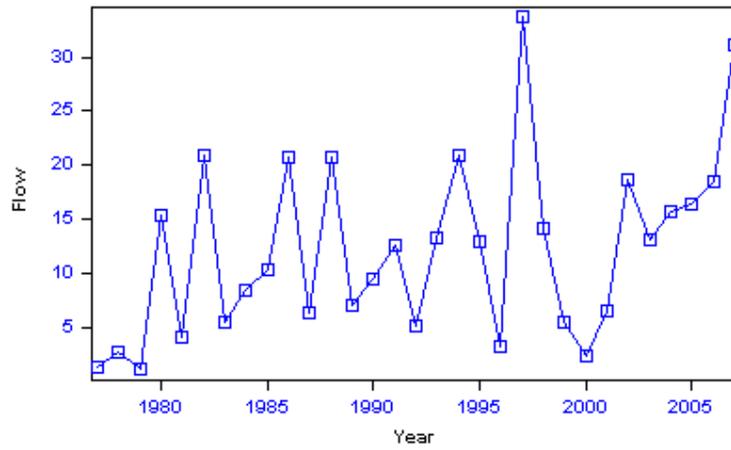




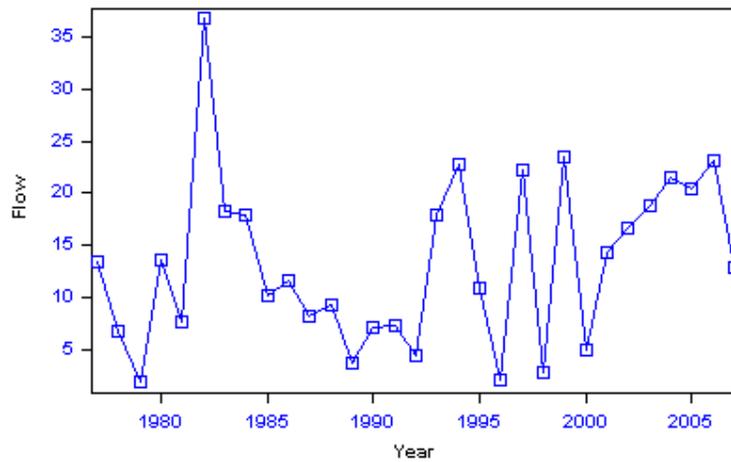
Seasonal Series 10 (original)



Seasonal Series 11 (original)

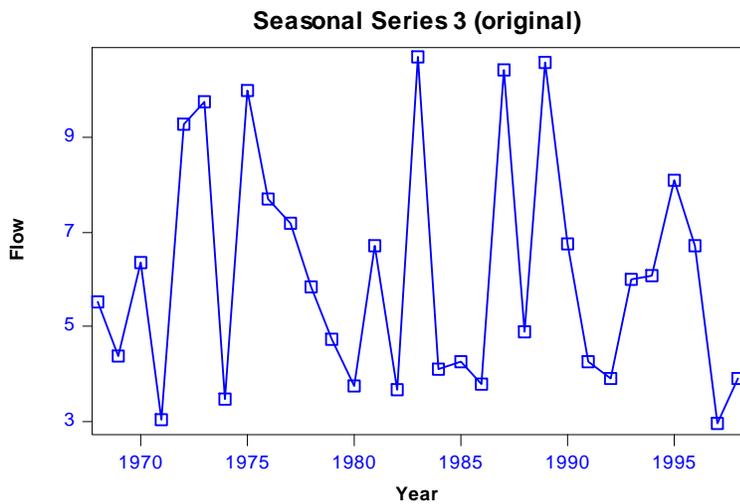
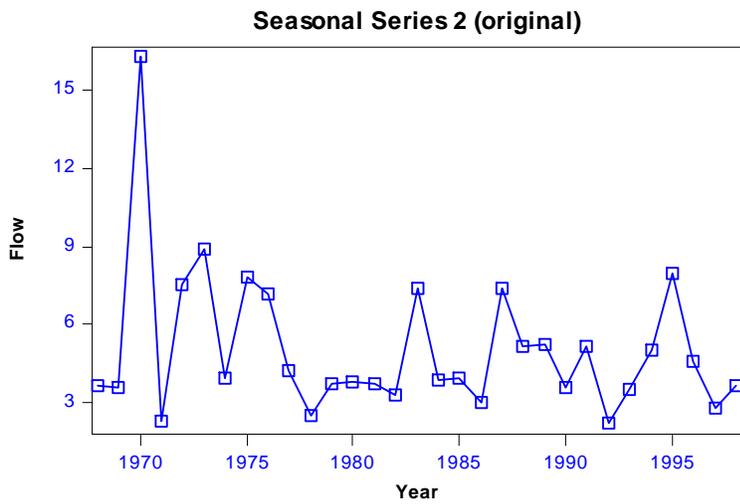
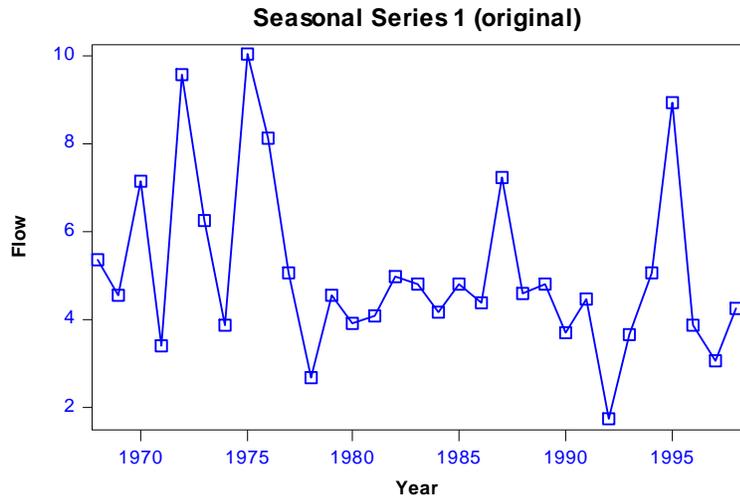


Seasonal Series 12 (original)

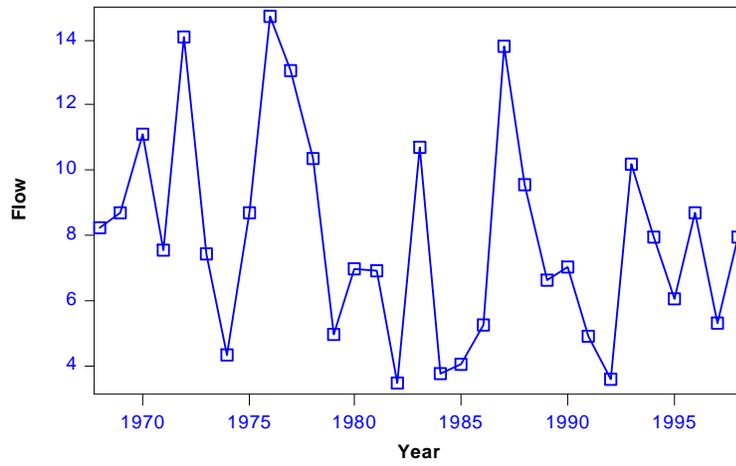


APÉNDICE 2

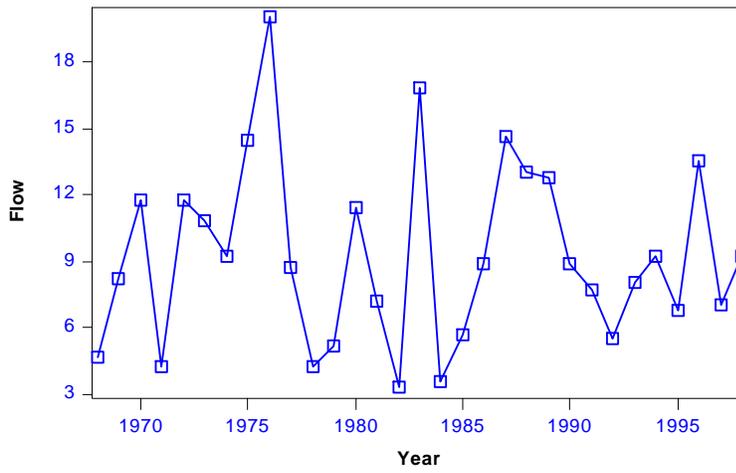
Aportaciones medias mensuales en la Estación Dudas en Pindilig (1968-1998)



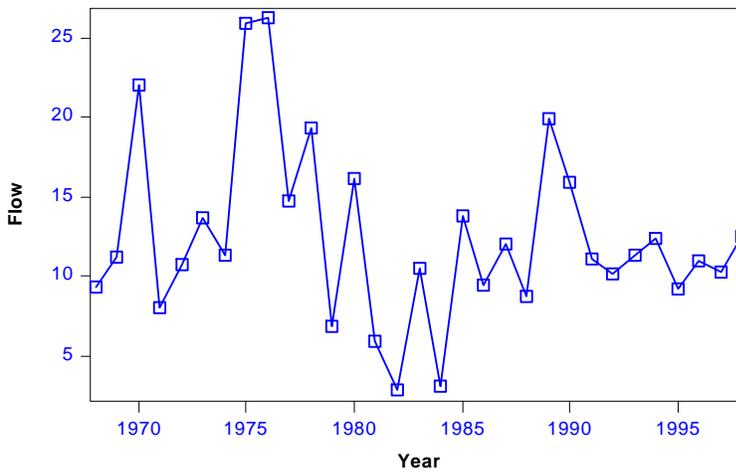
Seasonal Series 4 (original)



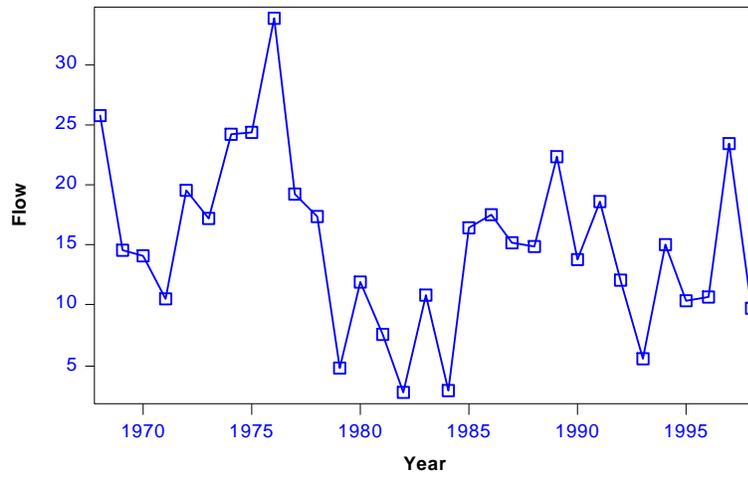
Seasonal Series 5 (original)



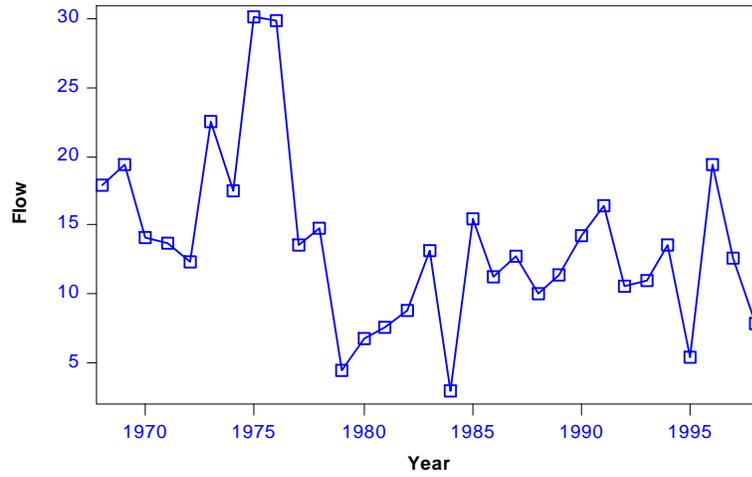
Seasonal Series 6 (original)



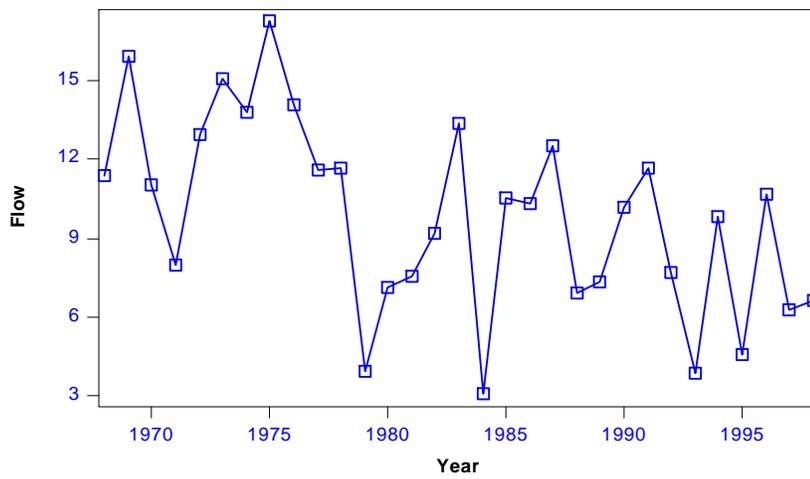
Seasonal Series 7 (original)



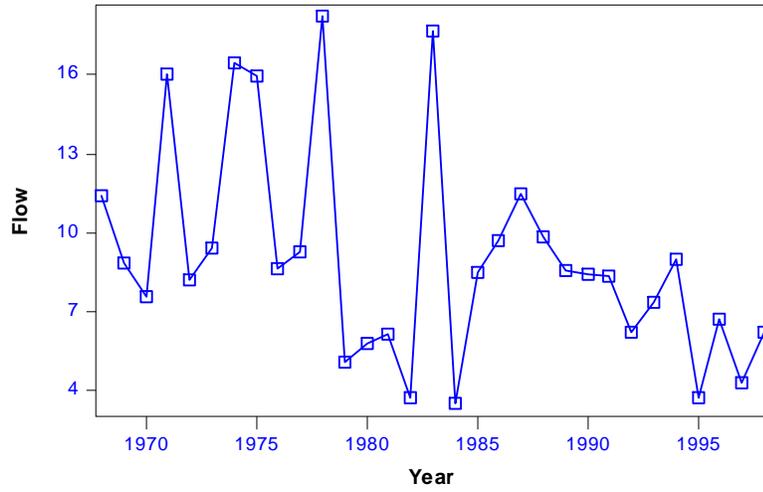
Seasonal Series 8 (original)



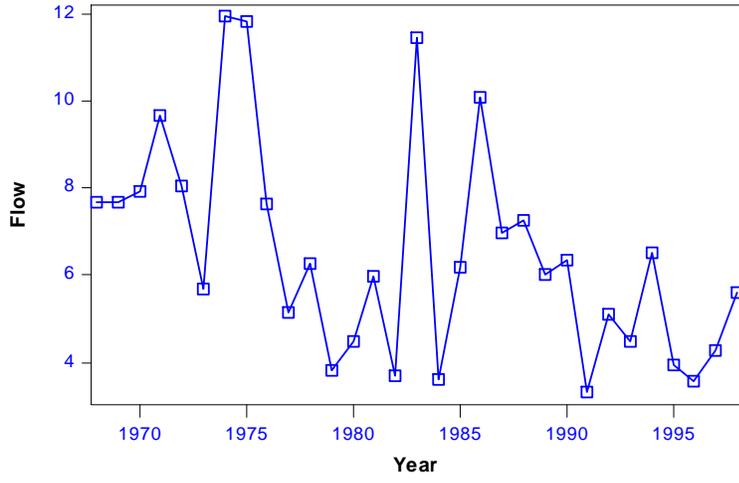
Seasonal Series 9 (original)



Seasonal Series 10 (original)



Seasonal Series 11 (original)



Seasonal Series 12 (original)

