

**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
AREA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERIA
MAESTRIA EN INGENIERIA AMBIENTAL**

**EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL EMBALSE PAO-CACHINCHE EN EL
PERÍODO 1983-2009**

AUTOR: *Ing. Milagros S.Padrón V.*
TUTOR: *MSc. Ing. Adriana Márquez*

BÁRBULA, ABRIL 2011

**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
AREA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERIA
MAESTRIA EN INGENIERIA AMBIENTAL**

**EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL EMBALSE PAO-CACHINCHE EN EL
PERÍODO 1983-2009**

AUTOR: Ing. Milagros S. Padrón V.

Trabajo de Grado presentado ante el Área de Estudios de Postgrado de la Universidad De Carabobo para optar al Título de Magíster en Ingeniería Ambiental

BÁRBULA, ABRIL 2011



ACTA DE DISCUSIÓN DE TRABAJO DE GRADO

En atención a lo dispuesto en los Artículos 137, 138 y 139 del Reglamento de Estudios de Postgrado de la Universidad de Carabobo, quienes suscribimos como Jurado designado por el Consejo de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a lo previsto en el Artículo 135 del citado Reglamento, para estudiar el Trabajo de Grado titulado:

“EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL EMBALSE PAO - CACHINCHE EN EL PERÍODO 1983-2009”

Presentado para optar al grado de **MAGÍSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL** por el (la) aspirante:

MILAGROS PADRÓN
V.-12.168.669

Habiendo examinado el Trabajo presentado, decidimos que el mismo está **APROBADO**.

En Valencia, a los cinco (05) días del mes de Abril del año dos mil once.



Luis Ayala
28/06/11

Auxilia Mallia
Prof. Auxilia Mallia
C.I.: 8842098
Fecha: 05/04/2011
FE: 05/04/2011/D6.-



Edilberto Guevara
Prof. Edilberto Guevara
C.I.: 10513817
Fecha: 05/04/2011

Edgar Mujica
Prof. Edgar Mujica
C.I.: 7169235
Fecha: 05/04/2011

**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
AREA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERIA
MAESTRIA EN INGENIERIA AMBIENTAL**

**EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL EMBALSE PAO-CACHINCHE EN EL
PERÍODO 1983-2009**

AUTOR: Ing. Milagros S. Padrón V.

Aprobado en el Área de Estudios de Postgrado de la Universidad de Carabobo por
Miembros de la Comisión Coordinadora del Programa:

_____ (Nombre, Apellido, Firma)

_____ (Nombre, Apellido, Firma)

_____ (Nombre, Apellido, Firma)

BÁRBULA, ABRIL 2011

**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
AREA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERIA
MAESTRIA EN INGENIERIA AMBIENTAL**

VEREDICTO

Nosotros, Miembros del Jurado designado para la evaluación del Trabajo de Grado titulado: **EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL EMBALSE PAO-CACHINCHE EN EL PERÍODO 1983-2009**, presentado por la Ing. Milagros Sofía Padrón Vitale, para optar al título de Magíster en Ingeniería Ambiental, estimamos que el mismo reúne los requisitos para ser considerado como: _____

Nombre, Apellido, C.I., Firma del Jurado

BÁRBULA, ABRIL 2011

DEDICATORIA

A Dios, principio y fin de todo

A mi madre, por impulsarme a culminar la meta

RECONOCIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios, mi *Guía* y mi luz.

Agradezco a mis padres por inspirarme perseverancia, serenidad y fortaleza para alcanzar las metas.

Mi eterno agradecimiento a mi amiga y tutora Adriana, por la confianza depositada para culminar con éxito este trabajo, su apoyo incondicional en todo momento y sus consejos certeros y “providenciales” para afrontar las vicisitudes en el camino hacia el logro de la meta.

Un reconocimiento especial merece el personal que labora en el Departamento de Captación de Fuentes Superficiales de Hidrocentro: El Ing. Orson Mora, Gerente de Captación, Tratamiento y Mantenimiento; por poner a disposición su tiempo, conocimientos y experiencia en la recopilación de la información técnica para llevar a cabo esta investigación. Asimismo, hago extensiva mi gratitud a los Técnicos Elio Aguirre y Fredy Yagia y al Ing. Manuel González, quienes siempre con mucha paciencia y cordialidad me brindaron toda su colaboración.

A los ingenieros Alexander Peña y Francisco Lares, de la Estación de Bombeo Red Media, quienes gentilmente me atendieron en su sede y suministraron toda la información referida al bombeo del embalse.

Al Ing. Luis Brito, Coordinador de la Sala SIG de CORPOCENTRO, quien gentilmente permitió el acceso a la base de datos del Sistema Ambiental del Estado Carabobo; y muy especialmente al Geógrafo Simón, quien con una enorme paciencia y total disposición me brindó todas las herramientas necesarias para defenderme con el uso del software para la georreferenciación de las zonas de estudio.

Finalmente, agradezco el apoyo institucional por parte del Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales de la Universidad de Carabobo (CIHAM-UC), que hizo posible el suministro, por parte de los entes gubernamentales, de toda la información recopilada, así como también al Proyecto Cuencas, dentro del cual se enmarca este trabajo.

Milagros

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE GRÁFICAS Y FIGURAS	xvii
RESUMEN	xxiv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	
Planteamiento del Problema	3
Formulación del Problema	6
Objetivos del Estudio	6
<i>Objetivo General</i>	6
<i>Objetivos Específicos</i>	6
Justificación de la Investigación	7
Alcances y Limitaciones	7
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	
Descripción de las Áreas de Estudio	9
Antecedentes	15
Bases Teóricas	19
Modelación de Operación de Embalses con los programas HEC	19
<i>Modelación geoespacial con el programa HEC-GeoHMS</i>	19
<i>Modelación hidrológica con el programa HEC-HMS</i>	24
<i>Modelación del tránsito en canales con el programa HEC-HMS</i>	37
<i>Modelo de sistema para tránsito de crecientes en el embalse</i>	41
Simulación de Operación de Embalse con el programa HEC-ResSim	43

Modelos de Pronóstico	46
<i>Modelos ARIMA</i>	46
<i>Modelo de Red Neuronal Artificial (RNA)</i>	48
Análisis de Series de Tiempo	61
<i>Descomposición Estacional</i>	61
Índices Estacionales	62
Bases Legales	62
CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO	
Nivel de la Investigación	63
Tipo de Investigación	63
Diseño de la Investigación	63
Población y Muestra	64
Etapas de la Investigación	64
<i>Etapa 1: Recolección de los datos</i>	65
<i>Etapa 2: Caracterización del Sistema Regional del Centro I (SRCI)</i>	67
<i>Etapa 3: Diagnóstico de la Operación del Embalse durante el Período 1983-2009</i>	72
<i>Etapa 4: Procesamiento de los Datos</i>	75
<i>Etapa 5: Evaluación de los Resultados</i>	75
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	
Caracterización física y operacional del Sistema Regional del Centro I	95
Caracterización del Área de Estudio	95
<i>Características Físicas del Subsistema Cuenca Río Pao</i>	95
Caracterización Operacional del Embalse Pao-Cachinche	120
Diagnóstico de la Operación Histórica del Sistema Regional del Centro durante el período 1983-2009	129
<i>Descomposición estacional de las series de tiempo diaria del embalse Pao-Cachinche durante el período 1983-2009:</i>	129

<i>Aporte-Extracción</i>	129
<i>Alivio</i>	132
<i>Gasto de Bombeo</i>	134
<i>Evaporación</i>	137
<i>Gasto Ecológico</i>	140
Balances Hídricos del Embalse Pao-Cachinche en el período 1983-2009	142
Reglas Generales de Operación del Embalse Pao-Cachinche	233
Modelación del Aporte Hídrico de las Subcuencas Afluentes al Embalse Pao-Cachinche	235
<i>Modelación del aporte-extracción diario al embalse en el período 2005-2008</i>	235
<i>Modelación del aporte-extracción mensual al embalse en el período 2005-2008</i>	241
Modelos de Red Neuronal Artificial	247
<i>Modelación del aporte-extracción diario al embalse:</i>	247
<i>(a) RNA (1):1983-2009</i>	247
<i>(b) RNA (2): 2005-2009</i>	248
<i>(c) RNA (3): 2008-2009</i>	249
<i>Modelación del aporte-extracción mensual al embalse</i>	249
Calidad de ajuste de los modelos estocásticos (ARIMA) vs los modelos de Red Neuronal Artificial (RNA)	250
Simulación de Operación de Crecientes del Embalse Pao-Cachinche	254
Modelación del proceso lluvia-escorrentía para la estimación del gasto de salida en el subsistema cuenca río Pao	254
<i>Modelación del proceso lluvia-escorrentía con HEC-HMS</i>	272
<i>Modelación de crecientes en la subcuenca del río Chirgua</i>	273
<i>Modelación de crecientes en la subcuenca del río Paíto</i>	275
<i>Modelación de crecientes en la subcuenca del río Pirapira</i>	280
<i>Modelación de crecientes en la subcuenca del río Paya</i>	283

<i>Modelación de crecientes en la subcuenca del río San Pedro</i>	287
Caudales máximos de crecientes en el subsistema cuenca Río Pao	290
Modelación determinística del subsistema Embalse Pao-Cachinche	293
Simulación de eventos de crecidas con HEC-ResSim	301
Establecimiento del Modelo óptimo de Operación del Embalse Pao-Cachinche	304
<i>Aplicación de las técnicas de modelado para la operación del embalse</i>	305
<i>Modelación de las entradas y salidas del embalse</i>	305
<i>Modelación de eventos de crecidas</i>	306
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	307
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	311
ANEXOS	
Anexo A: Tablas para el cálculo de CNI, CNII y CNIII	317
Anexo B: Tablas de atributos de la cuenca y de las corrientes	319
Anexo C: Modelos de cuenca alimentados al programa HEC-HMS	321
Anexo D: Tormentas de diseño para la cuenca del río Paito	324
Anexo E: Cálculo del Tránsito de Crecientes en la Cuenca del Río Chirgua	328
Anexo F: Simulación de Crecidas con HEC-ResSim	330
Anexo G: Imágenes Cuenca del Río Pao y Embalse Pao-Cachinche	331
Anexo H: Autocorrelaciones para el aporte neto diario y mensual	336
Anexo I: Resultados de la modelación lluvia-escorrentía para tormenta de diseño de Tr=5 años y D=3 horas en la cuenca del río Chirgua	340

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Pág
		.
1	Datos técnicos del embalse Pao-Cachinche.....	13
2	Características físicas de las subcuencas afluentes al embalse Pao-Cachinche.....	96
3	Atributos de las corrientes afluentes al embalse Pao-Cachinche.....	97
4	Tipo de suelo en la cuenca del río Chirgua.....	107
5	Tipo de suelo en la cuenca del río Paito.....	109
6	Uso actual del suelo en la cuenca del río Chirgua.....	111
7	Uso actual del suelo en la cuenca del río Paito.....	112
8	Tipo de suelo en la cuenca del río Pirapira.....	113
9	Tipo de suelo en la cuenca del río Paya.....	114
10	Tipo de suelo en la cuenca del río San Pedro.....	116
11	Uso actual del suelo en la cuenca del río Pirapira, Paya y San Pedro	117
12	Índices de estacionalidad para el aporte neto diario.....	131
13	Índices de estacionalidad para el alivio diario.....	134
14	Índices de estacionalidad para el gasto de bombeo diario.....	137

15	Índices de estacionalidad para la evaporación diaria.....	139
16	Índices de estacionalidad para el gasto ecológico diario.....	141
17	Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 1983	144
18	Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 1984	147
19	Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 1985	151
20	Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 1986	153
21	Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 1987	157
22	Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 1988	162
23	Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 1989	164
24	Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 1990	168
25	Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 1991	170
26	Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 1992	173
27	Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 1993	177
28	Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 1994	180
29	Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 1995	184
30	Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 1996	187
31	Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 1997	190
32	Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 1998	193
33	Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 1999	196
34	Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 2000	198

35	Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 2001	201
36	Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 2002	205
37	Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 2003	208
38	Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 2004	212
39	Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 2005	214
40	Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 2006	218
41	Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 2007	222
42	Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 2008	225
43	Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 2009	229
44	Resumen del análisis del aporte-extracción diario en el período 2005-2009.....	236
45	Modelación estocástica del aporte-extracción mensual al embalse durante el período 2005-2009.....	238
46	Pronósticos del aporte-extracción diario para enero de 2009 con el modelo $ARIMA(2,0,2) \times (2,0,0)_3$ con constante.....	240
47	Resumen del análisis del aporte neto mensual durante el período 2005-2009.....	242
48	Modelación estocástica del aporte-extracción mensual al embalse durante el período 2005-2009.....	244
49	Pronósticos del aporte-extracción mensual entre enero-agosto de 2009 con el modelo $ARIMA(0,0,1) \times (2,0,1)_6$ con constante.....	246
50	Calidad de ajuste de modelos para series diarias.....	251
51	Calidad de ajuste de modelos para series mensuales.....	253
52	Número de curva para la cuenca del río Chirgua.....	255
53	Número de curva para la cuenca del río Paito.....	258

54	Número de curva para la cuenca del río Pirapira.....	261
55	Número de curva para la cuenca del río Paya.....	264
56	Número de curva para la cuenca del río San Pedro.....	266
57	Tiempos estimados de concentración y de retardo en el subsistema cuenca río Pao.....	269
58	Índice de abstracción inicial (I_a), número de curva (CN) y retención máxima (S) en el subsistema cuenca río Pao.....	270
59	Tormenta de diseño para $T_r=5$ años y $D=3h$ en la cuenca del río Chirgua.....	272
60	Modelación lluvia-escorrentía en la cuenca del río Chirgua para períodos de retorno de 5,10 y 50 años y duraciones de 3 y 6 horas	273
61	Modelación lluvia-escorrentía en la cuenca del río Paito para períodos de retorno de 5,10 y 50 años y duraciones de 3 y 6 horas	275
62	Modelación lluvia-escorrentía en la cuenca del río Pirapira para períodos de retorno de 5,10 y 50 años y duraciones de 3 y 6 horas	280
63	Modelación lluvia-escorrentía en la cuenca del río Paya para períodos de retorno de 5,10 y 50 años y duraciones de 3 y 6 horas	284
64	Modelación lluvia-escorrentía en la cuenca del río San Pedro para períodos de retorno de 5,10 y 50 años y duraciones de 3 y 6 horas	287
65	Caudales máximos de crecientes en el subsistema cuenca río Pao	291
66	Caudales máximos de entrada al embalse vs caudal máximo de diseño del aliviadero.....	294
67	Aporte simultáneo de los afluentes al embalse Pao-Cachinche para una tormenta de 3h y períodos de retorno de 5,10 y 50 años.....	297
68	Aporte simultáneo de los afluentes al embalse Pao-Cachinche para una tormenta de 6h y períodos de retorno de 5,10 y 50 años.....	298
69	Volumen total descargado al embalse por el aporte simultáneo de los afluentes para tormentas de 3 y 6h.....	299
A-1	Tabla para el cálculo del CNI con HEC-GeoHMS.....	317
A-2	Tabla para el cálculo del CNII con HEC-GeoHMS.....	317

A-3	Tabla para el cálculo del CNIII con HEC-GeoHMS.....	318
B-1	Características físicas de la cuenca del río Chirgua.....	319
B-2	Atributos de las corrientes en la cuenca del río chirgua.....	319
B-3	Características físicas de la cuenca del río Paito.....	320
B-4	Atributos de las corrientes en la cuenca del río Paíto.....	320
D-1	Tormenta de diseño para $Tr=5$ años y $D=3h$ en la cuenca del río Pao.....	324
D-2	Tormenta de diseño para $Tr=5$ años y $D=6h$ en la cuenca del río Pao.....	324
D-3	Tormenta de diseño para $Tr=10$ años y $D=3h$ en la cuenca del río Pao.....	325
D-4	Tormenta de diseño para $Tr=10$ años y $D=6h$ en la cuenca del río Pao.....	325
D-5	Tormenta de diseño para $Tr=50$ años y $D=3h$ en la cuenca del río Pao.....	326
D-6	Tormenta de diseño para $Tr=50$ años y $D=6h$ en la cuenca del río Pao.....	326
E-1	Caudales de descarga del vertedero vs altura de la cresta.....	328
E-3	Tránsito de la creciente para $Tr=5$ años y $D=3h$, con $L=47.5$ m.....	329
H-1	Autocorrelaciones estimadas para el aporte-extracción diario en el período 1983-2009 con el modelo $ARIMA(2,0,2) \times (2,0,0)_3$ con constante.....	336
H-2	Autocorrelaciones parciales estimadas para el aporte-extracción diario en el período 1983-2009 con el modelo $ARIMA(2,0,2) \times (2,0,0)_3$ con constante.....	337
H-3	Autocorrelaciones estimadas para el aporte-extracción mensual en el período 2005-2009 con el modelo $ARIMA(0,0,1) \times (2,0,1)_6$ con	338

	constante.....	
	.	
H-4	Autocorrelaciones parciales estimadas para el aporte-extracción mensual en el período 2005-2009 con el modelo ARIMA(0,0,1)x(2,0,1)6 con constante.....	339
I-1	Resumen de resultados de la corrida con HEC-HMS.....	340
I-2	Resultados de la corrida con HEC-HMS.....	340

ÍNDICE DE GRÁFICAS Y FIGURAS

Gráfica		Pág
1	Curva de tránsito por el aliviadero del embalse Pao-Cachinche	85
2	Curva área-capacidad del embalse Pao-Cachinche	122
3	Curva de caudales de descarga al cauce	124
4	Caudales según número de bombas en funcionamiento	125
5	Aporte-extracción diario al embalse Pao-Cachinche en el período 1983-2009	130
6	Ciclo-tendencia del aporte-extracción diario en el período 1983-2009	131
7	Índice estacional del aporte neto diario	132
8	Alivio diario al embalse Pao-Cachinche en el período 1983-2009	132
9	Ciclo-tendencia del alivio diario en el período 1983-2009	133
10	Índice estacional del alivio diario	134
11	Gasto de bombeo diario al embalse Pao-Cachinche en el período 1983-2009	135

12	Ciclo-tendencia del gasto de bombeo diario en el período 1983-2009	136
13	Índice estacional del gasto de bombeo diario en el período 2004-2009	137
14	Evaporación diaria en el embalse Pao-Cachinche en el período 1983-2009	138
15	Ciclo-tendencia de la evaporación diaria en el período 1983-2009	138
16	Índice estacional de la evaporación diaria	139
17	Gasto ecológico diario en el embalse Pao-Cachinche en el período 1983-2009	140
18	Ciclo-tendencia del gasto ecológico diario en el período 1983-2009	141
19	Índice estacional del gasto ecológico diario	142
20	Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 1983	145
21	Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 1984	148
22	Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 1985	150
23	Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 1986	155
24	Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 1987	159
25	Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 1988	161
26	Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 1989	166
27	Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 1990	167
28	Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 1991	172
29	Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 1992	175

30	Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 1993	178
31	Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 1994	182
32	Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 1995	185
33	Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 1996	188
34	Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 1997	191
35	Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 1998	194
36	Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 1999	197
37	Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 2000	198
38	Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 2001	203
39	Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 2002	206
40	Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 2003	209
41	Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 2005	216
42	Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 2006	220
43	Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 2007	224
44	Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 2008	227
45	Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 2009	231
46	Aporte-extracción diario al embalse Pao-Cachinche en el período 2005-2009	232

47	Aporte-Extracción diaria al embalse Pao-Cachinche durante el período 1983-2009	236
48	Autocorrelación del aporte-extracción diario al embalse Pao-Cachinche en el período 2005-2009	237
49	Pronóstico del aporte-extracción diario para enero de 2009 con el modelo $ARIMA(2,0,2) \times (2,0,0)_3$ con constante	239
50	Autocorrelación de residuos para el ajuste del aporte-extracción diario con el modelo $ARIMA(2,0,2) \times (2,0,0)_3$ con constante	241
51	Aporte-extracción mensual al embalse Pao-Cachinche en el período 2005-2009	242
52	Autocorrelación del aporte-extracción mensual al embalse Pao-Cachinche en el período 2005-2009	243
53	Secuencia de tiempo para el aporte-extracción mensual en el período 2005-2009 con el modelo $ARIMA(0,0,1) \times (2,0,1)_6$ con constante	245
54	Pronóstico del aporte-extracción mensual en el período enero-agosto de 2009 con el modelo $ARIMA(0,0,1) \times (2,0,1)_6$ con constante	245
55	Autocorrelación de residuos para el ajuste del aporte-extracción mensual con el modelo $ARIMA(0,0,1) \times (2,0,1)_6$ con constante	247
56	Correlación del aporte-extracción observado vs aporte-extracción estimado: (a) serie diaria y (b) serie mensual	252
57	Histograma de crecientes en la cuenca del río Chirgua para tormenta de $Tr=5$ años y $D=3h$	272
58	Crecientes de entrada vs crecientes de salida para el aporte simultáneo de los afluentes al embalse Pao-Cachinche, para una tormenta de 3 horas	297
59	Crecientes de entrada vs crecientes de salida para el aporte simultáneo de los afluentes al embalse Pao-Cachinche, para una tormenta de 6 horas	299
60	Descarga total del aporte simultáneo de los afluentes al embalse Pao-Cachinche para tormentas de: (a) 3h y (b) 6h	300
61	Distribución de Weibull para caudales máximos de salida en el aliviadero del embalse Pao-Cachinche	300
C-1	Modelo de cuenca río Chirgua	321

C-2	Modelo de cuenca río Paito	321
C-3	Modelo de cuenca río Pirapira	322
C-4	Modelo de cuenca río Paya	322
C-5	Modelo de cuenca río San Pedro	323
D-7	Histograma de tormenta en la cuenca del río Paito para períodos de retorno de 5,10 y 50 años y duraciones de 3 y 6 horas	327
E-2	Gráfica de $(2S/t + O)$ vs O	328
F	Simulación de crecidas con HEC-ResSim	330
G-1	Imágenes cuenca río Pao	331
G-2	Imágenes embalse Pao-Cachinche	332
G-3	Ortofotomapa área de influencia del embalse Pao-Cachinche	333
G-4	Mapas de curvas de nivel de la cuenca del río Pao	334
G-5	Mapa de la hidrografía en la cuenca del río Pao	335

Figura		Pág.
1	Componentes del SRC1	9
2	Cuenca del río Pao	10
3	Vista del embalse Pao-Cachinche	12
4	Planta de Potabilización Alejo Zuloaga: (a) sistema convencional y (b) sistema de Grémont	15
5	Fundamento de operación de una red neuronal artificial	49

6	Modelo de neurona: (a) sin sesgo y (b) sesgada	50
7	Función de transferencia de límite pesado (Hard limit)	51
8	Función de transferencia lineal	52
9	Función de transferencia sigmoideal	52
10	Neurona con vector de entrada y un solo elemento R de entrada	53
11	Capa de una red	54
12	Arquitectura de red para una capa de neuronas	55
13	Capa de neuronas	56
14	Representación abreviada de una capa de neuronas	58
15	Capas de múltiples neuronas	59
16	Representación abreviada de una capa de múltiples neuronas	60
17	Subsistemas del SRCI	68
18	Esquema del procesamiento de los datos	75
19	Mapa de curvas de nivel de la cuenca del río Paito	99
20	Mapa de curvas de nivel de la cuenca del río Chirgua	101
21	Mapa de curvas de nivel de la cuenca del río San Pedro	102
22	Mapa de curvas de nivel de la cuenca del río Pirapira	104
23	Mapa de curvas de nivel de la cuenca del río Paya	105
24	Mapa del tipo de suelo en la cuenca del río Chirgua	108
25	Mapa del tipo de suelo en la cuenca del río Paito	110

26	Mapa del tipo de suelo en la cuenca del río Pao	111
27	Mapa del tipo de suelo en la cuenca del río Pirapira	113
28	Mapa del tipo de suelo en la cuenca del río Paya	115
29	Mapa del tipo de suelo en la cuenca del río San Pedro	116
30	Mapa del uso potencial del suelo en la cuenca del río Pao	120
31	Esquema de la obra de torre-toma del embalse Pao-Cachinche	121
32	Variables del subsistema embalse Pao-Cachinche	128
33	Aporte-extracción diario observado vs aporte-extracción diario estimado en el embalse Pao-Cachinche en el período 1983-2009	248
34	Aporte-extracción diario observado vs aporte-extracción diario estimado en el embalse Pao-Cachinche en el período 2005-2009	248
35	Aporte-extracción diario observado vs aporte-extracción diario estimado en el embalse Pao-Cachinche en el período 2008-2009	249
36	Aporte-extracción diario observado vs aporte-extracción mensual estimado en el embalse Pao-Cachinche en el período 2005-2009	250
37	Números de curva para la cuenca del río Chirgua bajo la condición de humedad antecedente: (a) I, (b) II y (c) III	257
38	Números de curva para la cuenca del río Paito bajo la condición de humedad antecedente: (a) I, (b) II y (c) III	260
39	Números de curva para la cuenca del río Pirapira bajo la condición de humedad antecedente: (a) I, (b) II y (c) III	263
40	Números de curva para la cuenca del río Paya bajo la condición de humedad antecedente: (a) I, (b) II y (c) III	265
41	Números de curva para la cuenca del río San Pedro bajo la condición de humedad antecedente: (a) I, (b) II y (c) III	268
42	Hidrogramas de escorrentía en la cuenca del río Chirgua para tormentas de diseño con períodos de retorno de 5,10 y 50 años y duraciones de 3 y 6 horas	276

43	Hidrogramas de escorrentía en la cuenca del río Paito para tormentas de diseño con períodos de retorno de 5,10 y 50 años y duraciones de 3 y 6 horas	279
44	Hidrogramas de escorrentía en la cuenca del río Pirapira para tormentas de diseño con períodos de retorno de 5,10 y 50 años y duraciones de 3 y 6 horas	282
45	Hidrogramas de escorrentía en la cuenca del río Paya para tormentas de diseño con períodos de retorno de 5,10 y 50 años y duraciones de 3 y 6 horas	286
46	Hidrogramas de escorrentía en la cuenca del río San Pedro para tormentas de diseño con períodos de retorno de 5,10 y 50 años y duraciones de 3 y 6 horas	289
47	Resultados operacionales en el embalse	301
48	Descarga del embalse	303
49	Esquema de modelación de las series de tiempo del embalse Pao-Cachinche	305
50	Esquema de modelación de eventos de crecida en el embalse Pao-Cachinche	306

RESUMEN
EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL EMBALSE PAO-CACHINCHE EN EL PERÍODO
1983-2009

AUTOR: *Ing. Milagros S. Padrón V.*
TUTOR: *MSc. Ing. Adriana Márquez R.*
Valencia, Abril 2011

En su artículo de revisión sobre los modelos clásicos de operación de embalse, Yeh (1985) señala que, a pesar de los avances, las investigaciones han sido muy lentas para encontrar su camino en la práctica. Simonovic (1992) ha discutido las limitaciones de los modelos de operación de embalse y las medidas correctivas para que sean más aceptables por los operadores, para quienes el uso de técnicas sofisticadas aplicadas en los modelos es mucho más complejo por la inclusión de estocasticidad de las variables hidrológicas. En este estudio se evalúa el desempeño de la operación del Embalse Pao-Cachinche durante el período 1983-2009 mediante la aplicación de técnicas de modelado estocástico (ARIMA), determinístico y de inteligencia artificial (RNA) utilizando variables de operación del embalse. Para ello se caracteriza física y operacionalmente el SRCI con HEC-GeoHMS, se modela el aporte hídrico de las cinco principales subcuencas afluentes al embalse: Chirgua, Paito, Pirapira, Paya y San Pedro, aplicando HEC-HMS, se simula la operación de crecientes con HEC-ResSim y se establece el modelo óptimo de operación del mismo. La modelación de la operación emplea registros que incluyen volúmenes de aporte, evaporación, precipitación, caudal de bombeo, alivio, caudal ecológico, recolectados durante el período 1983-2009. En el modelo estocástico se emplea la serie 2005-2008. En el modelo RNA, se emplean las series: 1983-2009, 2005-2009 y 2008-2009. En el modelo determinístico, se emplean tormentas sintéticas de 3 y 6 horas de duración con períodos de retorno de 5, 10 y 50 años para los cinco afluentes al embalse. Se encuentra que los modelos RNA muestran un ajuste satisfactorio ($R=0.98$) seguido del modelo ARIMA. Con el modelo determinístico se verifica que los gastos máximos de crecientes con periodos de retorno de 50 años y 2% de excedencia no superan la capacidad del aliviadero del embalse.

Palabras clave: operación de embalse, red neuronal artificial, modelo estocástico

INTRODUCCIÓN

El agua potable que se consume en el Estado Carabobo proviene de los Embalses Pao-Cachinche y Pao La Balsa y es distribuida por el Sistema Regional del Centro (SRC). De acuerdo a estimaciones del Instituto Nacional de Estadística (INE, 2007), la población total de Carabobo, en 2010, es de alrededor de dos millones trescientos mil habitantes y se proyectan unos dos millones quinientos mil habitantes para el 2015. A nivel nacional, el acceso a las fuentes de agua potable en áreas urbanas representa el 94 por ciento frente al 75 por ciento de las zonas rurales. (CEPAL, 2010).

El Sistema Regional del Centro abastece del vital líquido a los Estados Aragua, Carabobo y Cojedes. Está formado por los Sistemas Regional del Centro I (SRCI) y Regional del Centro II (SRCII). La información que publica la Hidrológica del Centro, HIDROVEN, en su página web indica que el SRCI está integrado por el Embalse Pao-Cachinche como principal fuente de abastecimiento y el Embalse Guataparo y Dique Toma Río Torito, como segunda y tercera fuentes, respectivamente. El SRCII tiene al Embalse Pao-La Balsa como su fuente principal y suministra agua a la zona oriental de Carabobo y al Estado Aragua. (HIDROVEN, 2006).

En el SRCI el agua captada del Embalse Pao-Cachinche es enviada por gravedad a la Estación de Bombeo (Cachinche y de allí bombeados diariamente entre 5000 a 6000 LPS hasta la Planta Potabilizadora Alejo Zuloaga, para finalmente ser tratada y distribuida a través de la Estación Red Media. Asimismo, en el SRCII, el agua captada del Embalse Pao-La Balsa es enviada por gravedad a la Estación de Bombeo Primaria y de allí es bombeada, primero a la E/B N°1 Principal y luego a la E/B N°2 Principal, hasta la Planta Potabilizadora Baldó Soules.

La necesidad de optimizar la operación del Embalse Pao-Cachinche, dada su relevancia en el suministro de agua potable para la Región Central del país, principalmente para el Estado Carabobo, motiva la realización de ésta investigación.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A nivel mundial, existe una creciente preocupación por la necesidad de disponer de agua potable en cantidad y calidad suficiente. Los organismos internacionales han asumido un rol determinante en la promoción y apoyo de programas destinados a dar solución al desafío que la insuficiencia de recursos hídricos supondrá en el siglo XXI.

Naciones Unidas (2008) destaca en su informe *Objetivos del Milenio 2008* que el consumo de agua en el último siglo se ha multiplicado por seis, ya que la tasa de crecimiento demográfico ha aumentado más del doble. En el mismo se señala que aunque en la actualidad no se puede hablar de escasez global de agua, existen alrededor de 2.800 millones de personas—más del 40 por ciento de la población mundial—que habitan en cuencas hídricas con alguna forma de insuficiencia de este recurso. Asimismo, en el informe presentado en 2010, el organismo enfatiza que “el suministro de agua potable sigue siendo un desafío en muchas partes del mundo” (Naciones Unidas, 2010, p.54) pues persisten marcadas diferencias en el acceso a las fuentes de abastecimiento entre las áreas urbanas y las rurales, incluso en regiones donde se han alcanzado importantes avances al respecto, como ocurre en América Latina y el Caribe.

En los países industrializados el consumo de agua potable alcanza los 380 litros per cápita al día (el caso de Estados Unidos) y a 129 litros per cápita diarios en Alemania; mientras que en los países en desarrollo se considera que un consumo entre 20 a 30 litros per cápita al día son suficientes para satisfacer las necesidades básicas (UNESCO, 2005). En Venezuela, la cifra más reciente de consumo de agua data de 2004, correspondiente a 440 litros por habitante por día (PNUD, 2009).

Venezuela ha logrado importantes avances en la reducción de la proporción de personas sin acceso al agua potable ya que, según datos oficiales, entre 1990 a 2007 la población que disponía de agua potable pasó de 68 por ciento a 92 por ciento (*Cumpliendo las Metas del Milenio*, 2004). Sin embargo, aún hay mucho por hacer ya que, tal como lo señala el PNUD (2009) persisten desafíos tanto en el manejo de la oferta de agua disponible como en el consumo elevado por habitante; lo cual, estima el organismo, genera la necesidad de introducir cambios al sistema.

Por otra parte, según estimaciones de HIDROVEN (2009), en los últimos tres años los embalses que abastecen de agua a los Estados Aragua, Carabobo y Cojedes han disminuido en un 25 por ciento sus niveles de agua, influenciado por la marcada sequía por la cual atravesó el país en 2009.

A escala internacional, las proyecciones de Naciones Unidas en lo que a disponibilidad de agua se refiere no son alentadoras, pues se estima que para 2025 unas dos terceras partes de la población mundial (alrededor de 5.500 millones de personas) vivirán en zonas con insuficiencia de agua entre moderada a grave. Al respecto, Daigger (2006) señala que la sociedad del siglo XXI se enfrenta a retos sin precedentes en el área del manejo del agua, catalogando la presión sobre el acceso a

la misma, producto del crecimiento poblacional; como el segundo desafío en importancia, precedido por la percepción de que los problemas de agua han sido resueltos. El autor sostiene que en 2050 se espera un incremento de aproximadamente cuatro billones de personas viviendo en lugares con problemas de acceso al agua; todo lo cual representa un alerta para Venezuela, tomando en cuenta el camino por recorrer para atender a la población rural.

La existencia en el país de deficiencias en el manejo del agua plantea la necesidad de establecer una metodología que permita mejorar la operación de los embalses, razón por la cual se seleccionó al embalse Pao-Cachinche como área de estudio. Este embalse presenta desde 2004 una condición de alivio permanente por el transvase del Lago de Valencia, situación que podría poner en riesgo de daños a la estructura del embalse y causar inundaciones a las poblaciones situadas aguas abajo del mismo; tales riesgos pueden ser controlados mediante el pronóstico del aporte hídrico al embalse y la simulación de los caudales máximos ante eventos de crecidas de los ríos afluentes.

La evaluación se realiza mediante la aplicación de técnicas de modelación de operación de embalse para estimar el aporte neto, el proceso lluvia-escorrentía y la operación de crecientes en las subcuencas de los ríos Chirgua, Paíto, Pirapira, Paya y San Pedro, empleando modelos de pronóstico, determinísticos y de red neuronal artificial mediante la aplicación de los programas HEC, STATGRAPHICS y MATLAB.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Puede establecerse una metodología para la operación del Embalse Pao-Cachinche empleando los modelos de operación de embalse?

OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Objetivo General

Evaluar el desempeño de la operación del Embalse Pao-Cachinche durante el período 1983-2009.

Objetivos Específicos

- 1.** Caracterizar física y operacionalmente el Sistema Regional del Centro I.
- 2.** Diagnosticar la operación histórica del Sistema Regional del Centro I durante el período 1983-2009.
- 3.** Modelar el aporte hídrico de las subcuencas que drenan al Embalse Pao-Cachinche.
- 4.** Simular el tránsito de crecientes del Subsistema Embalse Pao-Cachinche.
- 5.** Establecer el modelo óptimo de operación del Embalse Pao-Cachinche.

JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

En el ámbito académico, contribuirá al estudio de las técnicas para el modelado de la operación de embalses. En el ámbito técnico, permitirá pronosticar el aporte hídrico al embalse Pao-Cachinche y estimar los caudales pico de salida del aliviadero ante eventos de crecidas en los afluentes al mismo. En el ámbito socioeconómico, aportará las herramientas con base científica para la planificación del abastecimiento de agua en el Estado Carabobo, pudiéndose extender a la Región Central del país; asimismo, permitirá reducir los costos de operación por parte de la Hidrológica.

En el ámbito ambiental, el estudio servirá de referencia para el control de inundaciones aguas abajo del embalse Pao-Cachinche, tomando en cuenta la condición de alivio permanente que el mismo presenta desde 2004, por el transvase del Lago de Valencia.

ALCANCES Y LIMITACIONES

Este estudio puede constituirse en una referencia académica a posteriores investigaciones que pretendan profundizar en la aplicación de técnicas de modelación en la operación de embalses. Asimismo, sienta las bases para estudios enfocados en la operación de eventos de crecidas en las subcuencas afluentes al embalse Pao-Cachinche: Chirgua, Paíto, Pirapira, Paya y San Pedro.

La empresa operadora del embalse Pao-Cachinche podrá emplear los modelos de pronóstico para calibrar, validar y/o probar la serie de tiempo de los aportes netos diarios y/o mensuales al embalse.

La aplicación de los modelos HEC podrá ser extendida a otras cuencas donde se requiera estimar o validar tanto las características morfológicas e hidrográficas así como los parámetros hidrológicos de la zona de estudio, debido al fácil manejo y al bajo costo de aplicación que brindan los modelos.

A futuro, los resultados obtenidos orientarán la aplicación de planes de manejo integral en otras cuencas del país, pudiendo además, ser utilizados por entes gubernamentales: Ministerio del Poder Popular para el Ambiente, Hidrológicas, gobernaciones y alcaldías, consejos locales y estatales de planificación, universidades, institutos de investigación y tesis de pregrado y postgrado.

La disponibilidad de la información hidrológica es limitada, lo que impide validar los resultados. Por otra parte, la aplicación del programa HEC-ResSim para la simulación de la operación de crecidas en el embalse, resulta una herramienta poco flexible en el ingreso de la data y el establecimiento de escenarios para la simulación.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

DESCRIPCIÓN DE LAS ÁREAS DE ESTUDIO

Con la finalidad de facilitar el estudio del área de interés, ésta fue dividida en tres subsistemas: (a) Cuenca del río Pao (Subsistema I), (b) Embalse Pao-Cachinche (Subsistema II) y (c) Entrada a la Planta Potabilizadora Alejo Zuloaga (Subsistema III). En la Figura 1 se muestran los elementos del Sistema Regional del Centro I.



Figura 1. Componentes del SRC1. Mapa proporcionado por la Gerencia de Captación, Tratamiento y Mantenimiento de HIDROCENTRO, Estado Carabobo *Cuenca del Río Pao*. La cuenca del río Pao está ubicada entre los Estados Cojedes, Carabobo y Guárico, nace en las proximidades de Bejuma y Miranda (Carabobo) y desemboca en el río Portuguesa, al sur de Cojedes (MARNR, 1989 en Manrique, 2008). La mayor producción hídrica de toda la cuenca se ubica en el área comprendida entre

las nacientes de la cuenca y las Galeras del Pao, en el Estado Cojedes; posee una superficie de aproximadamente 360.000 hectáreas y está conformada por las subcuencas Pao-Cachinche y Pao-La Balsa, tal como se observa en la Figura 2.

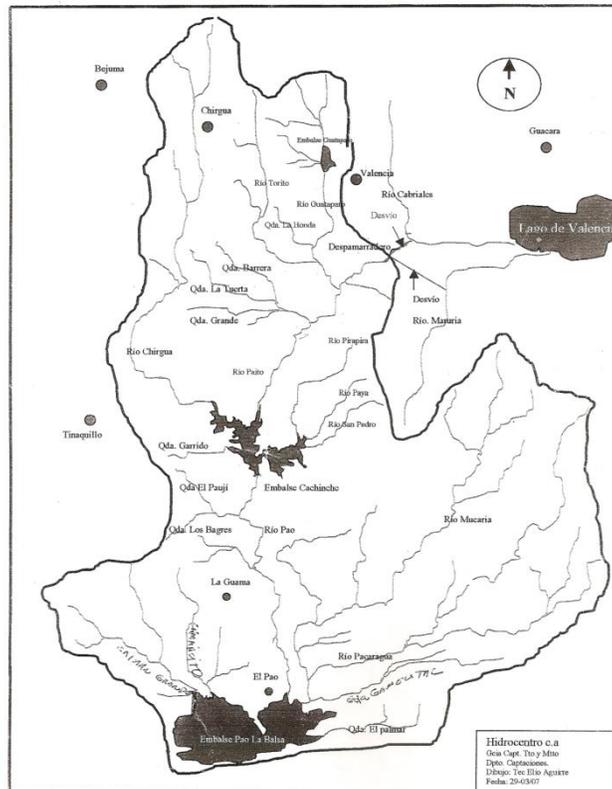


Figura 2. Cuenca del río Pao. Imagen proporcionada por Gerencia de Captación, Tratamiento y Mantenimiento, Departamento de Captaciones, HIDROCENTRO

Según estimaciones de densidad poblacional por Municipio realizadas por el Instituto Nacional de Estadística (INE) en 2008, la cuenca del río Pao-pertenciente al Municipio Libertador del Estado Carabobo-posee una población de 178.904 habitantes y una densidad poblacional de 320,6 habitantes por kilómetro cuadrado (INE, 2008).

El sistema hidrológico del río Pao está conceptualmente dividido en cuenca alta, cuenca media y cuenca baja; las tres cuencas totalizan, de acuerdo a estimaciones de HIDROCENTRO, un área de aproximadamente 259.323 hectáreas. La cuenca alta comprende desde las cabeceras hasta el Embalse Pao-Cachinche, tiene un área de 8.018 hectáreas y suministra agua al Embalse Guataparo. La cuenca media se extiende desde el Embalse Pao-Cachinche hasta el Embalse Pao-La Balsa, posee un área de aproximadamente 93.195 hectáreas-según cálculos de HIDROCENTRO-y abastece de agua al Embalse Pao-Cachinche; la cuenca baja abarca desde el Embalse Pao-La Balsa hasta la confluencia con el río Portuguesa, tiene un área de alrededor de 158.110 hectáreas y provee de agua al Embalse Pao-La Balsa. La subcuenca Pao-Cachinche está constituida por las microcuencas de los ríos Chirgua, Paito, Pirapira, Paya y San Pedro, respectivamente.

En lo que respecta al clima, la precipitación a largo de la cuenca sigue una distribución estacional, con un promedio de 1.320 milímetros por año. La relación precipitación-evapotranspiración es de 0,89; lo que convierte deficitario al balance hídrico y la temperatura promedio anual es de 26°C (MARNR, 1989; Escalona y Estrada, 1997; en Guillén, 2001). En esta cuenca, la zona de estudio estará delimitada por el Embalse Pao-Cachinche hasta la confluencia de sus principales tributarios, los ríos Chirgua, Paito, Pirapira, Paya y San Pedro, respectivamente.

Embalse Pao-Cachinche. González et al (2004) señalan que el embalse está ubicado en la región centro-norte de Venezuela (coordenadas 9°53"N, 68°08"W), en el límite con los Estados Carabobo y Cojedes, cerca de la ciudad de Valencia, aguas abajo de la confluencia de los ríos Paito y Chirgua, aproximadamente hacia el centro de la cuenca del río Pao. El embalse ocupa un área de aproximadamente 16.100.000 m², con un

volumen de 170.000.000 m³, una profundidad media de 10.6 m y un tiempo de residencia de las aguas de 281 días (ver Figura 3 y Anexos G).



Figura 3. Vista del Embalse Pao-Cachinche. Padrón (2009)

El Embalse Pao-Cachinche fue construido en 1972 y puesto en funcionamiento en 1973, es administrado por HIDROCENTRO y su uso está dirigido al abastecimiento de agua potable e irrigación, que de acuerdo a los tipos de embalses existentes, establecidos por Rivas (1983), puede ser clasificado como un embalse para Almacenaje de Conservación debido a que “se retiene el exceso de volumen de agua no utilizado en la época de abundancia para distribuirlo más tarde en la época de insuficiencia del recurso y satisfacer las demandas requeridas por el sistema que sirve”. En la Tabla 1 se presentan las principales características técnicas del Embalse Pao-Cachinche, proporcionadas por HIDROCENTRO:

Tabla 1. Datos técnicos del embalse Pao-Cachinche

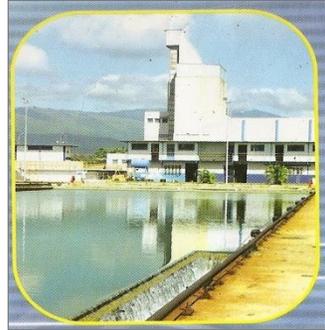
DATOS TÉCNICOS EMBALSE PAO-CACHINCHE	
Tipo de presa	Tierra zonificada
Cota de cresta (presa) (msnm)	360,40
Cota de aguas normales (msnm)	353,28
Superficie inundada (Ha)	1.320
Cota de aguas máximas (msnm)	357,50
Superficie inundada (Ha)	1.618
Cota de aguas muertas (msnm)	312,93
Cota mínima operación (msnm)	319,51
Rendimiento garantizado (m ³)	165.000.000
Volumen Total (m ³)	179.000.000
Volumen útil (m ³)	150.000.000
Volumen muerto (m ³)	500.000
Volumen inactivo (m ³)	500.000
Tipo de aliviadero	Eje curvo con doble contracción
Cota Cimacio (msnm)	353,28
Descarga máxima aliviadero (m ³)	760
Obra de Toma	Torre toma de 8 compuertas
Mecanismo de Emergencia	Válvula Howell-Bunger, 36"
Mecanismo de regulación	Embalse, torre toma y la presa

Fuente. Datos proporcionados por el Departamento de Captación de Fuentes Superficiales de HIDROCENTRO, Carabobo (2010)

Planta de Potabilización Alejo Zuloaga. La planta está ubicada en el Sector San Luis, en Valencia, Estado Carabobo; fue construida en el año de 1973 y ampliada en 1992; cuenta con una capacidad nominal de 8 m³/s y una capacidad de servicio de 6,5 m³/s. La planta recibe el agua proveniente de los embalses Pao-Cachinche y Guataparó (ver Figura 2) para ser tratada y de esta forma abastecer a los municipios Valencia, Naguanagua, San Diego, Libertador, parte de los Guayos y Tinaquillo (HIDROCENTRO, s.f.). La planta consta de dos sistemas para el tratamiento del agua (ver Figura 4.):

Sistema convencional. Se lleva a cabo en la planta original con tecnología americana y está diseñada para un caudal de entrada de 3 m³/s. El proceso de tratamiento consta de nueve (9) etapas o elementos; a saber: (a) aereador-desarenador-rompe carga, para mejorar las características fisicoquímicas del agua cruda; (b) mezcla rápida, donde se llevan a cabo los procesos de coagulación y pre-cloración; (c) sedimentación, que consta de una mezcla lenta para favorecer la floculación y posteriormente precipitar los coágulos a una determinada velocidad; (d) filtración, (e) postcloración, (f) pozo de succión, sistema de recolección del agua filtrada; (g) Almacenamiento en dos estanques de 30.000 m³ de capacidad cada uno; (h) estación de bombeo: Red Media y (9) Red de Distribución.

Sistema de Grémont. Se lleva a cabo en la ampliación de la planta la cual opera con tecnología francesa. El caudal de entrada es de 3,5 m³/s y consta de ocho (8) etapas o elementos: (a) desarenador-aereador, (b) mezcla rápida, donde se llevan a cabo los procesos de coagulación y precloración; (c) decantación, que consta de una agitación violenta y de corta duración para facilitar la floculación y la posterior formación de coágulos por contacto con una masa uniforme de lodo, que retiene los sólidos e impurezas del agua cruda; (d) filtración, (e) postcloración, (f) pozo de succión, donde luego que el agua filtrada es recolectada se mezcla con el agua proveniente de la planta convencional en la línea de aducción, antes de llegar a la estación de bombeo; (g) estación de bombeo Red Media y (h) Red de distribución.



(a)



(b)

Figura 4. Planta de potabilización Alejo Zuloaga: (a) sistema convencional y (b) sistema de Grémont. Imágenes proporcionadas por HIDROCENTRO.

ANTECEDENTES

La revisión de la literatura revela la existencia a nivel mundial, de un considerable número de programas orientados a garantizar la disponibilidad de agua en cantidad y calidad mediante la generación de soluciones que trasciendan los acuerdos firmados por organizaciones internacionales, con las Naciones Unidas y el PNUD a la cabeza; entre ellos destacan el Programa 21, también conocido como Agenda 21, y los Objetivos del Milenio (ODM).

El Programa 21, coordinado por la FAO desde finales de la década de los 80, ejecuta proyectos de campo para promover el manejo integrado de los recursos hídricos de cuencas hidrográficas en países como Bolivia, Noruega, Pakistán, Perú y Nepal, entre muchos otros (FAO, 2007). Por su parte, los ODM, aprobados en la Cumbre del Milenio en Septiembre de 2000, respaldan las iniciativas tendientes a elevar el acceso al agua potable y mejorar su calidad. Al respecto, los Indicadores de los ODM en 2010

muestran que la proporción de la población que usa fuentes mejoradas de abastecimiento de agua potable en América Latina y el Caribe, pasó de 90 por ciento en 2006 a 93 por ciento en 2007; lo que significa que ha sido alcanzada la meta del 2015 para este indicador.

En Venezuela, el acelerado crecimiento poblacional y la ocurrencia, cada vez más frecuente, de fenómenos meteorológicos, afectan el manejo del agua. Al respecto, el Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, INIA, destaca que el impacto producido por el Cambio Climático sobre los recursos hídricos del país está comprometiendo tanto la disponibilidad como la calidad del agua para diversos usos, principalmente para consumo humano (INIA, 2006).

En cuanto a la aplicación de la modelación operacional de embalses, la literatura consultada muestra la existencia de un mayor número de antecedentes a nivel local y regional en cuanto a modelación hidrológica, en comparación con aquellos que utilizan el programa de simulación de operación de embalses HEC-ResSim, del cual no se encontró referencia disponible, lo que se pudiera explicar por tratarse de un software de reciente desarrollo que además requiere de un considerable número de variables de entrada para poder ser ejecutado.

Barreto, Cabrera y Solórzano (2010), estimaron la producción hídrica en tres de los cinco ríos afluentes al embalse Pao-Cachinche, a saber: Pirapira, Paya y San Pedro, respectivamente; mediante el empleo de herramientas de simulación hidráulica. La metodología utilizada consistió en la elaboración de los respectivos modelos de elevación digital (MDT) mediante el programa ArcGIS, la combinación de bases de datos de los tipos de suelo, uso de la tierra y la modelación del proceso lluvia-escorrentía, aplicando el programa HEC-HMS.

Dentro de los objetivos alcanzados por los autores están las características físicas y los parámetros hidrológicos de las cuencas de los ríos Pira-Pira, Paya y San Pedro, respectivamente, a partir del programa HEC-GeoHMS; los volúmenes y caudales máximos de las crecientes a través del aliviadero para períodos de retorno de 2, 5, 10, 50 y 100 años a partir de tormentas de 2 horas de duración. Los resultados de estas investigaciones sirvieron de base tanto para la caracterización física de las subcuencas de los ríos Pirapira, Paya y San Pedro, la elaboración de los modelos de elevación digital y la simulación del tránsito de crecientes a través de dichas cuencas hacia el embalse.

Pérez y Dueñas (2003) aplicaron modelos estocásticos para pronosticar la oferta hídrica de la cuenca del río Colca, el cual desemboca al embalse Condoroma, situado en Arequipa, Perú. La metodología utilizada abarcó la caracterización morfológica e hidrográfica de la subcuenca Condoroma, la caracterización técnica del embalse, el tratamiento de los datos hidrológicos para la modelación estocástica de las series históricas y la simulación de operación del embalse Condoroma. El tratamiento de los datos consistió en el ajuste de las series históricas mediante técnicas de regresión y correlación durante el período 1951-2000.

Como parte de los resultados de este estudio, se obtuvieron los caudales de ingreso al embalse y la generación de las series hidrológicas estocásticas de los aportes de las cuencas intermedias. El estudio contribuye con el establecimiento de la metodología a seguir para el tratamiento de la información hidrológica.

Palencia y Machado (2005), aplicaron el software HEC-HMS para simular las crecientes a distintos períodos de retorno, generadas en la confluencia de los ríos

Canoabo y Temerla; asimismo, realizaron el tránsito de la creciente superpuesta hasta el Dique Toma, lugar donde se contaba con crecientes conocidas a partir de las cuales se efectuó la simulación. La modelación hidrológica para simular los procesos de la precipitación-escurrimiento se realizó mediante la aplicación del método del SCS para generar las crecientes, las cuales se transitaron desde la confluencia hasta el Dique-Toma "José Laurencio Silva" empleando el modelo de Muskingum. Una vez obtenidas las crecientes, éstas fueron comparadas por los autores con las propuestas por Hidrocentro. Este trabajo sirvió de base para la aplicación del programa HEC-HMS en la modelación del proceso lluvia-escorrentía en las cuencas de los ríos Chirgua, Paito, Pirapira, Paya y San Pedro.

Márquez (2006) aplicó el modelo HEC de modelización hidrológica para zonificar las manchas de inundación en la cuenca del río Urama (Estado Carabobo), con la finalidad de proporcionar, a partir de los resultados, mejores parámetros para la toma de decisiones institucionales. Para ello utilizó una metodología basada, principalmente, en el trabajo de campo, uso de fotografías, características de obras hidráulicas, un modelo de elevación digital a escala 1:25.000 y el procesamiento de los datos hidrológicos para la generación de tormentas con períodos de retorno de 10, 50 y 100 años.

Como resultados de esta investigación, Márquez obtuvo los modelos digitalizados espaciales de las características físicas y los parámetros hidrológicos requeridos para la modelización de las pérdidas por infiltración y la transformación de lluvia en escorrentía y flujo base, a partir de los cuales se generaron crecientes para los perfiles superficiales de agua. Este estudio contribuyó con la metodología para el procesamiento de los datos hidrológicos de las cuencas en estudio.

BASES TEÓRICAS

Las bases teóricas incluyen la descripción de los conceptos y de las ecuaciones aplicadas por los modelos matemáticos utilizados en este estudio.

MODELACIÓN DE OPERACIÓN DE EMBALSES CON LOS PROGRAMAS HEC

Modelos Determinísticos o de Sistemas

En la modelación de la operación del embalse Pao-Cachinche se emplean los siguientes modelos determinísticos: el HEC-HMS para modelar el proceso lluvia-escorrentía en cada una de las subcuencas afluentes al embalse, el modelo de sistema propuesto por Guevara (2004) para realizar tránsito por el embalse y el modelo HEC-ResSim para simular la operación de crecientes en el embalse. El modelo HEC-HMS requiere como datos de entrada las características físicas de las corrientes y subcuencas, las cuales son generadas mediante la aplicación del modelo HEC-GeoHMS. Todos los modelos antes mencionados se presentan a continuación:

Modelación Geoespacial con el programa HEC-GeoHMS

El modelo consta de cuatro módulos: (a) preprocesamiento del terreno, (b) procesamiento de la cuenca, (c) características físicas de las corrientes y cuencas y (d) estimación de los parámetros hidrológicos.

El preprocesamiento del terreno genera un conjunto de ocho parámetros a partir de un modelo de terreno, los cuales describen los modelos de drenaje de la cuenca y

permite la delineación de las corrientes y subcuencas; el conjunto de los datos generados comprende: la dirección del flujo, la acumulación del flujo, la definición de corrientes la segmentación de corrientes, la delineación de la cuenca, la representación vectorizada de cuencas y corrientes (polígonos de cuenca y segmentos de corriente) y la agregación de cuencas. La data resultante del preprocesamiento sirve como base de datos espacial para el estudio de las subcuencas afluentes al embalse Pao-Cachinche y es utilizada por el modelo HEC-HMS para la construcción del modelo hidrológico del proceso lluvia-escorrentía en cada una de las subcuencas.

El procesamiento de la cuenca permite delinear y editar las cuencas de acuerdo con las especificaciones del proyecto; consta de los siguientes pasos: unión de cuencas, subdivisión de cuencas, unión de ríos y perfil del río.

El módulo de caracterización física de las corrientes y subcuencas calcula varias características topográficas de las corrientes y cuencas, las cuales pueden ser usadas para comparación de cuencas y de parámetros hidrológicos. A continuación se detallan brevemente las características que son utilizadas en este estudio:

Densidad de drenaje (D_d). Monsalve (1995) la define como la relación entre la longitud total de las corrientes que conforman la red de drenaje de la cuenca y el área total de la misma. Se expresa de la forma:

$$D_d = \frac{L}{A} \quad (1)$$

donde L es la longitud total de las corrientes de agua en Km y A es el área total de la cuenca, en Km²; por lo tanto la densidad de drenaje tiene unidades de Km/Km². Se

utiliza como rango de referencia el comprendido entre 0,5 Km/Km²; correspondiente a cuencas con un drenaje pobre, a 3,5 Km/Km² para cuencas bien drenadas.

Forma de la cuenca (K_c). Guevara (2004) señala que la forma de la cuenca repercute en los hidrogramas de esorrentía y en las tasas de flujo máximo. En este estudio se utiliza el índice de Gravelius, también conocido como *factor de compacidad* K_c , que de acuerdo a Guevara relaciona el perímetro de la hoya con la circunferencia de un círculo de área igual a la de la cuenca, la cual se expresa de la forma:

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = \frac{P}{\sqrt{A}} * 0,23 \quad (2)$$

donde P es el perímetro de la cuenca, en Km; y A el área total de la misma, en Km². Monsalve destaca que a mayor irregularidad de la cuenca mayor K_c ; este autor señala además que una cuenca circular posee un coeficiente mínimo igual a 1 y concluye que existirá una mayor tendencia a la ocurrencia de crecientes a medida que K_c se aproxime a la unidad.

Factor de forma (K_f). El factor de forma relaciona el ancho medio de la cuenca con su longitud axial, la cual es medida a partir de la cabecera de la corriente más larga de la cuenca, en línea recta. El autor señala que el ancho medio resulta de dividir el área entre la longitud axial de la cuenca, tal como se expresa en las siguientes ecuaciones:

$$K_f = \frac{A}{L^2} \quad (3)$$

donde A es el área de la cuenca y L es la longitud axial de la cuenca La Ecuación 3 corresponde al índice de Horton, el cual es un factor adimensional que permite

estimar la ocurrencia de crecientes ya que de acuerdo a Monsalve, una cuenca con K_f bajo estará menos expuesta a crecientes que una de igual tamaño pero con mayor K_f .

Orden de la corriente. El orden de la corriente es una medida del grado de ramificación de una cuenca, o como señala Guevara (2004), “es una medida de la ramificación del el cauce principal en una cuenca”.

Longitud de la corriente. Guevara (2004) destaca la importancia del cálculo de la longitud promedio de la corriente ya que se trata de una propiedad “reveladora” del tamaño de los componentes de la red de drenaje y de las superficies de las cuencas afluentes. El cálculo de la longitud de una corriente se expresa mediante la Ecuación 4:

$$L_u = \frac{\sum_1^N L_u}{N_u} \quad (4)$$

donde L_u es la longitud total del cauce y N_u es el número de segmentos de ese orden.

Pendiente del terreno. Es una representación del relieve de la cuenca la cual, de acuerdo a Guevara (2004), está directamente asociada a los procesos erosivos en la superficie de la cuenca, teniendo además, según el autor, una relación compleja e importante con los procesos de infiltración, escurrimiento superficial, humedad del suelo y aporte del agua subterránea al caudal de las corrientes. Ejerce una influencia directa en el tiempo de concentración de la lluvia en los cauces y en consecuencia en las crecientes. Se expresa de la forma:

$$S = \frac{L_o}{A} * \Delta h \quad (5)$$

Donde L_0 es la longitud total de las curvas de nivel, Δh es el intervalo entre las curvas de nivel y A es el área de la cuenca. Guevara señala que la calidad del mapa a utilizar determinar la precisión de los resultados.

Longitud al centroide. Es la distancia siguiendo el cauce desde el punto más bajo hasta el centro de gravedad de la cuenca, definido este último con un punto ubicado en el cauce principal.

Centroide de la cuenca. El programa HEC-GeoHMS emplea los métodos de rectángulo circunscrito, la elipse, el canal de flujo y el que especifique el usuario. En este estudio se utiliza el método de la elipse para el cálculo de centroide de las subcuencas afluentes al embalse, el cual consiste en circunscribir una subcuenca dentro de una elipse y aproximar el centroide como el centro de la elipse. Este método es más lento que el del cuadro circunscrito, el cual circunscribe una subcuenca dentro de un rectángulo y aproxima el centroide como el centro del cuadro pero no puede ser aplicado a muchas formas de cuenca; sin embargo, el método de la elipse generalmente produce mejores estimados de los centroides de la cuenca. Este método solo funciona en subcuencas de dos millones de celdas o menos.

Modelación Hidrológica con el programa HEC-HMS

Este modelo tiene la capacidad de conducir una simulación hidrológica. La modelación hidrológica está diseñada para simular los procesos lluvia-escorrentía de sistemas cuencas dentríticas; puede resolver un amplio rango de problemas ya que

puede ser aplicado en diferentes cuencas. El modelo genera hidrogramas de salida luego de modelar el tránsito por el cauce, los cuales pueden ser usados directamente o en conjunto con otros softwares para estudios de disponibilidad de agua, drenaje urbano, diseño del vertedero de un embalse, reducción del daño por inundación, entre otros. El programa HEC-HMS posee tres alternativas de tormentas basadas en estándares:

- ✓ Tormentas basadas en frecuencias
- ✓ Tormentas de proyecto estándares
- ✓ Alturas de tormentas definidas por el usuario y distribución temporal.

En este estudio se emplean tormentas basadas en frecuencias debido a la carencia de datos de lluvia en los principales ríos afluentes al embalse; las mismas se explican a continuación:

Tormentas Hipotéticas Basadas en Frecuencia en HEC-HMS. El objetivo de las tormentas hipotéticas basadas en las frecuencias incluidas en HEC-HMS es definir un evento para el cual la altura de precipitación a distintas duraciones dentro de la tormenta tiene una probabilidad de excedencia consistente. Uno de los puntos fundamentales para obtener un diagrama de cualquier período de retorno es ver cuál es la lluvia de diseño y cómo se reparte en el tiempo. Una vez que se procesa el mismo, se obtiene la tormenta de proyecto en forma de una sucesión de bloques de igual duración, donde en cada uno de ellos llueve distinto, dándose el valor máximo a la mitad de la duración considerada:

Determinación de la duración de la lluvia. Por definición, la duración de la lluvia más desfavorable que provoca mayor pico de caudal de hidrograma es la del

tiempo de concentración, que es el momento a partir del cual toda la superficie de la cuenca aporta agua en nuestra sección de estudio. Si la duración es menor, parte de la superficie de la cuenca no aporta agua, por lo que el pico de caudal será menor, y si la duración es mayor el pico es el mismo que cuando se toma como duración el tiempo de concentración de la cuenca, ya que la superficie de agua es la misma.

Determinación de los intervalos de lluvia. Ésta se toma de manera que se obtengan entre 10 y 20 bloques de lluvia en la tormenta de proyecto, logrando una aproximación más a 20, cuanto mayor sea el tiempo de concentración.

Deducción de los valores de intensidad de precipitación. Para cada una de las duraciones acumuladas de los intervalos considerados (20, 40 y 280 minutos). La intensidad de precipitación se determina mediante el modelo empírico determinado para la región central de Venezuela (Estados Aragua, Carabobo y Cojedes) sobre la base de los registros pluviográficos de 14 estaciones, (Guevara, 2004) ha encontrado el modelo de la Ecuación 6, para estimar la curva de Intensidad – Duración –Frecuencia:

$$I = \frac{634T^{0.222}}{(D + 4)^{0.714}} \quad (r=0.996) \quad (6)$$

Donde, I es la intensidad máxima para un determinado período de retorno T en mm/hora y D es la duración de la tormenta en mm/hora.

Profundidad máxima de precipitación acumulada. Se define como el producto de la intensidad calculada por su duración correspondiente.

Bloques alternos. Se calcula la profundidad que le corresponde a cada uno de los bloques considerados desacumulando los valores obtenidos en el punto anterior. Reducir estos últimos valores de lluvia a intensidad dividiendo por la duración del intervalo de lluvia en horas (20 minutos = 0.33 horas), para tener mm/h.

Reducción de la lluvia por el área. Para ello se cuenta con un factor de reducción para la lluvia puntual sobre el área a partir de un análisis de Altura-Duración-Área, realizado sobre la base de 47 tormentas obtenidas del Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales, ocurridas en las regiones Nor-Oriental, Central, Centro-Occidental y Andes de Venezuela (Guevara, 2004); basado en el hecho de que la lluvia media decrece con la distancia desde el centro de la tormenta y de que la tasa de reducción de los valores puntuales se incrementa a medida que disminuye la duración de la lluvia puntual en el centro de la tormenta. Para una duración de 3 horas se determinó el factor de reducción, aplicando la Ecuación 7:

$$R_D = \frac{1}{1 + 7.75 \times 10^{-4} D^{-0.304} A} \quad (7)$$

Modelación del Volumen de Escurrimiento con HEC-HMS. El modelo HEC-HMS considera que el terreno y el agua en una cuenca se pueden clasificar como superficies impermeables y superficies permeables. La superficie impermeable en la cuenca es la parte a través de la cual escurre toda la precipitación si no hay infiltración, evaporación u otros volúmenes de pérdidas. La superficie permeable está sujeta a

pérdidas. El programa HEC-HMS involucra los siguientes modelos de alternativas para la determinación de las pérdidas acumuladas:

- ✓ Modelo de pérdidas iniciales y constantes
- ✓ Modelo déficit y velocidad constante
- ✓ Modelo de pérdidas del número de curva (CN) del Servicio de Conservación De Suelos (SCS)
- ✓ Modelo de pérdidas de Green y Ampt

Con cada modelo, las pérdidas de la precipitación se encuentran para cada intervalo de tiempo y se restan de la altura de la precipitación total para ese intervalo. La altura remanente se refiere al exceso de la precipitación. Esta altura se considera uniformemente distribuida sobre toda el área de la cuenca, de manera que representa el volumen de escurrimiento.

En este estudio sólo se detalla el modelo de pérdidas del número de curva (CN) del Servicio de Conservación de Suelos, debido a que es el que se ajusta a los datos encontrados.

Modelo de Pérdidas del Número de Curva (CN) del Soil Conservation Service (SCS). El modelo de Número de Curva (CN) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS, por sus siglas en inglés) estima el exceso de precipitación como una función de la precipitación acumulada, la cobertura del suelo, uso de la tierra, y humedad antecedente, mediante el uso de la Ecuación 8:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (8)$$

donde P_e es el exceso de precipitación acumulada en el tiempo, P es la altura de lluvia acumulada en el tiempo, I_a es la abstracción inicial (pérdida inicial) y S es la retención máxima potencial, una medida de la capacidad de la cuenca para abstraer y retener la precipitación de la tormenta. Hasta que la lluvia acumulada exceda a la abstracción inicial, el exceso de precipitación y en consecuencia el escurrimiento, serán nulos. A partir del análisis de los resultados de muchas cuencas pequeñas, el SCS desarrolló relaciones empíricas de I_a y S que se según la Ecuación 9:

$$I_a = 0.2S \quad (9)$$

Por otra parte, el exceso acumulado en el tiempo t es:

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (10)$$

El exceso incremental para un intervalo de tiempo se calcula como la diferencia entre el exceso acumulado y el final y el comienzo del período.

La retención máxima, S , y las características de la cuenca se relacionan mediante parámetros intermedios, el número de curva (abreviado en inglés como CN) interviene como en la Ecuación 11:

$$S = \begin{cases} \frac{1000-10CN}{CN} & \text{Sistema Inglés} \\ \frac{25400-254CN}{CN} & \text{SI} \end{cases} \quad (11)$$

El rango de valores de CN va desde 100 para cuerpos de agua hasta aproximadamente 30 para suelos permeables con alta velocidad de infiltración.

Estimación del número de curva de esorrentía (CN). Con la precipitación P, y el número de curva de esorrentía CN, la esorrentía P_e , puede ser determinada por la Ecuación 10. Para cuencas sin mediciones de caudal, tablas de número de curva de esorrentía CN para varias coberturas complejas hidrológicas del suelo se encuentran ampliamente disponibles.

Las coberturas complejas hidrológicas de suelo describen una combinación específica de los grupos de suelos hidrológicos, el uso y tratamiento de la tierra, la condición hidrológica superficial, y las condiciones de humedad antecedentes. Todos estos factores tienen un comportamiento directo sobre la cantidad de esorrentía producida por una cuenca. El grupo hidrológico de suelos describe el tipo de suelo. El uso y tratamiento del suelo describe el tipo y la condición de la cubierta vegetal. La condición hidrológica se refiere a la capacidad de la superficie de la cuenca para aumentar o impedir la esorrentía directa. La condición de humedad antecedente tiene en cuenta la historia reciente de la precipitación, y consecuentemente es una medida de la cantidad almacenada por la cuenca.

Clasificación Hidrológica de los Suelos. Los grupos hidrológicos en que se pueden dividir los suelos son utilizados en el planeamiento de cuencas; para la estimación de

escorrentía a partir de la precipitación. Los suelos han sido clasificados en cuatro grupos, A, B, C y D, de acuerdo con el potencial de escurrimiento.

A: Bajo potencial de escorrentía. Suelos que tienen alta tasa de infiltración aun cuando estén muy húmedos. Consisten en arenas o gravas profundas bien o excesivamente drenados. Estos suelos tienen una alta transmisión de agua.

B: Moderadamente bajo potencial de escorrentía. Suelos con tasa de infiltración moderada cuando están muy húmedos. Suelos moderadamente profundos a profundos, moderadamente bien drenados a bien drenados, suelos con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas y permeabilidad moderadamente lenta a moderadamente rápida. Son suelos con tasas de transmisión de agua moderadas.

C: Moderadamente alto potencial de escorrentía. Suelos con infiltración lenta cuando están muy húmedos. Consisten de suelos con un estrato que impide el movimiento del agua hacia abajo; suelos de texturas moderadamente finas a finas; suelos con infiltración lenta debido a sales o álcali, o suelos con niveles freáticos moderados. Estos suelos pueden ser pobremente drenados o bien moderadamente bien drenados, con estratos de permeabilidad lenta a muy lenta a poca profundidad (50 – 100 cm).

D: Alto potencial de escorrentía. Suelos con infiltración muy lenta cuando están muy húmedos. Consisten de suelos arcillosos con alto potencial de expansión; suelos con nivel freático alto permanente; suelos con estrato arcilloso superficial, suelos con infiltración muy lenta debido a sales o álcali y suelos poco profundos sobre

material casi impermeable. Estos suelos tienen tasas de transmisión de agua muy lenta.

Condición de Humedad Antecedente. El método del número de curva de escurrimiento tiene tres niveles de humedad antecedente, dependiendo de la precipitación total en los cinco días previos a la tormenta; la condición de humedad antecedente seca; la condición de humedad antecedente normal y la condición de humedad antecedente húmeda.

Condición I: Suelo Seco. Es el caso en que los suelos se secan sin perder la cohesión; o sea, cuando se puede arar o cultivar en buenas condiciones (lámina 0-35 mm).

Condición II: Suelo Normal. Es el caso medio para crecidas anuales, es decir, las condiciones medias existentes que produjera la máxima crecida anual en dichas cuencas (lámina 35- 50 mm).

Condición III: Suelo Húmedo. Cuando en los cinco (5) días anteriores a la tormenta dada, se han producido lluvias fuertes o lluvias tenues con bajas temperaturas y el suelo está casi saturado (lámina mayor a 50 mm).

La relación entre la precipitación y el escurrimiento para estas tres condiciones se expresa mediante un determinado número de curva, que depende de la condición de humedad antecedente, de la clasificación de los suelos según sus características hidrológicas (indicador de infiltración), de la condición hidrológica (indicador de la cobertura vegetal) y de los usos de la tierra.

Usos y Tratamiento del Suelo. El uso de la cuenca tiene efecto sobre la respuesta de la cuenca a los fenómenos hidrometeorológicos. A medida que se deforesta una cuenca aumentan los picos de crecidas y baja el caudal de estiaje (caudal mínimo del río, a partir del cual se midan las crecidas).

Dependiendo de la clasificación de los suelos, uso de la tierra, tratamiento o práctica y de la condición hidrológica, se determina el número de curva a la condición II de humedad antecedente ya que ésta es representativa de la condición del suelo. Los valores de CN para las condiciones I y III se estiman mediante las Ecuaciones:

$$CNI = \frac{4.2CNII}{10 - 0.058CNII} \quad (12)$$

$$CNIII = \frac{23CNII}{10 - 0.13CNII} \quad (13)$$

donde CN I es la condición de humedad antecedente seca, CN II es la condición de humedad antecedente normal y CN III es la condición de humedad antecedente húmeda.

El CN de una cuenca se puede estimar como una función del uso de la tierra, tipo de suelo, y humedad antecedente de la cuenca, con el uso de las tablas publicadas por el SCS. Con las tablas de CN desarrolladas por el SCS y publicadas en el Reporte Técnico 55 (comúnmente referenciado como TR-55) y conociendo el tipo de

suelo y el uso de la tierra, se encuentra un valor único de CN. Para una cuenca formada por varios tipos de suelo y usos de la tierra, un CN ponderado se calcula mediante la Ecuación 14:

$$CN_{ponderado} = \frac{\sum A_i CN_i}{CN_i} \quad (14)$$

donde $CN_{ponderado}$ es el número de curva ponderado para calcular el volumen de escurrimiento, I es el Índice de subdivisiones de la cuenca para tipo de suelo y uso de la tierra, CN_i es el número de curva para la subdivisión i y A_i es el Área de drenaje de la subdivisión i .

Los usuarios del modelo SCS como se implementa en HEC-HMS deberían notar que las tablas incluyen un CN ponderado para distritos urbanos, distritos residenciales, y áreas de clasificación reciente. Esto es, el CN que se muestra son valores compuestos para un área impermeable conectada directamente y espacios abiertos. Si se selecciona un CN para estos usos de la tierra, no se requiere la determinación del área impermeable no conectada en HEC-HMS.

Modelación de la Escorrentía Directa. Se describen los modelos de interés para este estudio, los cuales simulan los procesos de escurrimiento directo del exceso de precipitación sobre la cuenca. El programa HEC-HMS se refiere a estos procesos como “transformación” del exceso de precipitación en un punto de escurrimiento. Con HEC-HMS, existen dos opciones para métodos de transformación:

Modelos empíricos (modelos teóricos de sistemas). Involucran modelos de hidrogramas unitarios (HU) tradicionales. Los modelos teóricos de sistemas buscan

establecer un enlace casuístico, entre el exceso de precipitación y el escurrimiento sin considerar los detalles de los procesos internos. Las ecuaciones y los parámetros del modelo tienen un significado físico limitado. Sin embargo, ellos han sido seleccionados atendiendo a criterios de optimización de bondad de ajuste.

Modelo conceptual. El modelo conceptual incluido en HEC-HMS es el modelo de onda cinemática de flujo superficial. Este representa todos los mecanismos físicos que gobiernan el movimiento del exceso de precipitación sobre la superficie de la tierra de la cuenca y pequeños canales colectores en la cuenca. En este estudio se usa el modelo empírico del SCS, el cual se presenta a continuación:

Modelo de hidrograma unitario (HU) del SCS. El Servicio de conservación de Suelos (SCS) propuso un modelo paramétrico de Hidrograma Unitario (HU). Este HU adimensional, expresa el HU de descarga U_t como la relación de la descarga pico del HU U_p para cualquier tiempo t , una fracción de T_p , el tiempo al pico del HU. Las investigaciones del SCS sugieren que el pico del HU y el tiempo al pico del HU se relacionan mediante la Ecuación 15:

$$U_p = C \frac{A}{T_p} \quad (15)$$

donde A es el área de la cuenca y C es una constante de conversión (2.08 en el SI y 484 en el Sistema Inglés). El tiempo al pico-también conocido como tiempo de incremento-se relaciona con la duración de la unidad de exceso de precipitación mediante la Ecuación 16:

$$T_p = \frac{\Delta t}{2} + t_{lag} \quad (16)$$

donde Δt es la duración de la precipitación en exceso (el cual es un intervalo de cálculo en HEC-HMS); y t_{lag} es el retardo de la cuenca, definido como el tiempo diferencia entre el centro de masa del exceso de lluvia y el pico del HU.

Cuando se especifica el tiempo de retardo, HEC-HMS resuelve la Ecuación 16 para encontrar el tiempo al pico del HU, y la Ecuación 15 para encontrar el pico del HU. Conocidos U_p y T_p , el HU se encuentra a partir del formato dimensional, el cual se incluye en HEC-HMS, por multiplicación.

Estimación de los parámetros del HU del SCS. Para cuencas sin medición, el SCS sugiere que el tiempo de retardo del HU se debe relacionar con el tiempo de concentración, t_C , con la Ecuación 17:

$$t_{lag} = 0.6t_C \quad (17)$$

El tiempo de concentración es un parámetro cuasi-físico que se puede estimar con la Ecuación 18:

$$t_C = t_{sheet} + t_{shallow} + t_{channel} \quad (18)$$

donde t_{sheet} es la suma del tiempo de viaje en los tramos de flujo laminar sobre la superficie del terreno de la cuenca; $t_{shallow}$ es la suma del tiempo de viaje en tramos

de flujo turbulento, partes bajas de la calle, cunetas, quebradas y arroyos; y $t_{channel}$ es la suma del tiempo de viaje en tramos del canal.

Identificar los canales abiertos donde la información de la sección transversal esté disponible. Obtener las secciones transversales de levantamientos topográficos de campo, planos, o fotografías aéreas. Para estos canales, la velocidad se estima mediante la Ecuación de Manning:

$$V = \frac{CR^{2/3}S^{1/2}}{n} \quad (19)$$

donde V es la velocidad promedio; R es el radio hidráulico (definido como la relación del área de la sección transversal entre el perímetro mojado); S es la pendiente de la línea de energía (con frecuencia se aproxima a la pendiente del lecho); y C es una constante de conversión (1.00 para el SI y 1.49 para el Sistema Inglés).

Los valores de n, los cuales comúnmente se conocen como coeficiente de rugosidad de Manning, se puede estimar de tablas de textos, Una vez que la velocidad en el canal se ha estimado, el tiempo de viaje en el canal se calcula con la Ecuación 20:

$$t_{channel} = \frac{L}{V} \quad (20)$$

donde L es la longitud del canal.

Modelación del Tránsito en Canales con HEC-HMS. Los modelos de flujo en canales

que se incluyen en HEC-HMS son conocidos como modelos de tránsito. Los modelos de tránsito disponibles en HEC-HMS incluyen:

- ✓ Retardo
- ✓ Muskingum
- ✓ Suma modificada, conocido como almacenamiento en tránsito
- ✓ Onda cinemática
- ✓ Muskingum-Cunge

Cada uno de estos modelos calcula un hidrograma de escurrimiento aguas abajo conocido el hidrograma de escurrimiento aguas arriba como condición límite. Para cada uno se resuelve la ecuación de continuidad y cantidad de movimiento. En este estudio se aplica el modelo de Muskingum-Cunge por disponer de datos sobre él.

Muskingum-Cunge. El modelo de Muskingum incluye parámetros que no están basados en la física y que por lo tanto son difíciles de estimar. Además, el modelo se basa en suposiciones que con frecuencia no se cumplen en los canales naturales. Como una ampliación, el modelo Muskingum-Cunge supera estas limitaciones. El modelo se basa en una solución de la siguiente ecuación de continuidad (con un caudal de entrada lateral, q_L , incluye):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_L \quad (20)$$

Y la forma de difusión de la ecuación de cantidad de movimiento:

$$S_f = S_o - \frac{\partial y}{\partial x} \quad (21)$$

La combinación de éstos y el uso de la aproximación lineal da lugar a la ecuación de difusión convectiva (Millar y Cunge, 1975):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c \frac{\partial Q}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + cq_L \quad (22)$$

donde c es la celeridad (velocidad) de la onda; y μ es la difusividad hidráulica. La celeridad de la onda y la difusividad hidráulica se expresa como:

$$c = \frac{\partial Q}{\partial A} \quad (23)$$

$$Y \quad \mu = \frac{Q}{2BS_o} \quad (24)$$

donde B es el ancho superior de la superficie del agua. Una aproximación por diferencias finitas de las derivadas parciales, combinadas con la ecuación de continuidad, produce:

$$O_t = C_1 I_{t-1} + C_2 I_t + C_3 O_t - 1 + C_4 (q_L \Delta x) \quad (25)$$

Los coeficientes son:

$$C_1 = \frac{\frac{\Delta t}{K} + 2X}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1-X)} \quad (26)$$

$$C_2 = \frac{\frac{\Delta t}{K} - 2X}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1 - X)} \quad (27)$$

$$C_3 = \frac{2(1 - X) - \frac{\Delta t}{K}}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1 - X)} \quad (28)$$

$$C_4 = \frac{2\left(\frac{\Delta t}{K}\right)}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1 - X)} \quad (29)$$

Los parámetros K y X son (Cunge, 1969; Ponce, 1978):

$$K = \frac{\Delta x}{c} \quad (30)$$

$$X = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{Q}{BS_o c \Delta x} \right) \quad (31)$$

Como c, Q, y B cambian con el tiempo, los coeficientes C₁, C₂, C₃ y C₄ deben cambiar. HEC-HMS los recalcula para cada intervalo de tiempo y distancia, Δt y Δx , con el uso de los algoritmos propuestos por Ponce (1986)

De nuevo, la selección del intervalo de tiempo y distancia es crítica. HEC-HMS selecciona estos para garantizar exactitud y estabilidad. El Δt seleccionado es el mínimo de los siguientes: intervalo de tiempo del usuario a partir de las especificaciones de control; el tiempo de viaje a lo largo del tramo; o 1/20 del tiempo de incremento del flujo de entrada pico con la selección de una curva de crecimiento pronunciado, redondeando un múltiplo próximo o divisor del intervalo de tiempo del usuario. Una que se elige Δt , HEC-HMS calcula Δx como:

$$\Delta x = c\Delta t \quad (32)$$

El valor está limitado de esta manera:

$$\Delta x < \frac{1}{2} \left(c\Delta t + \frac{Q_o}{BS_o c} \right) \quad (37)$$

donde Q_o es el caudal de referencia, calculado a partir del hidrograma de entrada como:

$$Q_o = Q_B + \frac{1}{2}(Q_{peak} - Q_B) \quad (38)$$

donde Q_B es el flujo base; y Q_{peak} es el flujo de entrada pico.

Modelo de sistema para tránsito de crecientes en el embalse. Se emplea un modelo de caja negra para tránsito de crecientes y rendimiento para una capacidad determinada del vaso de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$I - O = \frac{dS}{dt} \quad (38)$$

donde I es el caudal de entrada, O es el caudal de salida y dS es el cambio de almacenamiento en el intervalo de tiempo dt .

La Ecuación 38 se basa en el principio de continuidad y de acuerdo a Guevara (2004), a medida que el flujo se mueve a través de la caja existirá un cambio en la cantidad de agua por el aumento del tirante, pudiéndose expresar la ecuación de continuidad de la forma:

$$I - O = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (39)$$

Con I igual al caudal de entrada, O es el caudal de salida, S es el volumen de almacenamiento y Δt es el incremento del tiempo.

Debido a que el almacenamiento es una característica de los modelos de este tipo, el cálculo del mismo estará sujeto a si el almacenamiento es en un río, una presa, un embalse o una combinación de alguna de éstas. En este estudio se considera el tránsito por el embalse, el cual se presenta a continuación:

Tránsito por el embalse. Para efectuar tránsito por el embalse se asume, por practicidad en el cálculo, que el nivel del embalse es horizontal aun cuando en la realidad no siempre sea así. Se requiere además disponer de los siguientes datos:

- ✓ El hidrograma de entrada

- ✓ El nivel de la superficie de agua en el embalse en el instante en que llega la creciente:
t=0
- ✓ El caudal de salida en el embalse antes de arribar la creciente.

Se mencionan adicionalmente como datos de entrada las características físicas del embalse (Curva Área- Capacidad) y el área de la superficie del agua. Las salidas no controladas; es decir, aquellas que discurren libremente sobre el aliviadero, se pueden determinar en función de las características geométricas del mismo y de la altura de agua que alcanza el caudal sobre dicha estructura. A su vez, el nivel del agua sobre el aliviadero va a depender del nivel de agua en el embalse (Guevara, 2004). Dados dos puntos 1 y 2 y en función del almacenamiento, la Ecuación 39 se puede expresar de la forma:

$$I_1 + I_2 + \left[\frac{2S_1}{t} - O_1 \right] = \frac{2S_2}{t} + O_2 \quad (40)$$

La solución de la Ecuación (40) requiere de una curva de tránsito que indique el valor de $[2S/t + O]$ contra valores de O . Todos los términos del lado izquierdo de la ecuación se conocen; el valor de $2S_2/t + O_2$ puede ser calculado; el valor de O_2 se obtiene entonces de la curva de tránsito. Se repite el procedimiento para todos los intervalos. Hay que hacer notar que el término $[2S/t - O]$ se calcula fácilmente como $[2S_2/t + O_2] - 2 O$.

Simulación de Operación de embalse con el programa HEC-ResSim

Es un programa computacional que simula la operación del embalse, provisto de una interface gráfica de usuario, capacidad de manejo y almacenamiento de datos

mediante la herramienta para el almacenamiento de datos HEC-DSS: Data Storage System y facilidades gráficas y de reportes. El programa está dividido en tres módulos, estos son:

- ✓ Configuración de Cuenca
- ✓ Red de Embalse
- ✓ Simulación

Módulo de configuración de cuenca. Este módulo permite crear o abrir una cuenca a partir del menú Archivo. Cuando una cuenca es creada el programa construye un árbol de directorio donde todos los archivos pertenecientes a la cuenca serán almacenados. Es importante señalar que este módulo se activa solo si se ha introducido previamente un mapa de la región o zona de estudio, en un programa compatible: Arcinfo® DEM (*.asc), ASCII DEM (*.dem) y ASCII Netin (*.net). Este módulo comprende los siguientes pasos:

- ✓ Crear o abrir una cuenca.
- ✓ Agregar archivos de mapas.
- ✓ Dibujar una alineación de corriente para identificar todos los elementos de la cuenca de estudio.
- ✓ Crear una configuración para identificar el conjunto de proyectos (embalse, presa, límites de estado, hidrografía, entre otros) que se quieren modelar en la cuenca de estudio.
- ✓ Ubicar los elementos del proyecto en la configuración.

Módulo de red de embalse. Una vez que se ha establecido una alineación de corriente y se han definido una o más configuraciones, puede ser creada una red de embalse. El desarrollo de una red de embalse comprende:

- ✓ Crear o abrir una red, para definir una nueva red de embalse y luego agregar los enrutamientos.
- ✓ Agregar enrutamientos, los cuales son elementos que establecen la conectividad esquemática de la red de embalses.
- ✓ Edición de propiedades de unión, para revisar la descripción y la estación del flujo.
- ✓ Edición de propiedades de enrutamiento.
- ✓ Edición de propiedades del embalse, la cual comprende la edición de los siguientes datos:

Datos Físicos. Describen los componentes físicos del embalse que incluyen el estanque, la presa y sus salidas, y cualquier derivación de salida (comúnmente llamada derivaciones del estanque).

Datos Operacionales. Constituyen los datos que cada embalse de la red debe tener para determinar cuánta agua liberar en cada instante de una corrida de simulación. Este plan es llamado *Conjunto de Operación*, formado por un conjunto de tres reglas básicas: Zonas, Reglas de operación e identificación de la curva guía del embalse.

Datos Observados. Corresponden a la serie de tiempo o históricos disponibles, para fines de comparación.

Definición de alternativas. Una alternativa consiste de: una red de embalse previamente creada a partir de una configuración, un conjunto de operación para cada embalse en la red, un conjunto de operación de balance de almacenamiento para cada sistema de embalse en la red (si aplica), una definición de condiciones

iniciales y un mapeo de los registros de series de tiempo para identificar los influjos locales.

Para desarrollar una alternativa es necesario, primero, darle un nombre y una descripción, seleccionar un conjunto de operación de embalse, seleccionar (en caso de que aplique) un conjunto de operación del sistema, seleccionar las condiciones iniciales, los datos de series de tiempo asociados con las localizaciones y los datos observados asociados con las localizaciones.

Módulo de simulación. Una vez introducidos todos los datos y creado las alternativas, se está listo para ejecutar la simulación, la cual permite especificar una ventana o intervalo de tiempo para una alternativa o grupo de alternativas.

Modelos de Pronóstico

La modelación del aporte hídrico al embalse Pao-Cachinche se lleva a cabo mediante la aplicación de modelos de pronóstico, los cuales permiten pronosticar valores futuros de datos de series de tiempo, dentro de estos modelos se incluyen las medias móviles, caminata aleatoria, varios tipos de suavizadores exponenciales, modelos de tendencias, y modelos paramétricos ARIMA. Cada uno de los modelos de pronósticos toma una aproximación diferente para pronosticar valores futuros; a continuación se explica el modelo ARIMA, con el cual se obtienen los coeficientes de correlación R^2 más satisfactorios para la modelación del aporte hídrico de las subcuencas afluentes al embalse Pao-Cachinche.

Modelos ARIMA

Los modelos ARIMA, (*AutoRegressive, Integrated, Moving Average*), expresan la observación en el tiempo t como una función lineal de las observaciones previas, un término del error actual, y una combinación lineal de los términos del error previo. La forma general del modelo se expresa en términos del operador de rezago B , el cual opera en el índice del tiempo de un dato tal como $B_j Y_t = Y_{t-j}$. Usando este operador, el modelo toma la forma:

$$(1 - B - B^2 - \dots - B^P)(1 - B^2 - B^{2s} - B^{Ps})(1 - B)^d(1 - B^s)^d Z_t = (1 - B - B^2 - \dots - B^q)(1 - B^s - B^{2s} - B^{Qs})a_t \quad (41)$$

con:
$$Z_t = Y_t - \mu \quad (42)$$

donde a_t es un error aleatorio o choque del sistema en el tiempo t , usualmente asumido normal con media 0 y desviación estándar σ_a . Para una serie estacionaria, μ representa la media del proceso. La Ecuación 1 frecuentemente se representa como ARIMA (p,d,q)x(P,D,Q)s, la cual involucra los siguientes términos:

- ✓ Un término auto-regresivo no estacional de orden p ,
- ✓ Diferenciación no estacional de orden d ,
- ✓ Un término de media móvil no estacional de orden q ,
- ✓ Un término auto-regresivo estacional de orden P ,
- ✓ Diferenciación estacional de orden D y
- ✓ Un término de media móvil estacional de Q .

Mientras que el modelo general luce formidable, los modelos más comúnmente usados son casos relativamente simples especiales, a continuación, se incluye la estructura de uno de ellos, usado en este estudio:

ARIMA(0,1,1)x(0,1,1)^s –MA términos de orden 1 estacionales y no estacionales.

La observación en el tiempo t es expresada como una combinación de la observación en estacionalidad más la diferencia entre la observación del último período y su contraparte estacional más un múltiplo de error de este período, el último período y dos períodos uno estacional:

$$Y_t = Y_{t-s} + Y_{t-1} - Y_{t-s-1} + a_t - \theta_1 a_{t-1} - O_1 a_{t-s} + \theta_1 O_1 a_{t-s-1} \quad (43)$$

donde Y_t es el valor observado en el tiempo t ; con $t= 1,2,\dots,n$; siendo n el tamaño de la muestra (número de observaciones usadas para ajustar el modelo).

Modelo de Red Neuronal Artificial (RNA)

Una Red Neuronal Artificial (RNA) consiste en una red altamente interconectada de elementos que operan en paralelo los cuales están inspirados en sistemas biológicos nerviosos, es por ello que tales elementos o unidades de procesamiento simple son llamadas "neuronas", donde aquellas con características similares se agrupan en una sola capa.

Así como en la naturaleza, las conexiones entre elementos determinan ampliamente la función de red. El usuario puede entrenar una red neural para ejecutar una función particular por ajuste de los valores de las conexiones (pesos)

entre elementos. La RNA almacena la información capturada por el vector de entrada mediante "los pesos" de las conexiones entre las neuronas.

Típicamente, las redes neuronales son ajustadas o entrenadas para que una entrada particular conlleve a una salida objetivo (target) específica. La Figura 5 muestra tal situación; donde la red es ajustada, basada en la comparación de la salida con el target, hasta que la salida de la red iguala al target, generalmente se necesitan muchos pares entrada/target para entrenar la red.

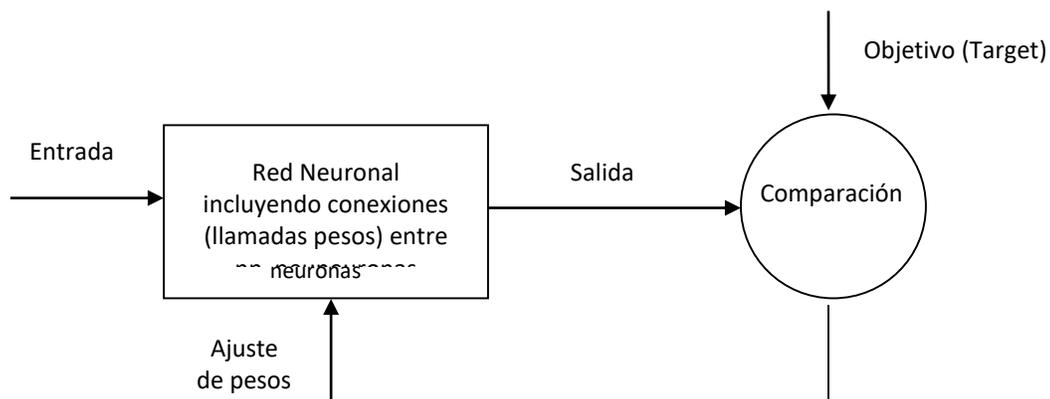


Figura 5. Fundamento de operación de una red neuronal artificial. Fuente: MATLAB®

Las redes neuronales han sido entrenadas para ejecutar funciones complejas en varios campos, incluyendo reconocimiento de modelos, identificación, clasificación, lenguaje, visión y sistemas de control. Las RNA también son entrenadas para resolver problemas que son difíciles de resolver por computadores tradicionales o el ser humano.

La RNA comúnmente usada en aplicaciones de ingeniería se basa en el algoritmo de propagación hacia atrás. En la RNA de propagación hacia atrás, las entradas a las neuronas de una capa de entrada se propagan en dirección hacia adelante y el vector

de salida se calcula a través de la utilización de una función de activación no lineal (Eberhart y Dobbins, 1990).

Al conocer la salida, se calcula el error en la capa de salida, mediante la propagación hacia atrás a través de la red se actualizan los pesos de las conexiones. Este proceso de cálculos por alimentación progresiva y propagación hacia atrás del error se repite hasta que un nivel aceptable de convergencia se ha alcanzado. Todo este proceso se conoce como la formación de la RNA. Normalmente, la “regla delta generalizada” se utiliza para entrenar una RNA de propagación hacia atrás. (Rumelhart et al. 1986). Una vez que la red se ha entrenado y validado, se puede utilizar para la predicción.

Modelo de neurona: neurona simple. Una neurona con una sola entrada escalar y sin sesgo se muestra en la Figura 6(a):

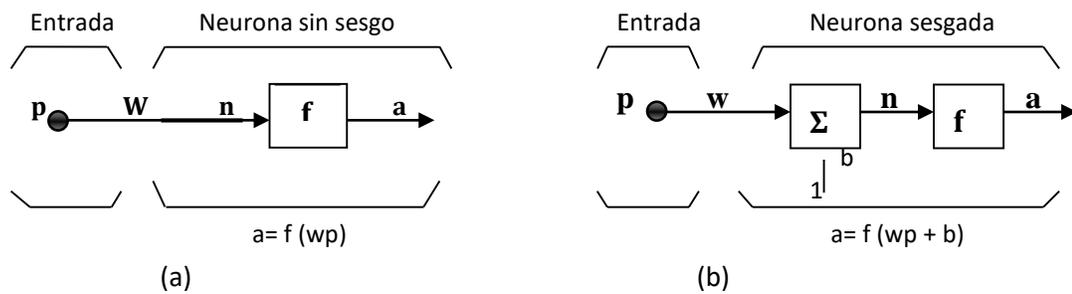


Figura 6. Modelo de neurona: (a) sin sesgo y (b) sesgada. Fuente: MATLAB®

En la Figura 6(a) la entrada escalar p es transmitida a través de una conexión que multiplica su longitud por el peso escalar w para formar el producto wp , que es también un escalar. La entrada pesada es el único argumento de la función de transferencia f , la cual produce la salida escalar a . La neurona de la Figura 6(b) tiene un sesgo escalar b . Los sesgos pueden ser vistos como una simple agregación al

producto w_p tal como se muestra en la figura, para la suma de la unión o como una función de cambio de f por una cantidad b . Los sesgos son como pesos, excepto aquellos que tienen una constante de entrada de 1.

La función de transferencia de entrada neta n , que es un escalar, es la suma de las entradas pesadas w_p y la tendencia b . Esta suma es el argumento de la función de transferencia f , la cual es comúnmente una función por paso o una función sigmoideal, que toma el argumento n y produce la salida a . Cabe señalar que w y b son ambos parámetros escalares ajustables de la neurona. La idea central de las redes neuronales es que dichos parámetros puedan ser ajustados para que la red exhiba algún comportamiento deseado o interesante.

Funciones de transferencia. Las tres funciones más comúnmente usadas se muestran a continuación:

Función de transferencia de límite pesado (Hard-Limit). En la Figura 7 se muestra una función de éste tipo, la cual limita la salida de la neurona a casi 0 (cero) si el argumento de entrada neto n es menor que 0 ó 1 y si n es mayor o igual a 0.

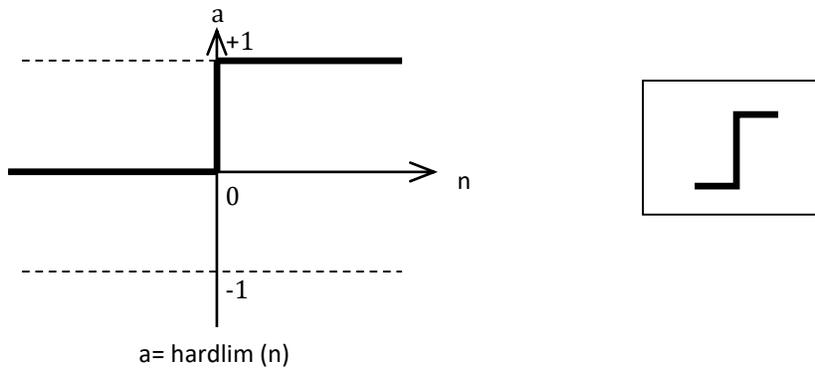


Figura 7. Función de transferencia de límite pesado (Hard-Limit). Fuente: MATLAB®

Función de transferencia lineal. En la Figura 8 se muestra la función de transferencia lineal:

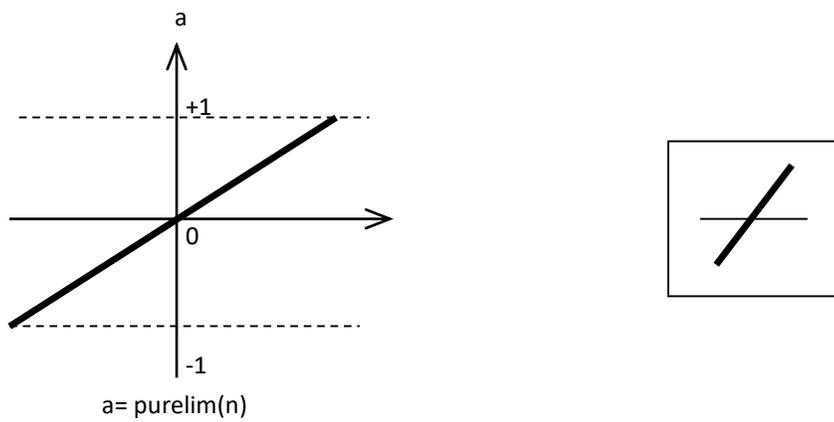


Figura 8. Función de transferencia lineal. Fuente: MATLAB®

Función de transferencia sigmoidal. La función de transferencia sigmoidal (ver Figura 9), toma la entrada, la cual puede tener cualquier valor entre más o menos infinito y presiona la salida al rango entre 0 a 1.

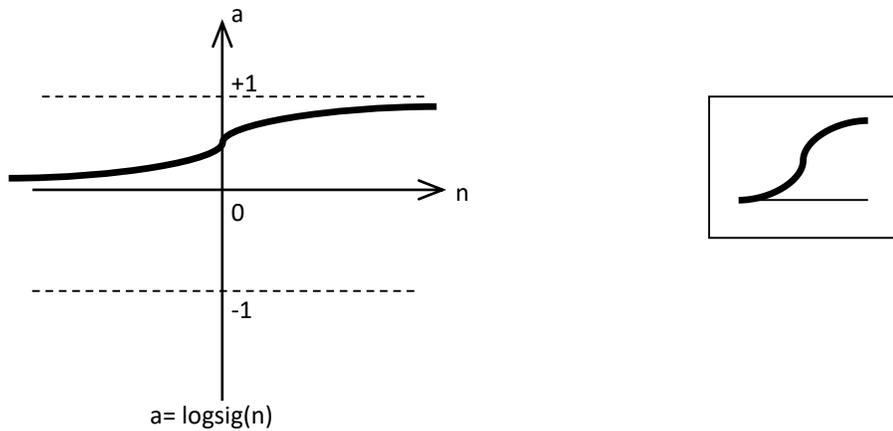


Figura 9. Función de transferencia sigmoidal. Fuente: MATLAB®

Esta función de transferencia es comúnmente usada en las redes de propagación hacia atrás, en parte porque es diferenciable. Una neurona con vector de entrada con un solo vector R -elemento de entrada se muestra en la Figura 6. En esta figura las entradas individuales de elementos $p_1, p_2, p_3, \dots, p_R$; son multiplicadas por los pesos $w_{1,1}; w_{1,2}; \dots w_{1,R}$ y los valores pesados son alimentados a la suma de la unión. Su suma es simplemente w_p , el punto producto de la matriz w (única columna) y el vector p , donde R es el número de elementos en el vector de entrada.

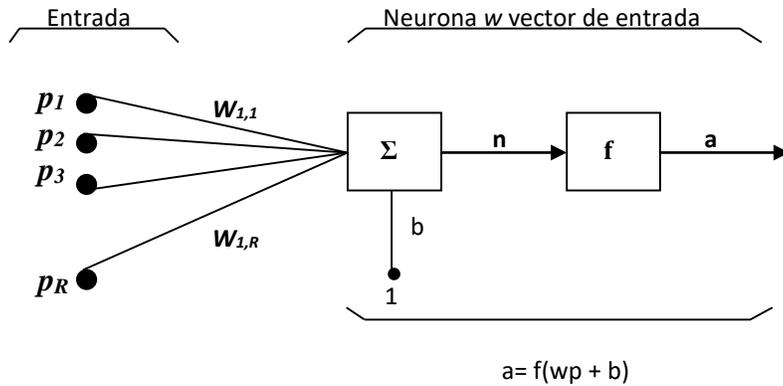


Figura 10. Neurona con vector de entrada y un solo elemento R de entrada. Fuente: MATLAB®

La neurona tiene un sesgo b , el cual es sumado con las entradas pesadas para formar las entradas netas n . En esta suma n es el argumento de la función de transferencia f :

$$n = w_{1,1}p_1 + w_{1,2}p_2 + \dots + w_{1,R}p_R + b \quad (44)$$

Los autores han dividido una notación abreviada para una neurona individual. Esta notación puede ser usada en circuitos de múltiples neuronas, tal como se muestra en la Figura 11, donde R es el número de elementos en el vector de entrada:

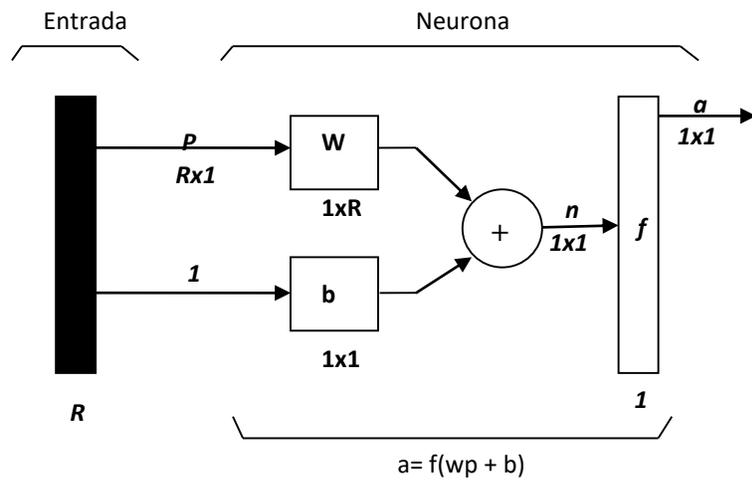


Figura 11. Capa de una red. Fuente: MATLAB®

El vector de entrada p es representado por la barra vertical negra sólida a la izquierda de la Figura 11. Las dimensiones de p son mostradas como $R \times 1$. Además, p es un vector de R -elementos de entrada. Estas entradas postmultiplican la columna simple, R -columnas de la matriz w . Como en anteriores oportunidades, una constante 1 entra a la neurona como una entrada y es multiplicada por un sesgo escalar b . La entrada neta ingresa a la función de transferencia f para tener a la salida las neuronas a , la cual en este caso es un escalar. Cabe señalar que, si hay más de una neurona, la red de salida sería un vector.

Una capa incluye la combinación de los pesos, la multiplicación y operación de suma, el sesgo b (usado aquí como un vector producto wp), los sesgos b y la función de transferencia f . El arreglo de las entradas, el vector p , no está incluido en la llamada capa.

Cada vez que esta notación abreviada de red es usada, los tamaños de las matrices son mostrados debajo de su matriz de nombre variable. Esta notación permitirá entender la arquitectura y seguir los modelos matemáticos asociados con ellos.

Arquitectura de red para una capa de neuronas. Una red de una capa con R elementos de entrada y S neuronas es mostrada en la Figura 12, donde R es el número de elementos en el vector de entrada, S es el número de neuronas en la capa, W es el peso de la matriz y $W_{i,j}$ es la longitud de conexión desde la entrada j a la neurona i .

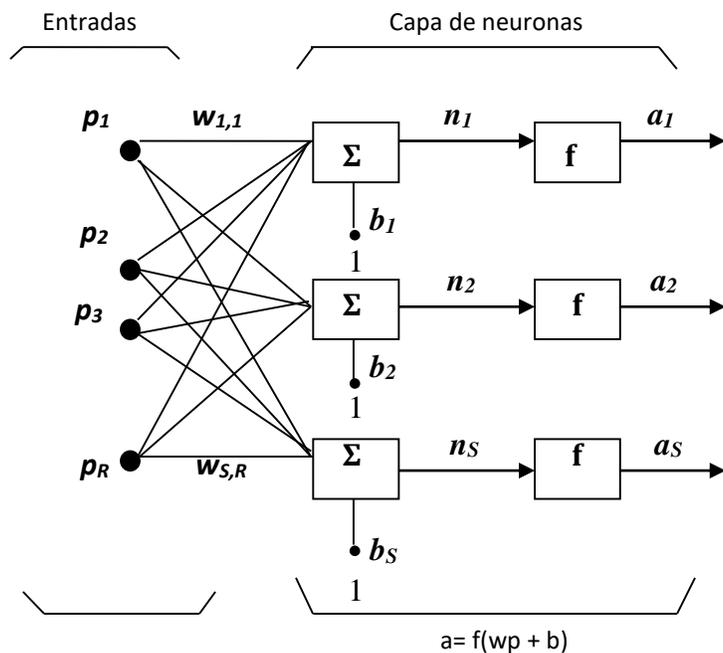


Figura 12. Arquitectura de red para una capa de neuronas. Fuente: MATLAB®

En ésta red cada elemento del vector de entrada p está conectado a cada neurona de entrada a través del peso de la matriz w . La i -ésima neurona tiene una sumatoria que reúne sus entradas y sesgos pesados para formar su propia salida escalar n_i . Los varios n_i toman juntos la forma de un vector de entrada neto n de elemento S .

Finalmente, las salidas de la capa de la neurona forman el vector a . La expresión para a es mostrada en la parte inferior de la Figura 13, donde R es el número de elementos en el vector de entrada y S es el número de neuronas en la capa 1.

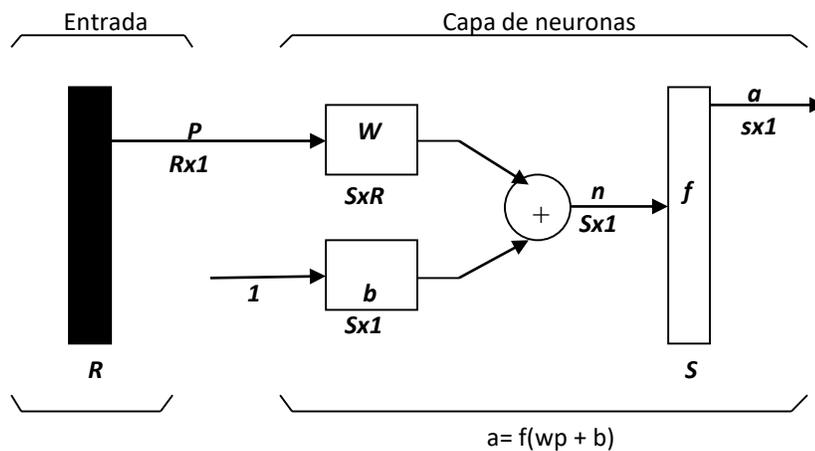


Figura 13. Capa de neuronas. Fuente: MATLAB®

En la Figura 13, f es un vector de longitud de entrada R , W es una matriz $S \times R$ y a y b son vectores de longitud S . Tal como se definió previamente, la capa de la neurona incluye el peso de la matriz, las operaciones de multiplicación, el vector de sesgo b , la suma y las cajas de función de transferencia.

Entradas y capas. Para describir las redes con múltiples capas la notación debe ser extendida. Específicamente, es necesario hacer una distinción entre pesos de matrices que están conectadas a entradas y pesos de matrices que están conectadas entre capas. También se necesita identificar la fuente y el destino de los pesos de las matrices. Cabe señalar que es común que el número de entradas a una capa sea diferente del número de neuronas, por ejemplo, R no es necesariamente igual a S . Una capa no está limitada a tener un número de entradas igual al número de sus neuronas.

Es posible crear una sola capa de neuronas que tengan diferentes funciones de transferencia, simplemente colocando dos de las redes mostradas en paralelo. Ambas redes tendrían las mismas entradas y cada red crearía algunas de las salidas. Los elementos del vector de entrada introducidos a la red a través del peso de la matriz W son:

$$W = \begin{pmatrix} w_{1,1} & w_{1,2} & \dots & w_{1,R} \\ w_{2,1} & w_{2,2} & \dots & w_{2,R} \\ w_{S,1} & w_{S,2} & \dots & w_{S,R} \end{pmatrix} \quad (45)$$

Nótese que los índices de las filas en los elementos de la matriz W indican la neurona de destino del peso y los índices de la columna indican cuál es la fuente de la entrada para ese peso. Además, los índices en $w_{1,2}$ expresan que la longitud de la señal desde el segundo elemento de entrada a la primera (y única) neurona es $w_{1,2}$.

La red de una capa con S neuronas y R entradas puede también ser representada en notación abreviada, tal como se muestra en la Figura 14, donde se llama a los pesos de las matrices conectadas a entradas “pesos de entradas” y a los pesos de las matrices que provienen de las salidas de una capa “pesos de capas”; con R igual al número de elementos en el vector de salida y S igual al número de neuronas en la capa 1.

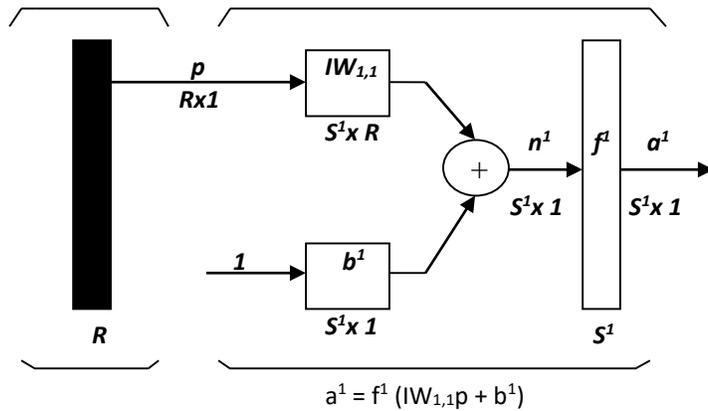
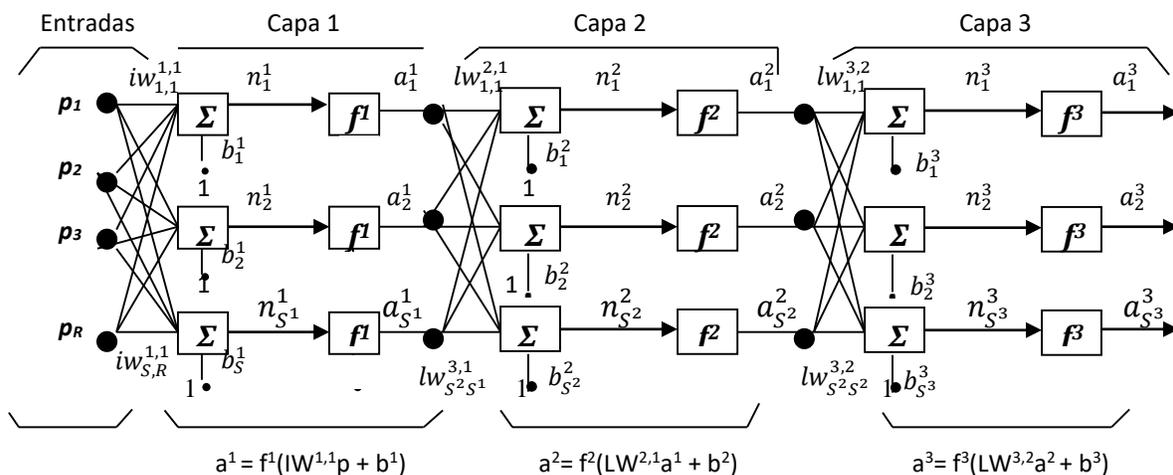


Figura 14. Representación abreviada de una capa de neurona. Fuente: MATLAB®

De la Figura 14 se puede observar que el peso de la matriz conectada al vector de entrada p es etiquetado como un peso de entrada a la matriz $IW^{1,1}$ teniendo una fuente 1 (segundo índice) y un destino 1 (primer índice). Los elementos de la capa 1, tales como los sesgos, la entrada neta y la salida tienen un superíndice 1 que denota que están asociados con la primera capa. Múltiples capas de neuronas, usan matrices con pesos de capa LW así como también matrices con pesos de entrada IW .

Múltiples capas de neuronas. Una red puede tener varias capas, cada una de las cuales tiene un peso de matriz W , un vector de sesgo b y un vector de salida a . Para distinguir entre el peso de las matrices, los vectores de salida, etc, en cada una de las capas, se identifica en la capa con un superíndice a la variable de interés, tal como se muestra en la Figura 15.



$$a^3 = f^3(LW^{3,2}f^2(LW^{2,1}f^1(IW^{1,1}p + b^1) + b^2) + b^3)$$

Figura 15. Capas múltiples de neuronas. Fuente: MATLAB®

La red mostrada en la Figura 15 tiene R^1 entradas, S^1 neuronas en la primera capa, S^2 neuronas en la segunda capa, etc. Es común tener diferentes números de neuronas en diferentes capas. Una constante de entrada 1 es alimentada al sesgo para cada neurona. Nótese que las salidas de cada capa intermedia son las entradas a la capa siguiente. Además, la capa 2 puede ser analizada como una red de una capa con S^1 entradas, S^2 neuronas y una matriz W^2 de peso $S^2 \times S^1$. La entrada a la capa 2 es a^1 , la salida es a^2 . Una vez que todos los vectores y matrices de la capa 2 han sido identificados, ésta puede ser tratada como una red de una sola capa. Esta aproximación puede ser tomada para cualquier otra capa de red.

Las capas de una red multicapa juegan roles distintos. Una capa que produce las salidas de la red es llamada *capa de salida*. Todas las otras capas son llamadas *capas ocultas*. La red de tres capas mostrada en la Figura 16 tiene una capa de salida (capa 3) y dos capas ocultas (capa 1 y capa 2). Algunos autores refieren a las entradas como

una cuarta capa. La misma red de tres capas puede también ser representada utilizando notación abreviada, tal como se muestra en la Figura 16:

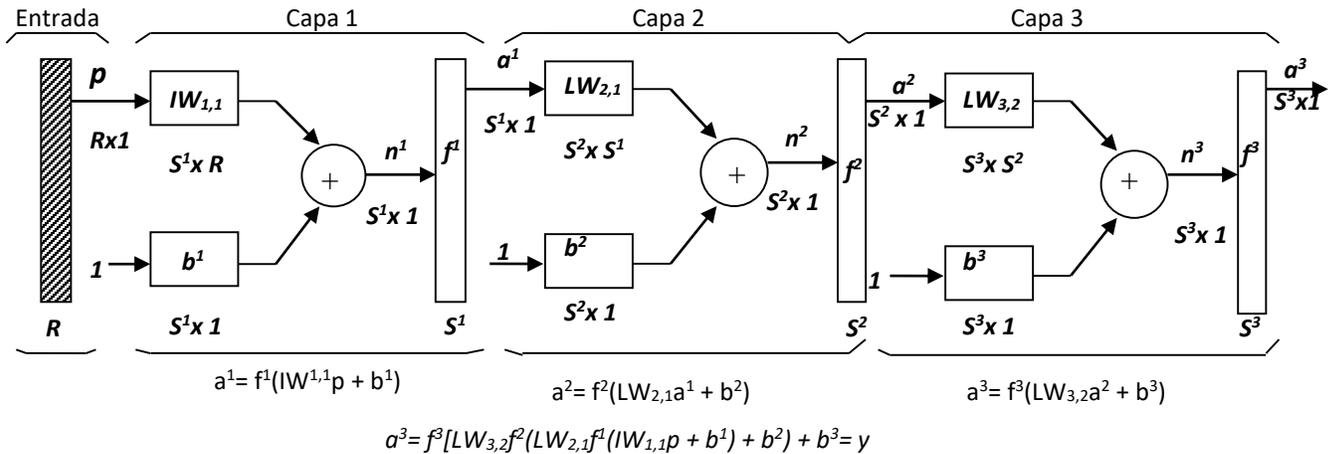


Figura 16. Representación abreviada de una capa de múltiples neuronas. Fuente: MATLAB®

Las redes multicapas son muy poderosas. Una red de dos capas, donde la primera capa es sigmoideal y la segunda capa es lineal, puede ser entrenada para aproximar cualquier función (con un número finito de discontinuidades) aproximadamente bien.

Se asume que la salida de la tercera capa a^3 es la salida de interés de la red y ésta salida es etiquetada como y . Esta notación es usada para especificar la salida de redes multicapa.

Análisis de Series de Tiempo

Descomposición Estacional

Este procedimiento divide una serie de tiempo en tres componentes: tendencia-ciclo, estacionalidad e irregularidad. La descomposición puede ser usada para crear una versión ajustada estacionalmente de la serie de tiempo original. Existen dos modelos básicos sobre los que se basa la descomposición de una serie de tiempo: modelo *multiplicativo* y modelo *aditivo*. El modelo multiplicativo asume que los datos en el tiempo t pueden ser representados como el producto de los cuatro componentes de acuerdo con:

$$Y_t = T_t C_t S_t R_t \quad (44)$$

El modelo aditivo asume que los componentes se suman:

$$Y_t = T_t + C_t + S_t + R_t \quad (45)$$

con: T es la tendencia o patrón general de largo plazo, C es la ciclicidad, S es la estacionalidad y R es la aleatoriedad o irregularidad. El propósito de la descomposición estacional es dividir una serie de tiempo observada en sus partes componentes, en particular, el procedimiento deriva en *Índices estacionales*, los cuales representan el efecto de cada estación.

Índices estacionales

Una vez que la tendencia-ciclo ha sido estimada, ésta puede ser removida de los datos. Para un modelo multiplicativo, se dividen los datos originales entre el componente estimado:

$$\hat{S}_t \hat{R}_t = \frac{Y_t}{\hat{T} * \hat{C}_t} \quad (46)$$

Para un modelo aditivo, la tendencia-ciclo es sustraída de los datos originales y queda:

$$\hat{S}_t \hat{R}_t = Y_t - \hat{T} \hat{C}_t \quad (47)$$

dónde: $\hat{S}_t \hat{R}_t$ es el índice estacional en función de la estacionalidad y la aleatoriedad, \hat{Y}_t es el conjunto de datos obtenidos por el modelo multiplicativo y $\hat{T} * \hat{C}_t$ es la tendencia-ciclo estimada. Las estimaciones resultantes del componente estacionalidad-irregularidad son promediadas usando todas las observaciones dentro de cada estación o temporada para remover el componente irregular, lo que resulta en un estimador del componente estacional. Los componentes estacionales son entonces ajustados para que un promedio estacional tenga un valor de 1.0 si se usa el método multiplicativo y 0 si se usa el método aditivo.

BASES LEGALES

El estudio se apoya en los Decretos 1.400 (Normas para la regulación y el control del aprovechamiento de los recursos hídricos y de las cuencas hidrográficas) y 38.595 (Ley de Aguas), ambos orientados a la protección y conservación de cursos de agua y

cuencas hidrográficas; en el Decreto 38.388, el cual especifica las limitaciones y potencialidades de las cuencas.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

A continuación se presenta la metodología en la cual se enmarca este estudio.

NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN

Tipo de Investigación

La investigación se inicia como *descriptiva* y se extiende hasta un nivel *correlacional* pues, tal como señala Hernández et al (2008), este tipo de estudio busca “conocer la relación que existe entre dos o más conceptos, categorías o variables en un contexto particular”. Este estudio realiza una aproximación de las características físicas de las corrientes y subcuencas afluentes al embalse; asimismo, se analiza la incidencia de los eventos de crecidas en cada una de las subcuencas y su repercusión en la operación del embalse; mediante la aplicación de técnicas de modelado.

Diseño de la Investigación

El diseño de la investigación es *No Experimental Longitudinal de Tendencia* ya que se analizan las variables hidrológicas correspondientes a las subcuencas, así como las variables físicas y operacionales propias del embalse Pao-Cachinche mediante el uso de una serie histórica de datos con registros superiores a 25 años.

POBLACIÓN Y MUESTRA

La población de este estudio está representada por el conjunto de datos hidrológicos, físicos y operacionales recopilados para el área de interés: subcuencas de los ríos afluentes al embalse Pao-Cachinche (Subsistema Cuenca Río Pao) y el propio embalse (Subsistema Embalse), respectivamente. La muestra está representada por la serie de tiempo del balance hídrico para el embalse Pao-Cachinche. Estas series de tiempo corresponden a registros diarios durante el período 1983-2009.

La muestra seleccionada es *Probabilística* por tratarse de un estudio descriptivo-correlacional donde se busca que los resultados obtenidos sean representativos de los eventos estudiados (Hernández et al, 2008) y por consiguiente, puedan ser aplicados de forma permanente en la toma de decisiones en la operación del embalse Pao-Cachinche por parte de HIDROCENTRO, en tiempo real y a futuro.

ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN

Este estudio se lleva a cabo en cinco etapas:

Etapa 1: Recolección de los datos

Etapa 2: Caracterización del SRC1

Etapa 3: Diagnóstico de la operación del embalse durante el período 1983-2009

Etapa 4: Procesamiento de los datos

Etapa 5: Evaluación de los resultados

Etapa 1: Recolección de los Datos

Los datos recopilados de las visitas a los organismos vinculados, principalmente Minamb, HIDROCENTRO, CORPOCENTRO, SOTARN e IGVSb, con respecto al manejo de la cuenca del río Pao y el embalse Pao-Cachinche, se agrupan en cinco grupos:

Datos hidrológicos. Corresponden a la base de datos del balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche, los cuales fueron proporcionados por el Departamento de Fuentes Superficiales de HIDROCENTRO; los datos de lluvia provienen de la estación hidrométrica Pao-Cachinche, proporcionados por el Minamb.

Datos físicos. Comprenden la curva Área-Capacidad y las características técnicas de la presa y el aliviadero del embalse, suministrados por HIDROCENTRO.

Datos operacionales. Correspondientes a la dinámica y reglas de operación del embalse, la Estación de Bombeo Red Media y la planta potabilizadora Alejo Zuloaga; entre las cuales están la programación de bombeo, el esquema de operación de la torre toma del embalse, los caudales extraídos de acuerdo a la cantidad de bombas operando e información de operación de la planta de potabilización.

Cartografía. Incluye las cartas topográficas y ortofotomapas suministrados por el IGVSb, CORPOCENTRO y SOTARN, a escala 1:25.000. En la delimitación de la cuenca media del río Pao se usan las cartas 6545-I-NO, 6545-I-NE, 6545-I-SO y 6545-I-SE, a partir de las cuales se crea el Modelo Digital del Terreno (MDT) para cada subcuenca, de los cuales hacen uso los modelos HEC.

Herramientas tecnológicas. Comprende la aplicación de los softwares de descarga libre empleados para la modelación de la operación del embalse. Los programas utilizados son:

HEC-GeoHMS (versión 1.1). Este modelo es utilizado para determinar las características morfológicas e hidrográficas de las corrientes y subcuencas afluentes al embalse. Los resultados del modelo junto con los parámetros hidrológicos de las subcuencas son utilizados como entradas por el modelo HEC-HMS.

HEC-HMS (versión 3.4). Permite modelar el proceso lluvia-escorrentía realizando el tránsito por el cauce de los ríos afluentes al embalse, a partir de las tormentas de diseño generadas.

HEC-ResSim (versión 3.0). La herramienta se utiliza para simular la operación de crecientes en el embalse.

STATGRAPHICS®. Se emplea para el análisis estadístico de los datos mediante los módulos *Métodos Descriptivos*, con el cual se obtienen los parámetros estadísticos y las gráficas de las series de tiempo; y *Análisis de Series de Tiempo*, el cual abarca la evaluación de la estacionalidad de los datos originales y la función de autocorrelación; así como también la estandarización o preprocesamiento de los datos para eliminar dicha estacionalidad. Las series estandarizadas son analizadas, variando en cada corrida los parámetros del modelo.

MATLAB® (versión 6.0.3). Este software se emplea en la modelación de la *Red Neuronal Artificial (RNA)*.

Etapa 2: Caracterización del Sistema Regional del Centro I (SRCI)

A los fines de facilitar su estudio, el SRC1 es dividido en tres subsistemas: (a) Subsistema 1: Cuenca del Río Pao, (b) Subsistema 2: Embalse Pao-Cachinche y (c) Subsistema 3: Entrada a la PTAB Alejo Zuloaga. Este estudio está centrado en el Subsistema 2. En la Figura 17 se presenta de forma esquemática la división propuesta para el estudio del SRC1.

La caracterización física de las subcuencas y corrientes del embalse Pao-Cachinche se realiza utilizando la herramienta HEC-GeoHMS, la cual requiere de entrada el Mapa de Elevación Digital (MDT) de la subcuenca para realizar el procesamiento digital del terreno y red de drenaje. A continuación, se explican brevemente los pasos que comprende la aplicación de HEC-GeoHMS.

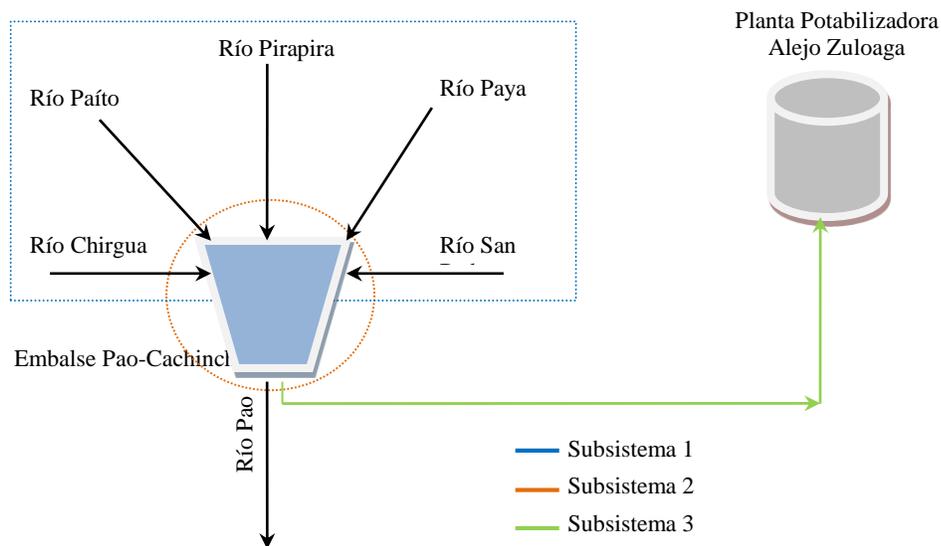


Figura 17. Subsistemas del SRCI. Elaboración propia

Preprocesamiento y procesamiento del terreno. Consta de los siguientes pasos:

1. Creación de carpetas de proyecto para cada una de las subcuencas, asignándoles como ubicación el Disco C del computador. Las carpetas se denominaron: *Proyecto_Chirgua*, *Proyecto_Paito*, *Proyecto_Pirapira*, *Proyecto_Paya* y *Proyecto_San Pedro*, respectivamente.

2. Almacenamiento de la tablas para el CNI, CNII y CNIII (ver Anexo A) en las carpetas de proyecto. Esta fase involucra:

- (a) Cálculo de las tablas del CNI y CNIII a partir de la tabla del CNII, y utilizando las Ecuaciones 12 y 13.

- (b) Tabulación de los resultados del CN para las condiciones I, II y III, para su posterior archivo en formato .dbf en las carpetas creadas para cada uno de los proyectos.
- (c) Elaboración en ArcGis del mapa del uso de suelo, a partir del ortofotomapa de la cuenca media del río Pao y de la tabla de uso potencial y tipo de suelo para el estado Carabobo, con la finalidad de generar una tabla de uso de suelo de la zona de interés.
- (d) Combinación de la base de datos para el uso del suelo del estado Carabobo con el mapa del área de interés.
- (e) Estimación del porcentaje de grupos hidrológicos de suelo a los cuales se les denominó: Pcta, Pctb, Pctc y Pctd, respectivamente.
- (f) Carga de las tablas de CNI, CNII y CNIII al programa HEC-GEoHMS.
- (g) Combinación del tema de polígonos del número de curva con las tablas del CN previamente cargadas al programa para las condiciones I, II y III. Esto da como resultado la generación de tres columnas: scscn1, scscn2 y scscn3 en la tabla de atributos de la cuenca.
- (h) Conversión del tema de polígonos de número de curva en un tema grid del número de curva, para lo cual se les denomina CN1, CN2 y CN3 seleccionando en cada caso el campo del scscn correspondiente.

Estimación de los parámetros hidrológicos. Se ingresan al programa la subcuenca y los temas del grid del número de curva a partir del menú *Hydrologic Parameters* para determinar el CN ponderado. Los resultados se muestran en la tabla de atributos (ver Anexo B).

Estimación de los parámetros para Muskingum-Cunge. Se ingresan los siguientes parámetros para el tránsito de crecientes utilizando el método de Muskingum-Cunge, con base a visitas de campo:

(a) **Ancho inferior del canal.** Se asume un ancho promedio de 20 metros para el cauce principal de las cinco subcuencas.

(a) **Valor N de Manning.** Con base a la observación directa se asume un valor N igual a 0,070; dicho valor es tomado de la tabla de valores de coeficientes de rugosidad para corrientes naturales de tramos lentos, con malezas y pozos profundos (Chow, 2004), lo que genera la tabla de atributos del río, la cual consta de la pendiente lateral, el ancho, la forma y el número de Manning.

Estimación de la pendiente de la cuenca. Aplicación de la función *Basin Slope*, la cual calcula la pendiente promedio de la subcuenca, generando el tema o grid de pendientes para la subcuenca en estudio.

Parámetros para la modelación hidrológica. Consta de los archivos de los modelos que serán utilizados por el programa HEC-HMS; a continuación se describen los pasos para la generación de los mismos:

1. El HEC-GeoHMS genera cuatro archivos: archivo de soporte de mapas, archivo de modelo ponderado distribuido de la cuenca, archivos de parámetros para cada grid y un archivo de modelo esquemático distribuido de la cuenca.

2. Conversión de las características físicas de los tramos de la subcuenca desde las unidades del mapa a las unidades del SI, con las cuales trabaja HEC-HMS.

3. Verificación de los datos en HMS por parte de HEC-GeoHMS con la finalidad de chequear la consistencia en la descripción de los parámetros hidrológicos: verificación de nombres únicos para tramos, subcuencas y puntos de salida, verifica que los ríos y centroides estén dentro de la subcuenca y verificación de la conectividad de los ríos. Todo esto se resume en un archivo de texto que resume los resultados de las verificaciones a la subcuenca.

(a) Creación del esquema de cuenca para HEC-HMS mediante la generación de un formato de punto (HMSPoint.shp) con el cual resultan las características puntuales, tales como ubicación de tramos de subcuencas y salidas. Asimismo, se crea un formato de línea (HMSSConnect.shp) con el cual se da conectividad del centroide a la salida de la cuenca.

(b) Adición de la leyenda de HMS, donde el programa inserta los iconos característicos del HEC-HMS para representar subcuencas, salida de la cuenca, dirección del flujo, entre otros.

(c) Adición de coordenadas geográficas a los elementos hidrológicos de la subcuenca, lo que posibilita que los datos del SIG sean exportados en formato ASCII y se preserve la información geográfica.

(d) Creación en el HEC-GeoHMS del archivo de respaldo de mapas, el cual contiene la información geográfica de la subcuenca y de los alineamientos de corrientes, en archivos de texto ASCII, para poder ser leído en HEC-HMS.

(e) Arranque del proyecto en HEC-HMS, con este paso previo al procesamiento en HMS, se importan los archivos creados en HEC-GeoHMS para ser usados como base de datos en HEC-HMS.

Aquí finaliza la aplicación del Hec-GeoHMS, cuyos resultados (las características físicas de la subcuenca y corrientes) son la entrada del HEC-HMS.

Etapa 3: Diagnóstico de la Operación del Embalse Durante el Período 1983-2009

En esta etapa se utiliza la herramienta estadística StatGraphics para analizar el comportamiento de las series históricas diarias, durante el período 1983-2009, del aporte neto, el caudal de bombeo, el gasto ecológico, la evaporación y el alivio en el embalse, para lo cual se ejecutan los siguientes pasos:

1. Selección de la aplicación *Descomposición Estacional* a partir del módulo *Análisis de Series de Tiempo* del StatGraphics, con la finalidad de eliminar la estacionalidad de la serie histórica.

2. Ingreso de los datos al programa: Se introducen, secuencialmente, los siguientes datos:

- (a) La serie de tiempo, que corresponde al conjunto de n observaciones.
- (b) El intervalo de muestreo, el cual define el intervalo entre sucesiones observadas. Se asigna un intervalo de muestreo diario a todas las corridas, ya que los datos son colectados diariamente, comenzando en enero de 1983 (01/83).
- (c) al ciclo de registro de los datos, los cuales se agrupan por semana La estacionalidad (s), la cual define el número de observaciones en un ciclo completo. Se establece una amplitud s igual a 7 para todas las corridas, correspondiente.
- (d) Obtención de los resultados: Luego del ingreso de los datos al programa se obtienen un conjunto de resultados, dentro de los cuales se mencionan a continuación aquellos utilizados en el análisis de las series de tiempo del embalse:

Tabla de resultados de la descomposición estacional. Consta de seis columnas:

Período. La fecha en que fue medido o registrado cada uno de los datos de la serie de tiempo.

Datos. La serie de tiempo original Y_t e incluye cualquier valor reemplazado que haya sido calculado por el programa como dato faltante.

Ciclo-tendencia. Corresponde al componente ciclo-tendencia estimado ($T_t C_t$ para la descomposición multiplicativa y $T_t + C_t$ para descomposición aditiva).

Estacionalidad. Esta referido al componente estacional estimado S_t .

Irregular. Es el componente irregular estimado R_t .

Datos estacionalmente ajustados. Referido a los datos originales sólo con los efectos estacionales removidos.

Método. El tipo de descomposición realizada por el programa.

Curva de tendencia-ciclo. Muestra el componente tendencia-ciclo estimado por suavización de los datos de la serie de tiempo mediante un promedio móvil de amplitud k igual a la amplitud de la estacionalidad s .

Tabla de índices de estacionalidad. Muestra el componente estacional estimado S_t como porcentaje, por cada estación.

Curva de índice estacional. Muestra los índices estimados.

En este punto finaliza la etapa de diagnóstico de la operación del embalse.

Etapa 4: Procesamiento de los Datos

Esta etapa comprende la aplicación de los modelos de pronóstico, de red neuronal artificial y de sistemas. El desarrollo del procesamiento de los datos se ejecuta siguiendo el esquema de la Figura 18, la cual se muestra a continuación:

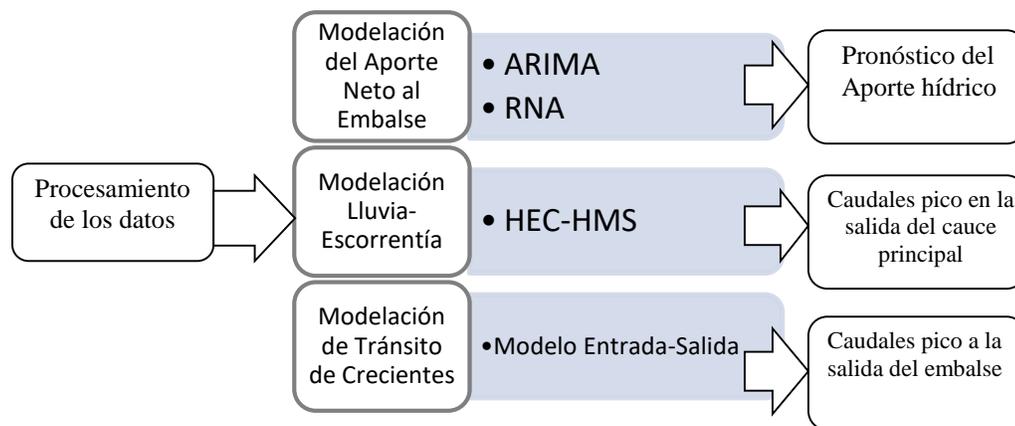


Figura 18. Esquema del procesamiento de los datos. Fuente: Elaboración propia

Modelación del Aporte Neto al Embalse

A continuación se describe la metodología seguida para la modelación del aporte neto diario y mensual al embalse, respectivamente, empleando los modelos de pronóstico ARIMA y de Red Neuronal Artificial (RNA):

Modelación del aporte neto al embalse aplicando ARIMA. El modelo de pronóstico se desarrolla en dos fases, empleando como datos de entrada la serie histórica del aporte neto al embalse durante el período 2005-2008. El criterio de

selección del período obedece a la condición actual de alivio permanente en el embalse. A continuación se detallan las fases que conforman la modelación:

(a) Calibración y validación del aporte-extracción diario en el período 2005-

2009. Se utilizan los siguientes períodos de tiempo para las etapas de calibración o entrenamiento, validación y prueba:

- ✓ Calibración/Entrenamiento: 2005-2006
- ✓ Validación: 2007-2008
- ✓ Prueba: enero 2009

La serie *diaria* muestra una tendencia cíclica anual, consta de 1461 observaciones, con una longitud de la estacionalidad de 3 días, el intervalo de muestra es de 1 día; el modelo genera 30 pronósticos y retiene 700 períodos para la validación.

(b) Calibración y validación del aporte-extracción mensual en el período 2005-

2009: Se utilizan los siguientes períodos para las etapas de calibración o entrenamiento, validación y prueba:

- ✓ Calibración/Entrenamiento: 2005-2006
- ✓ Validación: 2007-2008
- ✓ Prueba: enero 2009

La serie *mensual* muestra una tendencia cíclica e irregular, consta de 48 observaciones, con una longitud de la estacionalidad de 12 meses y el intervalo de muestra es de 30 días.

Modelación del aporte neto al embalse aplicando RNA. El modelo de red neuronal consta de tres capas: una de entrada, una oculta y una de salida. Al igual que la modelación con ARIMA, se emplean datos de series de tiempo diaria y mensual. Se modelan las entradas al embalse con base a las variables que mide diariamente el operador. Los pasos seguidos para la modelación con RNA comprenden:

- (a) Selección de los datos de Entrada/Salida al modelo; donde las entradas están constituidas por la Evaporación, el gasto ecológico, el alivio y el bombeo, y las salidas por el aporte-extracción.
- (b) Normalización de los datos entrada/salida del embalse a partir de la Ecuación 48, para obtener media cero y varianza 1 (0,1):

$$Z = \frac{x - \bar{x}}{\delta} \quad (48)$$

- (c) La modelación con RNA se lleva a cabo en dos fases:

Fase 1. Modelación de la serie diaria del aporte-extracción empleando tres períodos de tiempo, con fines exploratorios:

- A. 1983-2009, denominado RNA(1)
- B. 2005-2009, denominado RNA(2)
- C. 2008-2009, denominado RNA(3)

Fase 2. Modelación de la serie mensual del aporte-extracción al embalse durante el período 2005-2009 [RNA(2)], cuya

escogencia del periodo se basa en los resultados de la modelación de la serie diaria.

- (d) En ambas fases se emplea una arquitectura RNA de 4-N-1, donde el número de neuronas ocultas N igual a 20 proporciona el mínimo error de entrenamiento, por lo que el modelo es de la forma 4-20-1.
- (e) Aplicación el programa MATLAB, para lo cual se dividen aleatoriamente los vectores de entrada y salida en tres conjuntos: 60 por ciento para el entrenamiento, 20 por ciento para validar que la red sea una generalización y detener el entrenamiento; y 20 por ciento restante se usa como una prueba completamente independiente de la generalización de la red.

Modelación Lluvia-Escorrentía con HEC-HMS

El programa HEC-HMS consta de tres componentes: cuenca (Basin), Meteorológico (Meteorologic) y especificaciones de control (Control Specifications). El modelo es alimentado con las características morfológicas de la cuenca y de la red de drenaje, los cuales se obtienen de la aplicación del HEC-GeoHMS. A continuación se describen los pasos ejecutados para efectuar la modelación:

1. Definición de la configuración de la cuenca en el programa HEC-HMS mediante el establecimiento de los atributos del proyecto, por selección de los modelos matemáticos disponibles:

Método del número de curva del SCS. Se usa para determinar las pérdidas por infiltración, el cual requiere de los siguientes datos:

Abstracción inicial (I_a). Esta se calcula aplicando la Ecuación (9) a partir de la Ecuación (11) correspondiente a la Retención Máxima Potencial (S).

Número de curva ponderado ($CN_{\text{ponderado}}$). Se calcula a partir de la Ecuación (14)

Hidrograma unitario (HU) del SCS. Se emplea para transformar la lluvia en escorrentía; al cual se introducen los siguientes datos:

Tiempo de Concentración (T_c). Se calcula a partir de la ecuación desarrollada por el California Culvert Practice (Chow, 2004) aplicable a pequeñas cuencas montañosas, la cual se expresa de la forma:

$$T_c = 0,0195 \left(\frac{L^3}{h} \right)^{0,385} \quad (49)$$

Donde L es la longitud del cauce principal, en metros; y h es la diferencia entre los puntos extremos del cauce principal.

La Ecuación (49) sólo toma en cuenta las características del cauce natural pero no considera la pendiente sino el desnivel entre el punto más alto y el más bajo.

Método de recesión del flujo. Se usa para establecer el flujo base, tomando como referencia los promedios mensuales de lluvia en la

estación Cachinche entre 2000 a 2008 por la carencia de registros pluviométricos en la subcuencas de estudio.

Método de Muskingum-Cunge. Se emplea para efectuar el tránsito por el cauce, el cual requiere de la selección de:

Ancho del canal. Se asume un valor aproximado de 20 metros para las zonas de estudio.

Coefficiente de rugosidad de Manning. De acuerdo a la bibliografía consultada, se asume un valor de N normal de 0,070 correspondiente a “corrientes naturales, de tramos lentos, con malezas y pozos profundos” (Chow, 2004).

2. Importación del mapa de la delimitación del área de estudio para complementar la modelación de la cuenca, en el cual se ubican los íconos del programa HMS para subcuencas (ver Anexo C).

3. Generación de las tormentas de diseño (sintéticas), la cual involucra los siguientes pasos:

Selección del período de retorno. Se seleccionaron períodos de retorno de 5, 10 y 50 años tomando como base los artículos 60 y 61 de las *Normas sobre la Regulación y el Control del Aprovechamiento de los Recursos Hídricos y de las Cuencas Hidrográficas*, en los cuales se señala que la delimitación de un área depende del nivel de riesgo asociado a la misma, siendo tal nivel de riesgo establecido en función de los periodos de retorno.

Selección de la duración de las tormentas de diseño. A partir de los registros de lluvia en la cuenca del río Chirgua (Navas, 2006), validados con un pluviógrafo automatizado instalado en 2008 en dicha cuenca; se establecen tormentas de 3 y 6 horas de duración. Para reforzar la selección, se toma en cuenta lo señalado por Guevara (2004), quien refiere que la Dirección del antiguo Ministerio de Obras de Venezuela encontró, sobre la base del análisis de 50 tormentas registradas en la red pluviométrica nacional, que la duración de las tormentas de diseño es generalmente de 3 horas y no va más allá de 6 horas (Márquez, 2006).

Estimación de los valores de la tormenta de diseño. Mediante la aplicación de un modelo empírico que estima los valores de la curva Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), generado para la región central de Venezuela-Estados Aragua, Carabobo y Cojedes-sobre la base de los registros pluviográficos de 14 estaciones (Guevara, 2004). Se aplica la Ecuación 6) para calcular la intensidad máxima de tormentas con períodos de retorno de 5, 10 y 50 años; y duraciones de 3 y 6 horas.

Corrección de los valores de la tormenta de diseño por efecto del área. Mediante el factor de reducción R_D para la lluvia puntual sobre el área, a partir del análisis de Altura-Duración-Área realizado sobre la base de 47 tormentas obtenidas del Minamb (antiguo Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales), ocurridas en las regiones Nor-Oriental, Central, Centro-Occidental y Andes de Venezuela (Guevara, 2004). La Ecuación (50) muestra el cálculo de R_D :

$$R_D = \frac{1}{1+7,75 \times 10^{-4} D^{-0,304} A} \quad (50)$$

Distribución de los valores de la tormenta de diseño. Se realiza según el método de bloques alternativos (Márquez, 2006; Chow, Maidment, 1988) para desarrollar un pluviograma de valores de precipitación incremental. Este método sitúa el bloque de altura incremental máximo en la mitad de la duración requerida. Los bloques remanentes se arreglan entonces en orden descendente, alternativamente antes y después del bloque central.

Ingreso de las tormentas de diseño en HEC-HMS. Se introducen al programa las tormentas de diseño estimadas para períodos de retorno (T_r) de 5, 10 y 50 años y duraciones de 3 y 6 horas, respectivamente; para que el programa genere los modelos meteorológicos.

Establecimiento del control de tiempo. En el módulo de especificaciones de control se introducen los parámetros de tiempo para la generación de los hidrogramas de crecientes. En cada corrida se especifica:

- a) Fecha de inicio
- b) Fecha de finalización
- c) Tiempo de inicio, fijado a las 0:00 horas
- d) Tiempo final, dependiendo de la duración de la tormenta: 3 o 6 horas
- e) Intervalo de tiempo, corresponde al intervalo de tiempo para el establecimiento de los bloques alternos: 30 min.

Ejecución de las corridas con el programa HEC-HMS. Una vez alimentado el programa con las tormentas de diseño y establecidas las especificaciones de control para cada modelo hidrológico, se ejecuta la corrida, dando como resultados el hidrograma de creciente y la tabla de los caudales máximos de descarga en el cauce principal de la subcuenca correspondiente, para la ventana de tiempo especificada.

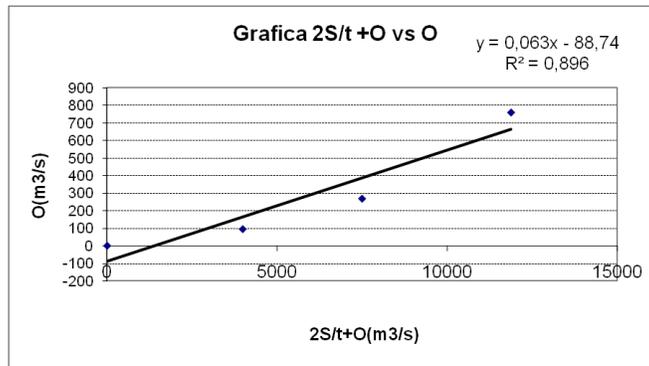
Modelación del Tránsito de Crecientes con el Modelo Entrada-Salida

Con base en la tendencia observada para el alivio del embalse durante los últimos cinco años, se emplea la condición de embalse inicial lleno, siguiendo el método propuesto por Guevara (2004) y utilizando las tormentas sintéticas generadas como caudales de entrada provenientes de los ríos afluentes al embalse. A continuación se presentan los pasos para la aplicación del modelo:

1. Elaboración de la curva de tránsito ($2S/t + O$) vs O . Donde el término ($2S/t+O$) se estima a partir del agua almacenada en el aliviadero del embalse con respecto a la altura de la cresta. La altura mínima de la cresta es cero (0) metros y la altura máxima es de 4 metros. Por lo tanto, para alturas de cresta comprendidas entre 0 m y 4 m le corresponderá un volumen de agua almacenada S (en millones de m^3). El término O corresponde al caudal de salida de la cuenca, el cual se calcula a partir de la ecuación del vertedero del embalse:

$$Q = 2LH^{1,5} \quad (51)$$

Donde L es la longitud de la cresta del aliviadero, en metros; y H es la altura de la cresta del aliviadero, en metros. La curva de tránsito para el embalse, con $L=47,5$ m; se muestra a continuación:



Gráfica 1. Curva de tránsito por el aliviadero del embalse Pao-Cachinche. Elaboración propia

2. Aplicación de la Ecuación (40) para realizar el procedimiento de tránsito por el embalse:

$$I_1 + I_2 + \left[\frac{2S_1}{t} - O_1 \right] = \frac{2S_2}{t} + O_2 \quad (40)$$

Donde I es la intensidad de la lluvia, O es el caudal máximo a la salida del aliviadero; y 1 y 2 corresponden a dos instantes de tiempo. Partiendo de un valor inicial de la descarga en el aliviadero igual a cero y un valor máximo de $760 \text{ m}^3/\text{s}$; se aplica el método propuesto por Guevara (2004), el cual consta de ocho columnas, tal como se muestra en el Anexo E:

Intervalo, el cual parte de 1 hasta n estimaciones.

Tiempo (t), se expresa en horas y se va incrementando de acuerdo al intervalo de tiempo establecido, en este estudio es de 30 min.

Intensidad (I), en este estudio corresponde a las tormentas de diseño, en m^3/s .

$(I_1 + I_2)$ es la suma de la intensidad entre el tiempo 1 y el tiempo 2, en m^3/s .

$(2S_1/t - O)$ se obtiene a partir de la Ecuación (40) como:

$$(2S_1/t - O) = (2S_2/t + O_2) - 2O \quad (m^3/s) \quad (52)$$

$(2S_1/t + O)$ representa el término X en la ecuación de la mejor recta, luego de graficar la curva de tránsito, en m^3/s .

O representa el término Y en la gráfica de la curva de tránsito, en m^3/s .

3. Se obtienen como resultado los caudales máximos a la salida del embalse.

Simulación de la Operación de Crecidas en el Embalse con HEC-ResSim

El programa consta de tres módulos: configuración de cuenca, red de embalse y simulación; a continuación se presentan los pasos seguidos para cargar los datos disponibles en cada módulo.

Módulo de configuración de cuenca. En éste módulo se cargan los mapas de la hidrografía y de los cuerpos de agua (en archivos .shp) de la cuenca del río Pao, a partir de los cuales se van agregando los distintos elementos que conforman la red del embalse: ubicación del embalse (se indica con un triángulo azul), identificación de tramos de corrientes y dirección de los flujos, los puntos extremos de los ríos Chirgua, Paito, Pirapira, Paya y San Pedro; ubicación de la presa del embalse y ubicación de la PTAB (ver Anexo F). Cabe señalar que las ubicaciones de los elementos de la red son aproximadas.

Módulo de red de embalse. Una vez que han sido agregados todos los elementos de la cuenca del río Pao, se prosigue con el módulo de red de embalse, el cual hace uso de la red previamente configurada para estimar los flujos de entrada y salida de aquellos elementos a los cuales les sean cargados datos puntuales o series de tiempo. El módulo requiere la introducción de tres tipos de datos: físicos, operacionales y datos observados:

Componentes físicos del embalse (Reservoir). Comprende el estanque del embalse (Pool) y la presa (Dam) del mismo:

Estanque (Pool). Se introducen los datos de:

Tipo de interpolación. El programa ofrece dos métodos de interpolación de los datos: lineal y cónica. Se seleccionó el método que utiliza por defecto el programa: *Lineal*.

Elevación-almacenamiento-área. A partir de la curva área-capacidad del embalse. Una vez cargados manualmente estos datos el programa muestra dos gráficas: una gráfica de elevación vs almacenamiento y otra de elevación vs área (Ver Anexo E).

Series de tiempo de la evaporación. Las cuales pertenecen a lo que el programa denomina *Pérdidas en el estanque*.

Presa (Dam). Se introducen manualmente los siguientes datos:

- ✓ Elevación en el tope de la presa: 53 m
- ✓ Longitud en el tope de la presa: 260 m

La adición de las salidas controladas, no controladas y bombas son automáticamente asociadas a la presa del embalse por el programa:

Salidas no controladas. Se cargan los siguientes datos para el aliviadero de descarga libre del embalse:

- ✓ Elevación de salida: 353.28 msnm
- ✓ Coeficiente Weir: 2.0
- ✓ Elevación (m) vs descarga del embalse (m^3/s)
- ✓ Elevación (m) vs descarga en el aliviadero (m^3/s)

Bombas. Se cargan los datos técnicos disponibles para las bombas:

Número de bombas: Operan de 3 a 4 equipos conectados en paralelo, de 3 HP y 3.500 RPM cada uno.

Límite de operación: 1,2 m³/s (1.200 LPS) por bomba.

Elevación mínima de la cola de agua (Minimum Tailwater Elevation): 335 msnm (25 m.c.a, metros de columna de agua).

Maximum Head: 30 m.c.a

Una vez cargados los datos del bombeo, el programa requiere especificar el método de bombeo a aplicar, los cuales son (a) Constante y (b) Function of operating head. Se seleccionó el método *Constante*.

Salidas controladas. La alimentación de los datos se realiza asumiendo que las compuertas de la torre toma actúan como las compuertas del embalse. Las salidas controladas requieren la especificación de:

El número de compuertas, referido a aquella compuerta próxima a la superficie del agua en el embalse, en este caso se asume 1 compuerta.

La Elevación vs capacidad máxima, para lo cual se introducen los datos de elevación, en metros; versus los caudales máximos, en m³/s. Una vez cargados estos datos el programa muestra la gráfica de los datos.

Datos observados. El programa construye una tabla donde se despliegan todas las series de tiempo cargadas al programa con fines de comparación, ya que las series de tiempo que sean activadas estarán disponibles para la creación de la *Alternativa*. Para la simulación de operación de crecientes se activaron las series de tiempo de las salidas no controladas (alivio del embalse) y el bombeo.

Configuración operacional (operation set). Comprende la definición de los datos operacionales del embalse: zonas, reglas de operación y alternativas; las cuales se detallan a continuación:

Zonas. El programa comprende tres tipos de zonas, para las cuales se introducen las series de tiempo de la fecha vs la elevación (m):

Control de crecidas (Flood control). La zona se fija entre las cotas 353,28 a 360,43 msnm.

Conservación (Conservation). La zona de operación del embalse se fija entre las cotas 319,51 a la 353,28 msnm.

Inactiva (Inactive). El volumen muerto en el embalse se fija a partir de los 319,51 msnm hasta la cota base a 306,95 msnm.

Reglas de operación. El programa ofrece siete opciones para definir las reglas de operación, a saber:

- ✓ Función de descarga (Release function)
- ✓ Función de control aguas abajo (Downstream control function)
- ✓ Operación de trasvase (Tandem operation)
- ✓ Recarga inducida (Induced surcharge)
- ✓ Rata de cambio límite de flujo (Flow rate of change limit).
- ✓ Rata de cambio límite de elevación (Elevation rate of change limit)
- ✓ Secuencia de comando (Script)

Se seleccionó la regla *Función de descarga*; la misma puede estar en función de: (a) fecha, (b) fecha y hora, (c) variables de

modelo, (d) variables externas y/o (e) variables de estado; siendo la opción escogida la *Descarga en función de la fecha*, para la cual se introducen al programa los caudales de descarga en el embalse en función de la fecha.

Se asigna a la presa del embalse la regla que establece que el *Caudal Máximo de Descarga en la presa debe ser igual a 760 m³/s*. Al estanque del embalse no se le asignó ninguna regla, donde el programa asume por defecto la *Operación Básica de la Curva Guía (Curva del Embalse)*.

Por otra parte, el programa requiere la asignación del método de interpolación que usará para interpretar los valores intermedios que no estén tabulados, por lo que se seleccionó el método de *interpolación lineal*.

Alternativas. Para establecer la alternativa que usa el módulo de simulación se requiere:

- a) Denominar la alternativa, en este caso: *Evento de Crecida en el Embalse Pao-Cachinche*.
- b) Establecer la condición inicial (lookback) de la simulación. El programa ofrece dos tipos: Constante y Serie de Tiempo; la selección de uno u otro tipo dependerá de si se busca que la condición inicial corresponda a una fecha puntual o a un período de tiempo.

- c) Asociar los datos de series de tiempo con una ubicación, es decir, a qué componente del embalse está referida la serie de tiempo.
- d) Asociar los datos observados con una ubicación.
- e) Guardar la alternativa seleccionada para ser usada en la simulación.

Módulo de simulación. Una vez que han sido introducidos al programa los datos físicos y operacionales y se ha definido la alternativa, se procede a especificar una ventana de tiempo (time window), la condición inicial (lookback) y los parámetros de intervalo de tiempo (time interval parameters) para la alternativa establecida, con la finalidad de ejecutar las corridas de simulación de operación de crecientes en el embalse.

Etapa 5: Evaluación de los resultados

Consta de las herramientas utilizadas para analizar los resultados obtenidos:

Representación gráfica de las variables del embalse. Se grafican las entradas mensuales vs las descargas (salidas) mensuales correspondientes al balance hídrico anual en el embalse, durante el período 1983-2009, con la finalidad de analizar la tendencia de las series de tiempo de entrada y salida así como las reglas de operación manejadas durante el período de estudio.

Estimación de los coeficientes de correlación R y R^2 para los modelos de pronóstico ARIMA y RNA. Con la finalidad de evaluar la calidad del ajuste de los modelos para los datos diarios y mensuales, respectivamente; en las etapas de entrenamiento, validación y prueba de los modelos.

Estimación de los caudales máximos de crecientes. Los cuales se obtienen de la modelación lluvia-escorrentía para los cinco ríos afluentes al embalse Pao-Cachinche, con la finalidad de identificar y comparar las subcuencas potencialmente portadoras de los mayores volúmenes de agua ante eventos de crecidas.

Estimación de los caudales máximos de salida en el embalse. Con la finalidad de compararlos con el caudal de diseño máximo de descarga del aliviadero y analizar el riesgo de rebose de la cresta del aliviadero.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos, por objetivo, luego de la aplicación de la metodología previamente mencionada:

Caracterización Física y Operacional del Sistema Regional del Centro I (SRCI)

Caracterización del Área de Estudio

Características Físicas del Subsistema Cuenca Río Pao. Las características físicas de las subcuencas que conforman el Embalse Pao-Cachinche se obtienen como resultado del procesamiento geográfico de cada una de ellas, mediante la aplicación de los softwares ArcGIS versión 9.2 y HEC-GeoHMS versión 1.1, con base a la cartografía empleada a escala 1:25.000. El procesamiento geográfico generó las características geomorfológicas de las cuencas, divididas en este estudio en características físicas (ver Tabla 2) y atributos de las corrientes de cada subcuenca (ver Tabla 3).

Tabla 2. Características físicas de las subcuencas afluentes al Embalse Pao-Cachinche

Característica	Subcuenca				
	Río Chirgua	Río Paito	Río Pirapira	Río Paya	Río San Pedro
Área de la cuenca (Km ²)	602,02	2578,50	136,02	120,84	284,91
Perímetro de la cuenca (Km)	168,50	347,58	75,99	70,70	120,26
Densidad de drenaje (Km/Km ²)	0,087	0,158	0,105	0,114	0,096
Índice de Gravelius: K _c	1,94	1,93	1,84	1,81	2,00
Factor de Forma: K _f	0,35	0,94	0,66	0,63	0,61
Elevación Centroidal (m)	774,98	500,00	513,68	600,00	500,00
Pendiente de la cuenca (m)	7,50	8,04	8,37	12,15	13,42
Pendiente entre puntos extremos (m)	0,017	0,007	0,016	0,029	0,027

Fuente. Elaboración propia. Datos tomados del procesamiento digital del terreno mediante el software HEC-GeoHMS

Tabla 3. Atributos de las corrientes afluentes al Embalse Pao-Cachinche

Característica	Subcuenca				
	Río Chirgua	Río Paito	Río Pirapira	Río Paya	Río San Pedro
Orden de la corriente principal	3	3	3	2	2
Longitud promedio de las corrientes de orden 1 (m)	12501,29	12969,02	10767,51	17973,30	13887,20
Longitud promedio de las corrientes de orden 2 (m)	7184,45	11336,25	12858,82	49.573,03	25144,25
Longitud promedio de las corrientes de orden 3 (m)	13850,30	6065,42	32979,47	-	-
Longitud del cauce principal (m)	41550,90	52287,50	14310,70	13831,70	21581,40
Elevación aguas arriba (msnm)	700,00	500,00	513,68	508,28	605,69
Elevación aguas abajo (msnm)	400,00	400,00	400,00	455,71	400,00
Pendiente entre puntos extremos (m)	0,0092	0,0280	0,0079	0,0038	0,0104
Longitud del tributario mas largo (m)	64595,51	89639,15	24736,73	24302,68	29159,99

Fuente. Elaboración propia. Datos tomados del procesamiento digital del terreno mediante el software HEC-GeoHMS

Tal como se observa en la Tabla 2, los resultados obtenidos mediante la aplicación de la herramienta HEC-GeoHMS muestran que, tanto la densidad de drenaje, el factor de forma y el Índice de Gravelius para las cinco subcuencas afluentes al embalse muestran poca variación de unas zonas respecto a otras; debido a que se utilizaron cartas topográficas a escala 1:25.000, a partir de las cuales se crearon los modelos de elevación digital (MDT) del terreno, los cuales se alimentaron al programa.

De la Tabla 2 se observa que la subcuenca de mayor extensión es la del río Paito, con un área aproximada de 2.579 Km², el perímetro de la cuenca es de 348 km y la pendiente es de 8 por ciento, la elevación al centroide es igual a 500 m y la pendiente entre los puntos extremos de la cuenca es de 0,007 por ciento, lo que indica que el terreno presenta muy poco desnivel, tal como se observa en la Figura 19, donde el rango predominante de las cotas se ubica entre los 400 a 1200 msnm. El Índice de Gravelius K_c es igual a 1,93; lo que de acuerdo a Monsalve (1995) hace suponer que se trata de una cuenca de forma irregular mientras que el factor de forma K_f es 0,94; siendo entre las cuencas en estudio, la más susceptible a la ocurrencia de crecidas.

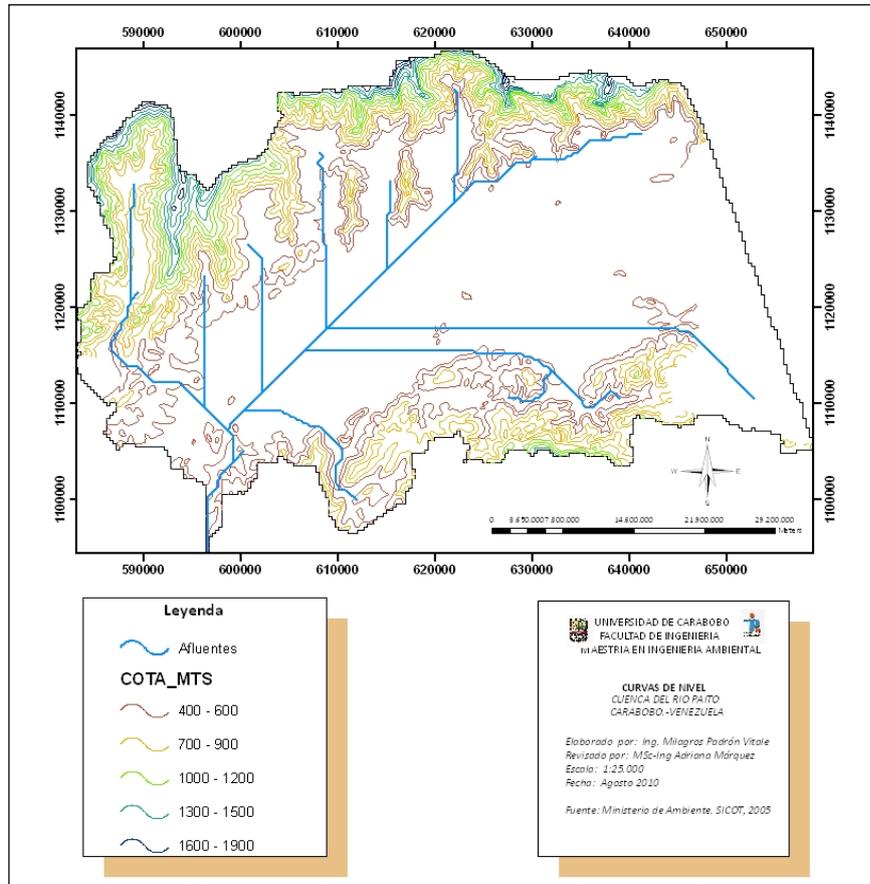


Figura 19. Mapa de curvas de nivel de la cuenca del río Paito. Elaboración propia

La densidad de drenaje en la cuenca del río Paito es de alrededor de 0,2 Km/Km²; según Monsalve (1995) indica que la cuenca posee un drenaje muy pobre, pues está por debajo del valor referencial de 0,5 Km/Km² para “drenajes pobres”; de acuerdo a este resultado, la cuenca del río Paito presenta baja escorrentía superficial y una alta retención en el subsuelo.

La digitalización del río Paito arrojó como resultado 26 tributarios de 1º a 3º orden, donde el tributario más largo tiene una longitud aproximada de 47.381 m y el más corto mide alrededor de 701 m. En la Tabla 3 se observa que la corriente principal de la cuenca del río Paito es de 3º orden con una longitud promedio de 12.969 m para las corrientes de 1º orden, 11.336 m para las corrientes de 2º orden

y 6.065 m para las corrientes de 3º orden. El cauce principal tiene una longitud de aproximadamente 52288 m y la longitud del tributario más largo es de alrededor de 89.639 m. La elevación aguas arriba del cauce principal es de 500 msnm y de 400 msnm aguas abajo con una pendiente entre puntos extremos del cauce principal de alrededor de 0,03 por ciento.

La cuenca del río Chirgua posee la segunda mayor extensión entre las subcuencas estudiadas, tal como se observa en la Tabla 2 y la Figura 20, con un área aproximada de 602 Km² y un perímetro de alrededor de 169 Km. La pendiente de la cuenca es de 7,5 por ciento, la pendiente entre los puntos extremos es de 0,017 por ciento y la elevación al centroide igual a 775 m. El coeficiente de compacidad o índice de Gravelius es de 1,94; muy cercano al de la subcuenca del río Paito, lo que permite afirmar que se trata de una cuenca de forma irregular mientras que el factor de forma K_f resultó ser el menor de las cinco cuencas estudiadas: 0,35; lo que la convierte en la subcuenca menos susceptible a la ocurrencia de crecidas. La densidad de drenaje es igual a 0,09 Km/Km², correspondiente a hojas de drenaje muy pobre, siendo la de menor drenaje respecto al resto de las cuencas en estudio.

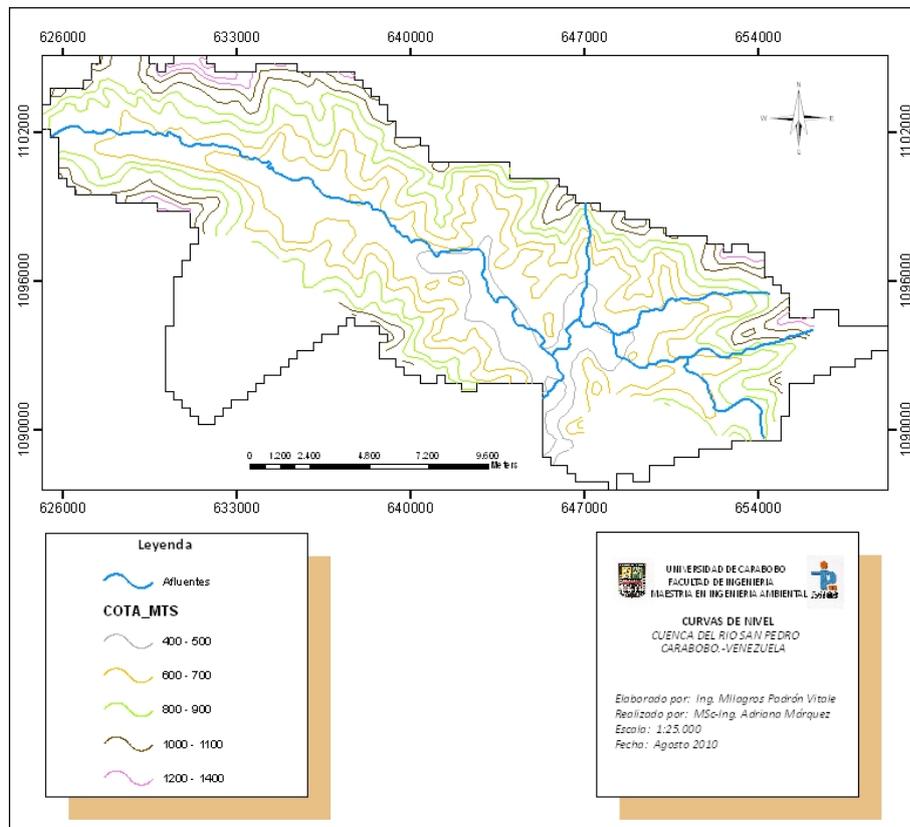


Figura 20. Mapa de curvas de nivel de la cuenca del río Chirgua. Elaboración propia

En la Tabla 3 se observa que la corriente principal del río Chirgua es de 3º orden con una longitud aproximada de 41.551 m. La elevación aguas arriba del cauce principal está a 700 msnm mientras que la elevación aguas abajo se ubica en los 400 msnm, con una pendiente entre puntos extremos de 0,009 por ciento. El tributario más largo tiene una longitud de aproximadamente 64.596 metros mientras que las longitudes promedio de las corrientes de 1º, 2º y 3º son, respectivamente: 12.501 m, 7.184 m y 13.850 m. El tributario más largo tiene una longitud de 64.596 m. De la digitalización del río Chirgua se obtuvieron 29 tributarios de 1º a 3º orden, siendo el de mayor longitud igual 22.287 m y el de menor longitud igual a 3.504 m.

En orden de extensión, la tercera cuenca en importancia es la del río San Pedro (ver Figura 21), abarca un área de 285 Km², posee un perímetro aproximado de 285 Km, una pendiente de 13,42 por ciento que la ubica como la subcuenca de mayor pendiente respecto al resto de las cuencas de estudio, una pendiente entre puntos extremos igual a 0,027 por ciento y una elevación centroidal de 500 m. Posee el mayor índice de Gravelius entre las cuencas estudiadas: 2,0; lo que significa que se trata de la cuenca más irregular en lo que a forma se refiere, con un factor de forma K_f igual a 0,61; tratándose de una cuenca menos sujeta a crecidas con respecto a la cuenca del río Paito y más susceptible a tales eventos respecto a la cuenca del río Chirgua.

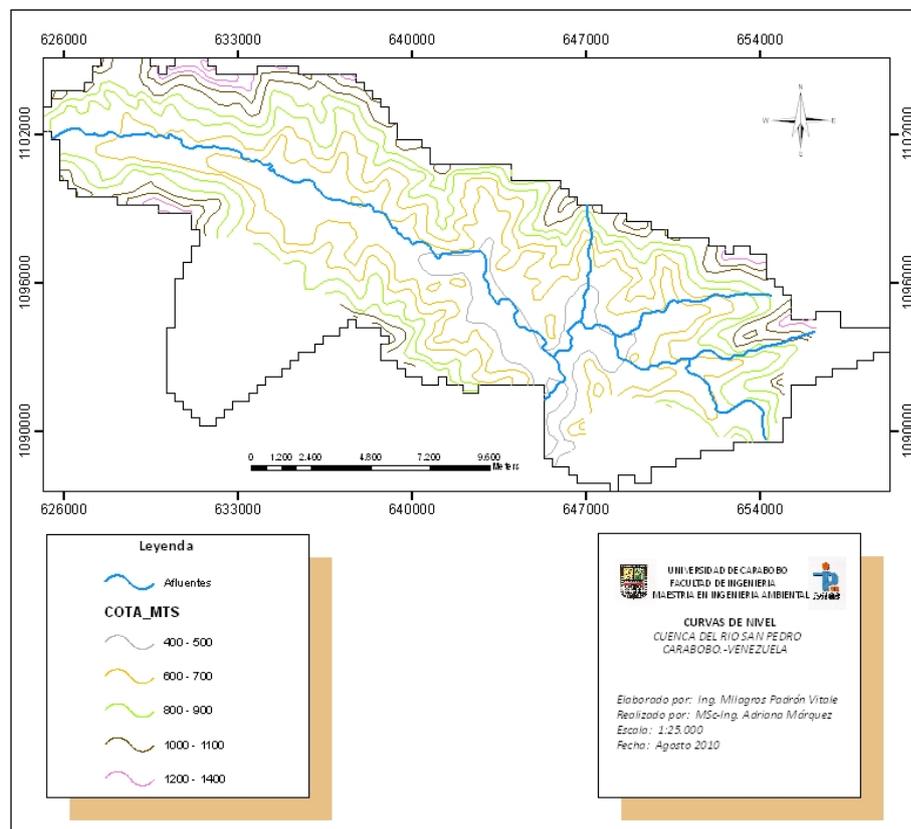


Figura 21. Mapa de curvas de nivel de la cuenca del río San Pedro. Elaboración propia

Con la digitalización del río San Pedro se obtienen nueve (9) tributarios entre 1º y 2º orden, la longitud del cauce principal es de 21.581 m y las longitudes promedio de las corrientes de 1º y 2º orden son de 13.887 y 25.144 m, respectivamente; asimismo, la longitud del tributario más largo es de 29.160 m. El punto de mayor elevación aguas arriba del cauce principal está a 606 msnm y el de menor elevación aguas abajo del cauce principal está a 400 msnm. La pendiente entre puntos extremos es de aproximadamente 0,01 por ciento; lo que significa que es la subcuenca con mayor diferencia de elevación si se compara con las pendientes entre puntos extremos del resto de las subcuencas estudiadas.

La subcuenca del río Pirapira posee un área de aproximadamente 136 Km², el perímetro es de alrededor de 76 Km, la elevación centroidal es igual a 516 m, la pendiente de la cuenca es de 8,37 por ciento y la pendiente entre puntos extremos es de 0,016 por ciento (ver Figura 22); la cual es muy cercana a la diferencia de elevaciones en la cuenca del río Chirgua, tal como se observa en la Tabla 2.

La densidad de drenaje es de alrededor de 0,1 Km/Km², por lo tanto se trata de una cuenca de drenaje pobre por estar, de acuerdo a la clasificación establecida por Monsalve (1995), por debajo del rango de referencia: 0,5 Km/Km² (hoyas con drenaje pobre) a 3,5 Km/Km² (hoyas excepcionalmente bien drenadas). Asimismo, el coeficiente de compacidad o índice de Gravelius es de 1,84 y el factor de forma es igual a 0,66; esto indica que se trata de una cuenca que presenta forma irregular y sujeta a la ocurrencia de crecidas.

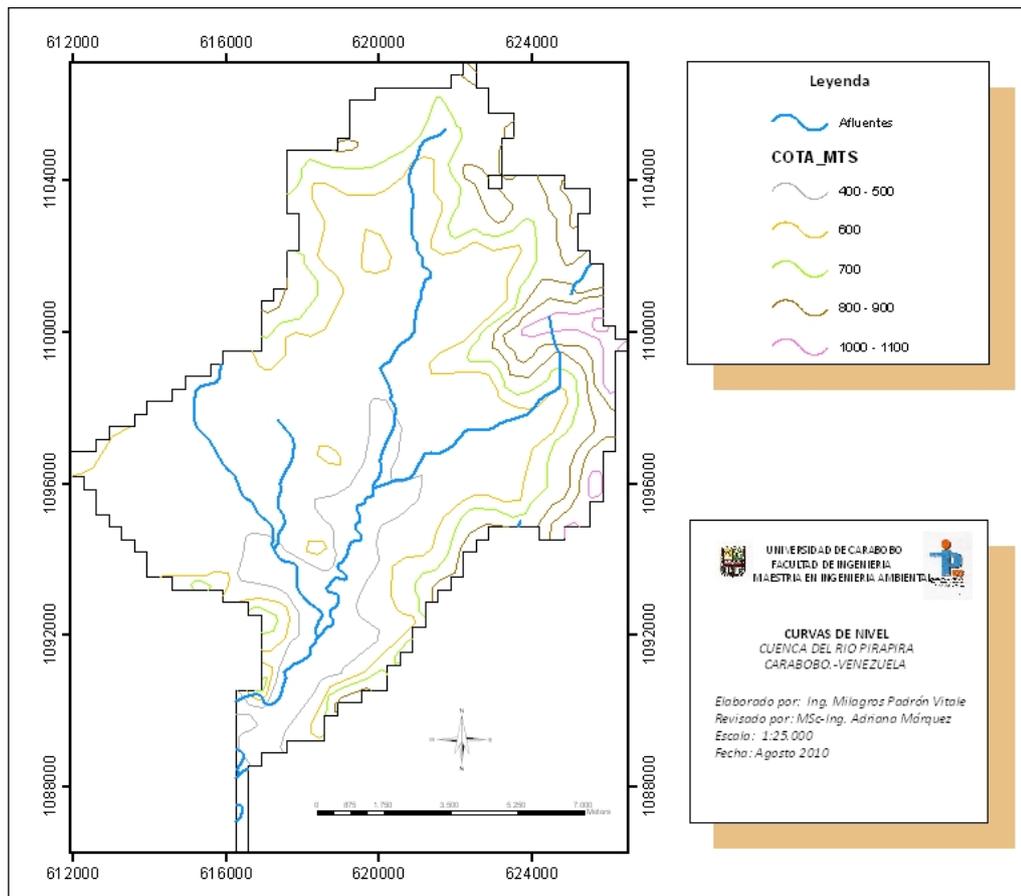


Figura 22. Mapa de curvas de nivel de la cuenca del río Pirapira. Elaboración propia

La digitalización del río Pirapira arrojó como resultado siete (7) tributarios de 1º a 3º orden con una corriente principal de 3º orden cuya longitud aproximada es de 14.311 m. Asimismo, la longitud promedio de las corrientes de 1º orden es de 10.768 m, las corrientes de 2º orden dieron como resultado una longitud promedio de 12.859 m y las corrientes de 3º orden tienen una longitud promedio de 32.979 m. La elevación aguas arriba del cauce principal es de 514 m y la elevación aguas abajo es igual a 0,0079 por ciento, por lo que al igual que la cuenca del río Chirgua y del río Paito, no presenta marcadas diferencias de elevación. La longitud del tributario más largo es de alrededor de 24.737 m.

La subcuenca de menor extensión es la correspondiente al río Paya la cual, tal como se observa en la Tabla 2, posee un área de alrededor de 121 Km², con un perímetro igual a 71 Km, la elevación centroidal es de 600 m, la pendiente es igual a 12,15 por ciento y la pendiente entre puntos extremos de la subcuenca es de 0,029 por ciento; lo que la ubica como la segunda cuenca con mayor diferencia de elevación detrás de la cuenca del río San Pedro (ver Figura 23). La cuenca posee un drenaje pobre ya que la densidad de drenaje es igual a 0,11 Km/Km², el índice de Gravelius es igual a 1,81; por lo que se trata de una cuenca de forma irregular y el factor de forma K_f es igual a 0,63; correspondiente a una cuenca sujeta a eventos de crecidas.

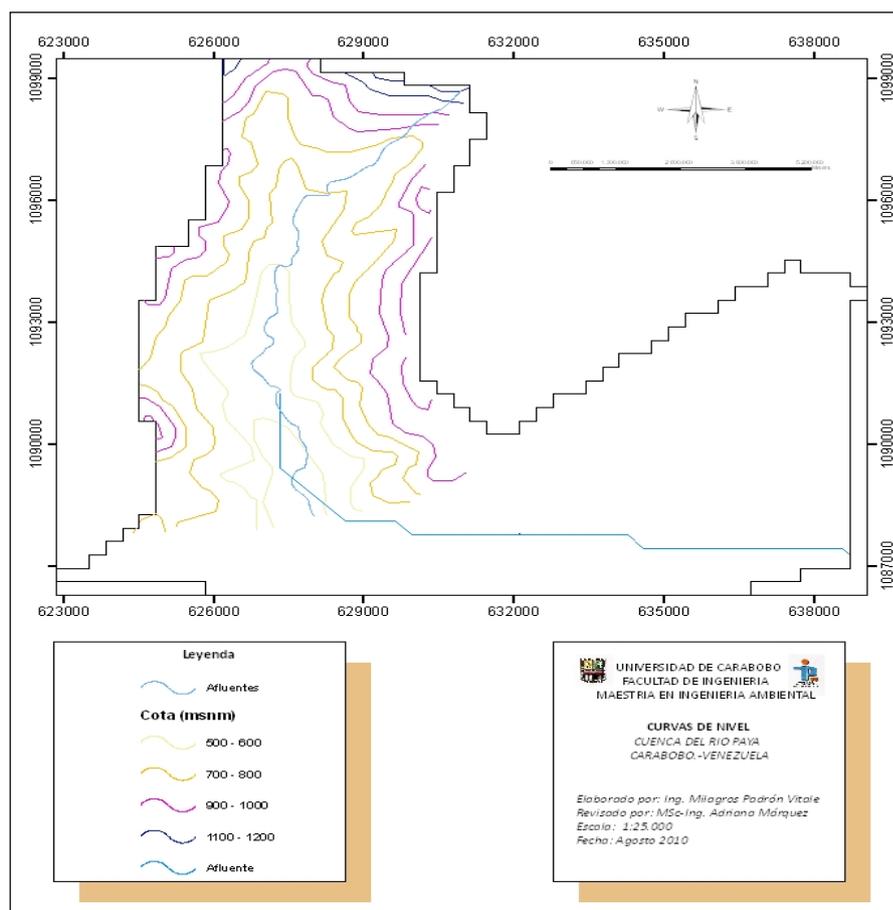


Figura 23. Mapa de curvas de nivel de la cuenca del río Paya. Elaboración propia

De la Tabla 3 se observa que la corriente principal es de 2º orden con una longitud promedio de 17.973 m para las corrientes de 1º orden y de 49.573 m para

las corrientes de 2º orden; la longitud del cauce principal es de 13.832 m, el punto más elevado aguas arriba del cauce principal está a 508 msnm y el punto más bajo aguas abajo está a 456 msnm. La digitalización del río Paya da como resultado siete (7) tributarios de 1º a 2º orden, donde la pendiente entre los puntos extremos del cauce principal es la menor de entre las subcuencas en estudio siendo la misma de 0,0038 y la longitud del tributario más largo es igual a aproximadamente 24.303 m.

Tipo de Suelo. Uso Actual y Potencial. El tipo de suelo predominante en las subcuencas de los ríos Chirgua y Paito es el *Vlles*, cuyas proporciones de área representan aproximadamente el 42 por ciento y el 31 por ciento, respectivamente (ver Tablas 4 y 5). Según ésta clasificación, se trata de suelos poco profundos, de baja fertilidad, con afloramientos rocosos (Minamb, 2005), tal como se observa en las Figuras 24 y 25, respectivamente.

Tabla 4. Tipo de suelo en la cuenca del río Chirgua

Tipo	Características Generales del Suelo	Área (Km²)	Proporción de Área (%)
<i>II s</i>	Suelos fértiles, profundos, textura media, bien drenados y sin sales.	79,30	12,31
<i>IV s, VI e</i>	Suelos arenosos poco profundos, con drenaje externo rápido, ácidos y de baja fertilidad.	2,57	0,40
<i>VI es, VIII es, III se</i>	Suelos poco profundos, de baja fertilidad y drenaje moderado.	35,82	5,56
<i>VII e</i>	Suelos poco profundos y pedregosos, de textura franco-arcillosa o arcillosa, ácidos y de baja fertilidad.	136,27	21,16
<i>VII es</i>	Suelos poco profundos, de baja fertilidad, con frecuentes afloramientos rocosos y piedras superficiales.	250,99	41,69
<i>VII e VII es</i>	Suelos de baja fertilidad, poco profundos, bien drenados.	95,06	14,76

Fuente. Elaboración propia. Datos proporcionados por CORPOCENTRO provenientes del SICOT. Minamb (2005)

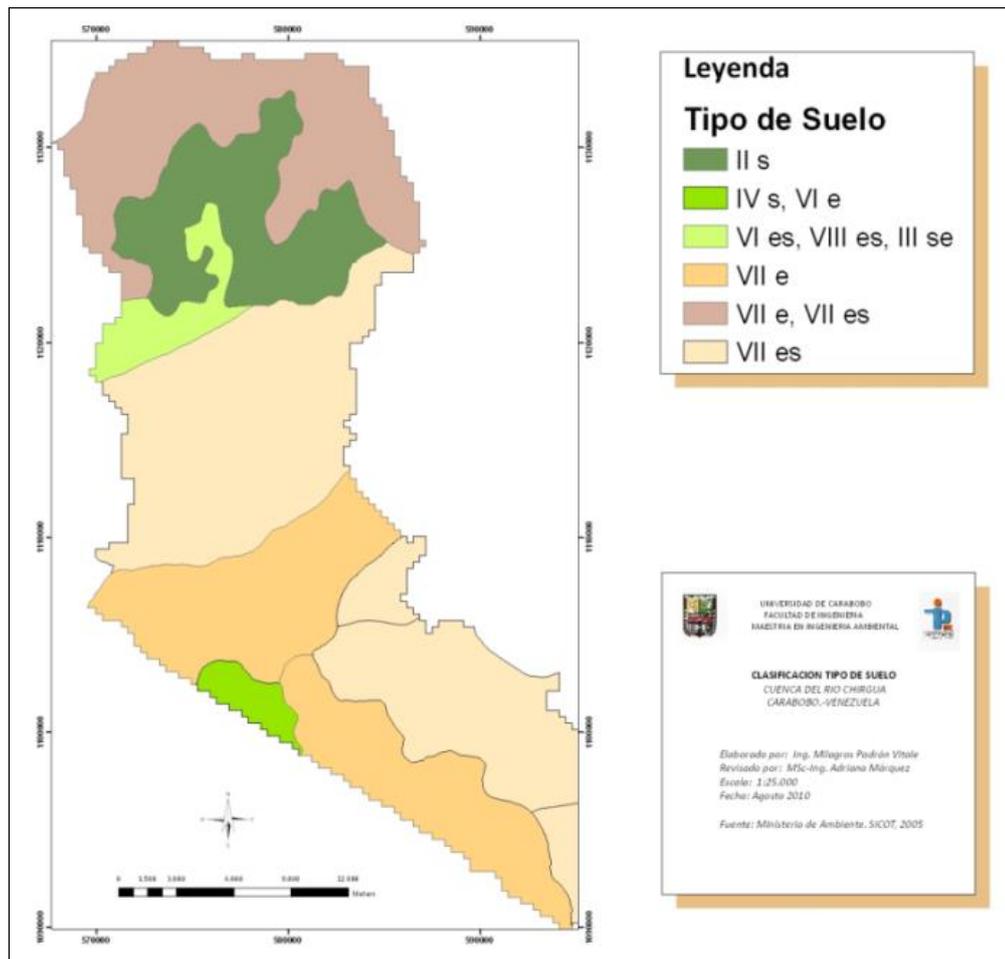


Figura 24. Mapa del tipo de suelo en la cuenca del río Chirgua. Elaboración propia

Tabla 5. Tipo de suelo en la cuenca del río Paito

Tipo	Características Generales del Suelo	Área (Km²)	Proporción de Área (%)
<i>II s</i>	Suelos fértiles, de textura media dominando la franco-limosa, profundos y bien drenados.	156,35	6,17
<i>II s, III sd</i>	Suelos fértiles, de texturas medias o arcillosas, profundos y bien drenados.	445,1	17,57
<i>IV s, IV sd</i>	Suelos de baja fertilidad, arcillosos, profundos, bien drenados, con presencia de sales.	122,01	4,82
<i>VI es, VII es</i>	Suelos de textura franco-arcillosa, pedregosa.	107,97	4,26
<i>VII e</i>	Suelos de baja fertilidad, poco profundos, bien drenados	20,32	0,80
<i>VII es</i>	Suelos de baja fertilidad, poco profundos, con afloramientos rocosos.	804,28	31,19
<i>VII e, VII es</i>	Suelos de baja fertilidad, poco profundos, bien drenados.	225,77	8,91
<i>VII es, VII c + VI c</i>	Suelos de baja fertilidad, texturas medias, moderadamente profundos.	132,98	5,25
<i>VII es, VIII e</i>	Suelos de baja fertilidad, poco profundos, sin sales y moderadamente drenados.	211,4	8,34
<i>VIII ds</i>	Suelos orgánicos de color oscuro, con pH entre 4 a 4.5 y bajo contenido de nutrientes.	352,32	13,90

Fuente. Elaboración propia. Datos proporcionados por CORPOCENTRO provenientes del SICOT. Minamb (2005)

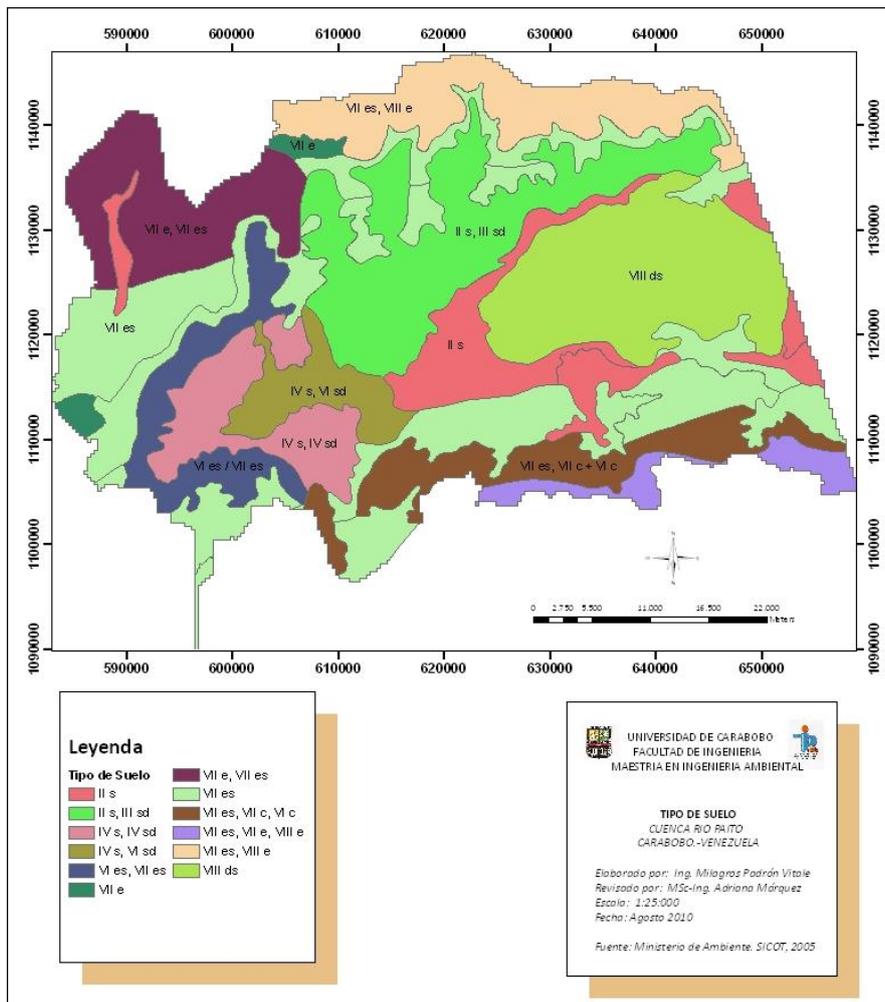


Figura 25. Mapa del tipo de suelo en la cuenca del río Paito. Elaboración propia

El tipo de suelo predominante en las cuencas de los ríos Chirgua y Paito se corresponde con el uso actual de los suelos en cada una de ellas. Tal como se observa en la Tabla 6, más del 85 por ciento de los suelos de la cuenca del río Chirgua, alrededor de 530 Km², abarca un área donde existen bosques de cobertura principalmente buena y pastizales (ver Figura 26), las tierras cultivadas constituyen aproximadamente el 10 por ciento del área del suelo destinada para tal uso, los suelos con fines de ganadería intensiva, caracterizados por la presencia de pastizales, constituyen alrededor del tres (3) por ciento del área total mientras que el uso residencial alcanza alrededor del dos (2) por ciento, concentrado principalmente en la parte baja de la cuenca.

Tabla 6. Uso actual del suelo en la cuenca del río Chirgua

Uso	Área (Km ²)	Porcentaje de Área (%)
Tierras Cultivadas	47,17	10,16
Bosques Cobertura Buena, Pastizales	372,00	61,79
Bosques Cobertura Pobre	158,57	26,34
Pastizales	13,66	2,94
Residencial	10,62	2,29

Fuente. Elaboración propia

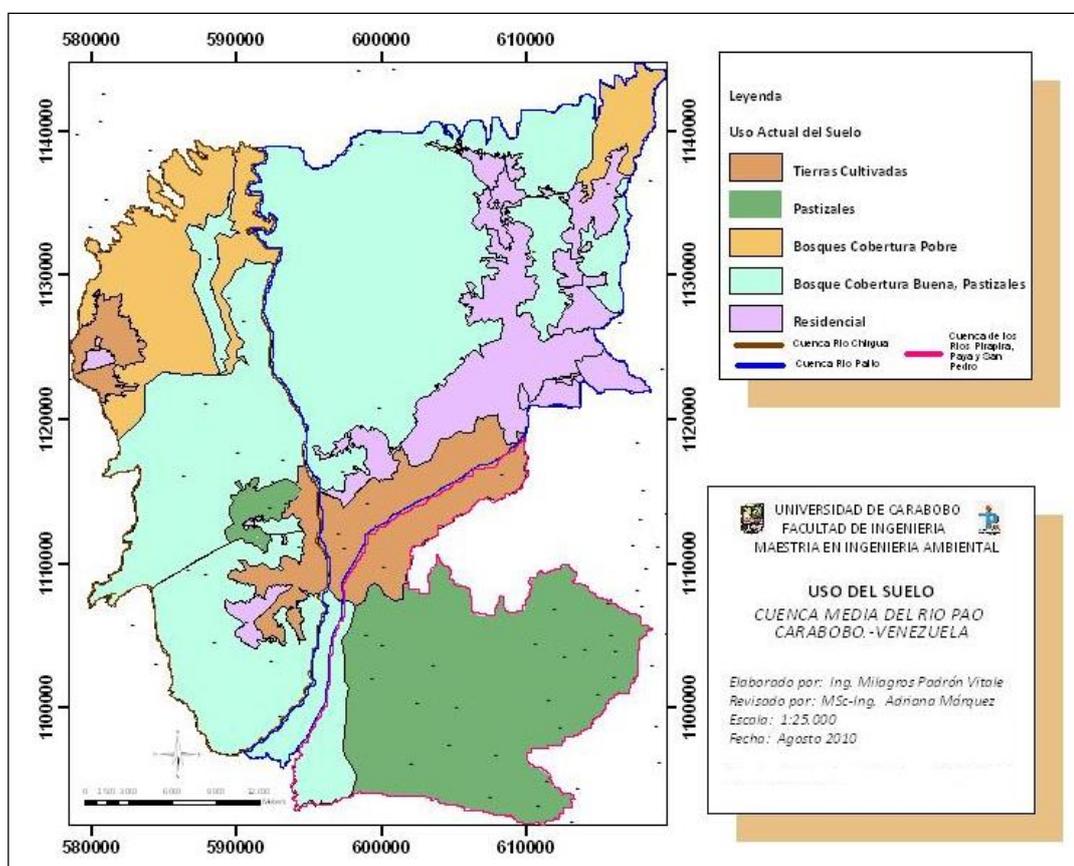


Figura 26. Mapa de uso actual del suelo en la cuenca del río Pao. Elaboración propia

Asimismo, en la cuenca del río Paito, el 33 por ciento del suelo, alrededor de 862 Km², están cubiertos de extensas zonas boscosas con presencia de pastizales (ver Tabla 7 y Figura 26), que al igual que la cuenca del río Chirgua, se corresponde

con el tipo de suelo de la zona; el uso residencial en la cuenca representa el 25 por ciento del porcentaje de área total en contraste con la cuenca del río Chirgua, mientras que los suelos destinados al cultivo constituyen alrededor del 21 por ciento del porcentaje de área total de la cuenca, que representa unos 544 Km².

Tabla 7. Uso actual del suelo en la cuenca del río Paito

Uso	Área (Km ²)	Porcentaje de Área (%)
Tierras Cultivadas	544,45	21,11
Bosques Cobertura Buena, Pastizales	862,32	33,44
Bosques Cobertura Pobre	524,52	20,34
Residencial	647,23	25,11

Fuente. Elaboración propia

En la Tabla 8 se observa que mas del 40 por ciento de los suelos que prevalecen en la subcuenca del río Pirapira, alrededor de 56 Km², es de los tipos *Vles*, *IIIse* y *IVse* (ver Figura 27); que corresponden a suelos de moderada profundidad y fertilidad, texturas medias, arcillosos y sin sales. Asimismo, abundan en la cuenca los suelos del tipo *VIIes*, que abarcan un área de 52 Km², lo que representa el 39 por ciento del área total de la cuenca.

Tabla 8. Tipo de suelo en la cuenca del río Pirapira

Tipo	Características Generales del Suelo	Área (Km ²)	Proporción de Área (%)
<i>VII es</i>	Suelos poco profundos, de baja fertilidad, con frecuentes afloramientos rocosos y piedras superficiales.	51,51	37,87
<i>VI es, III se, IV se</i>	Suelos de moderada fertilidad, texturas medias, arcillosos, moderadamente profundos y sin sales.	56,24	41,35
<i>VII es, VII c + VI c</i>	Suelos de baja fertilidad, poco profundos, sin sales y moderadamente drenados.	3,46	2,54

VII es, VII e, VIII e	Suelos de baja fertilidad, texturas medias, moderadamente profundos, moderadamente drenados.	9,63	7,08
--------------------------	--	------	------

Fuente. Elaboración propia. Datos proporcionados por CORPOCENTRO provenientes del SICOT. Minamb (2005)

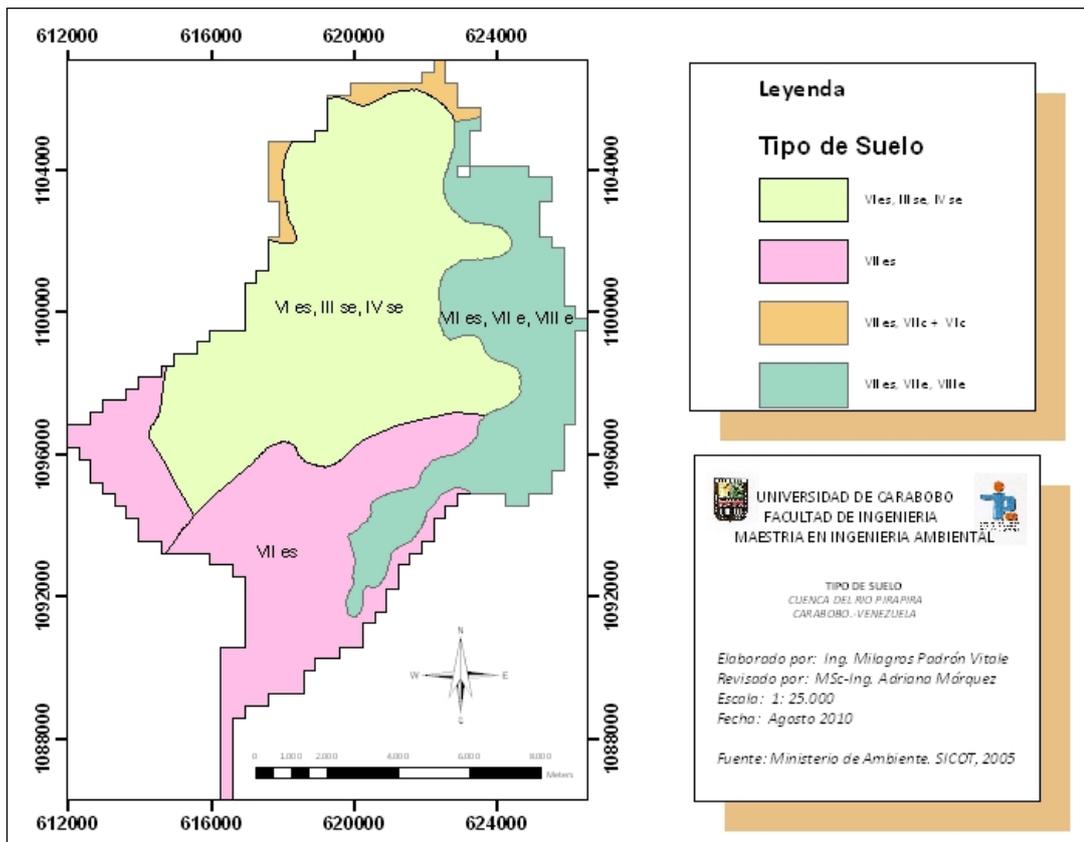


Figura 27. Mapa del tipo de suelo en la cuenca del río Pirapira. Elaboración propia

En cuanto a la cuenca del río Paya, aproximadamente el 40 por ciento de los suelos son del tipo VI + VIIe, VIIe (ver Tabla 9), unos 48 Km², los cuales se caracterizan por ser pedregosos y de textura franco-arcillosa. En general, en esta cuenca los suelos son de tipo VI, VII y VIII, caracterizados por tener una profundidad de media a baja, baja fertilidad, de texturas franco-arcillosas a arcillosas y pedregosos, tal como se observa en la Figura 28.

Tabla 9. Tipo de suelo en la cuenca del río Paya

Tipo	Características Generales del Suelo	Área (Km²)	Proporción de Área (%)
<i>VI + VII e, VII e</i>	Suelos de textura franco-arcillosa, pedregosa.	47,61	39,40
<i>VII e</i>	Suelos poco profundos y pedregosos, de textura franco-arcillosa o arcillosa, ácidos y de baja fertilidad.	12,09	9,98
<i>VII es</i>	Suelos poco profundos, de baja fertilidad, con frecuentes afloramientos rocosos y piedras superficiales.	20,14	16,93
<i>VII e, VI e</i>	Suelos de baja fertilidad, texturas medias, poco profundos, generalmente pedregosos, ácidos, de textura franco-arcillosa o arcillosa.	7,91	6,53
<i>VII es, VII e, VIII e</i>	Suelos de baja fertilidad, texturas medias, moderadamente profundos, moderadamente drenados.	33,09	27,32

Fuente. Elaboración propia. Datos proporcionados por CORPOCENTRO provenientes del SICOT. Minamb (2005)

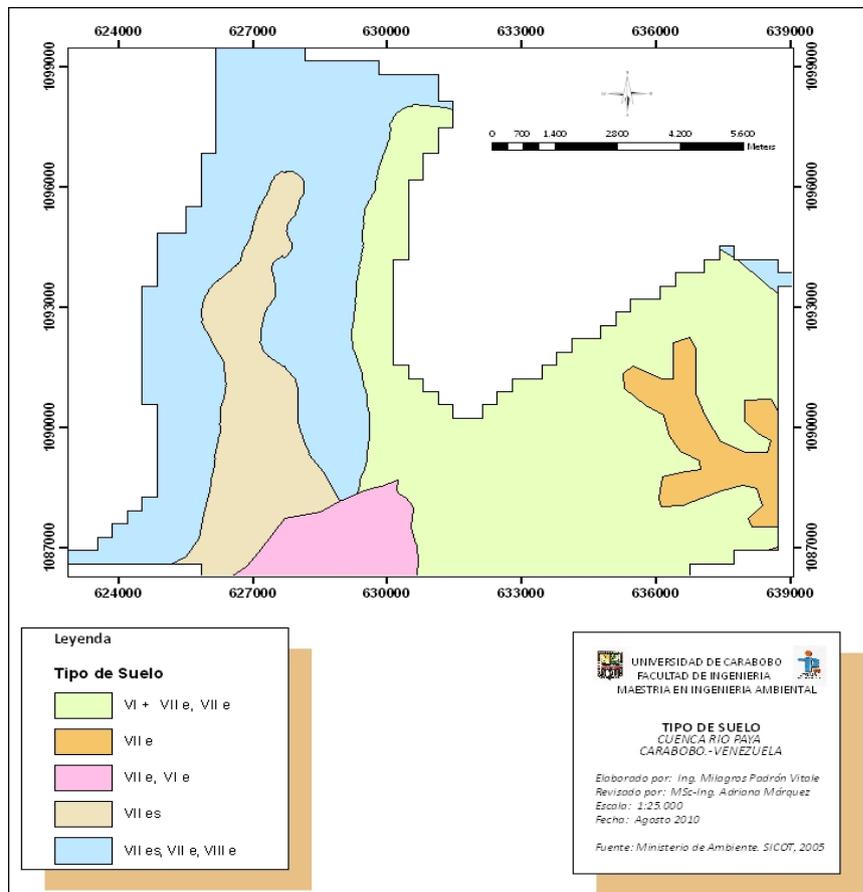


Figura 28. Mapa del tipo de suelo en la cuenca del río Paya. Elaboración propia

En la cuenca del río San Pedro predominan los suelos tipo *VIIes*, *VIIe* y *VIIIe* (ver Tabla 10) ya que representan el 50 por ciento del área total y abarcan un área de aproximadamente 143 Km² (ver Figura 29). Estos suelos se caracterizan por ser de baja fertilidad, moderadamente profundos y drenados, con texturas medias. En general, abundan los suelos tipo VI y VII al igual que en la cuenca del río Paya.

Tabla 10. Tipo de suelo en la cuenca del río San Pedro

Tipo	Características Generales del Suelo	Área (Km ²)	Proporción de Área (%)
VI es, III se, IV se	Suelos de moderada fertilidad, arcillosos, texturas medias, moderadamente profundos, sin sales.	25,15	8,74
VI + VII e, VII e	Suelos de textura franco-arcillosa, pedregosa.	49,09	17,08
VII es	Suelos poco profundos, de baja fertilidad, con frecuentes afloramientos rocosos y piedras superficiales.	65,14	22,65
VII es, VII e, VIII e	Suelos de baja fertilidad, texturas medias, moderadamente profundos, moderadamente drenados.	142,69	50,14
VII e	Suelos poco profundos y pedregosos, de textura franco-arcillosa o arcillosa, ácidos y de baja fertilidad.	2,84	0,99

Fuente. Elaboración propia. Datos proporcionados por CORPOCENTRO provenientes del SICOT. Minamb (2005)

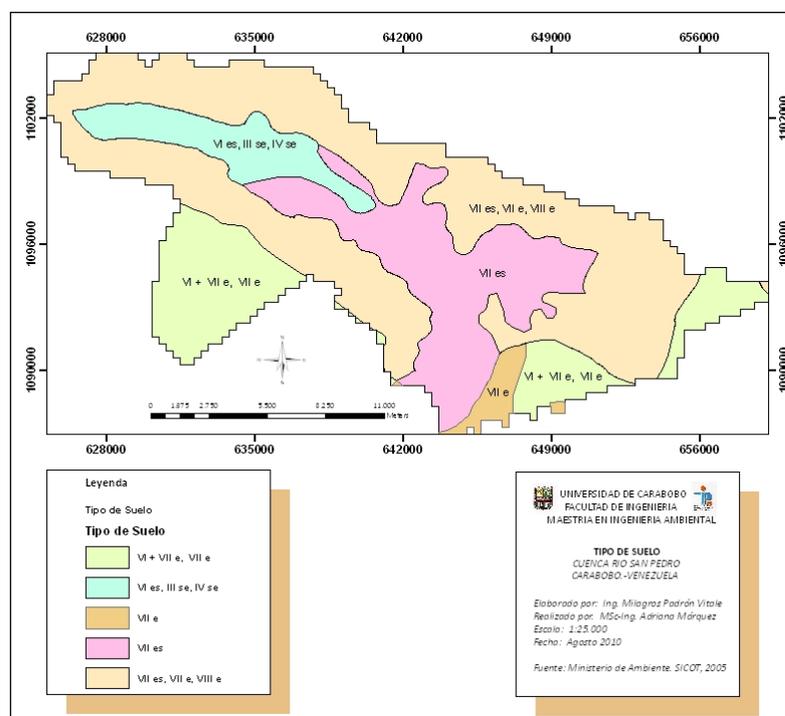


Figura 29. Mapa del tipo de suelo en la cuenca del río San Pedro. Elaboración propia

En cuanto al uso del suelo, las microcuencas de los ríos Pirapira, Paya y San Pedro se caracterizan por ser de uso agrícola y pecuario, predominando éste último con una proporción de pastizales de alrededor de 60 por ciento del área total, favoreciendo la actividad pecuaria, se estima que alrededor de 324 Km² de suelos de las tres (3) cuencas están cubiertos de pastizales, mientras que la proporción de tierras cultivadas y la de bosques y pastizales son muy cercanas, siendo de aproximadamente 20 por ciento y 21 por ciento, respectivamente (ver Tabla 11).

Tabla 11. Uso actual del suelo en la cuenca de los ríos Pirapira, Paya y San Pedro

Uso	Área (Km ²)	Porcentaje de Área (%)
Tierras Cultivadas, Residencial	106,45	19,65
Bosques Cobertura Buena, Pastizales	111,28	20,54
Pastizales	324,05	59,81

Fuente. Elaboración propia

En general, el uso actual de los suelos de la cuenca media del río Pao-Cachinche se caracteriza por ser un área agrícola, pecuaria y residencial. En la zona predominan los cultivos de árboles frutales, principalmente los cítricos como la naranja; las microcuencas están cubiertas de extensos bosques densos, con vegetación arbustiva, matorrales y vegetación herbácea; la actividad pecuaria se centra en el ganado bovino y bufalino (ver Anexo G). La cuenca posee baja densidad poblacional debido a que los asentamientos humanos son pocos y muy dispersos, donde abunda la existencia de fincas de mediana extensión dedicadas al cultivo y/o a la cría de ganado y pollo. Asimismo, los tipos de suelo establecidos

para cada subcuenca se corresponden con los usos predominantes en cada cuenca.

En la Figura 30 se muestran los usos potenciales del suelo en la subcuenca del río Pao-Cachinche según el Minamb (2005), en la misma se observa que más de dos tercios de los suelos de la cuenca del río Pao, principalmente en las subcuencas de los ríos Chirgua y Paito, son propicios a la vegetación natural pues son suelos poco profundos de baja fertilidad y pedregosos. Además; se trata de un Área Bajo Régimen Especial (ABRAE); decretada *Zona Protectora de la Cuenca del Río Pao* el 05-06-1992 (Decreto 2.310) con el propósito de conservar los recursos naturales, controlar la contaminación de las aguas, recuperar los recursos degradados y racionalizar la ocupación de sus márgenes. El 05-06-1996 se publica en gaceta el *Plan de Ordenamiento y Reglamento de la Cuenca del Río Pao*, en la cual se describen las restricciones de uso de la misma.

En la parte media de la subcuenca del río Chirgua y parte baja de la subcuenca del río Paito y microcuencas de los ríos Pirapira, Paya y San Pedro el uso potencial del suelo se centra en la presencia de bosques naturales (ver Figura 29), donde los suelos son de baja fertilidad, poco profundos y de textura media. En las estribaciones montañosas de las microcuencas predomina el bosque tropical premontano, con la presencia de especies tales como bucares, falso araguaney y yagrumo; estas zonas boscosas evidencian la presencia de actividades antrópicas, principalmente la tala y quema (Proyecto Cuenca, 2009).

Los suelos de la parte alta de las cuencas de los ríos Paito y Chirgua son potencialmente aptos para la agricultura intensiva (ver Figura 29), por cuanto se trata de suelos fértiles, profundos, de textura media, bien drenados y sin sales. La parte media de la cuenca del río Paito y parte alta de la cuenca del río San Pedro son suelos potencialmente idóneos para la ganadería semi-intensiva, debido a que los suelos son profundos, arcillosos, de baja fertilidad, bien drenados y con

presencia de sales. En la actualidad existen granjas avícolas y porcinas principalmente en la microcuenca de los ríos Pirapira, Paya y San Pedro.

La parte baja de las cuencas de los ríos Chirgua, Paito y San Pedro poseen suelos ácidos, de baja fertilidad, poco profundos, pedregosos y de textura franco-arcillosa, potencialmente útiles para ser destinados al desarrollo de la ganadería extensiva, tal como se observa en la Figura 29. Asimismo, el suelo de la zona noroeste de la cuenca del río Chirgua, límite con los estados Yaracuy y Cojedes, es apta para la siembra de plantaciones forestales con fines protectores, debido a que son suelos poco profundos, de textura franco-arcillosa y lecho rocoso cercano a la superficie (Minamb, 2005).

En general, el uso potencial de los suelos de la cuenca media del río Pao se corresponde en gran medida con el uso actual, tal como se observa en las Figuras 25 y 29; cabe destacar que Guillén (2005) afirma que la cuenca posee un “moderadamente alto potencial de erosión” lo que ameritaría una “moderada prioridad de atención conservacionista”.

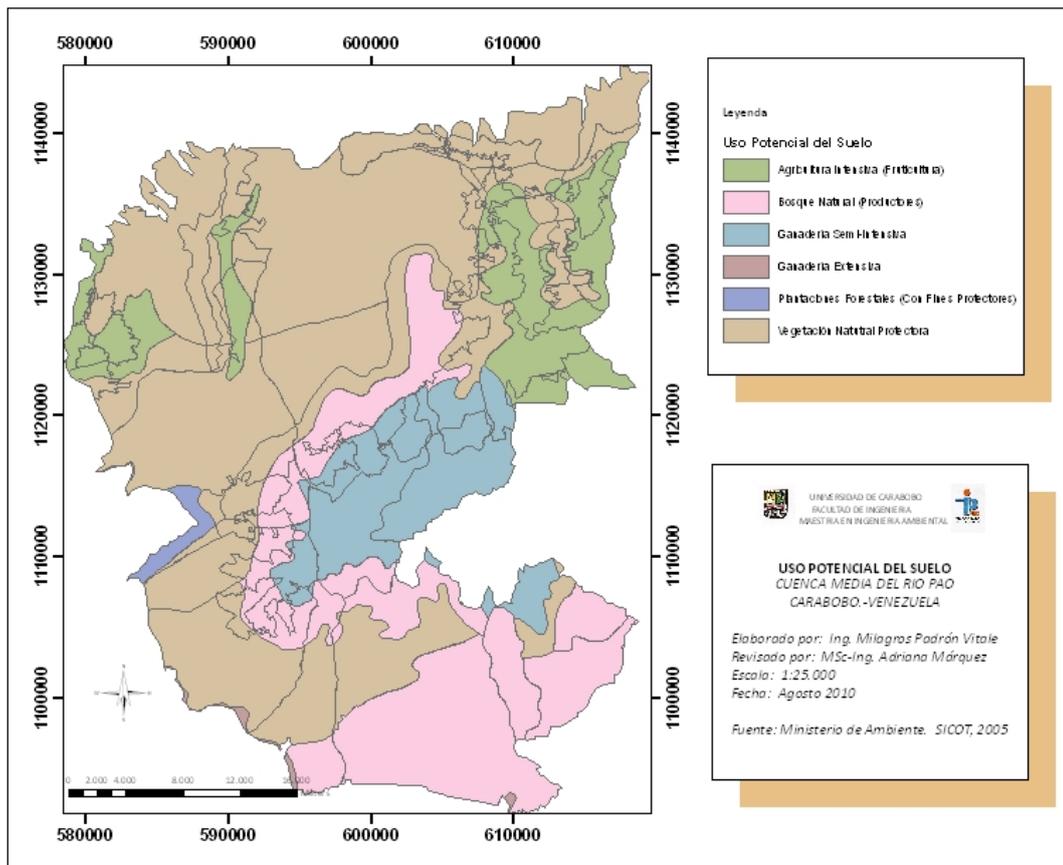


Figura 30. Mapa del uso potencial del suelo en la cuenca del río Pao. Elaboración propia

Caracterización Operacional del Embalse Pao-Cachinche

El Embalse Pao-Cachinche recibe y almacena las aguas provenientes de las subcuencas de los ríos Chirgua, Paito, Pirapira, Paya y San Pedro, así como también alrededor de 220 millones de metros cúbicos diarios provenientes de los desvíos

del río Cabrales en 2005 y del Lago de Valencia desde 2004, los cuales son vertidos hacia las aguas del río Paito.

Posee una torre toma con ocho (8) compuertas de fondo, cada una de las cuales posee orificio de entrada de dimensiones 0,91 m x 1,83 m; las compuertas trabajan de acuerdo a la calidad del agua en el embalse, lo que implica la realización de análisis biológicos, fisicoquímicos y químicos-sanitarios en diversos puntos de muestreo en el embalse, tales como la torre toma (a nivel superficial, 5 m y 10 m); la desembocadura del río Paito y la desembocadura del río Chirgua. Por lo general operan las compuertas 1, 2 y 3 (ver Figura 31) por donde circula el agua que va hacia la planta potabilizadora Alejo Zuloaga, a través de un acueducto de 88 pulgadas de diámetro.

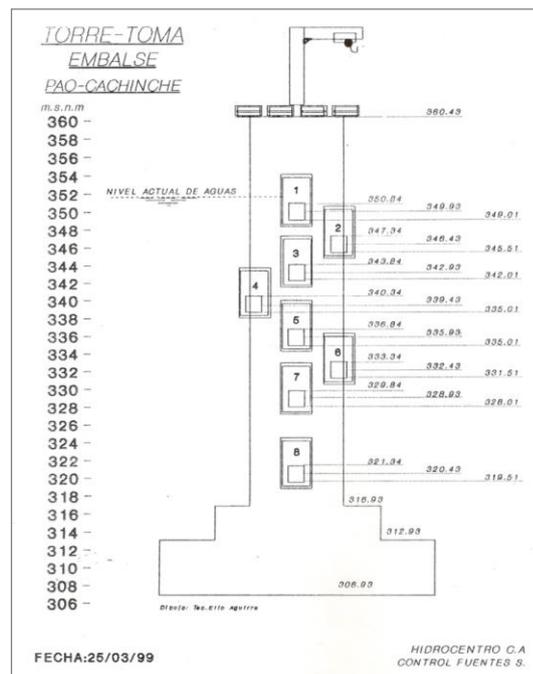
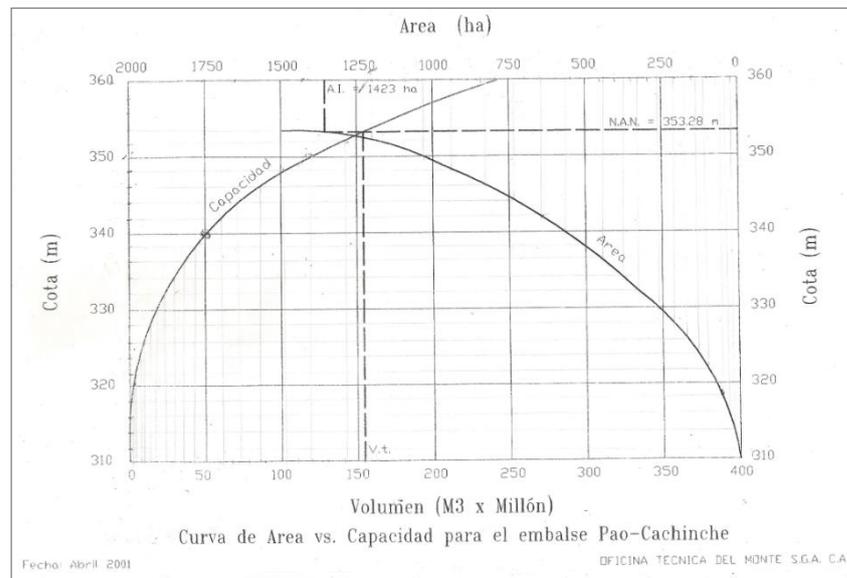


Figura 31. Esquema de la torre toma del embalse Pao-Cachinche. Proporcionado por el Departamento de Captación de Fuentes Superficiales de HIDROCENTRO, Estado Carabobo (1999)

Las variables de entrada al embalse comprenden los registros diarios de mediciones directas como la lluvia y el nivel en el embalse; así como también de las variables calculadas: el área que ocupa el espejo de agua, el volumen almacenado, el cual es estimado con la Curva de Área-Capacidad del embalse (ver Gráfica 2); el caudal de alivio proveniente del Embalse Guataparo y el caudal proveniente de los ríos afluentes, estimado a partir del balance hídrico. Cabe destacar que durante el periodo de estudio 1983-2009, no hubo alivio proveniente del Embalse Guataparo ya que el mismo solo es utilizado en casos de emergencia, por ejemplo una parada de planta.



Gráfica 2. Curva de Área-Capacidad del embalse Pao-Cachinche. Proporcionada por el Departamento de Captación de Fuentes Superficiales de HIDROCENTRO, Estado Carabobo (2001)

En la Gráfica 2 se observa que el volumen estimado por la curva de área-capacidad para la cota de alivio del embalse: 353,28 msnm; es de 150 millones de metros cúbicos y el área del espejo de agua es igual a 1.423 ha. El volumen de aguas muertas abarca desde la cota base del embalse de 310 msnm hasta la cota 319,51 msnm; donde el área del espejo de agua para ésta elevación es menor a

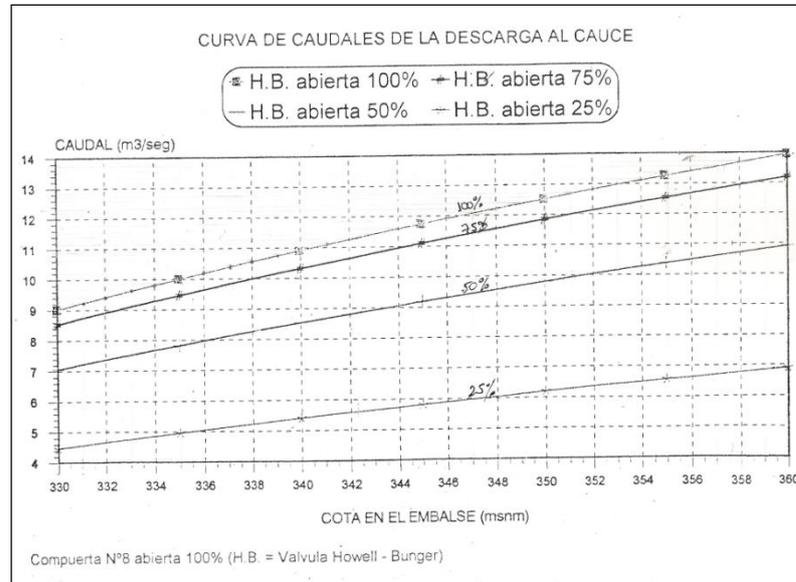
las 100 ha y el volumen almacenado en el embalse es inferior a los cinco (5) millones de metros cúbicos.

De acuerdo a la curva del embalse, a la cota máxima de la presa de 360,40 msnm, la capacidad del embalse es de aproximadamente 240 millones de metros cúbicos y el área ocupada por el espejo de agua es de alrededor de 1.500 ha. Es importante mencionar que la curva área-capacidad corresponde a 2001, año en el que se realiza una batimetría en el embalse, resultando, de acuerdo al personal técnico de HIDROCENTRO, en una disminución de 22 millones de metros cúbicos en el volumen total del mismo.

Para noviembre de 2009, el volumen total almacenado en el embalse fue de 159,2 millones de metros cúbicos pues las cotas se mantuvieron en el rango de 353,28 msnm a 313,00 msnm durante ese mes; de acuerdo a HIDROCENTRO el volumen almacenado disponible fue de 157,2 millones de metros cúbicos, que corresponde a un rango de cotas entre los 353,28 a 328,00 msnm y el caudal de agua aportada por los ríos fue estimada por la hidrológica en 777.600 m³/día.

Las variables de salida registradas diariamente en el embalse abarcan la evaporación, el caudal de gasto ecológico, el caudal de extracción por bombeo y el caudal de alivio hacia el Embalse Pao-La Balsa. En 2009 la evaporación promedio en el embalse, de acuerdo a estimaciones de HIDROCENTRO, fue de 60.480 m³/día mientras que el caudal de gasto ecológico se mantuvo constante durante todo el año e igual a 830 LPS. El caudal de gasto ecológico es extraído del embalse a través de la compuerta N° 8 y es regulado por medio de una válvula Howell-Bunger de 36 pulgadas de diámetro. En la Gráfica 3 se muestra la curva de los caudales de descarga al cauce de acuerdo al porcentaje de apertura de la válvula; donde se observa que cuando la misma está totalmente abierta (100 por ciento de apertura)

el caudal mínimo de descarga es igual a 9 m³/s, a una cota de 330 msnm y el caudal máximo es igual a 14 m³/s, para una cota de 360 msnm.

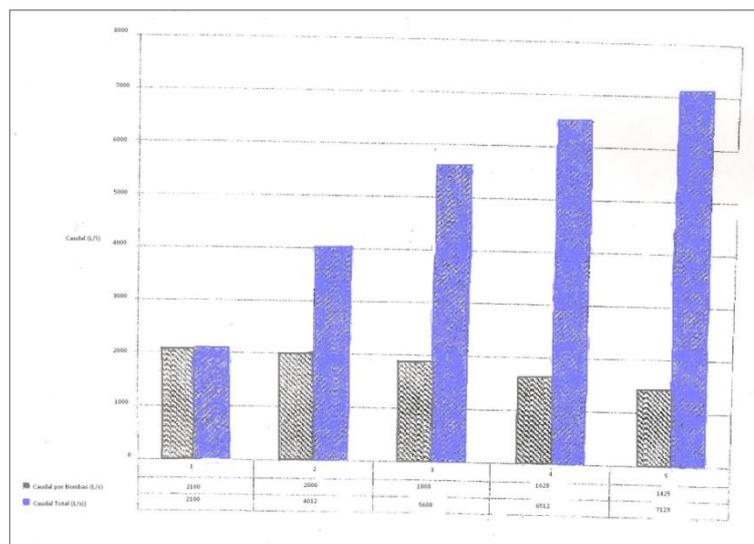


Gráfica 3. Curva de caudales de descarga al cauce. Proporcionada por el Departamento de Captación de Fuentes Superficiales, HIDROCENTRO, Estado Carabobo (2001)

El agua del embalse es conducida por gravedad hacia la Estación de Bombeo Red Media, la cual se encuentra a 295 msnm y a 300 m de la salida de la torre toma, de aquí es enviada hacia la planta potabilizadora Alejo Zuloaga empleando un máximo de cuatro (4) bombas marca Booster de 3 HP y 3.500 RPM cada una, que operan en paralelo, de forma semiautomática, las 24 horas del día durante los 365 días del año. El Embalse Pao-Cachinche posee la particularidad de que permanece lleno tanto en el verano como en el invierno; aunado a la condición actual de alivio permanente, situación que ha venido ocurriendo desde 2004.

En la Gráfica 4 se muestran los caudales de bombeo de acuerdo al número de bombas en funcionamiento para el sistema de bombeo Pao-Cachinche. En la estación de bombeo Red Media existe un total de cinco (5) bombas, sin embargo,

dependiendo de la programación establecida, esto es; de lunes a viernes operan cuatro (4) bombas y de viernes a sábado trabajan tres (3), por lo que siempre permanece una bomba en modo de espera, la cual solo es utilizada en caso de falla o mantenimiento de cualquiera de los equipos en funcionamiento.



Gráfica 4. Caudales según número de bombas en funcionamiento. Proporciónada por Departamento Técnico de la estación de bombeo Red Media, Estado Carabobo

En la Gráfica 4 se observa que la capacidad nominal de bombeo con un (1) equipo en funcionamiento es igual a 2.100 LPS, con dos (2) bombas el caudal es de 2.006 LPS, si se trabaja con tres (3) bombas el caudal es igual a 1.868 LPS, con cuatro (4) bombas operando el caudal es de 1.628 LPS y en caso de que se requiriese mantener operando los cinco (5) equipos, el caudal bombeado por cada equipo es igual a 1.425 LPS; sin embargo las capacidades reales en el presente son: (a) Una bomba extrae 1.600 LPS, (b) Dos bombas extraen 3.400 LPS, (c) Tres bombas extraen 5.300 LPS y (d) Cuatro bombas extraen 6.200 LPS. Asimismo, se observa que el mínimo caudal de extracción por bombeo es igual a 2.100 LPS y el máximo caudal corresponde a 7.123 LPS. El agua bombeada desde la Red Media

hasta la planta potabilizadora debe vencer una elevación de 130 m, ya que ésta última se encuentra a 425 msnm.

En las estimaciones de HIDROCENTRO respecto al comportamiento del volumen almacenado en el embalse Pao-Cachinche en el período 2009-2010, se consideraron tres escenarios de bombeo para garantizar el abastecimiento de agua potable durante período de sequía de 2010, teniendo como base un volumen almacenado de 159,2 millones de metros cúbicos, un volumen almacenado disponible de 157,2 millones de metros cúbicos y un caudal aportado por los ríos de 9 m³/s. El uso de cuatro (4) bombas para extraer en total 667.872 m³/día del embalse representa un caudal de bombeo de 535.680 m³/día para cubrir 235 días de abastecimiento; con tres (3) equipos se bombea un caudal de 457.920 m³/día para extraer en total 590.112 m³/día, siendo el caudal bombeado igual a los cuales garantizan 266 días de abastecimiento; mientras que con el uso de dos (2) bombas se tiene un caudal de bombeo de 267.840 m³/día y un caudal total extraído igual a 400.032 m³/día que permite obtener una capacidad de almacenamiento de 393 días (HIDROCENTRO, 2009).

Históricamente el embalse ha aliviado durante los meses de julio a diciembre período que corresponde a las estaciones lluviosa y mixta, sin embargo con el desvío del Lago de Valencia hacia el río Paito, el embalse viene aliviando durante casi todo el año desde entonces. En 2008 se registró un alivio promedio superior a los 35 millones de metros cúbicos por mes durante el invierno, mientras que en el verano el embalse alivió un promedio de ocho (8) millones de metros cúbicos por mes. El aliviadero del embalse es de tipo libre, tiene una longitud según cálculos propios de aproximadamente 47,5 m; la elevación es de cuatro (4) m y el caudal máximo del aliviadero es igual a 760 m³/s. Por su parte, la cresta de la presa es enroscada con núcleo de arcilla y posee una longitud de 260 m.

La operación diaria del sistema Embalse Pao-Cachinche puede ser considerada, para efectos de cálculo, como una operación continua bajo régimen no permanente ya que las entradas y salidas fluyen de continuamente todo el tiempo y todas las variables cambian en el tiempo (Felder y Rousseau, 1991); por lo tanto el balance hídrico del embalse puede ser expresado en la forma siguiente, tomando como base de cálculo un (1) día de operación:

$$Q_{\text{Rios}} + P + Q_{\text{Alivio Guataparo}} - (E + Q_{\text{Gasto ecológico}} + Q_{\text{Bombeo}} + Q_{\text{Alivio Pao-La Balsa}}) = \text{Almacenamiento} \quad (52)$$

representando los términos a la izquierda de la igualdad las entradas al embalse y los términos a la derecha de la igualdad las salidas del mismo; además Q_{Rios} es el caudal de entrada proveniente de los ríos afluentes al embalse en unidades de $\text{m}^3/\text{día}$, P es la lluvia caída en el embalse en m^3 , $Q_{\text{Alivio Guataparo}}$ es el caudal de alivio proveniente del Embalse Guataparo en $\text{m}^3/\text{día}$, Almacenamiento es el volumen de agua almacenada en el embalse en m^3 , E es la evaporación en el embalse en unidades de m^3 , $Q_{\text{Gasto ecológico}}$ es el caudal de gasto ecológico en $\text{m}^3/\text{día}$, Q_{Bombeo} es el caudal de bombeo en $\text{m}^3/\text{día}$ y $Q_{\text{Alivio Pao-La Balsa}}$ es el caudal de alivio hacia el Embalse Pao-La Balsa en $\text{m}^3/\text{día}$. En la Figura 32 se muestra el esquema de las variables de entrada y salida del embalse.

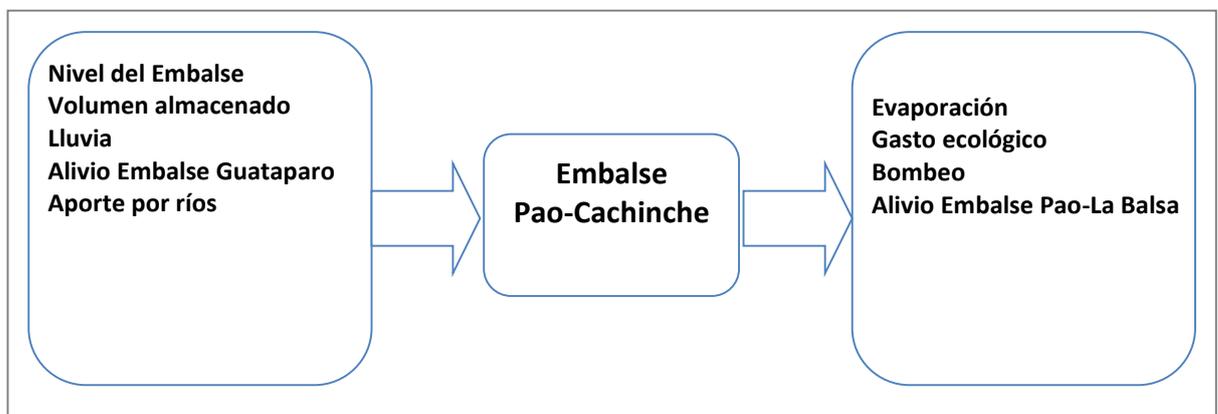


Figura 32. Variables del subsistema Embalse Pao-Cachinche. Elaboración propia

El agua extraída del embalse hacia la planta potabilizadora es movida a un caudal cuyo rango fluctúa entre 6,5 a 7,0 m³/s, debido a que la planta posee una capacidad instalada de 8 m³/s, una capacidad de servicio de 6,5 m³/s y abastece de agua potable a una población de aproximadamente 2.262.070 habitantes en el Estado Carabobo, según estimaciones del INE en 2008.

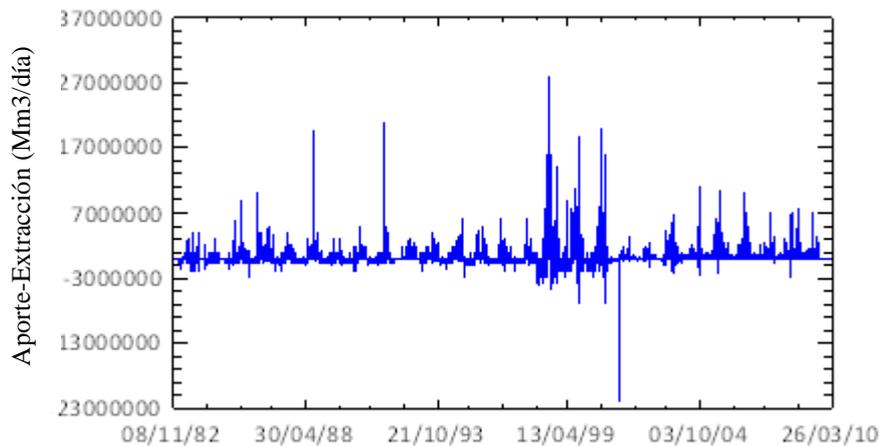
Diagnóstico de la Operación Histórica del Sistema Regional del Centro I (SRC1) Durante el Período 1983-2009

Con base en la subdivisión establecida de los elementos que conforman el SRC1, el diagnóstico se centra en el análisis del sistema Embalse Pao-Cachinche (Subsistema 2) durante 26 años de operación; el cual abarca el volumen de aporte-extracción de los afluentes o entrada al embalse y la salida del mismo.

Debido a que se contó con las series de tiempo diarias del embalse durante el período de estudio, las mismas se analizaron mediante la descomposición estacional con la finalidad de detectar algún patrón, como primera aproximación, del comportamiento de tales registros históricos. A continuación se presentan los resultados del análisis de las series diarias en el período 1983-2009 del aporte-extracción, el alivio, la evaporación, el gasto de bombeo y el gasto ecológico del embalse:

Descomposición Estacional de las Series de Tiempo Diarias del Embalse Pao-Cachinche Durante el Período 1983-2009

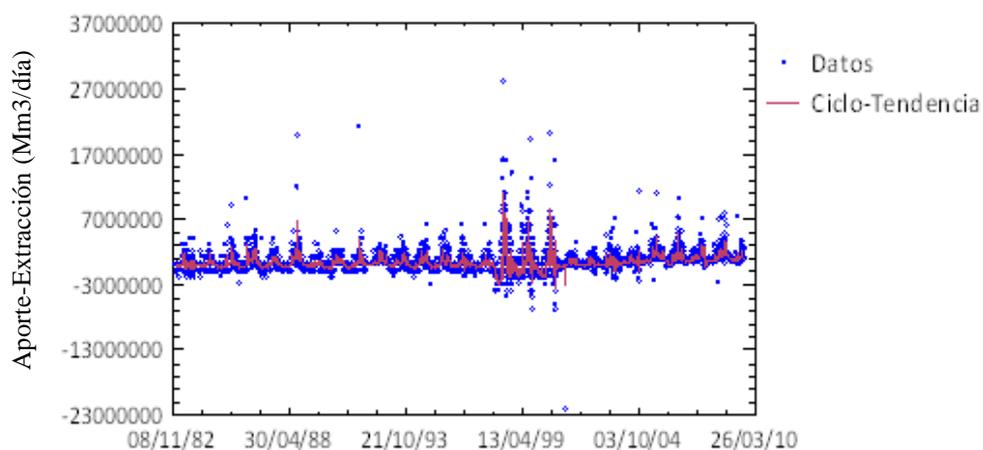
Aporte-Extracción. Esta serie de tiempo permite estimar la disponibilidad aprovechable de agua en el embalse durante las fases del ciclo hidrológico entre 1983 a 2009. De acuerdo a las bases teóricas que establece Bolinaga (1999) para la regulación y control de un embalse con fines de aprovechamiento del agua, la serie histórica abarca los volúmenes de agua provenientes de los afluentes al embalse y la demanda a suplir por el mismo. El patrón general de largo plazo del *Aporte-Extracción* muestra una tendencia creciente (ver Gráfica 5) debido al trasvase del Lago de Valencia en 2004.



Gráfica 5. Aporte-Extracción diario al embalse Pao-Cachinche durante el período 1983-2009. Datos procesados con StatGraphics.

En la Gráfica 5 se observa que durante intervalos puntuales de tiempo las cantidades de agua regulables con fines de abastecimiento (disponibilidades netas) superaron la disponibilidad de agua del embalse, lo que significa que en esos períodos se extrajo más agua de la que entró al embalse.

La descomposición estacional de la variable *Aporte-Extracción* emplea el método aditivo sobre 9.757 observaciones, con un intervalo de muestra de 1 día y una longitud de la estacionalidad igual a 7 días de la semana. En la gráfica de tendencia para el aporte-extracción diario (ver Gráfica 6) se observan variaciones cíclicas con una frecuencia anual debido a la ocurrencia de las estaciones seca y lluviosa.



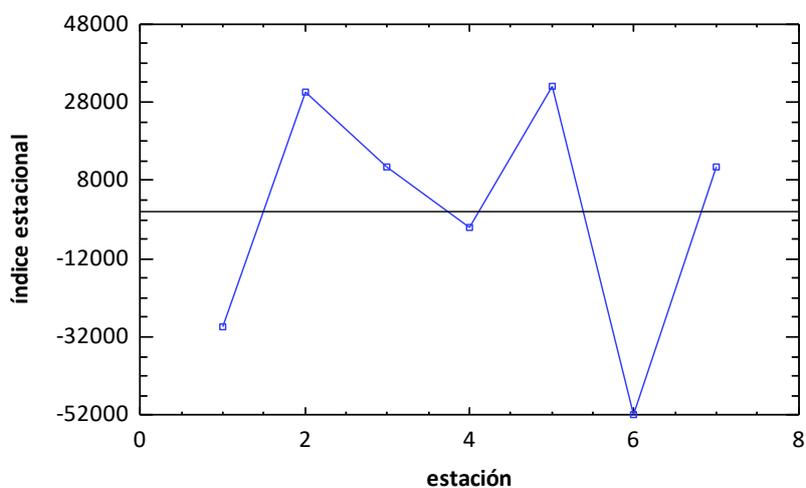
Gráfica 6. Ciclo-tendencia del aporte-extracción diario durante el período 1983-2009. Datos procesados con StatGraphics

En la Tabla 12 se presentan los índices estacionales que resultan de la remoción del componente irregular de los datos originales para el *Aporte-Extracción* diario, escalados para que un día sea igual a 0. Los índices van desde un mínimo de -51.920,1 en el día 6 hasta un máximo de 32.015,5 en el día 5 (ver Gráfica 7), lo que indica que el volumen proveniente de los afluentes al embalse excede en 32.000 m³ al promedio el día 5, mientras que el día 6 el aporte-extracción está a 51.000 m³ por debajo del promedio a lo largo del curso de una semana completa.

Tabla 12. Índices de estacionalidad para el aporte-extracción diario

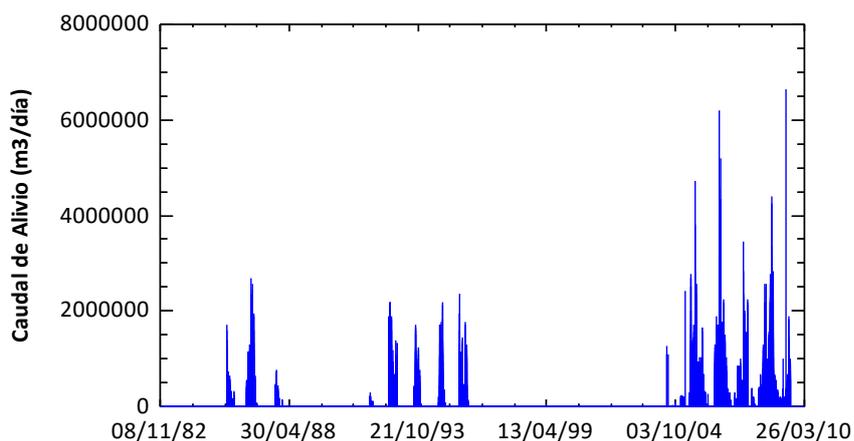
Estación	Índice
1	-29.357,3
2	30.395,1
3	11.276,9
4	-3.936,5
5	32.015,5
6	-51.920,1
7	11.526,4

Fuente. Datos procesados con StatGraphics



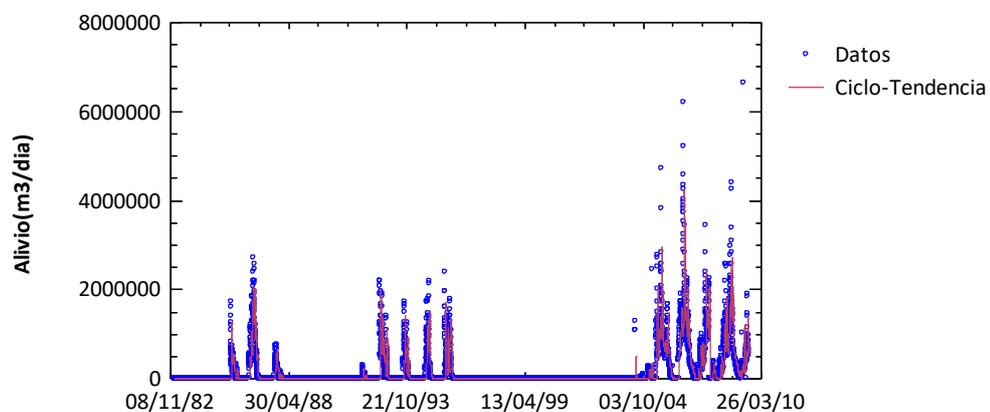
Gráfica 7. Índice estacional del aporte-extracción diario. Datos procesados con StatGraphics

Alivio. La serie histórica del *Alivio* del embalse durante este período muestra una tendencia de larga duración creciente, principalmente a partir del año 2004, tal como se observa en la Gráfica 8:



Gráfica 8. Alivio diario del embalse Pao-Cachinche durante el período 1983-2009. Datos procesados con StatGraphics

Se aplicó una descomposición estacional mediante el método aditivo de la serie de tiempo del *Alivio* diario en el embalse. Los datos cubren 9.740 períodos de tiempo, con un intervalo de muestra de 1 día y estacionalidad igual a 7 días de la semana. En la Gráfica 9 se muestra la gráfica de ciclo-tendencia de la serie diaria del *Alivio*, donde se observan variaciones cíclicas e irregulares a lo largo del período de tiempo estudiado.



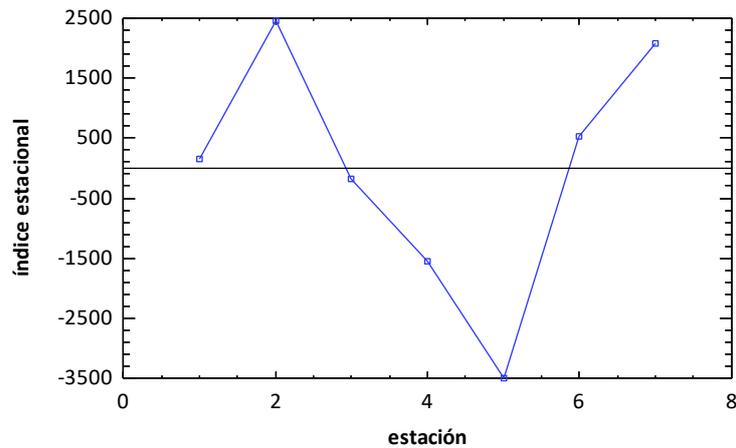
Gráfica 9. Ciclo-tendencia del alivio diario durante el período 1983-2009. Datos procesados con StatGraphics

En la Tabla 13 se presentan los componentes o índices estacionales que resultan de la remoción del componente irregular de los datos del *Alivio* diario, escalados para que un día sea igual a 0. Los índices van desde un mínimo de -3.486,1 en el día 5 hasta un máximo de 2.439,5 en el día 2 (ver Gráfica 10), lo que indica que en el día 2 el embalse registra un alivio superior a 2.400 m³ respecto al promedio mientras que en el día 5 se alivian alrededor de 3.500 m³ menos que el promedio a lo largo del curso de una semana completa.

Tabla 13. Índices de estacionalidad para el alivio diario

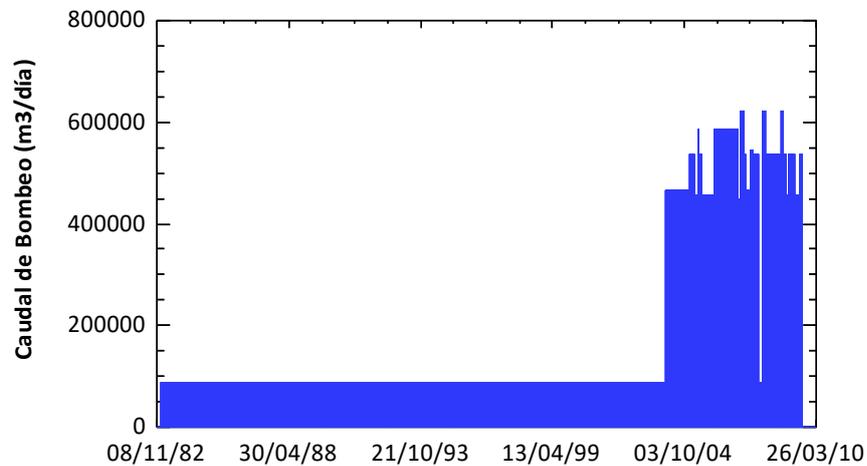
Estación	Índice
1	158,0
2	2.439,5
3	-168,8
4	-1.544,9
5	-3.486,1
6	527,9
7	2.074,3

Fuente. Datos procesados con StatGraphics



Gráfica 10. Índice estacional del alivio diario. Datos procesados con StatGraphics

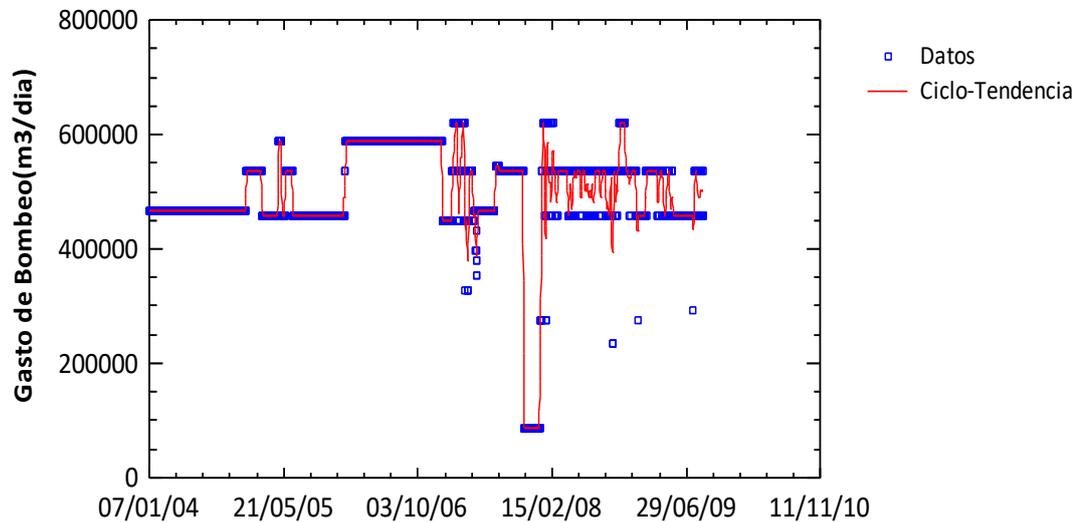
Gasto de Bombeo. La serie de tiempo diaria del *Gasto de Bombeo*, al igual que la del *Aporte-Extracción*, muestra una tendencia creciente del caudal de bombeo a largo plazo, tal como se observa en la Gráfica 11:



Gráfica 11. Gasto de bombeo diario en el embalse Pao-Cachinche durante el período 1983-2009. Datos procesados con StatGraphics

A partir del último trimestre de 2004 se observa un aumento en el gasto de bombeo en el embalse, mostrando la serie una tendencia cíclica e irregular. Debido a la variabilidad de los datos entre 2004 a 2009, se estimaron los índices estacionales del gasto de bombeo; este procedimiento aplica una descomposición estacional multiplicativa a la variable Bombeo. Los datos cubren 2.070 períodos de tiempo, el intervalo de la muestra es de 1 día y la longitud de la estacionalidad igual a 7 días de la semana.

En la Gráfica 12 se muestra la ciclo-tendencia del gasto de bombeo donde se observa que el menor valor registrado es en 2007, el cual fue de 87.868 m³ y el mismo se mantuvo los dos últimos meses de ese año; este caudal mínimo representa una disminución superior al 80 por ciento del caudal de bombeo y es a partir de 2008 que la tendencia comienza a mostrar un comportamiento cíclico e irregular.



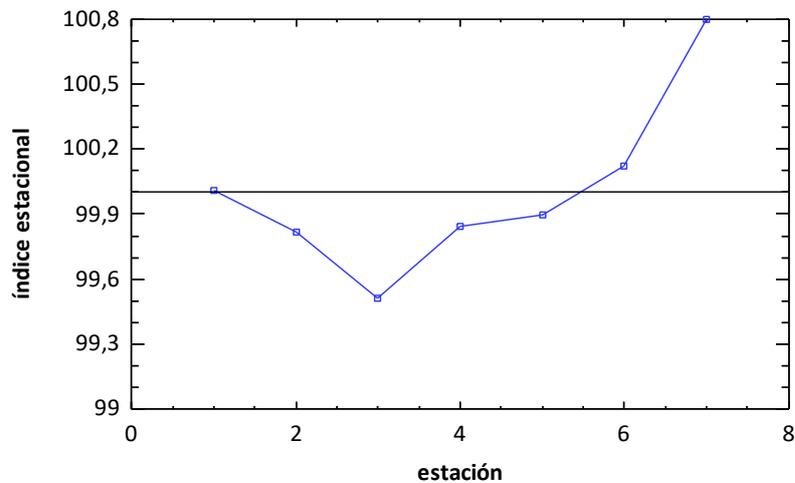
Gráfica 12. Ciclo-tendencia del gasto de bombeo diario durante el período 2004-2009. Datos procesados con StatGraphics

En la Tabla 14 se presentan los índices estacionales diarios en el período 2004-2009 que resultan de la remoción del componente irregular de los datos originales para el *Gasto de Bombeo*, escalados de forma que un día promedio sea igual a 100; los mismos van desde un mínimo de 99,51 en el día 3 hasta un máximo de 100,80 en el día 7; como se muestra en la Gráfica 13. Esto indica que el día 7 se supera en 0,8 por ciento el promedio de bombeo diario mientras que el día 3 el gasto de bombeo se ubica 0,49 por ciento por debajo del bombeo diario promedio, a lo largo del curso de una semana completa.

Tabla 14. Índices de estacionalidad para el gasto de bombeo diario durante el período 2004-2009

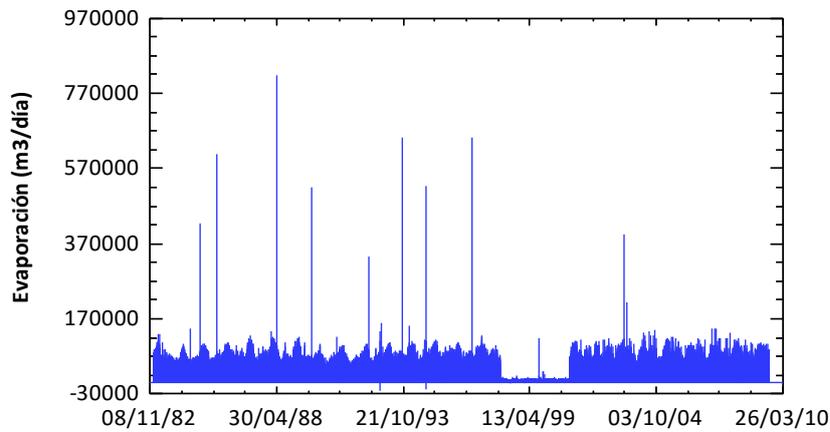
Estación	Índice
1	100,01
2	99,82
3	99,51
4	99,85
5	99,90
6	100,12
7	100,80

Fuente. Datos procesados con StatGraphics



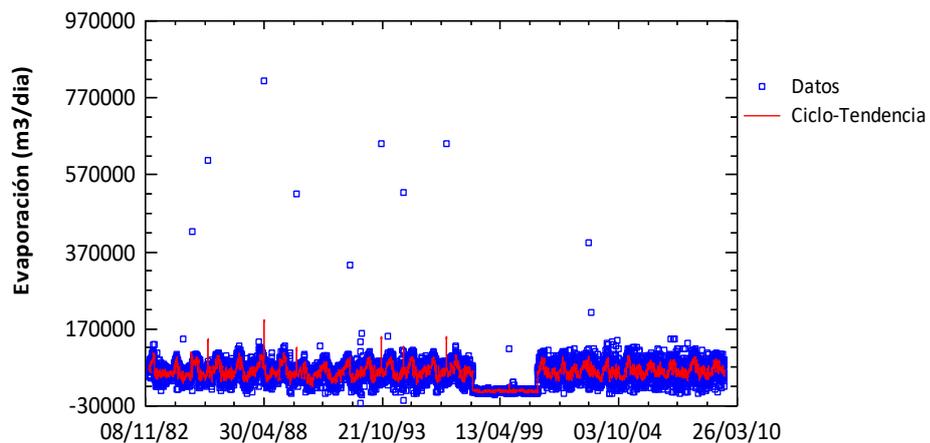
Gráfica 13. Índice estacional del gasto de bombeo diario durante el período 2004-2009. Datos procesados con StatGraphics

Evaporación. El patrón general de largo plazo de la evaporación muestra una tendencia cíclica con una estacionalidad diferenciada entre los períodos seco y lluvioso, tal como se muestra en la Gráfica 14:



Gráfica 14. Evaporación diaria en el embalse Pao-Cachinche durante el período 1983-2009. Datos procesados con StatGraphics

Se aplica la descomposición estacional aditiva para la variable Evaporación. Los datos cubren 9.740 períodos de tiempo, el intervalo de la muestra es de 1 día y la estacionalidad es igual a 7 días de la semana. De la gráfica de la serie de tiempo se observa que en 1988 se registra la mayor evaporación en el embalse, siendo la misma de 816.490 m³; correspondiente al 23 de abril de ese año. En la Gráfica 15 se muestra la gráfica de ciclo-tendencia de la evaporación a lo largo de los 26 años de registro.



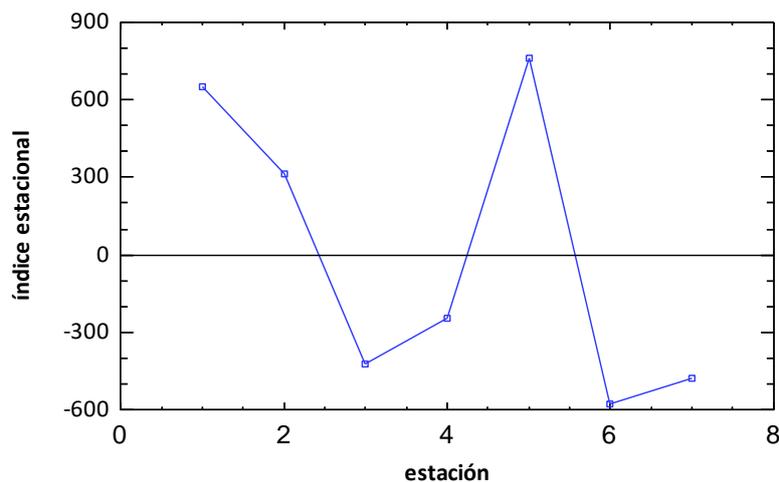
Gráfica 15. Ciclo-tendencia de la evaporación diaria durante el período 1983-2009. Datos procesados con StatGraphics

En la Tabla 15 y en la Gráfica 16 se muestran los índices estacionales que resultan de la remoción del componente irregular de los datos originales para la *Evaporación* diaria, escalados de modo que un día sea igual a 0. Los índices van desde un mínimo de -578,4 en el día 6 hasta un máximo de 759,7 en el día 5. Esto indica que el día 5 se evaporan alrededor de 760 m³ por encima del promedio mientras que en el día 6 se evaporan alrededor de 580 m³ por debajo del promedio, a lo largo del curso de una semana completa.

Tabla 15. Índices de estacionalidad para la evaporación diaria

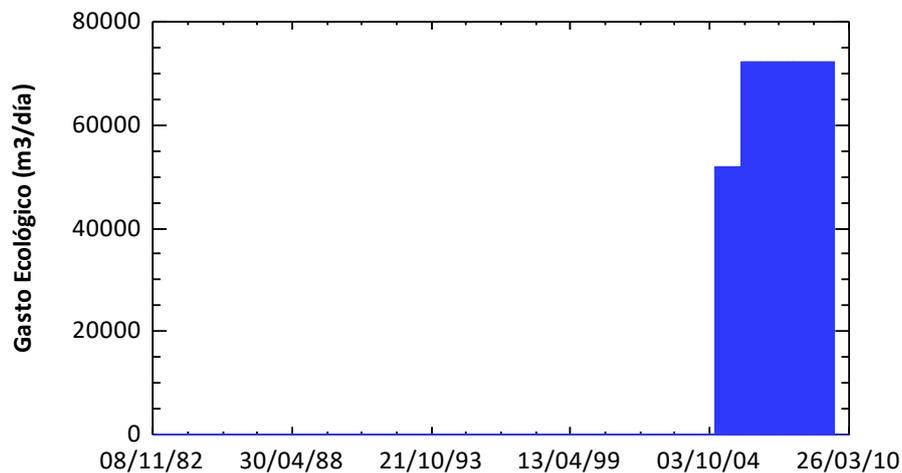
Estación	Índice
1	648,5
2	314,4
3	-422,5
4	-242,2
5	759,7
6	-578,4
7	-479,4

Fuente. Datos procesados con StatGraphics



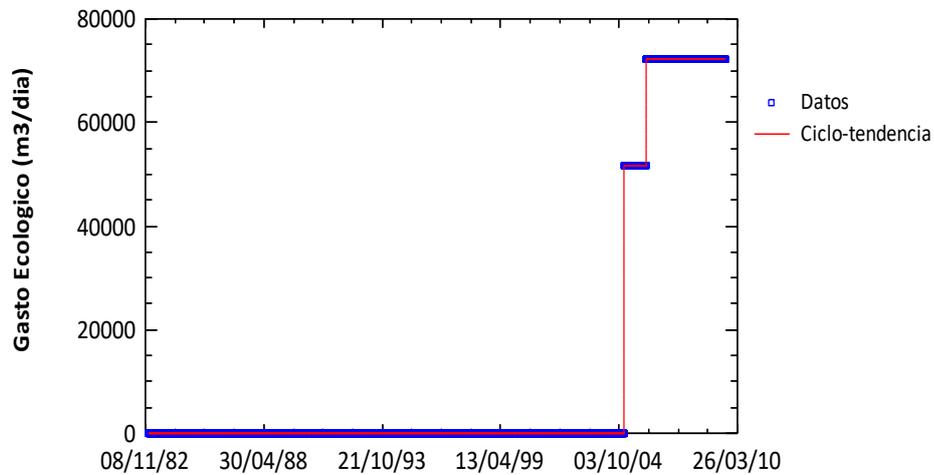
Gráfica 16. Índice estacional de la evaporación diaria. Datos procesados con StatGraphics

Gasto Ecológico. El *Gasto Ecológico* cumple con una doble finalidad, por una parte es utilizado para mantener el nivel del embalse Pao La Balsa en la cota de aguas normales (131,00 msnm) y por otro lado, permite preservar el ecosistema natural del río Pao. Entre 1983 a 2004 la serie de tiempo diaria del *Gasto Ecológico* en el embalse muestra una tendencia lineal; a partir de 2005 la tendencia va en aumento; de 2005 a 2006 el gasto ecológico se incrementa en aproximadamente un 30 por ciento, manteniéndose en 2009 en 835 LPS, tal como se observa en la Gráfica 17:



Gráfica 17. Gasto ecológico diario en el embalse Pao-Cachinche durante el período 1983-2009. Datos procesados con StatGraphics

Se aplica la descomposición estacional aditiva a la variable *Gasto Ecológico*; la herramienta utiliza 9.740 datos, con un intervalo de muestra de 1 día y estacionalidad igual a 7 días de la semana. En la Gráfica 18 se muestra la tendencia del gasto ecológico a lo largo de los 26 años de registro, en la cual se observa que a partir de 2004 el *Gasto Ecológico* muestra una tendencia al aumento, con un acumulado de alrededor del 30 por ciento.



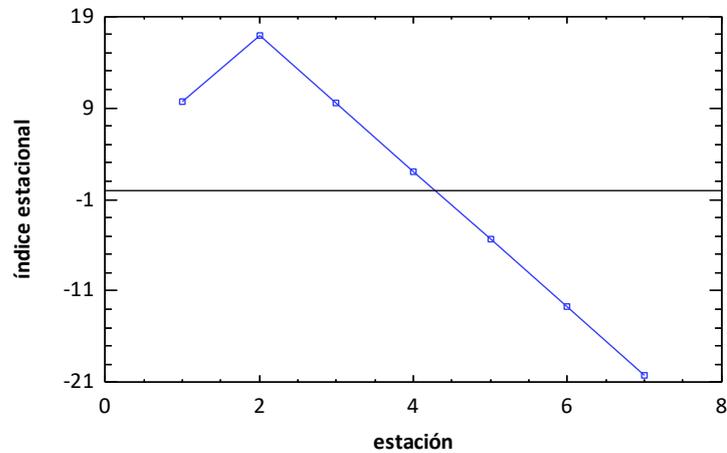
Gráfica 18. Ciclo-tendencia del gasto ecológico diario durante el período 1983-2009. Datos procesados con StatGraphics

En la Tabla 16 y la Gráfica 19 se presentan los índices estacionales que resultan de la remoción del componente irregular de los datos originales para el *Gasto Ecológico* diario, escalados de modo que un día sea igual a 0. Los índices van desde un mínimo de -20,15 en el día 7 hasta un máximo de 16,91 en el día 2. Esto indica que en el día 2 el gasto ecológico hacia el río Pao está alrededor de 17 m³ por encima del promedio y en el día 7 el mismo está a 20 m³ por debajo del promedio, a lo largo del curso de una semana completa.

Tabla 16. Índices de estacionalidad para el gasto ecológico diario

Estación	Índice
1	9,72
2	16,91
3	9,50
4	2,08
5	-5,33
6	-12,74
7	-20,15

Fuente. Datos procesados con StatGraphics



Gráfica 19. Índice estacional del gasto ecológico diario. Datos procesados con StatGraphics

Balances Hídricos del Embalse Pao-Cachinche en el Período 1983-2009

A continuación se analizan los balances hídricos mensuales del subsistema Embalse Pao-Cachinche durante 26 años de operación:

Balance hídrico año 1983. En la Tabla 17 se observa que entre los meses de enero a marzo, el aporte neto de agua proveniente de los ríos afluentes al embalse mantuvo una tendencia creciente, sin embargo el volumen de agua almacenado mostró una disminución para ese mismo período por la combinación del aumento de la evaporación y la escasa lluvia registrada en el embalse. Mientras que en enero el aporte neto por ríos fue de 2.920.000 m³, la lluvia estimada 78.600 m³ con una evaporación total de 2.160.000 m³ y un volumen almacenado de 68.000.000 m³; en marzo los afluentes al embalse aportaron unos 7.280.000 m³ de agua, la lluvia registrada fue de 87.300 m³, la evaporación total fue de

3.000.000 m³ (la más elevada del año) y el volumen almacenado se situó en 150.000.000 m³, alrededor de 18.000.000 m³ menos con respecto al mes de enero.

El caudal de bombeo diario extraído del embalse se mantuvo constante durante todo el año, en alrededor de 1020 LPS diarios. A partir de mayo se inicia el período lluvioso el cual se extiende hasta octubre, siendo el mayor aporte por ríos el estimado en septiembre: 24.800.000 m³. La máxima cantidad de lluvia registrada en el embalse corresponde al mes de mayo con un total 3.450.000 m³. Entre los meses de mayo a agosto se eleva el almacenamiento de agua en el embalse, alcanzándose el máximo entre junio y julio, mes a partir del cual comienza a disminuir el volumen almacenado hasta alcanzar los 153 millones de metros cúbicos en diciembre.

Durante todo el año no hubo alivio en el embalse y aunque no hay registro del gasto ecológico, de acuerdo a Hidrocentro, la válvula de descarga al cauce permaneció abierta, con una descarga diaria de alrededor de 600 LPS.

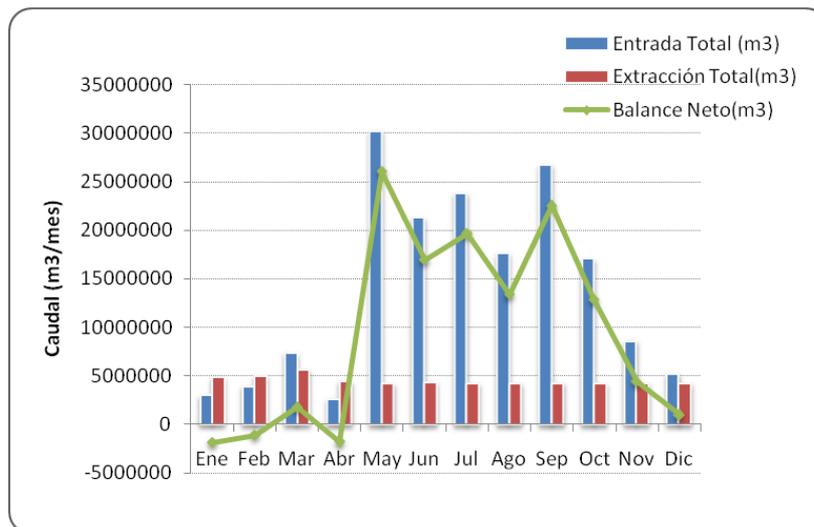
Aunque en los meses de enero, febrero y abril el balance en el embalse fue de pérdida debido a que las salidas superaron a las entradas, el balance neto en 1983 fue de ganancia, pues ingresó un volumen total aproximado de 145 millones metros cúbicos y salieron 114 millones de metros cúbicos, tal como se muestra en la Gráfica 5.

Tabla 17. Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 1983

Mes	Aporte Ríos (m³)	Lluvia en el embalse (m³)	Volumen almacenado (m³)	Entrada Total (m³)	Evaporación (m³)	Gasto ecológico (m³)	Bombeo (m³)	Alivio (m³)	Extracción Total(m³)	Balance neto (m³)
Enero	2.920.000	78.602	168.000.000	2.998.602	2.160.000	S/I	2.720.000	0	4.880.000	-1.881.398
Febrero	3.914.038	0	157.000.000	3.914.038	2.297.391	S/I	2.720.000	0	5.017.391	-1.103.353
Marzo	7.280.000	87.320	150.000.000	7.367.320	3.000.000	S/I	2.636.040	0	5.636.040	1.731.280
Abril	2.636.040	0	144.000.000	2.636.040	1.734.039	S/I	2.720.000	0	4.454.039	-1.817.999
Mayo	26.803.098	3.450.000	165.000.000	30.253.098	1.570.000	S/I	2.640.000	0	4.210.000	26.043.098
Junio	18.665.420	2.670.000	169.000.000	21.335.420	1.660.000	S/I	2.720.000	0	4.380.000	16.955.420
Julio	22.213.571	1.630.000	169.000.000	23.843.571	1.570.000	S/I	2.636.040	0	4.206.040	19.637.531
Agosto	15.475.140	2.156.785	168.000.000	17.631.925	1.603.940	S/I	2.636.040	0	4.239.980	13.391.945
Septiembre	24.826.762	1.982.863	163.000.000	26.809.625	1.646.199	S/I	2.640.000	0	4.286.199	22.523.426
Octubre	14.644.873	2.440.000	157.000.000	17.084.873	1.580.000	S/I	2.636.040	0	4.216.040	12.868.833
Noviembre	8.094.122	518.242	154.000.000	8.612.364	1.584.890	S/I	2.636.040	0	4.220.930	4.391.434
Diciembre	4.748.693	446.095	153.000.000	5.194.788	1.587.269	S/I	2.636.040	0	4.223.309	971.479
Total	144.937.047	15.459.907	1.917.000.000	167.681.664	21.993.728	-	31.976.240	0	53.969.968	113.711.696

Fuente. Elaboración propia. Datos tomados de la base de datos diaria del balance hídrico para el embalse Pao-Cachinche. HIDROCENTRO

S/I: Sin Información



Gráfica 20. Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 1983. Elaboración propia a partir del balance hídrico del embalse

En la Gráfica 20 se observa que, en general, las extracciones o salidas totales del embalse mostraron una tendencia lineal a lo largo del año 1983 ya que las mismas estuvieron constituidas solo por las variables de evaporación y bombeo. Asimismo, las entradas totales al embalse mostraron una tendencia cíclica e irregular marcadamente diferenciada entre los períodos seco (enero a abril) y lluvioso (mayo a noviembre).

Balance hídrico año 1984. En la Tabla 18 se observa que el volumen neto de agua aportada al embalse por los ríos afluentes muestra una tendencia cíclica y regular a lo largo de todo el año, cuyo valor máximo se alcanza en agosto: 24.162.000 m³ mientras que el menor aporte fue de 3.225.000 m³, registrado en noviembre. Para el mes de enero no existen registros de lluvias ni evaporación en el embalse.

Por otra parte, aun cuando el aporte neto muestra una tendencia cíclica e irregular durante todo el año y las lluvias estuvieron presentes a lo largo del mismo, lo anterior no significó un aumento de las entradas totales al embalse con

respecto a 1983. De hecho, la entrada total en 1983 fue de 167.680.000 m³ mientras que en 1984 fue de 140.586.000 m³.

Respecto a la evaporación en el embalse, la misma muestra una tendencia decreciente de enero a julio (ver Tabla 18), mes a partir del cual la tendencia se revierte debido a la ocurrencia del período lluvioso. El volumen almacenado en el embalse muestra una tendencia decreciente durante los primeros seis meses del año y a partir de julio se revierte dicha tendencia.

El volumen almacenado muestra una tendencia decreciente durante los primeros seis meses del año, el cual inicia con 153.000.000 m³ en enero y alcanza los 123.000.000 m³ en julio; dicha disminución corresponde al período seco, caracterizado por el ingreso de un menor aporte proveniente de los ríos afluentes y una baja ocurrencia de lluvias en el embalse.

Al igual que en 1983, durante todo el año no hubo alivio en el embalse ni se registró el gasto ecológico, cuya descarga al cauce sería de 600 u 800 LPS diarios. El balance hídrico neto fue de ganancia ya que las entradas totales superan a las salidas totales (ver Tabla 18).

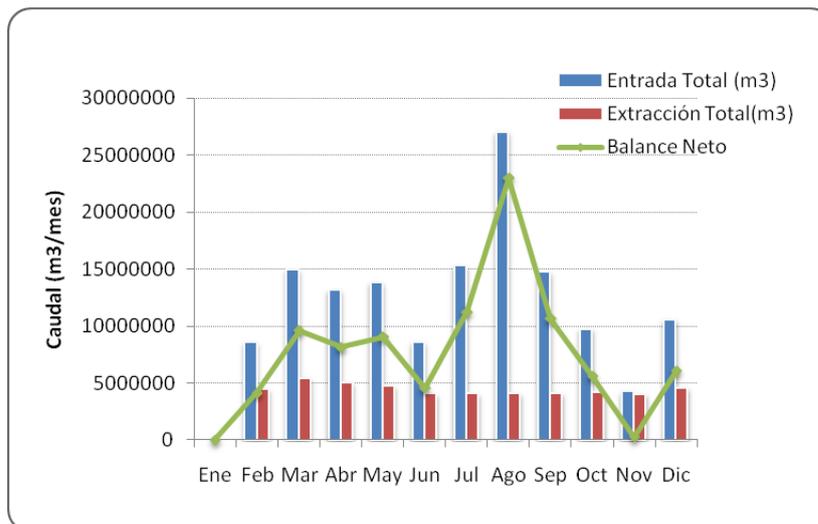
En la Gráfica 21 se muestra el comportamiento de las entradas y salidas totales en el embalse durante el 1984, donde se observa que las entradas mostraron una tendencia cíclica e irregular durante todo el año, siendo el valor máximo el alcanzado en agosto, ingresando al embalse alrededor de 27 millones de metros cúbicos de agua. Asimismo, las salidas totales a lo largo del año muestran una tendencia casi lineal, por cuanto las mismas solo toman en cuenta a la evaporación y el bombeo, por no existir alivio ni gasto ecológico durante el año.

Tabla 18. Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 1984

Mes	Aporte Ríos(m³)	Lluvia en el embalse (m³)	Volumen almacenado (m³)	Entrada Total (m³)	Evaporación (m³)	Gasto ecológico (m³)	Bombeo (m³)	Alivio (m³)	Extracción Total(m³)	Balance neto (m³)
Enero	S/I	S/I	153.000.000	S/I	S/I	S/I	2.720.000	0	S/I	-
Febrero	8.543.947	8.281	150.000.000	8.552.228	1.972.792	S/I	2.460.304	0	4.433.096	4.119.132
Marzo	14.976.472	0	142.000.000	14.976.472	2.680.000	S/I	2.720.000	0	5.400.000	9.576.472
Abril	12.514.206	636.128	134.000.000	13.150.334	2.380.277	S/I	2.636.040	0	5.016.317	8.134.017
Mayo	13.314.620	480.000	127.000.000	13.794.620	2.030.000	S/I	2.720.000	0	4.750.000	9.044.620
Junio	5.908.615	2.668.533	122.000.000	8.577.148	1.406.823	S/I	2.636.040	0	4.042.863	4.534.285
Julio	13.166.837	2.100.000	126.000.000	15.266.837	1.320.000	S/I	2.720.000	0	4.040.000	11.226.837
Agosto	24.161.892	2.860.000	146.000.000	27.021.892	1.410.000	S/I	2.636.040	0	4.046.040	22.975.852
Septiembre	12.878.431	1.834.833	151.000.000	14.713.264	1.450.000	S/I	2.636.040	0	4.086.040	10.627.224
Octubre	8.880.952	860.000	152.000.000	9.740.952	1.530.000	S/I	2.640.000	0	4.170.000	5.570.952
Noviembre	3.225.068	1.012.586	152.000.000	4.237.654	1.370.000	S/I	2.636.040	0	4.006.040	231.614
Diciembre	10.204.730	350.000	149.000.000	10.554.730	1.900.000	S/I	2.636.040	0	4.536.040	6.018.690
Total	127.775.770	12.810.361	1.704.000.000	140.586.131	19.449.892	-	31.796.544	0	48.526.436	92.059.695

Fuente. Elaboración propia. Datos tomados de la base de datos diaria del balance hídrico para el embalse Pao-Cachinche. HIDROCENTRO

S/I: Sin Información



Gráfica 21. Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 1984. Elaboración propia a partir del balance hídrico del embalse

Balance hídrico año 1985. Durante este año el aporte neto al embalse proveniente de los ríos afluentes se incrementó en más de 85 millones de metros cúbicos (que representa alrededor del 40 por ciento) ya que pasó de 127.775.770 m³ en 1984 a 214.491.838 m³ en 1985 (ver Tabla 19). Asimismo, la serie de tiempo del aporte muestra una tendencia cíclica e irregular a lo largo de todo el año.

Durante todo el año se registraron lluvias en el embalse, con excepción del mes de enero, siendo el valor máximo el alcanzado en agosto: 2.450.000 m³ que junto a los más de 35 millones de metros cúbicos de agua provenientes de los afluentes, constituyen la mayor entrada al embalse, de alrededor de 39.389.190 m³. La menor cantidad de lluvia se registró en noviembre, la misma fue de 8.134.347 m³, asimismo fue el mes donde entró menos agua al embalse ya que se registró el menor aporte por ríos: alrededor de 6.900.000 m³.

El volumen almacenado en el embalse muestra una tendencia cíclica e irregular debido a la ocurrencia de los períodos seco y lluvioso; así se tiene que de enero a abril (período seco) el volumen total en el embalse disminuye unos 35 millones de

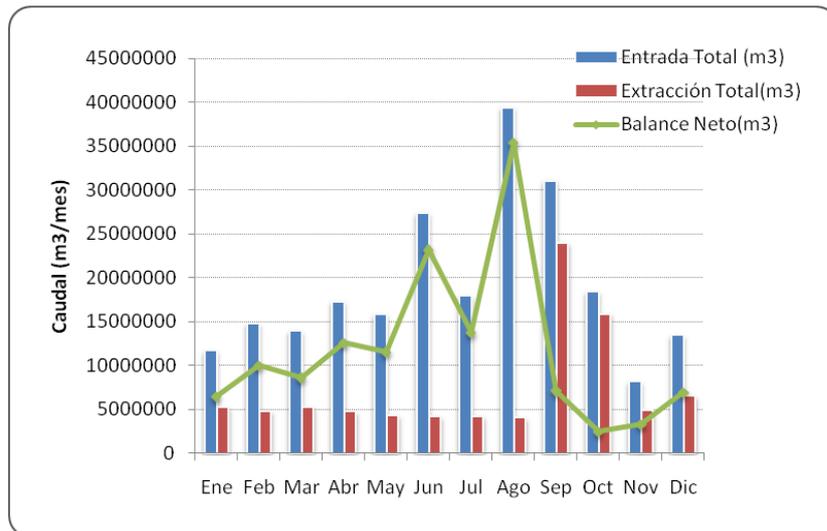
metros cúbicos al pasar de 168 millones a 133 millones de metros cúbicos, registrándose durante esos meses una alta evaporación, siendo la máxima alcanzada de 2.580.000 m³ durante el mes de marzo. Entre mayo a septiembre (período lluvioso), el volumen almacenado se incrementa en unos 46 millones de metros cúbicos, al pasar de 137 millones a 183 millones de metros cúbicos, período durante el cual la evaporación disminuye un 10 por ciento (unos 160.000 m³) tal como se muestra en la Tabla 19. De octubre y hasta diciembre el volumen desciende de 182 millones a 180 millones de metros cúbicos.

Al igual que en los años 1983 y 1984, se mantiene la condición de la válvula de descarga al cauce del río Pao, por lo que no se registra gasto ecológico durante todo el año. Respecto al bombeo, el mismo se mantiene constante durante todo el año, siendo el caudal diario de 1020 LPS. Se bombearon un total de aproximadamente 33 millones de metros cúbicos de agua desde el embalse hacia la planta potabilizadora Alejo Zuloaga.

Tal como se observa en la Tabla 19, a partir de septiembre el embalse comienza a aliviar como resultado de una marcada estación lluviosa caracterizada por el incremento del aporte de agua proveniente de los ríos afluentes así como de las lluvias en el embalse. El balance neto en 1985 registró una ganancia total superior a los 140 millones de metros cúbicos de agua, donde las entradas totales fueron de alrededor de 220 millones de metros cúbicos frente a los 140 millones de metros cúbicos que ingresaron en 1984. Las salidas netas en el embalse totalizaron más de 87 millones de metros cúbicos.

En la Gráfica 22 se observa una tendencia creciente de las entradas desde enero hasta agosto mientras que las salidas mantienen una tendencia casi lineal hasta agosto ya que en el mes de septiembre se alcanza el pico de 23.942.818 m³ de agua por el alivio de más de 18 millones de metros cúbicos. Entre agosto y

septiembre las salidas se incrementaron un 83 por ciento, ya que pasan de 4 millones de metros cúbicos a alrededor de 24 millones de metros cúbicos.



Gráfica 22. Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 1985. Elaboración propia a partir del balance hídrico del embalse

Tabla 19. Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 1985

Mes	Aporte Ríos (m³)	Lluvia en el embalse (m³)	Volumen almacenado (m³)	Entrada Total (m³)	Evaporación (m³)	Gasto ecológico (m³)	Bombeo (m³)	Alivio (m³)	Extracción Total(m³)	Balance neto (m³)
Enero	11.674.924	0	168.000.000	11.674.924	2.490.000	S/I	2.720.000	0	5.210.000	6.464.924
Febrero	14.734.517	73.710	156.000.000	14.808.227	2.341.844	S/I	2.460.304	0	4.802.148	10.006.079
Marzo	13.736.271	170.000	143.000.000	13.906.271	2.580.000	S/I	2.720.000	0	5.300.000	8.606.271
Abril	15.543.937	1.749.552	133.000.000	17.293.489	2.080.000	S/I	2.636.040	0	4.716.040	12.577.449
Mayo	14.165.151	1.650.000	137.000.000	15.815.151	1.550.000	S/I	2.720.000	0	4.270.000	11.545.151
Junio	25.945.460	1.410.000	137.000.000	27.355.460	1.520.000	S/I	2.640.000	0	4.160.000	23.195.460
Julio	16.116.360	1.860.000	139.000.000	17.976.360	1.510.000	S/I	2.720.000	0	4.230.000	13.746.360
Agosto	36.939.190	2.450.000	160.000.000	39.389.190	1.390.000	S/I	2.636.040	0	4.026.040	35.363.150
Septiembre	29.574.997	1.477.991	183.000.000	31.052.988	2.340.000	S/I	2.636.040	18.966.778	23.942.818	7.110.170
Octubre	16.976.712	1.390.000	182.000.000	18.366.712	1.800.000	S/I	2.640.000	11.442.346	15.882.346	2.484.366
Noviembre	6.899.736	1.234.611	180.000.000	8.134.347	1.710.000	S/I	2.636.040	500.000	4.846.040	3.288.307
Diciembre	12.184.583	1.260.000	180.000.000	13.444.583	1.740.000	S/I	2.720.000	2.074.816	6.534.816	6.909.767
Total	214.491.838	14.725.864	1.898.000.000	229.217.702	23.051.844	-	31.884.464	32.983.940	87.920.248	141.297.454

Fuente. Elaboración propia. Datos tomados de la base de datos diaria del balance hídrico para el embalse Pao-Cachinche. HIDROCENTRO

S/I: Sin Información

Balance hídrico año 1986. El aporte neto muestra a lo largo del año una tendencia cíclica e irregular cuyo valor máximo es de 53.573.259 m³ registrado en el mes de septiembre, siendo el aporte total de 264.939.598 m³ (ver Tabla 20). En cuanto a la lluvia caída en el embalse, el total registrado es de alrededor de 12.611.941 m³, mientras que en 1985 fue de 14.725.864 m³, lo que significa una disminución del 14 por ciento con respecto a 1985. Sin embargo esta disminución no incidió en las entradas totales, las cuales al contrario aumentaron alrededor del 17 por ciento, al pasar de 229.217.702 m³ en 1985 a 277.551.539 m³ en 1986, debido al aumento del aporte de agua proveniente de los ríos afluentes al embalse.

En la Tabla 20 se observa que entre enero a abril disminuye el volumen almacenado en el embalse, el cual registra alrededor de 170 millones de metros cúbicos en enero y 133 millones de metros cúbicos en abril, período que corresponde a la estación seca; mientras que de mayo a octubre se eleva en aproximadamente 45 millones de metros cúbicos el volumen almacenado, al pasar de 140 millones de metros cúbicos en mayo hasta alcanzar 185 millones de metros cúbicos en septiembre. Asimismo, durante los primeros cuatro meses del año (enero-abril) se registra la mayor evaporación en el embalse (superiores a los 2 millones de metros cúbicos), disminuyendo alrededor del 46 por ciento (aproximadamente 1.200.000 m³) de mayo a noviembre, por la ocurrencia de la estación lluviosa.

No hay registros del gasto ecológico en el embalse, sin embargo el mismo estuvo entre los 600 u 800 LPS diarios, según información de la operadora. Asimismo, el caudal de bombeo, tal como se observa en la Tabla 20, mostró un comportamiento análogo al observado en 1985, es decir, fue constante durante todo el año, en alrededor de 1020 LPS.

Tabla 20. Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 1986

Mes	Aporte Ríos (m³)	Lluvia en el embalse (m³)	Volumen almacenado (m³)	Entrada Total (m³)	Evaporación (m³)	Gasto ecológico (m³)	Bombeo (m³)	Alivio (m³)	Extracción Total(m³)	Balance neto (m³)
Enero	13.629.025	0	170.000.000	13.629.025	2.030.000	S/I	2.720.000	0	4.750.000	8.879.025
Febrero	12.662.152	0	159.000.000	12.662.152	2.191.975	S/I	2.460.304	0	4.652.279	8.009.873
Marzo	13.748.438	210.000	146.000.000	13.958.438	2.750.000	S/I	2.720.000	0	5.470.000	8.488.438
Abril	13.462.760	234.900	133.000.000	13.697.660	2.200.000	S/I	2.636.040	0	4.836.040	8.861.620
Mayo	20.161.741	1.630.000	140.000.000	21.791.741	1.650.000	S/I	2.720.000	0	4.370.000	17.421.741
Junio	30.103.329	2.040.000	164.000.000	32.143.329	1.480.000	S/I	2.640.000	0	4.120.000	28.023.329
Julio	17.983.857	2.300.000	182.000.000	20.283.857	1.590.000	S/I	2.720.000	10.909.051	15.219.051	5.064.806
Agosto	27.854.148	3.350.000	183.000.000	31.204.148	1.580.000	S/I	2.720.000	22.210.866	26.510.866	4.693.282
Septiembre	53.573.259	997.041	185.000.000	54.570.300	1.580.000	S/I	2.636.040	48.600.667	52.816.707	1.753.593
Octubre	39.400.000	1.800.000	185.000.000	41.200.000	1.630.000	S/I	2.640.000	38.884.440	43.154.440	-1.954.440
Noviembre	15.471.749	0	182.000.000	15.471.749	1.630.000	S/I	2.636.040	12.087.537	16.353.577	-881.828
Diciembre	6.889.140	50.000	179.000.000	6.939.140	1.700.000	S/I	2.636.040	524.029	4.860.069	2.079.071
Total	264.939.598	12.611.941	2.008.000.000	277.551.539	22.011.975	-	31.884.464	133.216.590	187.113.029	90.438.510

Fuente. Elaboración propia. Datos tomados de la base de datos diaria del balance hídrico para el embalse Pao-Cachinche. HIDROCENTRO

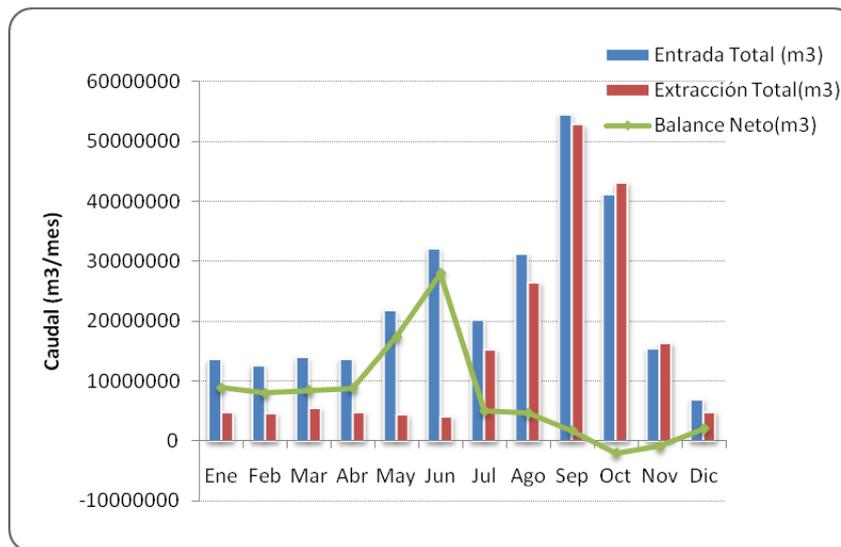
S/I: Sin Información

En la Tabla 20 se observa que el embalse comienza a aliviar a partir de julio, siendo la cantidad aliviada de alrededor de 10.909.051 m³. Las descargas a través del aliviadero se incrementan hasta el mes de septiembre, donde se registra el mayor volumen de entrada al embalse: 54.570.300 m³, iniciándose una disminución debido a la finalización del período lluvioso.

El balance neto en el embalse para 1986 fue de ganancia ya que al final del año ingresó un volumen total de 90.438.5190 m³, con excepción de los meses de octubre y noviembre donde la salida superó a la entrada (ver Gráfica 23), lo que significó una pérdida de alrededor de 1.954.440 m³ en octubre y 881.828 m³ en noviembre debido a la extracción por bombeo de 3.960 m³ más en octubre con respecto al mes anterior y a la disminución de las entradas en noviembre, que significó alrededor de 25 millones de metros cúbicos de agua que dejaron de ingresar al embalse respecto al mes de octubre.

Si se comparan la ganancia neta entre 1985 y 1986 se observa que la misma disminuyó un 36 por ciento (alrededor de 50.858.944 m³), debido a que la extracción total del embalse en 1986 aumento en más del 50 por ciento (casi 100 millones de metros cúbicos) respecto a 1985, la razón de tal disminución puede ser atribuida al mayor alivio de agua del embalse como resultado del incremento del aporte neto.

En la Gráfica 23 se observa que las entradas totales en 1986 muestran una tendencia creciente hasta el mes de septiembre mientras que las salidas durante ese mismo período mantienen una tendencia casi lineal, superando las entradas en más del 50 por ciento a las salidas; sin embargo, a partir de julio se reduce la diferencia entre las entradas y las salidas, siendo estas últimas superiores en octubre y noviembre.



Gráfica 23. Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 1986. Elaboración propia a partir del balance hídrico del embalse

Balance hídrico año 1987. El aporte neto de los ríos afluentes al embalse muestra una tendencia decreciente de enero a junio mientras que de julio a octubre se registran los mayores aportes, siendo el máximo el alcanzado en agosto, de alrededor de 27 millones de metros cúbicos. El aporte total en 1987 fue de 168.381.420 m³ (ver Tabla 21), que al ser comparado con el aporte total proveniente en 1986, representa una disminución de alrededor de 97 millones de metros cúbicos de agua.

A excepción de febrero y marzo, en el resto del año se registraron lluvias en el embalse, sin embargo el total disminuyó en aproximadamente 1.400.000 m³ con respecto a 1986, ya que en ese año se contabilizaron, de acuerdo a la Tabla 21, 12.611.941 m³ frente a los 11.127.418 m³ de lluvia registrada en el embalse en 1987. Asimismo, las entradas totales disminuyeron en más de 98 millones de metros cúbicos debido al menor aporte de agua proveniente de los afluentes así como de la menor cantidad de lluvia registrada en el embalse, lo que hace inferir que se trata de un año mucho más seco que 1986.

Tabla 21. Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 1987

Mes	Aporte Ríos (m³)	Lluvia en el embalse (m³)	Volumen almacenado (m³)	Entrada Total (m³)	Evaporación (m³)	Gasto ecológico (m³)	Bombeo (m³)	Alivio (m³)	Extracción Total(m³)	Balance neto (m³)
Enero	11.472.747	550.000	172.000.000	12.022.747	2.150.000	S/I	2.720.000	0	4.870.000	7.152.747
Febrero	10.651.775	0	162.000.000	10.651.775	2.401.120	S/I	2.460.304	0	4.861.424	5.790.351
Marzo	13.275.616	0	151.000.000	13.275.616	2.670.000	S/I	2.720.000	0	5.390.000	7.885.616
Abril	12.677.716	612.258	140.000.000	13.289.974	2.460.000	S/I	2.636.040	0	5.096.040	8.193.934
Mayo	7.813.802	1.810.000	133.000.000	9.623.802	1.510.000	S/I	2.720.000	0	4.230.000	5.393.802
Junio	8.320.585	1.550.645	135.000.000	9.871.230	1.410.000	S/I	2.636.040	0	4.046.040	5.825.190
Julio	14.376.696	1.280.000	138.000.000	15.656.696	1.310.000	S/I	2.720.000	0	4.030.000	11.626.696
Agosto	26.909.225	2.040.000	158.000.000	28.949.225	1.570.000	S/I	2.636.040	0	4.206.040	24.743.185
Septiembre	21.753.983	1.585.855	178.000.000	23.339.838	1.870.000	S/I	2.636.040	4.213.953	8.719.993	14.619.845
Octubre	20.684.914	720.000	182.000.000	21.404.914	1.820.000	S/I	2.640.000	15.514.689	19.974.689	1.430.225
Noviembre	9.552.341	778.690	181.000.000	10.331.031	1.730.000	S/I	2.636.040	2.588.998	6.955.038	3.375.993
Diciembre	10.892.020	200.000	178.000.000	11.092.020	1.880.000	S/I	2.720.000	914.537	5.514.537	5.577.483
Total	168.381.420	11.127.448	1.908.000.000	179.508.868	22.781.120	-	31.880.504	23.232.177	77.893.801	101.615.067

Fuente. Elaboración propia. Datos tomados de la base de datos diaria del balance hídrico para el embalse Pao-Cachinche. HIDROCENTRO
S/I: Sin Información

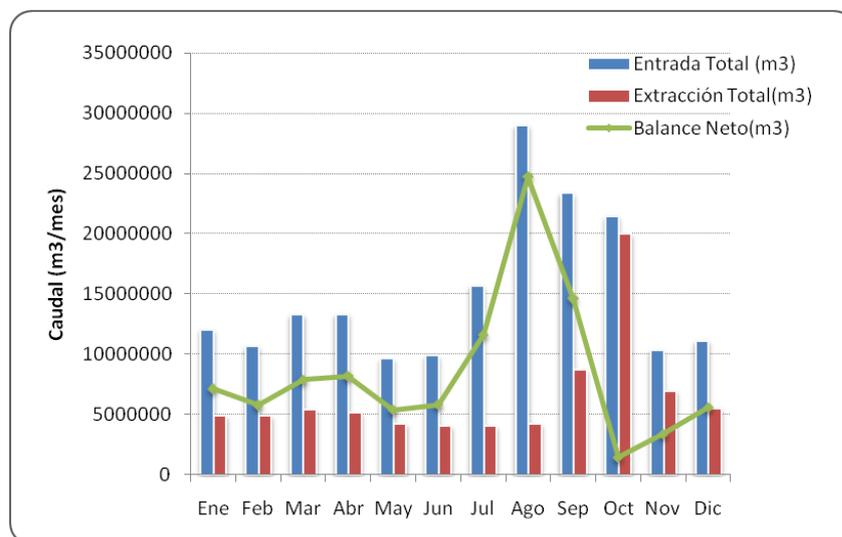
El volumen almacenado muestra una tendencia decreciente durante los primeros cinco meses del año, al pasar de 172 millones de metros cúbicos en enero a 133 millones de metros cúbicos en mayo. A partir del mes de agosto (que registra el mayor aporte de los afluentes) comienza a incrementar el volumen almacenado, siendo el nivel máximo el alcanzado en octubre, de 182 millones de metros cúbicos.

La evaporación muestra durante todo el año una tendencia cíclica e irregular, que coincide con las estaciones seca y lluviosa; se registran las mayores tasas de evaporación de enero a abril, donde la evaporación promedio supera los dos millones de metros cúbicos mensuales y el valor máximo de 2.670.000 m³ se alcanza en marzo. La llegada de la época de lluvia entre mayo a diciembre, disminuye la tasa de evaporación, donde la mínima evaporación se registra en julio, de aproximadamente 1.310.000 m³.

Al igual que en los años precedentes, no hay registros del gasto ecológico en el embalse, el cual se habría mantenido entre los 600 u 800 LPS diarios, según información de la operadora. Asimismo, el caudal de bombeo, tal como se observa en la Tabla 21, mostró un comportamiento análogo al observado entre 1985 y 1986, es decir, fue constante durante todo el año, en alrededor de 1020 LPS diarios.

El embalse comienza a aliviar a partir de septiembre, con un máximo de 15.514.689 m³ registrado en octubre, siendo para este mes el volumen almacenado de 181 millones de metros cúbicos. En cuanto al balance neto, este fue de ganancia ya que las entradas superaron en más de 100 millones de metros cúbicos a las salidas del embalse.

En la Gráfica 24 se observa que la tendencia de las entradas totales al embalse es creciente, alcanzando el volumen pico en agosto, debido a que en ese mes ingresa el mayor volumen de agua proveniente de los afluentes (alrededor de 27 millones de metros cúbicos). Asimismo, las salidas mantienen una tendencia casi lineal hasta agosto, alcanzando en octubre la extracción máxima: más de 20 millones de metros cúbicos, ya que en ese mes se alivia la mayor cantidad de agua del embalse: aproximadamente 15 millones de metros cúbicos.



Gráfica 24. Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 1987. Elaboración propia a partir del balance hídrico del embalse

Balance hídrico año 1988. El aporte neto al embalse muestra una tendencia creciente a lo largo del año, siendo el mínimo 9.520.509 m³ registrado en diciembre y el máximo de 75.498.603 m³ registrado en septiembre. El aporte total fue de alrededor de 317 millones de metros cúbicos que respecto a 1987 representa un aumento de 40 por ciento ya que al embalse ingresaron en 1988 más de 148 millones de metros cúbicos.

Entre junio a agosto se registraron las mayores cantidades de lluvia en el embalse, período que corresponde a la estación lluviosa, siendo el volumen total al final del año, de alrededor de 16 millones de metros cúbicos (ver Tabla 22), lo que representa 33 por ciento de aumento con respecto a 1987, año que registró en total más de cinco millones de metros cúbicos de lluvia sobre el embalse.

El volumen almacenado muestra una tendencia decreciente de enero a mayo (período seco), pues pasa de 167 a 111 millones de metros cúbicos y asciende entre junio a septiembre, mes en el que alcanza el pico de 186 millones de metros cúbicos. En la Tabla 22 se observa que la evaporación promedio mensual de enero a mayo es superior a dos millones de metros cúbicos, que junto al bombeo constante de 1020 LPS diarios hacia la Planta Potabilizadora Alejo Zuloaga, pudo haber influido en el descenso del volumen almacenado en el embalse durante el período seco. Durante los meses de junio a diciembre (período lluvioso) la evaporación promedio mensual es de alrededor de 1.200 millones de metros cuadrados con un valor máximo alcanzado en abril de 3.200.000 m³.

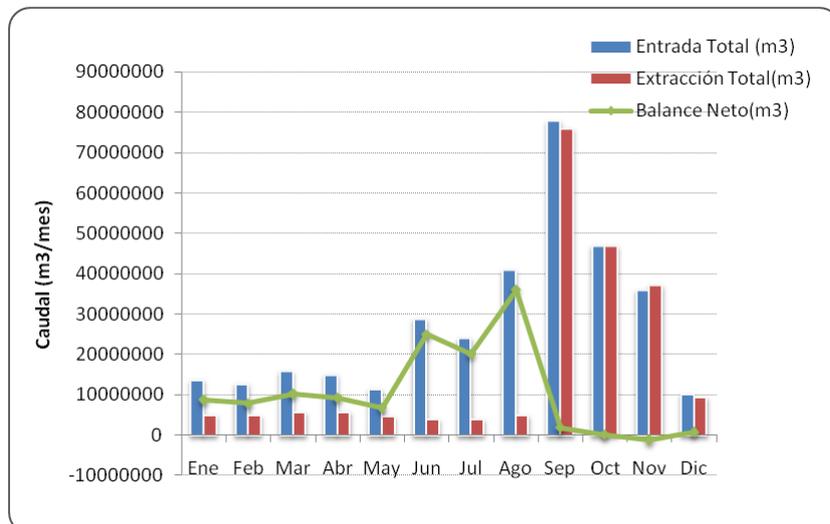
Como en años anteriores, no hay registros del gasto ecológico en el embalse, el cual se habría mantenido entre los 600 u 800 LPS diarios, según información de la operadora. Asimismo, el caudal de bombeo, tal como se observa en la Tabla 22, mostró un comportamiento análogo al observado a partir de 1985, pues se mantuvo durante todo el año en alrededor de 1020 LPS diarios.

El embalse alivia a partir de agosto, alcanzando en septiembre el pico de 71 millones de metros cúbicos, el volumen almacenado ese mes es de 167 millones de metros cúbicos. En la Tabla 22 se observa que solo en noviembre el balance neto es negativo (las salidas superan a las entradas en alrededor de 1.200.000 m³), lo cual puede ser debido tanto a la disminución del aporte neto respecto al mes de octubre como a la poca variación del almacenamiento con respecto al mes

anterior, pues en septiembre se extrajo casi lo mismo que entró, siendo la ganancia en ese mes de apenas 59.055 m³.

La Gráfica 25 muestra que las entradas totales poseen una tendencia ascendente hasta septiembre, mes en el que se registra la entrada máxima de 77 millones de metros cúbicos. Las salidas mantienen una tendencia casi lineal hasta agosto, mes a partir del cual comienza a aliviar el embalse. De agosto a septiembre las salidas del embalse se incrementan en más del 90 por ciento y superan a las entradas, por el ingreso de más de 36 millones de metros cúbicos entre tales meses.

De acuerdo al balance hídrico, el embalse ganó en 1988 alrededor de 125 millones de metros cúbicos de agua que comparado con los 100 millones ganados en 1987 representa un aumento de aproximadamente 23 millones de metros cúbicos de agua.



Gráfica 25. Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 1988. Elaboración propia a partir del balance hídrico del embalse

Tabla 22. Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 1988

Mes	Aporte Ríos (m³)	Lluvia en el embalse (m³)	Volumen almacenado (m³)	Entrada Total (m³)	Evaporación (m³)	Gasto ecológico (m³)	Bombeo (m³)	Alivio (m³)	Extracción Total(m³)	Balance neto (m³)
Enero	13.756.777	0	167.000.000	13.756.777	2.340.000	S/I	2.720.000	0	5.060.000	8.696.777
Febrero	12.369.297	417.380	154.000.000	12.786.677	2.475.249	S/I	2.460.304	0	4.935.553	7.851.124
Marzo	15.856.748	0	140.000.000	15.856.748	2.980.000	S/I	2.720.000	0	5.700.000	10.156.748
Abril	15.023.852	0	124.000.000	15.023.852	3.200.000	S/I	2.636.040	0	5.836.040	9.187.812
Mayo	10.856.688	590.000	111.000.000	11.446.688	2.010.000	S/I	2.720.000	0	4.730.000	6.716.688
Junio	26.330.044	2.520.000	113.000.000	28.850.044	1.260.000	S/I	2.640.000	0	3.900.000	24.950.044
Julio	21.499.822	2.570.000	136.000.000	24.069.822	1.270.000	S/I	2.720.000	0	3.990.000	20.079.822
Agosto	37.560.000	3.350.000	167.000.000	40.910.000	1.610.000	S/I	2.720.000	571.525	4.901.525	36.008.475
Septiembre	75.498.603	2.288.086	186.000.000	77.786.689	1.760.000	S/I	2.636.040	71.578.834	75.974.874	1.811.815
Octubre	45.315.555	1.650.000	184.000.000	46.965.555	1.780.000	S/I	2.720.000	42.406.500	46.906.500	59.055
Noviembre	33.435.520	2.587.370	184.000.000	36.022.890	1.560.000	S/I	2.636.040	33.026.191	37.222.231	-1.199.341
Diciembre	9.520.509	650.000	181.000.000	10.170.509	1.700.000	S/I	2.720.000	5.042.199	9.462.199	708.310
Total	317.023.415	16.622.836	1.847.000.000	333.646.251	23.945.249	-	32.048.424	152.625.249	208.618.922	125.027.329

Fuente. Elaboración propia. Datos tomados de la base de datos diaria del balance hídrico para el embalse Pao-Cachinche. HIDROCENTRO

S/I: Sin Información

Balance hídrico año 1989. El aporte total de los afluentes al embalse fue de 133.426.597 m³ que al compararse con el mismo aporte para 1988 de 317.023.415 m³, constituye una disminución superior al 80 por ciento debido a que dejaron de ingresar al embalse alrededor de 180 millones de metros cúbicos respecto al año anterior. De la Tabla 24 se observa que el mayor aporte proveniente de los afluentes se registra en septiembre con 15.842.352 m³ mientras que el mínimo aporte ocurre en febrero con 8.402.052 m³.

Al igual que el aporte neto de los afluentes al embalse, el volumen total de lluvia registrado en 1989 disminuyó con respecto a 1988 al pasar de 16.622.836 m³ a 15.671.815 m³, debido a que durante el período seco (aproximadamente de enero a abril) la precipitación acumulada fue de 250.000 m³. Con la llegada del período de lluvias (entre mayo a octubre) se eleva la cantidad de lluvia en el embalse, alcanzando el máximo en noviembre, cuando precipitan más de cuatro millones de metros cúbicos de agua sobre el embalse.

El volumen de agua almacenada en el embalse muestra una tendencia decreciente entre enero a julio, al pasar de 179 a 138 millones de metros cúbicos de agua (correspondiente al período seco) debido a la combinación de la disminución de más del 80 por ciento del aporte de los afluentes, la escasa lluvia registrada en el embalse (apenas 250.000 m³) y el bombeo constante hacia la PTAB de 1020 LPS diarios durante todo el año. A partir de agosto comienza a ascender el volumen almacenado ya que aumenta de forma sostenida el aporte de los ríos afluentes, con un volumen mensual superior a los 10 millones de metros cúbicos y las extracciones mensuales no varían más del 10 por ciento.

Tabla 23. Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 1989

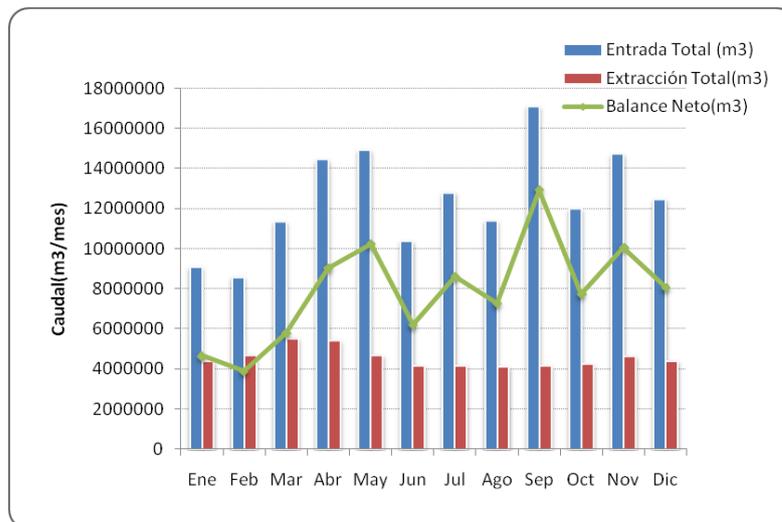
Mes	Aporte Ríos (m³)	Lluvia en el embalse (m³)	Volumen almacenado (m³)	Entrada Total (m³)	Evaporación (m³)	Gasto ecológico (m³)	Bombeo (m³)	Alivio (m³)	Extracción Total(m³)	Balance neto (m³)
Enero	9.009.654	70.000	179.000.000	9.079.654	980.000	S/I	2.720.000	722.740	4.422.740	4.656.914
Febrero	8.402.052	179.740	173.000.000	8.581.792	2.227.562	S/I	2.460.304	0	4.687.866	3.893.926
Marzo	11.337.690	0	166.000.000	11.337.690	2.810.000	S/I	2.720.000	0	5.530.000	5.807.690
Abril	14.433.778	0	154.000.000	14.433.778	2.770.000	S/I	2.636.040	0	5.406.040	9.027.738
Mayo	12.012.238	2.890.000	143.000.000	14.902.238	1.970.000	S/I	2.720.000	0	4.690.000	10.212.238
Junio	8.426.879	1.930.000	139.000.000	10.356.879	1.520.000	S/I	2.640.000	0	4.160.000	6.196.879
Julio	10.363.247	2.430.000	138.000.000	12.793.247	1.470.000	S/I	2.720.000	0	4.190.000	8.603.247
Agosto	10.273.044	1.120.000	142.000.000	11.393.044	1.480.000	S/I	2.636.040	0	4.116.040	7.277.004
Septiembre	15.842.352	1.242.586	150.000.000	17.084.938	1.540.000	S/I	2.636.040	0	4.176.040	12.908.898
Octubre	10.579.589	1.410.000	158.000.000	11.989.589	1.610.000	S/I	2.640.000	0	4.250.000	7.739.589
Noviembre	10.329.838	4.369.489	157.000.000	14.699.327	2.000.000	S/I	2.636.040	0	4.636.040	10.063.287
Diciembre	12.426.236	30.000	149.000.000	12.456.236	1.760.000	S/I	2.636.040	0	4.396.040	8.060.196
Total	133.436.597	15.671.815	1.848.000.000	149.108.412	22.137.562	-	31.800.504	722.740	54.660.806	94.447.606

Fuente. Elaboración propia. Datos tomados de la base de datos diaria del balance hídrico para el embalse Pao-Cachinche. HIDROCENTRO
S/I: Sin Información

La evaporación mensual en el embalse muestra una tendencia cíclica e irregular a lo largo del año ya que, entre febrero a abril y luego de julio a noviembre se mantiene por encima de los dos millones de metros cúbicos, sólo entre mayo a octubre se ubica por debajo de los 1.900.000 m³. La evaporación total en el año fue de alrededor de 22 millones de metros cúbicos, que respecto al año anterior representa una disminución del ocho por ciento (unos 1.800.000 m³) ya que en 1988 la misma fue de 23.945.249 m³.

Al igual que en 1988, no hay registros del gasto ecológico en el embalse, sin embargo el mismo se mantendría entre los 600 u 800 LPS diarios, según información suministrada por la operadora. En cuanto al caudal de bombeo, tal como se observa en la Tabla 23, la tendencia es análoga a la registrada desde 1985, pues se mantuvo durante todo el año en alrededor de 1020 LPS diarios.

El embalse alivia sólo en el mes de enero siendo el volumen de alrededor de 700.000 m³ de agua, volumen remanente del mes de diciembre cuando el mismo descarga más de cinco millones de metros cúbicos. En cuanto al balance hídrico, este fue de ganancia ya que las entradas totales en todo el año superaron en más de 94 millones de metros cúbicos a las salidas del embalse; así se observa en la Tabla 23 que las entradas totalizaron alrededor de 12 millones de metros cúbicos mientras que las salidas totales fueron superiores a los 54 millones de metros cúbicos. La Gráfica 26 muestra que mientras las entradas mensuales mantienen una tendencia cíclica e irregular durante todo el año, las salidas por el contrario mostraron poca variabilidad ya que las variables de gasto ecológico, alivio y bombeo permanecen casi invariables.



Gráfica 26. Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 1989. Elaboración propia a partir del balance hídrico del embalse

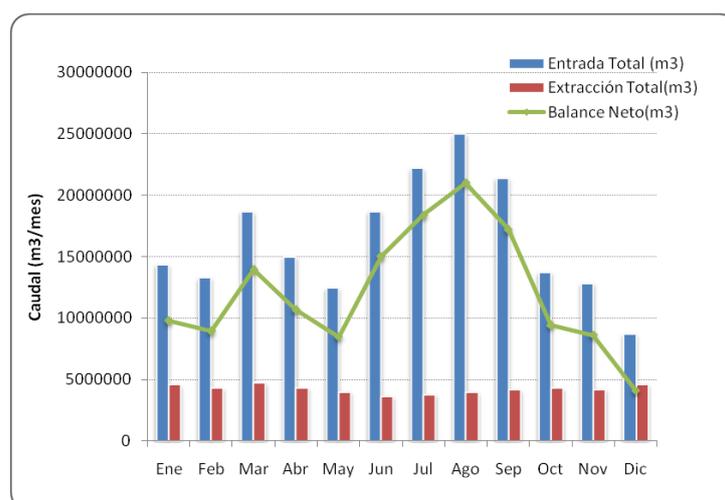
Balance hídrico año 1990. El aporte neto proveniente de los afluentes al embalse aumenta con respecto a 1989 en alrededor de 50 millones de metros cúbicos de agua, ya que pasa de 133 a 183 millones de metros cúbicos, respectivamente. El máximo aporte se registra en agosto: 22.793.576 m³ y el mínimo en diciembre: 8.686.594 m³ (ver Tabla 24). Por otra parte, aunque llovió prácticamente durante todo el año en el embalse (a excepción de diciembre), al comparar el total registrado en 1989 se observa que dejaron de llover alrededor de 12 millones de metros cúbicos, para ese año se totalizaron aproximadamente 15 millones de metros cúbicos de lluvia frente a los 12 millones de metros cúbicos totalizados en 1990.

El volumen almacenado en el embalse disminuye de 136 a 88 millones de metros cúbicos entre enero a junio, respectivamente, debido a que en ese período las entradas mostraron una tendencia decreciente y las extracciones mantuvieron una tendencia creciente (ver Tabla 24); de julio a noviembre se incrementa el volumen de 102 a 164 millones de metros cúbicos, respectivamente, período que corresponde a la época lluviosa. Cabe destacar que aun cuando el volumen mínimo almacenado en el embalse en el mes de junio alcanzó el valor más bajo

registrado durante el período 1983-2009, de 88 millones de metros cúbicos, el mismo representó una disminución del 40 por ciento con respecto al volumen útil, esto es, alrededor de 62 millones de metros cúbicos.

La evaporación total registrada disminuyó en aproximadamente 3.600.000 m³ con respecto al año 1989, ya que pasó de 22.137.562 m³ a 18.527.204 m³, respectivamente. El máximo registro de evaporación corresponde a 1.980.000 m³ en el mes de marzo y el mínimo fue de 980.000 m³ registrado en junio.

Tanto el gasto ecológico como el caudal de bombeo hacia la PTAB muestran las mismas condiciones que en años anteriores. Asimismo, no hubo alivio en el embalse durante todo el año (ver Tabla 24). En cuanto al balance neto en el embalse, el mismo fue de ganancia (alrededor de 145 millones de metros cúbicos de agua) ya que las entradas totalizaron más de 195 millones de metros cúbicos mientras que las salidas solo alcanzaron poco más de 50 millones de metros cúbicos. La Gráfica 27 muestra que mientras las entradas poseen una tendencia creciente hasta agosto y a partir de allí decrecen, las salidas por su parte mantiene una tendencia casi lineal durante todo el año.



Gráfica 27. Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 1990. Elaboración propia a partir del balance hídrico del embalse

Tabla 24. Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 1990

Mes	Aporte Ríos (m³)	Lluvia en el embalse (m³)	Volumen almacenado (m³)	Entrada Total (m³)	Evaporación (m³)	Gasto ecológico (m³)	Bombeo (m³)	Alivio (m³)	Extracción Total(m³)	Balance neto (m³)
Enero	13.866.623	470.000	136.000.000	14.336.623	1.830.000	S/I	2.720.000	0	4.550.000	9.786.623
Febrero	13.240.688	13.741	124.000.000	13.254.429	1.847.204	S/I	2.460.304	0	4.307.508	8.946.921
Marzo	18.581.140	70.000	109.000.000	18.651.140	1.980.000	S/I	2.720.000	0	4.700.000	13.951.140
Abril	14.607.100	356.863	95.000.000	14.963.963	1.650.000	S/I	2.636.040	0	4.286.040	10.677.923
Mayo	11.534.435	880.000	87.000.000	12.414.435	1.220.000	S/I	2.720.000	0	3.940.000	8.474.435
Junio	15.905.894	2.750.000	88.000.000	18.655.894	980.000	S/I	2.640.000	0	3.620.000	15.035.894
Julio	20.195.519	1.980.000	102.000.000	22.175.519	1.050.000	S/I	2.720.000	0	3.770.000	18.405.519
Agosto	22.793.576	2.170.000	122.000.000	24.963.576	1.310.000	S/I	2.636.040	0	3.946.040	21.017.536
Septiembre	19.466.518	1.905.720	141.000.000	21.372.238	1.510.000	S/I	2.636.040	0	4.146.040	17.226.198
Octubre	13.650.000	60.000	154.000.000	13.710.000	1.640.000	S/I	2.640.000	0	4.280.000	9.430.000
Noviembre	11.108.754	1.703.318	164.000.000	12.812.072	1.550.000	S/I	2.636.040	0	4.186.040	8.626.032
Diciembre	8.686.594	0	163.000.000	8.686.594	1.960.000	S/I	2.636.040	0	4.596.040	4.090.554
Total	183.636.841	12.359.642	1.485.000.000	195.996.483	18.527.204	-	31.800.504	0	50.327.708	145.668.775

Fuente. Elaboración propia. Datos tomados de la base de datos diaria del balance hídrico para el embalse Pao-Cachinche. HIDROCENTRO

S/I: Sin Información

Balance hídrico año 1991. En la Tabla 25 se observa que el aporte neto de los ríos afluentes al embalse apenas crece un dos por ciento (alrededor de 3 millones de metros cúbicos) respecto a 1990, registrándose el máximo aporte en agosto de 47.658.612 m³ que junto con las lluvias registradas en el embalse para ese mes: 3.530.000 m³, constituyen la mayor entrada al embalse en 1991, las cuales totalizaron más de 50 millones de metros cúbicos. El menor aporte se registra en diciembre, el mismo fue de 92.833.398 m³ que sumado a las lluvias registradas en el embalse en ese mes: 620.000 m³ representan la menor entrada al mismo.

En total se registraron más de 15 millones de metros cúbicos de lluvia en el embalse, que comparado con los 12 millones de metros cúbicos precipitados en 1990, constituye una disminución de aproximadamente el 20 por ciento (unos 2.900.000 m³). El pico de lluvia se registra en agosto y el mismo fue de tres millones de metros cúbicos.

En cuanto al volumen almacenado en el embalse, se observa que al igual que en años anteriores, disminuye durante los primeros meses, ya que pasa de 153 a 102 millones de metros cúbicos de enero a julio, respectivamente, como resultado de la poca variabilidad en las salidas del embalse (las cuales se mantienen sobre los cuatro millones de metros cúbicos mensuales), sumado a la tendencia cíclica e irregular del aporte proveniente de los afluentes. De agosto a noviembre se eleva el almacenamiento de agua de 133 a 180 millones de metros cúbicos, respectivamente, debido al aumento del aporte y de las lluvias, principalmente de agosto a octubre, con lo cual se elevaron las entradas totales en ese período.

Tabla 25. Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 1991

Mes	Aporte Ríos (m³)	Lluvia en el embalse (m³)	Volumen almacenado (m³)	Entrada Total (m³)	Evaporación (m³)	Gasto ecológico (m³)	Bombeo (m³)	Alivio (m³)	Extracción Total(m³)	Balance neto (m³)
Enero	12.975.988	0	153.000.000	12.975.988	2.230.000	S/I	2.720.000	0	4.950.000	8.025.988
Febrero	13.288.904	70.655	141.000.000	13.359.559	2.064.550	S/I	2.460.304	0	4.524.854	8.834.705
Marzo	13.936.947	69.000	128.000.000	14.005.947	2.210.000	S/I	2.720.000	0	4.930.000	9.075.947
Abril	9.889.511	1.720.840	117.000.000	11.610.351	1.680.000	S/I	2.636.040	0	4.316.040	7.294.311
Mayo	13.085.302	840.000	110.000.000	13.925.302	1.580.000	S/I	2.720.000	0	4.300.000	9.625.302
Junio	9.982.800	2.130.000	104.000.000	12.112.800	1.130.000	S/I	2.640.000	0	3.770.000	8.342.800
Julio	9.664.418	1.980.000	102.000.000	11.644.418	1.140.000	S/I	2.720.000	0	3.860.000	7.784.418
Agosto	47.658.612	3.530.000	133.000.000	51.188.612	1.170.000	S/I	2.636.040	0	3.806.040	47.382.572
Septiembre	25.183.402	2.408.434	157.000.000	27.591.836	1.400.000	S/I	2.636.040	0	4.036.040	23.555.796
Octubre	16.525.574	640.000	179.000.000	17.165.574	1.750.000	S/I	2.640.000	3.268.316	7.658.316	9.507.258
Noviembre	5.792.196	1.275.897	180.000.000	7.068.093	1.420.000	S/I	2.636.040	1.275.508	5.331.548	1.736.545
Diciembre	9.283.398	620.000	177.000.000	9.903.398	1.790.000	S/I	2.720.000	109.641	4.619.641	5.283.757
Total	187.267.052	15.284.826	1.681.000.000	202.551.878	19.564.550	-	31.884.464	4.653.465	56.102.479	146.449.399

Fuente. Elaboración propia. Datos tomados de la base de datos diaria del balance hídrico para el embalse Pao-Cachinche. HIDROCENTRO

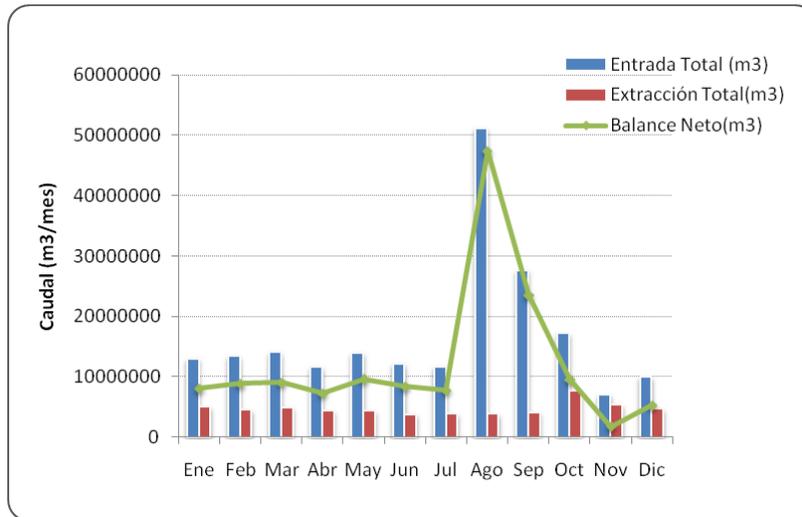
S/I: Sin Información

La evaporación total en el embalse fue de alrededor de 19.500.000 m³, que al compararse con la registrada en 1990 es cinco por ciento superior (mas de un millón de metros cúbicos). El mes de mayor evaporación es enero con mas de dos millones de metros cúbicos de agua evaporada mientras que el mes de junio registra la menor evaporación, sobre el millón de metros cúbicos.

El gasto ecológico y el caudal de bombeo hacia la PTAB mantienen las mismas condiciones de años anteriores. En cuanto al alivio, a partir de octubre el embalse comienza a descargar agua por el vertedero libre, siendo el total descargado en ese mes de alrededor de tres millones de metros cúbicos y disminuye hasta los cien mil metros cúbicos en diciembre. En todo el año se aliviaron mas de cuatro millones y medio de metros cúbicos de agua hacia el cauce del río Pao.

El balance neto fue de ganancia, ya que las entradas estuvieron por encima de los 200 millones de metros cúbicos mientras que las salidas totalizaron alrededor de los 56 millones de metros cúbicos. El embalse tuvo un balance positivo superior a los 145 millones de metros cúbicos al final del año.

La Gráfica 28 muestra que de enero a julio las entradas mensuales al embalse mantienen una tendencia cíclica e irregular, se registra un pico en el mes de agosto debido al ingreso de alrededor de 47 millones de metros cúbicos de agua proveniente de los afluentes y de septiembre a diciembre descienden por la menor incidencia del período lluvioso, que repercute en el volumen aportado al embalse por los afluentes. Asimismo, las salidas mantienen una tendencia prácticamente lineal de enero a septiembre ya que el gasto ecológico, el caudal de bombeo y la evaporación muestran poca variación en ese período; mientras que de octubre a diciembre aumentan las extracciones por el alivio del embalse.



Gráfica 28. Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 1991. Elaboración propia a partir del balance hídrico del embalse

Balance hídrico año 1992. Al comparar el volumen de agua aportado por los afluentes entre 1991 y 1992 se observa que el mismo disminuye 10 por ciento, lo que representa alrededor de 20 millones de metros cúbicos que dejaron de entrar en el año, por cuanto para 1991 se totalizan más de 187 millones de metros cúbicos frente a 166 millones de metros cúbicos en 1992 (ver Tabla 26). El mayor volumen aportado por los afluentes se registra en agosto con aproximadamente 46 millones de metros cúbicos mientras que el mínimo aporte es de alrededor de 470 mil metros cúbicos en febrero.

Aun cuando no llovió en el embalse los tres primeros meses del año, se observa de la Tabla 27 que de abril a mayo se totalizan alrededor de 17 millones de metros cúbicos, lo que representa un aumento de alrededor de 1.800.000 m³ con respecto a los 15 millones de metros cúbicos de lluvia registrados en 1991. El mes que registra la menor cantidad de lluvia es diciembre con 460.000 m³ y el mes de máxima precipitación es julio con 4.050.000 m³.

Tabla 26. Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 1992

Mes	Aporte Ríos (m³)	Lluvia en el embalse (m³)	Volumen almacenado (m³)	Entrada Total (m³)	Evaporación (m³)	Gasto ecológico (m³)	Bombeo (m³)	Alivio (m³)	Extracción Total(m³)	Balance neto (m³)
Enero	4.760.000	0	167.000.000	4.760.000	2.037.195	S/I	2.720.000	0	4.757.195	2.805
Febrero	4.751.830	0	154.000.000	4.751.830	2.203.658	S/I	2.548.172	0	4.751.830	0
Marzo	5.290.000	0	140.000.000	5.290.000	2.560.000	S/I	2.720.000	0	5.280.000	10.000
Abril	6.806.279	1.793.005	125.000.000	8.599.284	2.377.234	S/I	2.636.040	0	5.013.274	3.586.010
Mayo	5.320.000	1.360.000	122.000.000	6.680.000	1.380.000	S/I	2.640.000	0	4.020.000	2.660.000
Junio	4.950.000	1.130.000	125.000.000	6.080.000	1.180.000	S/I	2.640.000	0	3.820.000	2.260.000
Julio	10.820.000	4.050.000	150.000.000	14.870.000	1.320.000	S/I	2.720.000	2.726.955	6.766.955	8.103.045
Agosto	46.180.000	3.050.000	184.000.000	49.230.000	1.620.000	S/I	2.720.000	36.950.000	41.290.000	7.940.000
Septiembre	30.172.411	1.191.260	183.000.000	31.363.671	1.593.594	S/I	2.636.040	24.751.517	28.981.151	2.382.520
Octubre	18.400.000	830.000	181.000.000	19.230.000	1.760.000	S/I	2.720.000	12.077.744	16.557.744	2.672.256
Noviembre	21.136.229	3.221.890	181.000.000	24.358.119	1.723.467	S/I	2.636.040	13.554.832	17.914.339	6.443.780
Diciembre	7.910.000	460.000	179.000.000	8.370.000	1.690.000	S/I	2.720.000	3.035.175	7.445.175	924.825
Total	166.496.749	17.086.155	1.891.000.000	183.582.904	21.445.148	-	32.056.292	93.096.223	146.597.663	36.985.241

Fuente. Elaboración propia. Datos tomados de la base de datos diaria del balance hídrico para el embalse Pao-Cachinche. HIDROCENTRO
S/I: Sin Información

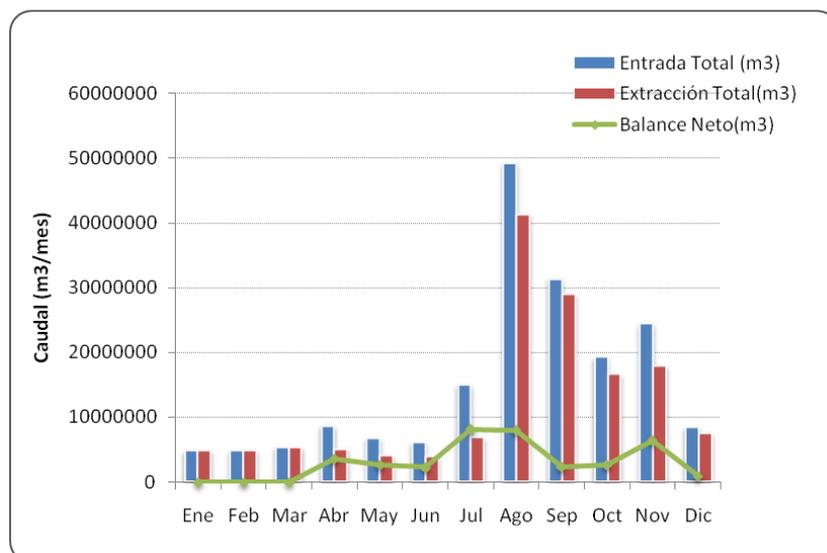
El volumen almacenado muestra una tendencia decreciente de enero a mayo, período que corresponde a la estación seca y en el cual se observa, de acuerdo a la Tabla 26, el bajo aporte de agua proveniente de los afluentes sumado a la alta evaporación en el embalse, la cual supera los 2.000.000 m³ mensuales; así se tiene que el volumen disminuye de 167 millones de metros cúbicos en enero a 122 millones de metros cúbicos en mayo.

La evaporación en el embalse sigue la misma tendencia mostrada en años anteriores, donde se observa que los mayores volúmenes de agua se evaporan del embalse en el período seco (aproximadamente de enero a abril), en promedio dos millones de metros cúbicos mensuales; mientras que durante el período de lluvia (aproximadamente de mayo a octubre), se evapora un volumen menor de agua del embalse, que en promedio se sitúa en alrededor de 1.500.000 m³ mensuales. Se observa también que la evaporación total en el año: 21.445.148 m³ es alrededor del 13 por ciento (unos 2.900.000 m³) inferior a la totalizada en 1991: 18.527.204 m³.

El gasto ecológico y el caudal de bombeo mantienen las mismas condiciones de los años anteriores. Por otra parte, a partir de julio comienza a aliviar el embalse, totalizándose más de 90.000.000 m³ hasta diciembre, el mes de agosto registra el mayor volumen descargado por el aliviadero, con alrededor de 37.000.000 m³. Agosto constituye precisamente el mes de mayor entrada al embalse, ya que se registran el máximo volumen de agua aportado por los ríos afluentes (aproximadamente 46.000.000 m³) y la mayor cantidad de lluvia: 3.050.000 m³. El volumen almacenado en el embalse para el mes de julio es de 184.000.000 m³, lo que significa un aumento de 5.000.000 m³ de agua (alrededor del tres por ciento) por encima del volumen total del embalse y de 19.000.000 m³ (un 10 por ciento) superiores al rendimiento garantizado del embalse: 165.000.000 m³.

El balance neto en el embalse para 1992 es de ganancia (unos 36 millones de metros cúbicos), siendo el mes de febrero el único donde se extrajo prácticamente el mismo volumen que ingresó al embalse, por lo que en ese mes no hubo ganancia de agua al embalse. Las entradas totalizaron en el año 183.582.904 m³ frente a 146.597.663 m³ de agua que salieron del embalse.

La Gráfica 29 muestra que tanto las entradas como las salidas mantienen una tendencia ascendente de enero a agosto (mes donde se alcanza la máxima entrada al embalse, superior a los 46 millones de metros cúbicos), mientras que de septiembre a diciembre la tendencia es decreciente. Se observa además que durante los tres primeros meses del año, los volúmenes de entrada y de salida se mantuvieron muy próximos, lo que indica que se extrajo lo que ingresó al embalse en ese tiempo.



Gráfica 29. Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 1992. Elaboración propia a partir del balance hídrico del embalse
Balance hídrico año 1993. El aporte neto de los afluentes al embalse totaliza alrededor de 180.000.000 m³, tal como se observa en la Tabla 27, lo que significa un aumento del siete por ciento (aproximadamente 13.000.000 m³) con respecto

a 1992, cuando ingresó al embalse un volumen superior a los 166.000.000 m³. En agosto se registra el máximo aporte al embalse con alrededor de 28.000.000 m³ mientras que en enero se registra el mínimo volumen de entrada: 4.700.000 m³.

Durante los primeros tres meses del año las lluvias en el embalse fueron escasas ya que sólo se registraron 20.000 m³, a partir de abril las mismas se incrementan alcanzando el pico de 2.840.000 m³ en el mes de agosto. El total de lluvia registrada en el embalse para 1993 fue de alrededor de 12.000.000 m³.

El volumen almacenado muestra una tendencia decreciente durante los primeros cinco meses del año, ya que pasa de 173 a 142 millones de metros cúbicos de agua debido a la escasa lluvia en el embalse y a la mayor evaporación que se registra en el período seco, la cual supera los 2.000.000 m³ mensuales de enero a marzo. A partir de junio comienza a ascender el volumen del embalse con un máximo de 183 millones de metros cúbicos en el mes de septiembre.

El gasto ecológico y el caudal de bombeo hacia la PTAB muestran el mismo comportamiento de los años anteriores, donde el caudal de descarga del gasto ecológico esta entre los 600 a 800 LPS diarios y el gasto de bombeo es de alrededor de 1020 LPS diarios, a lo largo de todo el año. Respecto al alivio, se registran 4.840.000 m³ de agua en enero debido a que en diciembre de 1992 se alcanzó el volumen total del embalse, es decir, el mismo fue de 179.000.000 m³. De agosto a diciembre se alivia un total de 51.000.000 m³, donde el máximo volumen descargado fue en septiembre con 24.800.000 m³. En todo el año se aliviaron un total de 56.000.000 m³.

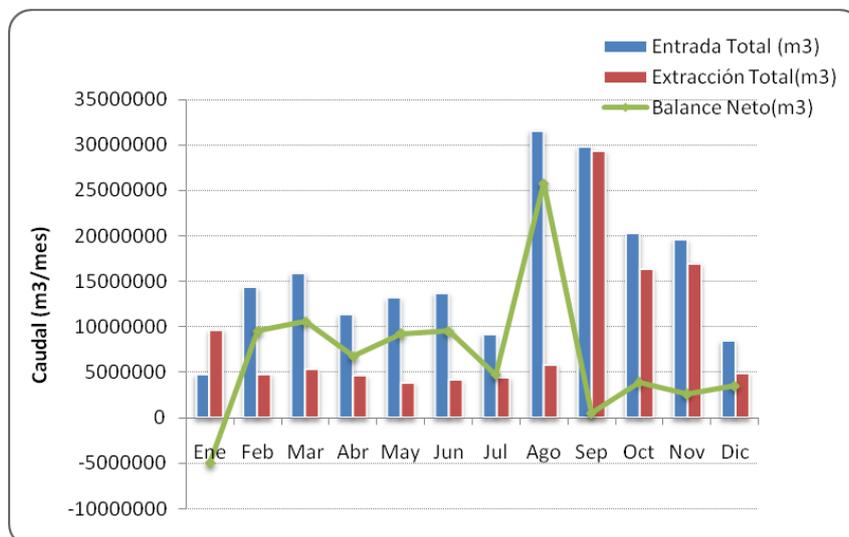
Tabla 27. Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 1993

Mes	Aporte Ríos (m³)	Lluvia en el embalse (m³)	Volumen almacenado (m³)	Entrada Total (m³)	Evaporación (m³)	Gasto ecológico (m³)	Bombeo (m³)	Alivio (m³)	Extracción Total(m³)	Balance neto (m³)
Enero	4.710.000	0	173.000.000	4.710.000	2.120.000	S/I	2.720.000	4.840.000	9.680.000	-4.970.000
Febrero	14.378.313	0	163.000.000	14.378.313	2.349.904	S/I	2.460.304	0	4.810.208	9.568.105
Marzo	15.891.195	20.000	151.000.000	15.911.195	2.570.000	S/I	2.720.000	0	5.290.000	10.621.195
Abril	10.178.866	1.190.677	142.000.000	11.369.543	1.972.515	S/I	2.636.040	0	4.608.555	6.760.988
Mayo	11.957.749	1.210.000	142.000.000	13.167.749	1.170.000	S/I	2.720.000	0	3.890.000	9.277.749
Junio	12.112.206	1.620.000	151.000.000	13.732.206	1.510.000	S/I	2.640.000	0	4.150.000	9.582.206
Julio	7.855.849	1.310.000	158.000.000	9.165.849	1.680.000	S/I	2.720.000	0	4.400.000	4.765.849
Agosto	28.736.697	2.840.000	171.000.000	31.576.697	1.740.000	S/I	2.636.040	1.450.000	5.826.040	25.750.657
Septiembre	28.225.137	1.609.068	183.000.000	29.834.205	1.761.219	S/I	2.636.040	24.879.059	29.276.318	557.887
Octubre	19.119.069	1.180.000	181.000.000	20.299.069	1.930.000	S/I	2.720.000	11.730.000	16.380.000	3.919.069
Noviembre	18.430.236	1.165.477	181.000.000	19.595.713	1.557.864	S/I	2.636.040	12.749.171	16.943.075	2.652.638
Diciembre	8.391.096	40.000	178.000.000	8.431.096	1.940.000	S/I	2.720.000	240.000	4.900.000	3.531.096
Total	179.986.413	12.185.222	1.974.000.000	192.171.635	22.301.502	-	31.964.464	55.888.230	110.154.196	82.017.439

Fuente. Elaboración propia. Datos tomados de la base de datos diaria del balance hídrico para el embalse Pao-Cachinche. HIDROCENTRO
S/I: Sin Información

El balance neto del embalse fue de ganancia, el cual se ubicó en alrededor de 82.000.000 m³ ya que las entradas superan en 82.000.000 m³ a las salidas, que representa un aumento del 50 por ciento. De la Tabla 27 se observa que solo en el mes de Enero las extracciones superan en aproximadamente 5.000.000 m³ a las entradas al embalse como resultado del menor aporte de los afluentes (alrededor de 4.700.000 m³), la ausencia de lluvia y el alivio del embalse.

En la Gráfica 30 se observa que las entradas poseen una tendencia cíclica e irregular a lo largo del año, registrándose el máximo en agosto, el cual corresponde al mes de mayor ingreso al embalse; mientras que las salidas se incrementan en más del 60 por ciento de septiembre a noviembre, que corresponden a los meses de mayor extracción donde el valor máximo de 29.000.000 m³ de agua en septiembre representa una diferencia superior al 80 por ciento como resultado del alivio de alrededor de 24.000.000 m³ en ese mes.



Gráfica 30. Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 1993. Elaboración propia a partir del balance hídrico del embalse

Balance hídrico año 1994. El volumen de agua que ingresa al embalse proveniente de los ríos afluentes muestra una tendencia creciente a lo largo del año, registrándose los mayores aportes entre los meses de agosto a noviembre, periodo que corresponde a la estación lluviosa, donde el máximo de alrededor de 31.000.000 m³ ocurre en octubre y el aporte mínimo de 7.800.000 m³ se registra en diciembre, tal como se observa en la Tabla 28. Si se comparan los aportes netos entre 1993 y 1994 se observa que hubo un incremento de aproximadamente 36.500.000 m³ de agua que ingresan al embalse.

A excepción del mes de enero, se registraron lluvias en el embalse durante todo el año, siendo los meses de junio a septiembre los de mayor precipitación, con un volumen aproximado de 7.600.000 m³. Durante todo el año se registra un volumen total de lluvia en el embalse de alrededor de 15.000.000 m³. El volumen de agua almacenado en el embalse muestra la misma tendencia de años anteriores ya que disminuye durante los meses de enero a mayo (correspondiente al período seco), al pasar de 170 a 125 millones de metros cúbicos y aumenta de junio a octubre (período lluvioso), alcanzando un máximo de 183 millones de metros cúbicos.

El descenso del volumen almacenado hasta 25.000.000 m³ por debajo del volumen útil del embalse durante la época seca se debe a la combinación de los bajos aportes de los afluentes, la alta evaporación (alrededor de 2.000.000 m³ al mes) y la poca variación entre las extracciones mensuales ya que tanto el caudal de bombeo así como el gasto ecológico permanecen constantes a lo largo del año. En cuanto al ascenso del volumen almacenado, el mismo se debe al aumento del 50 por ciento en el aporte de los afluentes sumado a los más de 2.000.000 m³ de lluvia registrados en el embalse.

Tabla 28. Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 1994

Mes	Aporte Ríos (m³)	Lluvia en el embalse (m³)	Volumen almacenado (m³)	Entrada Total (m³)	Evaporación (m³)	Gasto ecológico (m³)	Bombeo (m³)	Alivio (m³)	Extracción Total(m³)	Balance neto (m³)
Enero	11.879.788	0	170.000.000	11.879.788	2.370.000	S/I	2.720.000	0	5.090.000	6.789.788
Febrero	12.442.520	106.560	158.000.000	12.549.080	2.313.450	S/I	2.460.304	0	4.773.754	7.775.326
Marzo	15.403.634	170.000	145.000.000	15.573.634	2.590.000	S/I	2.720.000	0	5.310.000	10.263.634
Abril	12.022.165	491.266	132.000.000	12.513.431	2.024.654	S/I	2.636.040	0	4.660.694	7.852.737
Mayo	11.047.213	1.250.000	125.000.000	12.297.213	1.550.000	S/I	2.720.000	0	4.270.000	8.027.213
Junio	14.157.708	2.588.235	126.000.000	16.745.943	1.444.657	S/I	2.636.040	0	4.080.697	12.665.246
Julio	15.520.463	2.780.000	135.000.000	18.300.463	1.200.000	S/I	2.720.000	0	3.920.000	14.380.463
Agosto	29.850.162	2.310.000	159.000.000	32.160.162	1.420.000	S/I	2.640.000	0	4.060.000	28.100.162
Septiembre	27.267.099	2.684.193	180.000.000	29.951.292	1.659.804	S/I	2.636.040	10.823.565	15.119.409	14.831.883
Octubre	31.629.876	1.790.000	183.000.000	33.419.876	1.900.000	S/I	2.720.000	28.650.000	33.270.000	149.876
Noviembre	27.491.149	856.047	183.000.000	28.347.196	1.687.028	S/I	2.636.040	24.000.558	28.323.626	23.570
Diciembre	7.805.479	80.000	180.000.000	7.885.479	1.760.000	S/I	2.720.000	1.750.000	6.230.000	1.655.479
Total	216.517.256	15.106.301	1.876.000.000	231.623.557	21.919.593	-	31.964.464	65.224.123	119.108.180	112.515.377

Fuente. Elaboración propia. Datos tomados de la base de datos diaria del balance hídrico para el embalse Pao-Cachinche. HIDROCENTRO

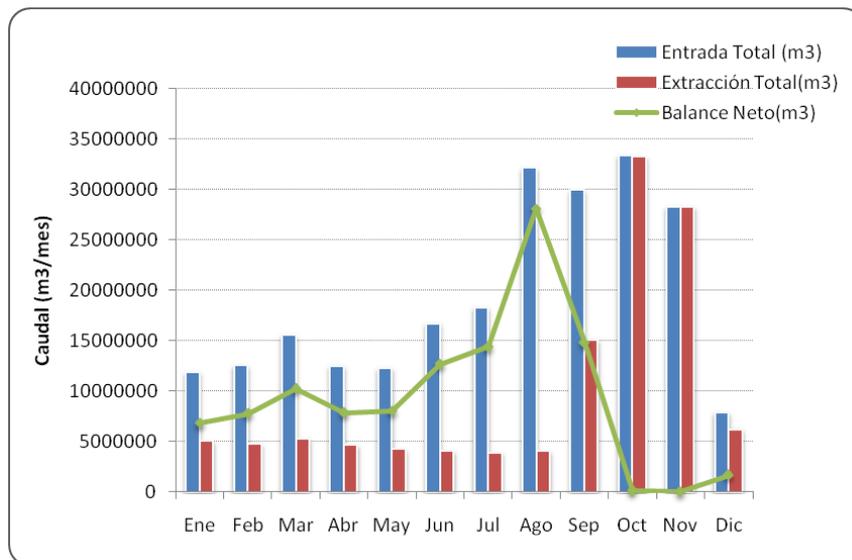
S/I: Sin Información

Al igual que los años precedentes, la evaporación en el embalse de enero a mayo fue de alrededor de 10.850.000 m³ mientras que de junio a octubre fue de aproximadamente 7.600.000 m³, lo que constituye una disminución del 30 por ciento (unos 3.200.000 m³) entre la época seca y la lluviosa. Por otra parte, se mantienen las condiciones ya descritas en años anteriores para el gasto ecológico y el caudal de bombeo hacia la planta potabilizadora Alejo Zuloaga.

El embalse comienza a aliviar en septiembre, observándose que el volumen almacenado para ese mes es de 180 millones de metros cúbicos, lo que significa un aumento del almacenamiento con respecto al volumen total del embalse de apenas el 0,5 por ciento, que constituye alrededor de 1.000.000 m³. En total, se aliviaron más de 65.000.000 m³, siendo la descarga máxima igual a 28.650.000 m³ registrada en el mes de octubre.

Las entradas mensuales al embalse fueron 40 por ciento superiores a las salidas ya que ingresaron en total alrededor de 230.000.000 m³ de agua frente los 120.000.000 m³ extraídos en 1994, por lo que el balance hídrico arrojó una ganancia de aproximadamente 112.500.000 m³ de agua.

En la Gráfica 31 se observa que las entradas muestran una tendencia creciente de enero a octubre cuando alcanza su valor más alto: más de 33.000.000 m³, mientras que las salidas poseen una tendencia casi lineal hasta agosto para luego ascender entre septiembre y octubre, siendo la diferencia entre ambos meses de apenas 150.000 m³; asimismo, la diferencia entre las entradas y las salidas durante los primeros meses del año es superior al 60 por ciento.



Gráfica 31. Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 1994. Elaboración propia a partir del balance hídrico del embalse

Balance hídrico año 1995. Al igual que en los años precedentes, el aporte neto proveniente de los afluentes al embalse muestra una tendencia decreciente los primeros cinco meses del año, debido a la ocurrencia del período seco, que junto a los elevados volúmenes de agua evaporados del embalse durante dicho período, inciden en la tendencia mostrada. En la Tabla 29 se observa que el aporte por ríos disminuye de 216.500.000 m³ en 1994 a 145.200.000 m³ en 1995.

Se registraron lluvias durante todo el año en el embalse, con excepción del mes de febrero, registrándose la mayor cantidad de precipitación en junio, con un total de alrededor de 3.210.000 m³. En todo el año se registra un volumen total de lluvia sobre el embalse de aproximadamente 14.000.000 m³.

El volumen de agua almacenada en el embalse disminuye de enero a junio al pasar de 174 a 140 millones de metros cúbicos, lo que representa una disminución de 10.000.000 m³ con respecto al volumen útil del embalse; esta tendencia es el resultado de la disminución del aporte proveniente de los afluentes, la poca lluvia

registrada sobre el embalse y una evaporación mensual superior a los 2.000.000 m³ durante el período seco. A partir de julio se revierte la tendencia ya que comienza a ascender el volumen almacenado en el embalse hasta alcanzar el máximo de 183.000.000 m³ en agosto.

La evaporación en el embalse se mantiene por encima de los 2.400.000 m³ mensuales entre los meses de enero a marzo, el mínimo volumen de agua que se evapora del embalse es de 1.330.000 m³ correspondiente al mes de junio mientras que el valor máximo de evaporación mensual ocurre en marzo, cuando se registran 2.470.000 m³. En todo el año se evaporó un volumen de agua superior a los 22.500.000 m³.

El caudal de gasto ecológico descargado al cauce del río Pao se mantuvo constante a lo largo de todo el año, en apenas 4 m³ diarios, que representan alrededor de 0,046 LPS, lo cual totaliza una descarga al final del año de 1.629 m³. Este bajo caudal pudiera ser atribuido a la disminución del aporte proveniente de los afluentes, que entre enero a mayo totaliza alrededor de 9.470.000 m³ frente a aproximadamente 63.000.000 m³ totalizados durante el período lluvioso.

El caudal de bombeo hacia la PTAB muestra el mismo patrón que en los años precedentes, de alrededor de 1020 LPS diarios. Por otra parte, a partir de julio comienza a aliviar el embalse, registrándose el valor máximo en noviembre con alrededor de 21.000.000 m³ y el mínimo en diciembre con 365.000 m³, siendo el total aliviado en el año de 60.600.000 m³ de agua hacia el cauce del río Pao.

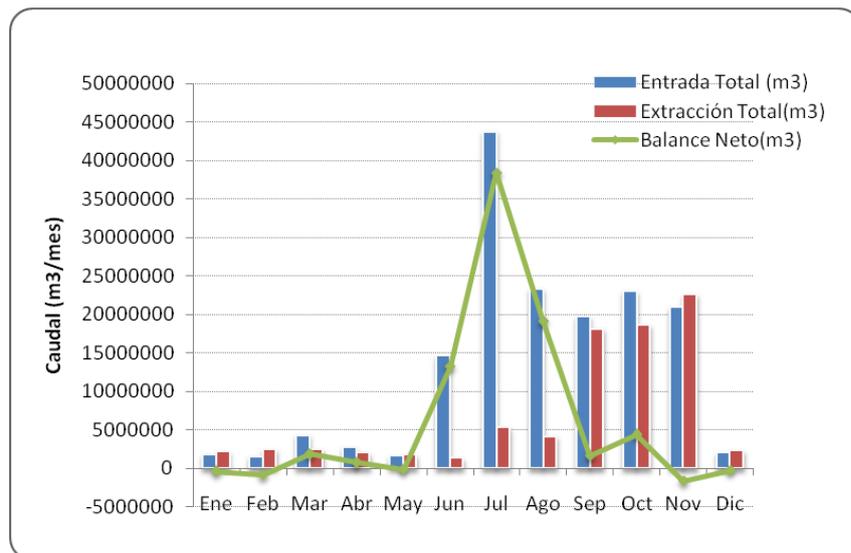
Tabla 29. Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 1995

Mes	Aporte Ríos (m ³)	Lluvia en el embalse (m ³)	Volumen almacenado (m ³)	Entrada Total (m ³)	Evaporación (m ³)	Gasto ecológico (m ³)	Bombeo (m ³)	Alivio (m ³)	Extracción Total(m ³)	Balance neto (m ³)
Enero	1.420.000	350.000	174.000.000	1.770.000	2.170.000	139	2.720.000	0	2.170.139	-400.139
Febrero	1.530.279	0	165.000.000	1.530.279	2.406.618	125	2.460.304	0	2.406.743	-876.464
Marzo	3.200.000	1.090.000	154.000.000	4.290.000	2.470.000	139	2.720.000	0	2.470.139	1.819.861
Abril	2.150.737	573.426	146.000.000	2.724.163	1.991.466	134	2.636.040	0	1.991.600	732.563
Mayo	1.170.000	420.000	140.000.000	1.590.000	1.750.000	139	2.720.000	0	1.750.139	-160.139
Junio	11.380.000	3.210.000	140.000.000	14.590.000	1.330.000	134	2.636.040	0	1.330.134	13.259.866
Julio	40.630.000	3.104.705	163.000.000	43.734.705	1.572.623	139	2.720.000	3.720.000	5.292.762	38.441.943
Agosto	21.680.000	1.630.000	183.000.000	23.310.000	1.570.000	139	2.640.000	2.582.001	4.152.140	19.157.860
Septiembre	18.433.299	1.283.238	182.000.000	19.716.537	1.846.804	134	2.636.040	16.287.144	18.134.082	1.582.455
Octubre	21.610.000	1.410.000	182.000.000	23.020.000	1.920.000	134	2.720.000	16.701.721	18.621.855	4.398.145
Noviembre	20.206.540	753.436	182.000.000	20.959.976	1.621.819	134	2.636.040	20.976.370	22.598.323	-1.638.347
Diciembre	1.800.000	250.000	178.000.000	2.050.000	1.950.000	139	2.720.000	365.242	2.315.381	-265.381
Total	145.210.855	14.074.805	1.989.000.000	159.285.660	22.599.330	1.629	31.964.464	60.632.478	83.233.437	76.052.223

Fuente. Elaboración propia. Datos tomados de la base de datos diaria del balance hídrico para el embalse Pao-Cachinche. HIDROCENTRO

El balance neto del embalse fue de alrededor de 76.000.000 m³ de ganancia ya que se totalizan 159.285660 m³ de agua que ingresan frente a 83.233.437 m³ de agua que se extrae del embalse al término del año. Tanto en los meses de enero y febrero como en mayo, noviembre y diciembre se registran balances negativos (ver tabla 30) ya que las salidas superan a las entradas.

En la Gráfica 32 se observa que tanto las entradas como las salidas se ubican por debajo de los 5.000.000 m³ entre enero a mayo, lo que supondría la ocurrencia de una marcada sequía, donde a partir de julio aumentan las entradas al embalse mientras que las salidas se incrementan en más del 50 por ciento.



Gráfica 32. Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 1995. Elaboración propia a partir del balance hídrico del embalse

Balance hídrico año 1996. El aporte neto proveniente de los afluentes al embalse muestra una tendencia creciente de enero a julio, mes que registra un volumen máximo de agua de aproximadamente 33.560.000 m³ para luego descender entre agosto a diciembre, alcanzándose el mínimo ingreso por ríos en noviembre con 8.574.351 m³ (ver Tabla 30). Al comparar los aportes totales entre 1995 y 1996 se observa que el mismo aumenta alrededor de 47.700.000 m³, lo que representa un

incremento del 25 por ciento con respecto al volumen que ingresa al embalse en 1995.

En la Tabla 30 se observa que enero y marzo son los únicos meses que no llueve en el embalse, siendo junio y julio los que registran la mayor cantidad de lluvia en el embalse, las cuales son superiores a los 3.000.000 m³ mensuales. En total se registran en el embalse más de 18.000.000 m³ de lluvia, lo que representa un incremento superior a los 4.000.000 m³ con respecto a 1995.

El volumen de agua almacenado muestra el mismo patrón de años anteriores, es decir, disminuye de 170 a 132 millones de metros cúbicos entre enero a mayo (período seco) y aumenta a partir de junio (período de lluvias), alcanzando el máximo de 184.000.000 m³ en ese mes.

La evaporación del agua del embalse muestra el mismo patrón de años anteriores, donde se observa que durante los meses de enero a abril (correspondientes a la época seca) la misma es superior a los 2.500.000 m³ mensuales, mientras que en la época de lluvia (aproximadamente de mayo a noviembre) la evaporación disminuye a alrededor de 1.600.000 m³ al mes, lo cual representa una disminución mensual superior al 30 por ciento entre las épocas seca y lluviosa.

El gasto ecológico, aun cuando no se registra en el balance hídrico, estaría comprendido entre los 600 a 800 LPS, de acuerdo a Hidrocentro. Asimismo, el caudal de agua bombeada hacia la planta potabilizadora Alejo Zuloaga se mantuvo constante a lo largo del año, en alrededor de 1020 LPS diarios.

Tabla 30. Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 1996

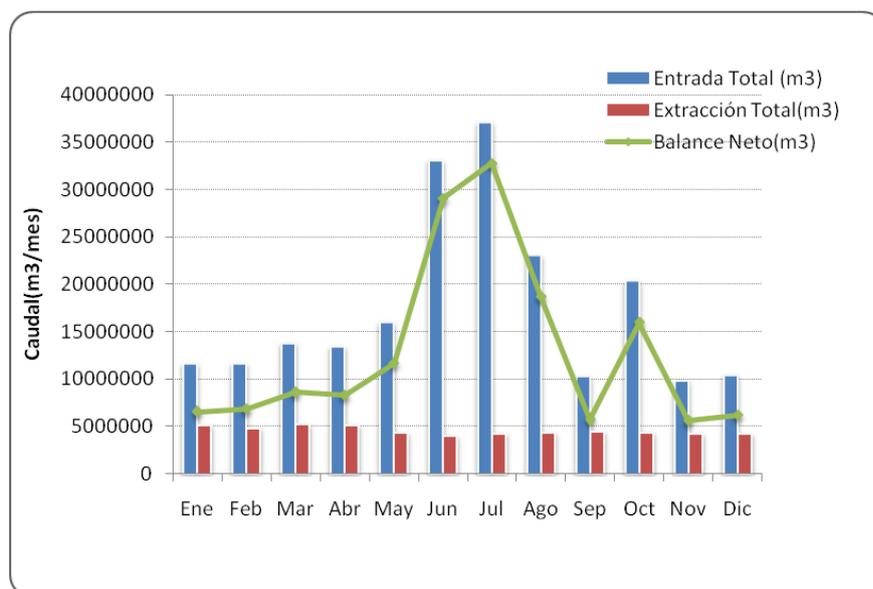
Mes	Aporte Ríos (m³)	Lluvia en el embalse (m³)	Volumen almacenado (m³)	Entrada Total (m³)	Evaporación (m³)	Gasto ecológico (m³)	Bombeo (m³)	Alivio (m³)	Extracción Total (m³)	Balance neto (m³)
Enero	11.695.785	0	170.000.000	11.695.785	2.440.000	S/I	2.720.000	0	5.160.000	6.535.785
Febrero	11.470.575	213.309	160.000.000	11.683.884	2.335.728	S/I	2.548.172	0	4.883.900	6.799.984
Marzo	13.826.549	0	149.000.000	13.826.549	2.530.000	S/I	2.720.000	0	5.250.000	8.576.549
Abril	12.760.991	697.132	135.000.000	13.458.123	2.573.347	S/I	2.636.040	0	5.209.387	8.248.736
Mayo	14.354.362	1.690.000	132.000.000	16.044.362	1.680.000	S/I	2.720.000	0	4.400.000	11.644.362
Junio	29.973.237	3.140.000	151.000.000	33.113.237	1.400.000	S/I	2.640.000	0	4.040.000	29.073.237
Julio	33.558.431	3.530.000	179.000.000	37.088.431	1.590.000	S/I	2.720.000	0	4.310.000	32.778.431
Agosto	21.040.315	2.030.000	184.000.000	23.070.315	1.750.000	S/I	2.640.000	0	4.390.000	18.680.315
Septiembre	8.048.978	2.251.142	182.000.000	10.300.120	1.905.350	S/I	2.636.040	0	4.541.390	5.758.730
Octubre	18.178.375	2.230.000	184.000.000	20.408.375	1.810.000	S/I	2.640.000	0	4.450.000	15.958.375
Noviembre	8.574.351	1.320.000	184.000.000	9.894.351	1.680.000	S/I	2.640.000	0	4.320.000	5.574.351
Diciembre	9.494.007	990.000	182.000.000	10.484.007	1.580.000	S/I	2.720.000	0	4.300.000	6.184.007
Total	192.975.956	18.091.583	1.992.000.000	211.067.539	23.274.425	-	31.980.252	0	55.254.677	155.812.862

Fuente. Elaboración propia. Datos tomados de la base de datos diaria del balance hídrico para el embalse Pao-Cachinche. HIDROCENTRO

S/I: Sin Información

De la Tabla 30 se observa que el embalse no alivia en todo el año debido a que el aporte proveniente de los afluentes mantuvo una tendencia cíclica e irregular durante el período de lluvia. Por otra parte, el balance neto en el embalse arrojó una ganancia superior a los 155.800.000 m³, pues las entradas totalizaron mas de 210.000.000 m³ mientras que las salidas totales fueron de aproximadamente 55.000.000 m³, como resultado de la poca variación de la evaporación ya que el gasto ecológico y el bombeo se mantuvieron constantes durante todo el año.

En la Gráfica 33 se observa que las entradas muestran una tendencia ascendente de enero a julio, cuando se alcanza el máximo de alrededor de 35.000.000 m³, a partir de agosto desciende hasta ubicarse a 10 por ciento de las entradas totales del mes de enero. En cuanto a las salidas, las mismas mantienen una tendencia practicamente lineal a lo largo del año; cabe resaltar que las entradas mensuales superan en más del 50 por ciento a las salidas del embalse.



Gráfica 33. Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 1996. Elaboración propia a partir del balance hídrico del embalse

Balance hídrico año 1997. El aporte neto de agua proveniente de los afluentes al embalse muestra una tendencia cíclica e irregular durante todo el año, siendo el mes de julio el que registra el máximo aporte, de alrededor de 23.000.000 m³, lo cual repercute en el incremento de la entrada total contabilizada en el embalse para ese mes: 25.624.000 m³. En la Tabla 31 se observa que en todo el año ingresaron más de 140.000.000 m³ de agua proveniente de los ríos afluentes, que representa una disminución del 27 por ciento (más de 52.000.000 m³) con respecto al total registrado en 1996.

En todo el año se registra un total de 13.138.857 m³ de lluvia en el embalse, donde el período comprendido entre enero a mayo, correspondiente a la época seca, registra la menor cantidad de lluvia acumulada, alrededor de 1.330.000 m³; mientras que de junio a noviembre, correspondiente a la época lluviosa, se contabilizan aproximadamente 11.800.000 m³ de lluvia.

El volumen almacenado en el embalse muestra una tendencia descendente de enero a junio, al pasar de 179 a 138 millones de metros cúbicos, respectivamente; lo que significa que cuando el volumen alcanza su mínimo nivel se ubica a 12.000.000 m³ (alrededor del ocho por ciento) por debajo del volumen útil del embalse. A partir de julio comienza a ascender el volumen almacenado, alcanzando en octubre los 181.000.000 m³.

La evaporación en el embalse muestra la misma tendencia de años anteriores, ya que entre los meses de enero a abril (época seca) la misma supera los 2.200.000 m³ mensuales, mientras que en la época de lluvia (aproximadamente de mayo a octubre) la evaporación disminuye a alrededor de 1.600.000 m³ al mes, lo cual representa una disminución mensual superior al 30 por ciento entre las épocas seca y lluviosa. En total se evaporaron más de 22.000.000 m³ de agua del embalse.

Tabla 31. Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 1997

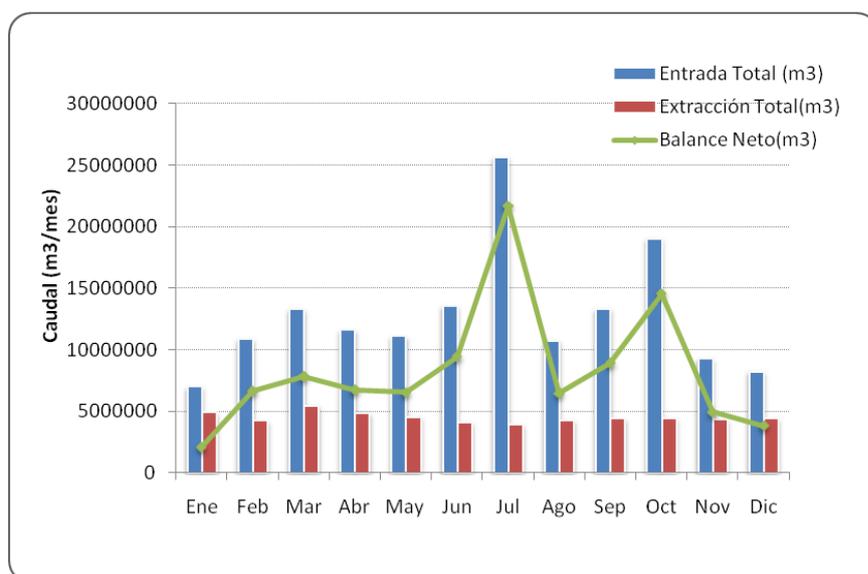
Mes	Aporte Ríos (m³)	Lluvia en el embalse (m³)	Volumen almacenado (m³)	Entrada Total (m³)	Evaporación (m³)	Gasto ecológico (m³)	Bombeo (m³)	Alivio (m³)	Extracción Total(m³)	Balance neto (m³)
Enero	6.984.403	20.000	179.000.000	7.004.403	2.180.000	S/I	2.720.000	0	4.900.000	2.104.403
Febrero	10.774.746	102.830	172.000.000	10.877.576	1.763.207	S/I	2.460.304	0	4.223.511	6.654.065
Marzo	13.078.575	210.000	162.000.000	13.288.575	2.730.000	S/I	2.720.000	0	5.450.000	7.838.575
Abril	11.286.949	318.120	151.000.000	11.605.069	2.221.390	S/I	2.636.040	0	4.857.430	6.747.639
Mayo	10.420.635	680.000	140.000.000	11.100.635	1.830.000	S/I	2.720.000	0	4.550.000	6.550.635
Junio	10.927.643	2.640.000	138.000.000	13.567.643	1.480.000	S/I	2.640.000	0	4.120.000	9.447.643
Julio	22.974.140	2.650.000	155.000.000	25.624.140	1.210.000	S/I	2.720.000	0	3.930.000	21.694.140
Agosto	9.301.407	1.450.000	168.000.000	10.751.407	1.630.000	S/I	2.640.000	0	4.270.000	6.481.407
Septiembre	11.730.474	1.607.907	175.000.000	13.338.381	1.769.302	S/I	2.636.040	0	4.405.342	8.933.039
Octubre	17.461.414	1.570.000	181.000.000	19.031.414	1.830.000	S/I	2.640.000	0	4.470.000	14.561.414
Noviembre	7.404.187	1.890.000	180.000.000	9.294.187	1.710.000	S/I	2.640.000	0	4.350.000	4.944.187
Diciembre	8.238.754	0	175.000.000	8.238.754	1.690.000	S/I	2.720.000	0	4.410.000	3.828.754
Total	140.583.327	13.138.857	1.976.000.000	153.722.184	22.043.899	-	31.892.384	0	53.936.283	99.785.901

Fuente. Elaboración propia. Datos tomados de la base de datos diaria del balance hídrico para el embalse Pao-Cachinche. HIDROCENTRO

S/I: Sin Información

El gasto ecológico, aun cuando no se registra en el balance hídrico, estaría comprendido entre los 600 a 800 LPS, de acuerdo a Hidrocentro. Asimismo, el caudal de agua bombeada hacia la PTAB se mantuvo constante a lo largo del año, en alrededor de 1020 LPS diarios. De la Tabla 31 se observa que el embalse no alivia en todo el año debido a la tendencia cíclica e irregular mostrada por el aporte proveniente de los afluentes a lo largo del año.

De acuerdo al balance neto en el embalse, el mismo tuvo una ganancia de alrededor de 100.000.000 m³, que representa un aumento de las entradas en 65 por ciento con respecto a las salidas, lo cual podría ser atribuido a la disminución de la evaporación del agua del embalse. En la Gráfica 34 se muestra la tendencia cíclica e irregular de las entradas mensuales al embalse frente a la tendencia casi lineal de las salidas a lo largo de todo el año.



Gráfica 34. Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 1997. Elaboración propia a partir del balance hídrico del embalse

Balance hídrico año 1998. El aporte neto proveniente de los afluente al embalse se incrementa un 76 por ciento al pasar de 193.000.000 m³ en 1997 a alrededor

de 810.000.000 m³ en 1998 como resultado del aumento del aporte, entre mayo a junio, superior a los 40.000.000 m³. De la Tabla 32, el máximo aporte se registra en julio, el cual alcanza los 127.930.000 m³ mientras que el menor aporte se registra en diciembre, con 17. 577.000 m³.

Aun cuando el aporte neto muestra un considerable aumento del volumen que ingresa al embalse (superior al 70 por ciento), no sucede lo mismo con las lluvias registradas, las cuales se reducen en más del 80 por ciento con respecto a 1997, al totalizar alrededor de 2.100.000 m³ en todo el año, siendo el máximo registrado de 400.000 m³ de lluvia en julio.

Asimismo, la evaporación disminuye en más del 85 por ciento al pasar de alrededor de 22.000.000 de m³ en 1997 a tan solo 2.739.200 m³ en 1998. El volumen máximo evaporado fue de 310.000 m³ en marzo mientras que el mínimo se registró en junio con 150.000 m³, esta disminución de la evaporación podría ser atribuida a la incidencia de factores tales como el aumento de la humedad relativa y/o de la temperatura de la zona donde se ubica del embalse, lo cual afectó no solo la tasa de evaporación diaria sino además las lluvias en el embalse.

Como en años anteriores, tanto el gasto ecológico como el bombeo hacia la PTAB muestran las mismas condiciones, es decir, se mantienen constantes a lo largo del año; al igual que en 1997, el embalse no alivió en todo el año. Respecto al balance neto, el mismo fue de ganancia (superior a 99.000.000 m³ al año) ya que las entradas totalizaron más de 810.000.000 m³ frente a 34.600.000 m³ correspondientes a las salidas del embalse.

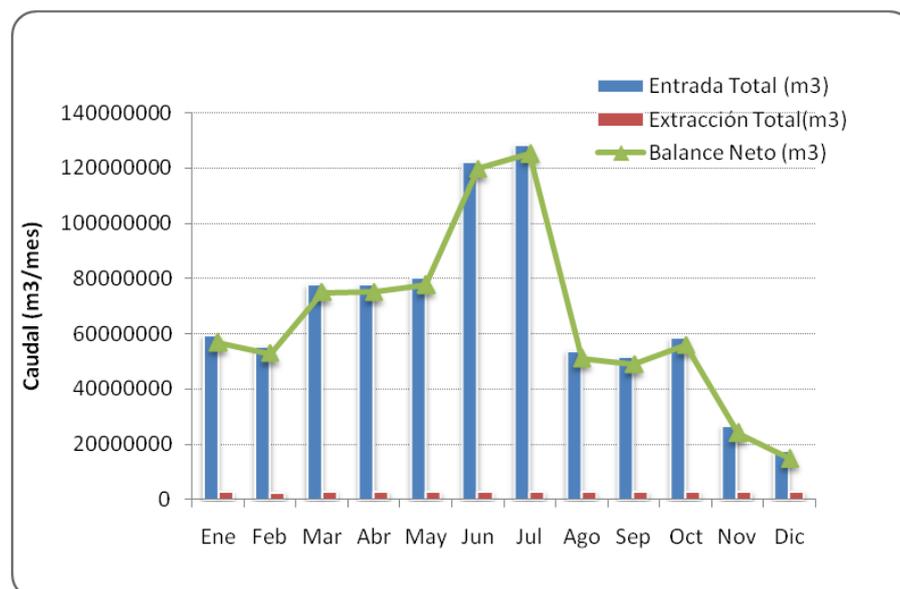
Tabla 32. Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 1998

Mes	Aporte Ríos (m³)	Lluvia en el embalse (m³)	Volumen almacenado (m³)	Entrada Total (m³)	Evaporación (m³)	Gasto ecológico (m³)	Bombeo (m³)	Alivio (m³)	Extracción Total(m³)	Balance neto (m³)
Enero	59.687.726	10.000	164.000.000	59.697.726	270.000	S/I	2.720.000	0	2.990.000	56.707.726
Febrero	55.512.920	0	153.000.000	55.512.920	260.856	S/I	2.460.304	0	2.721.160	52.791.760
Marzo	77.977.340	10.000	139.000.000	77.987.340	310.000	S/I	2.720.000	0	3.030.000	74.957.340
Abril	77.753.171	133.582	134.000.000	77.886.753	216.842	S/I	2.636.040	0	2.852.882	75.033.871
Mayo	80.099.383	390.000	134.000.000	80.489.383	160.000	S/I	2.720.000	0	2.880.000	77.609.383
Junio	122.328.727	190.000	152.000.000	122.518.727	150.000	S/I	2.640.000	0	2.790.000	119.728.727
Julio	127.931.563	400.000	177.000.000	128.331.563	240.000	S/I	2.720.000	0	2.960.000	125.371.563
Agosto	53.812.233	190.000	184.000.000	54.002.233	250.000	S/I	2.640.000	0	2.890.000	51.112.233
Septiembre	51.365.799	367.975	183.000.000	51.733.774	251.502	S/I	2.634.040	0	2.885.542	48.848.232
Octubre	58.415.365	220.000	184.000.000	58.635.365	220.000	S/I	2.640.000	0	2.860.000	55.775.365
Noviembre	26.694.401	130.000	181.000.000	26.824.401	210.000	S/I	2.640.000	0	2.850.000	23.974.401
Diciembre	17.576.241	60.000	179.000.000	17.636.241	200.000	S/I	2.720.000	0	2.920.000	14.716.241
Total	809.154.869	2.101.557	1.964.000.000	811.256.426	2.739.200	-	31.890.384	0	34.629.584	776.626.842

Fuente. Elaboración propia. Datos tomados de la base de datos diaria del balance hídrico para el embalse Pao-Cachinche. HIDROCENTRO

S/I: Sin Información

En la Gráfica 35 se muestran las tendencias de las entradas y las salidas mensuales en el embalse durante todo el año, donde se observa que las entradas crecen de enero a julio, cuando alcanzan el máximo de 128.000.000 m³, para luego disminuir a partir de agosto; por su parte las salidas mensuales muestran una tendencia prácticamente lineal, con una diferencia cercana al 100 por ciento con respecto a los volúmenes de agua que ingresan mensualmente al embalse.



Gráfica 35. Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 1998. Elaboración propia a partir del balance hídrico del embalse

Balance hídrico año 1999. Se registra un aporte neto proveniente de los afluentes al embalse de alrededor de 527.500.000 m³, que si se compara con el aporte de 1998 representa una disminución superior a los 280.000.000 m³ de agua, asimismo, mantiene una tendencia cíclica e irregular durante todo el año, siendo el máximo de alrededor de 98.000.000 m³ registrado en julio y el mínimo de 11.000.000 m³ en diciembre.

Al igual que en 1998, se registra a lo largo del año, escasa lluvia y evaporación en el embalse. Así, se tiene que las lluvias totalizan en el año 2.320.450 m³ (alrededor de 220.000 m³ más que en 1998), alcanzando un máximo de aproximadamente 700.000 m³ en septiembre y un mínimo de tan solo 10.000 m³ en enero, tal como se observa en la Tabla 33. Por su parte, la evaporación totaliza en el año 2.858.632 m³, lo que representa apenas un cuatro por ciento de aumento (alrededor de 120.000 m³) con respecto a 1998.

El volumen de agua almacenado disminuye de 174.000.000 m³ en enero a 155.000.000 m³ en mayo, ubicándose a 5.000.000 m³ por encima del volumen útil del embalse; a partir de junio se invierte la tendencia, es decir, aumenta el volumen almacenado, alcanzando el máximo de 183.000.000 m³ en septiembre.

Tal como en años anteriores, tanto el gasto ecológico como el caudal de bombeo hacia la PTAB muestran las mismas condiciones, es decir, se mantienen constantes a lo largo del año; al igual que en 1998, el embalse no alivió en todo el año. Respecto al balance neto, el mismo fue de ganancia (superior a 458.000.000 m³ al año) ya que las entradas totalizaron más de 493.000.000 m³ frente a 34.500.000 m³ correspondientes a las salidas del embalse.

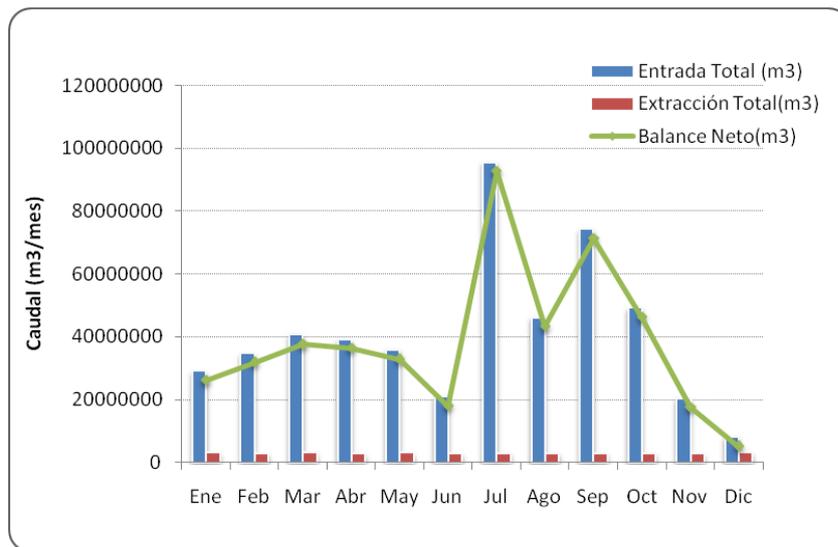
En la Gráfica 36 se observa que las estradas muestran una tendencia cíclica e irregular mientras que las salidas poseen una tendencia prácticamente lineal a lo largo del año, siendo la diferencia entre lo que ingresa y lo que se extrae mensualmente del embalse superior al 90 por ciento.

Tabla 33. Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 1999

Mes	Aporte Ríos (m³)	Lluvia en el embalse (m³)	Volumen almacenado (m³)	Entrada Total (m³)	Evaporación (m³)	Gasto ecológico (m³)	Bombeo (m³)	Alivio (m³)	Extracción Total(m³)	Balance neto (m³)
Enero	31.965.168	10.000	174.000.000	28.995.168	250.000	S/I	2.720.000	0	2.970.000	26.025.168
Febrero	37.263.518	46.364	166.000.000	34.555.054	248.160	S/I	2.460.304	0	2.708.464	31.846.590
Marzo	43.594.088	70.000	158.000.000	40.554.088	320.000	S/I	2.720.000	0	3.040.000	37.514.088
Abril	41.772.069	231.164	155.000.000	39.104.091	207.674	S/I	2.460.304	0	2.667.978	36.436.113
Mayo	38.828.214	280.000	154.000.000	35.828.214	280.000	S/I	2.720.000	0	3.000.000	32.828.214
Junio	23.758.356	250.000	155.000.000	20.878.356	240.000	S/I	2.640.000	0	2.880.000	17.998.356
Julio	98.321.340	254.187	164.000.000	95.458.055	227.245	S/I	2.636.040	0	2.863.285	92.594.770
Agosto	48.893.353	30.000	181.000.000	46.053.353	200.000	S/I	2.640.000	0	2.840.000	43.213.353
Septiembre	76.976.596	698.735	183.000.000	74.086.014	254.542	S/I	2.636.040	0	2.890.582	71.195.432
Octubre	51.970.672	270.000	183.000.000	49.113.621	221.011	S/I	2.636.040	0	2.857.051	46.256.570
Noviembre	23.157.446	120.000	181.000.000	20.337.446	180.000	S/I	2.640.000	0	2.820.000	17.517.446
Diciembre	11.066.352	60.000	180.000.000	8.116.352	230.000	S/I	2.720.000	0	2.950.000	5.166.352
Total	527.567.172	2.320.450	2.034.000.000	493.079.812	2.858.632	-	31.628.728	0	34.487.360	458.592.452

Fuente. Elaboración propia. Datos tomados de la base de datos diaria del balance hídrico para el embalse Pao-Cachinche. HIDROCENTRO

S/I: Sin Información



Gráfica 36. Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 1999. Elaboración propia a partir del balance hídrico del embalse

Balance hídrico año 2000. El aporte neto proveniente de los afluentes al embalse muestra una tendencia cíclica e irregular durante todo el año, donde el máximo se registra en agosto: $113.218.556 \text{ m}^3$, mes que corresponde a la entrada máxima mensual al embalse, con aproximadamente $113.000.000 \text{ m}^3$; mientras que el mínimo ocurre en diciembre y es de alrededor de $15.000.000 \text{ m}^3$. Al comparar el volumen total aportado por los afluentes entre 1999 y 2000 se observa que el mismo aumentó alrededor del dos por ciento (unos $11.700.000 \text{ m}^3$).

Al igual que en 1998 y 1999, durante todo el año se registra escasa lluvia y evaporación en el embalse. La lluvia total en el año fue de $2.022.618 \text{ m}^3$ (alrededor de 300.000 m^3 más que en 1999), alcanzando un máximo de aproximadamente 390.000 m^3 en agosto y un mínimo de tan solo 15.328 m^3 en abril, tal como se observa en la Tabla 34. En cuanto a la evaporación, la misma totaliza en el año $2.867.639 \text{ m}^3$, lo que representa menos del uno por ciento de aumento (alrededor de 9.000 m^3) con respecto a 1999, siendo la máxima evaporación de 306.614 m^3 en abril y la mínima de 192.048 m^3 en junio.

Tabla 34. Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 2000

Mes	Aporte Ríos (m³)	Lluvia en el embalse (m³)	Volumen almacenado (m³)	Entrada Total (m³)	Evaporación (m³)	Gasto ecológico (m³)	Bombeo (m³)	Alivio (m³)	Extracción Total(m³)	Balance neto (m³)
Enero	29.131.112	30.000	176.000.000	29.161.112	260.000	S/I	2.720.000	0	2.980.000	26.181.112
Febrero	34.496.721	32.958	170.000.000	34.529.679	266.927	S/I	2.460.304	0	2.727.231	31.802.448
Marzo	35.290.538	80.000	162.000.000	35.370.538	300.000	S/I	2.720.000	0	3.020.000	32.350.538
Abril	46.271.678	15.328	155.000.000	46.287.006	306.614	S/I	2.636.040	0	2.942.654	43.344.352
Mayo	31.513.393	110.000	146.000.000	31.623.393	230.000	S/I	2.720.000	0	2.950.000	28.673.393
Junio	31.177.417	259.589	145.000.000	31.437.006	192.048	S/I	2.636.040	0	2.828.088	28.608.918
Julio	45.219.151	290.000	149.000.000	45.509.151	230.000	S/I	2.720.000	0	2.950.000	42.559.151
Agosto	113.218.511	390.000	165.000.000	113.608.511	240.000	S/I	2.640.000	0	2.880.000	110.728.511
Septiembre	51.700.002	369.009	180.000.000	52.069.011	214.256	S/I	2.636.040	0	2.850.296	49.218.715
Octubre	47.456.353	290.000	183.000.000	47.746.353	210.000	S/I	2.640.000	0	2.850.000	44.896.353
Noviembre	58.779.145	135.734	182.000.000	58.914.879	197.794	S/I	2.636.040	0	2.833.834	56.081.045
Diciembre	15.019.535	20.000	179.000.000	15.039.535	220.000	S/I	2.720.000	0	2.940.000	12.099.535
Total	539.273.556	2.022.618	1.992.000.000	541.296.174	2.867.639	-	31.884.464	0	34.752.103	506.544.071

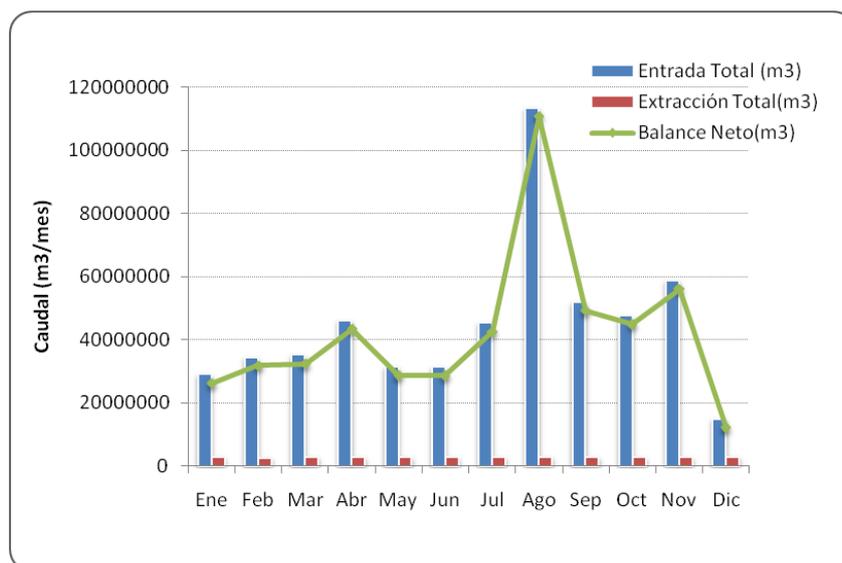
Fuente. Elaboración propia. Datos tomados de la base de datos diaria del balance hídrico para el embalse Pao-Cachinche. HIDROCENTRO

S/I: Sin Información

El volumen de agua almacenada en el embalse disminuye de 176.000.000 m³ en enero a 145.000.000 m³ en junio, período que corresponde a la estación seca, a partir de julio (inicio de la estación de lluvia) asciende hasta alcanzar el máximo de 183.000.000 m³ en octubre.

Tal como en años anteriores, tanto el gasto ecológico como el caudal de bombeo hacia la PTAB muestran las mismas condiciones, es decir, se mantienen constantes a lo largo del año; al igual que en 1999, el embalse no alivió en todo el año. Respecto al balance neto, el mismo fue de ganancia (superior a 500.000.000 m³ al año) ya que las entradas totalizaron más de 540.000.000 m³ frente a 34.700.000 m³ correspondientes a las salidas del embalse.

En la Gráfica 37 se observa que la tendencia de las entradas mensuales es cíclica e irregular durante todo el año mientras que en las salidas mensuales se mantiene casi invariable, siendo la misma prácticamente lineal. Las entradas superan en más del 90 por ciento a las salidas del embalse.



Gráfica 37. Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 2000. Elaboración propia a partir del balance hídrico del embalse

Balance hídrico año 2001. El aporte total de los afluentes al embalse muestra una tendencia cíclica e irregular durante todo el año, siendo el máximo registro el del mes de enero, con alrededor de 44.500.000 m³, que a su vez constituye el mayor ingreso mensual al embalse, totalizando 44.550.887 m³. Los meses de agosto, septiembre y octubre son los de mayor aporte al embalse pues en ese período ingresan más de 40.000.000 m³ al mes; dicho volumen está por debajo del aporte de enero, lo que indica que a lo largo del año no hay un patrón claramente diferenciado entre las épocas seca y lluviosa. Al comparar el volumen aportado por los afluentes entre 2000 y 2001 se observa una disminución superior al 70 por ciento, lo que equivale a alrededor de 385.000.000 m³ de agua que dejaron de entrar en 2001.

A excepción del mes de febrero, se registran lluvias en todo el año, alcanzando el máximo en junio, con alrededor de 2.440.000 m³. De enero a mayo (época seca) llueve sobre el embalse alrededor de 1.516.760 m³, mientras que de junio a diciembre (épocas lluviosa y mixta) como es de esperarse, se registra en el embalse una lluvia de aproximadamente 9.255.000 m³. Asimismo, de la Tabla 35 se observa que las lluvias se incrementan un 85 por ciento con respecto a 2000, totalizando alrededor de 13.200.000 m³ en todo el año.

El volumen almacenado en el embalse disminuye de 174.000.000 m³ en enero a 116.000.000 m³ en junio, lo que constituye una reducción de 34.000.000 m³ (alrededor del 23 por ciento) con respecto al volumen útil del embalse; tal disminución se debe al menor aporte proveniente de los afluentes sumado a la mayor evaporación (de alrededor de 2.500.000 m³ mensuales) durante el período seco. A partir de julio comienza a ascender el volumen almacenado como resultado del aumento de junio a julio de alrededor de 920.000 m³ del aporte de los ríos afluentes. Es necesario destacar que en mayo de 2001 se realiza una batimetría al embalse, disminuyendo 22.000.000 m³ el volumen del mismo.

Tabla 35. Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 2001

Mes	Aporte Ríos (m³)	Lluvia en el embalse (m³)	Volumen almacenado (m³)	Entrada Total (m³)	Evaporación (m³)	Gasto ecológico (m³)	Bombeo (m³)	Alivio (m³)	Extracción Total(m³)	Balance neto (m³)
Enero	44.510.887	40.000	174.000.000	44.550.887	1.840.000	S/I	2.720.000	0	4.560.000	39.990.887
Febrero	4.857.129	0	166.000.000	4.857.129	2.041.675	S/I	2.460.304	0	4.501.979	355.150
Marzo	5.020.000	230.000	156.000.000	5.250.000	2.690.000	S/I	2.720.000	0	5.410.000	-160.000
Abril	5.282.640	366.750	146.000.000	5.649.390	2.353.722	S/I	2.636.040	0	4.989.762	659.628
Mayo	24.780.412	880.000	123.000.000	25.660.412	1.840.000	S/I	2.720.000	0	4.560.000	21.100.412
Junio	7.491.605	2.440.000	116.000.000	9.931.605	1.520.000	S/I	2.640.000	0	4.160.000	5.771.605
Julio	8.412.085	1.760.000	124.000.000	10.172.085	1.650.000	S/I	2.720.000	0	4.370.000	5.802.085
Agosto	16.370.000	1.810.000	135.000.000	18.180.000	1.350.000	S/I	2.640.000	0	3.990.000	14.190.000
Septiembre	14.493.141	1.300.000	144.000.000	15.793.141	1.750.000	S/I	2.640.000	0	4.390.000	11.403.141
Octubre	10.372.616	1.850.000	153.000.000	12.222.616	1.800.000	S/I	2.640.000	0	4.440.000	7.782.616
Noviembre	8.660.482	1.425.938	160.000.000	10.086.420	1.490.506	S/I	2.636.040	0	4.126.546	5.959.874
Diciembre	3.397.338	1.110.000	159.000.000	4.507.338	1.290.000	S/I	2.720.000	0	4.010.000	497.338
Total	153.648.335	13.212.688	1.756.000.000	166.861.023	21.615.903	-	31.892.384	0	53.508.287	113.352.736

Fuente. Elaboración propia. Datos tomados de la base de datos diaria del balance hídrico para el embalse Pao-Cachinche. HIDROCENTRO

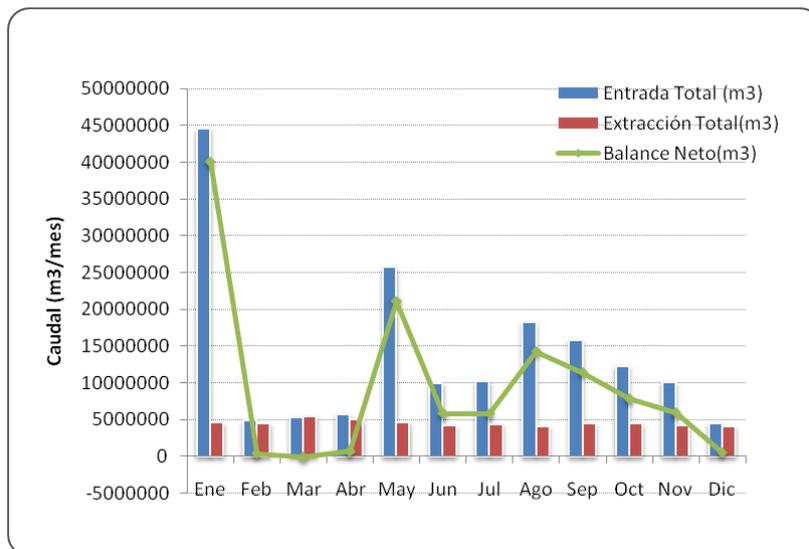
S/I: Sin Información

La evaporación muestra la misma tendencia que en años anteriores, donde se observa que durante la época seca (aproximadamente de enero a abril) se registran las mayores tasas de evaporación mensual (superiores a los 2.500.000 m³ al mes), totalizándose en este período unos 8.925.000 m³; mientras que en la época de lluvias (aproximadamente de mayo a diciembre) disminuye a alrededor de 1.500.000 m³ mensuales, totalizándose en dicho período 12.700.000 m³.

Tanto el gasto ecológico como el caudal de bombeo hacia la PTAB muestran las mismas condiciones que en años anteriores, es decir, se mantienen constantes a lo largo del año; al igual que en 2000, el embalse no alivió en todo el año.

El balance neto en el embalse fue de ganancia, superior a 113.000.000 m³ al año, ya que las entradas totalizaron más de 166.000.000 m³ frente a 53.500.000 m³ correspondientes a las salidas del embalse. De acuerdo a la Tabla 36, sólo en el mes de marzo el balance fue de pérdida (negativo) ya que las salidas (que totalizan 5.410.000 m³) superan en 160.000 m³ a las entradas registradas en ese mes, de alrededor de 5.250.000 m³, cuya causa podría ser atribuida a que precisamente en el mes de marzo se registra la más alta evaporación mensual en el embalse: 2.690.000 m³.

En la Gráfica 38 se observa que las entradas al embalse muestran una tendencia irregular de enero a mayo, comenzando a decrecer a partir de agosto; mientras que las salidas poseen una tendencia prácticamente lineal a lo largo del año, por la poca variación de las variables de salida. La diferencia de lo que entra versus lo que sale del embalse para el mes de enero representa alrededor del 90 por ciento, esto es, casi 40.000.000 m³.



Gráfica 38. Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 2001. Elaboración propia a partir del balance hídrico del embalse

Balance hídrico año 2002. El aporte neto proveniente de los afluentes al embalse totaliza aproximadamente 90.480.000 m³, que si se compara con la misma variable de 2001 se observa una disminución del 40 por ciento, que equivale a alrededor de 63.000.000 m³. De enero a mayo (época seca) el aporte acumulado es del orden de 20.800.000 m³, mientras que de junio a septiembre (época lluviosa) ingresan más de 42.000.000 m³ al embalse. El mes que registra el mayor aporte de los afluentes es junio, con 18.400.00 m³ y el de menor aporte es diciembre, con un aproximado de 2.600.000 m³.

Durante todo el año se registra en el embalse un total de 16.400.00 m³ que representa un aumento del 19 por ciento (alrededor de 3.200.000 m³) con respecto al aporte que ingresó al embalse en 2001. Los únicos meses donde no llueve son febrero y marzo, mientras que de abril a noviembre se prolongan las lluvias en el embalse, registrándose el máximo den 3.700.000 m³ en septiembre.

El volumen almacenado en el embalse disminuye de 156.000.000 m³ en enero a 128.000.000 m³ en mayo, lo que representa una reducción del 15 por ciento (unos 22.000.000 m³) con respecto al volumen útil del embalse, como resultado

del menor ingreso proveniente de los afluentes, la escasa lluvia y la alta evaporación (superior a los 2.000.000 m³ mensuales) en el embalse. A partir de junio y hasta octubre cuando alcanza el volumen máximo de 160.000.000 m³ debido al aumento del aporte y de las lluvias en el embalse así como la disminución de la evaporación, por tratarse del período de lluvias.

La evaporación sigue la misma tendencia que en años anteriores, donde se observa que durante el período seco la misma es del orden de los 2.500.000 m³, mientras que en el período de lluvia desciende a alrededor de 1.500.000 m³ al mes. En total se evapora del embalse un volumen de agua de aproximadamente 21.780.000 m³, que comparado con el total evaporado en 2001, representa un aumento menor al uno por ciento (apenas 167.000 m³), siendo la máxima evaporación la registrada en marzo, de 2.240.000 m³ y la mínima registrada en el mes de junio, de alrededor de 1.465.000 m³ (ver Tabla 36).

Tanto el gasto ecológico como el caudal de bombeo hacia la PTAB muestran las mismas condiciones que en años anteriores, es decir, se mantienen constantes en todo el año; al igual que en 2001, el embalse no alivió en todo el año.

El balance neto en el embalse es de ganancia (más de 53.000.000 m³ en el año) ya que las entradas totalizan alrededor de 107.000.000 m³ mientras que las salidas son superiores a 53.600.000 m³ (ver Tabla 36). Los meses de enero, febrero, marzo y diciembre arrojaron balances negativos (pérdidas), en alrededor de 1.000.000 m³ entre enero y febrero, y sobre los 400.000 m³ en marzo. Para el mes de diciembre las salidas superan a las entradas ya que es precisamente en dicho mes que se registra la menor entrada al embalse: 450.000 m³.

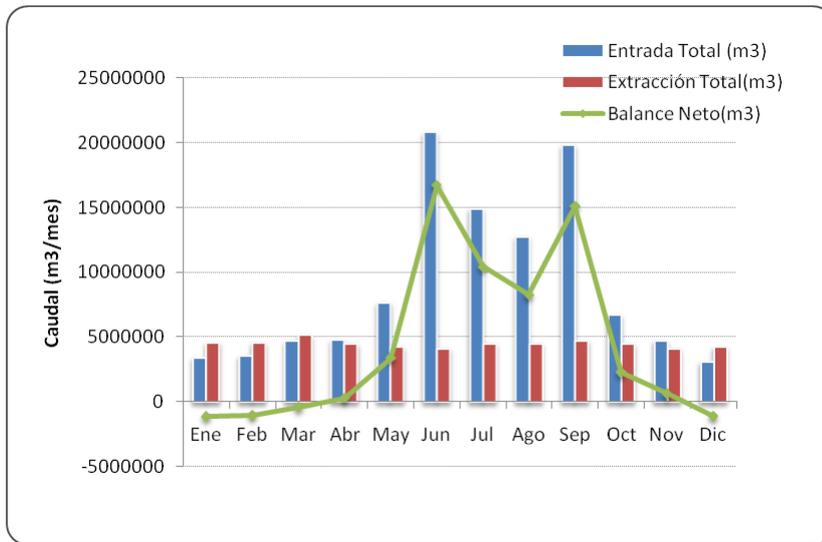
Tabla 36. Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 2002

Mes	Aporte Ríos (m³)	Lluvia en el embalse (m³)	Volumen almacenado (m³)	Entrada Total (m³)	Evaporación (m³)	Gasto ecológico (m³)	Bombeo (m³)	Alivio (m³)	Extracción Total(m³)	Balance neto (m³)
Enero	3.346.691	80.972	156.000.000	3.427.663	1.860.000	S/I	2.720.000	0	4.580.000	-1.152.337
Febrero	3.541.054	0	149.000.000	3.541.054	2.126.056	S/I	2.460.304	0	4.586.360	-1.045.306
Marzo	4.697.456	0	141.000.000	4.697.456	2.410.000	S/I	2.720.000	0	5.130.000	-432.544
Abril	3.570.164	1.200.625	133.000.000	4.770.789	1.859.543	S/I	2.636.040	0	4.495.583	275.206
Mayo	5.629.489	2.010.000	128.000.000	7.639.489	1.550.000	S/I	2.720.000	0	4.270.000	3.369.489
Junio	18.415.628	2.390.882	135.000.000	20.806.510	1.465.962	S/I	2.636.040	0	4.102.002	16.704.508
Julio	13.233.566	1.657.411	147.000.000	14.890.977	1.770.000	S/I	2.720.000	0	4.490.000	10.400.977
Agosto	11.090.000	1.661.062	153.000.000	12.751.062	1.860.000	S/I	2.640.000	0	4.500.000	8.251.062
Septiembre	16.108.103	3.704.614	162.000.000	19.812.717	2.091.465	S/I	2.636.040	0	4.727.505	15.085.212
Octubre	4.851.210	1.860.000	160.000.000	6.711.210	1.820.000	S/I	2.640.000	0	4.460.000	2.251.210
Noviembre	3.353.164	1.381.528	160.000.000	4.734.692	1.470.000	S/I	2.640.000	0	4.110.000	624.692
Diciembre	2.642.477	450.000	150.000.000	3.092.477	1.500.000	S/I	2.720.000	0	4.220.000	-1.127.523
Total	90.479.002	16.397.094	1.774.000.000	106.876.096	21.783.026	-	31.888.424	0	53.671.450	53.204.646

Fuente. Elaboración propia. Datos tomados de la base de datos diaria del balance hídrico para el embalse Pao-Cachinche. HIDROCENTRO

S/I: Sin Información

En la Gráfica 39 se observa que las entradas poseen una tendencia cíclica e irregular, donde los meses de junio a septiembre acumulan el mayor ingreso al embalse (alrededor 68.262.000 m³) debido al aumento del aporte proveniente de los afluentes y de las lluvias registradas en el mismo. En cuanto a las salidas, muestran una tendencia casi lineal durante todo el año, con un volumen de extracción promedio de 4.500.000 m³ al mes, donde la máxima salida corresponde al mes de marzo, el cual registra la máxima evaporación.



Gráfica 39. Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 2002. Elaboración propia a partir del balance hídrico del embalse

Balance hídrico año 2003. En todo el año ingresaron al embalse aproximadamente 153.217.664 m³ de agua proveniente de los afluentes, lo que representa un aumento del 40 por ciento (alrededor de 62.740.000 m³ al año) con respecto a 2002. De la Tabla 37 se puede observar que existen dos períodos: el de enero a marzo, donde el aporte se ubica en alrededor de 11.653.000 m³, (correspondiente al período seco) y el de abril a noviembre, donde el aporte se eleva a más de 137.800.000 m³. El máximo aporte se registra en agosto, siendo de 25.440.000 m³ mientras que el mínimo ocurre en enero, de aproximadamente 2.630.000 m³.

En todo el año se registra en el embalse un total de 19.350.000 m³ de lluvia, que al ser comparado con la misma variable de 2002, se observa un aumento del 15 por ciento (alrededor de 2.952.000 m³) con respecto a 2002. De la Tabla 38 se observa que de enero a marzo no llueve en el embalse mientras que de junio a agosto se registran las mayores precipitaciones, superiores a los 3.000.000 m³ mensuales. El máximo de lluvia se registra en julio, con 3.750.000 m³ y el mínimo se registra en diciembre, con 180.000 m³.

El volumen almacenado en el embalse disminuye de 154.000.000 m³ en enero a 136.000.000 m³ en mayo, mes a partir del cual comienza a aumentar dicho volumen hasta alcanzar el máximo de 164.000.000 m³ en agosto; en este mes se registra el mayor volumen de entrada al embalse por el aumento del aporte proveniente de los afluentes (alrededor de 25.000.000 m³) más las elevadas lluvias, superiores a los 3.000.000 m³ al mes.

La evaporación registrada en el año es de alrededor de 21.836.000 m³, que representa un aumento de apenas el 0,2 por ciento (alrededor de 53.000 m³). De enero a mayo (época seca) se registra la mayor evaporación en el embalse, siendo el acumulado de alrededor de 10.960.000 m³, mientras que de junio a diciembre (épocas lluviosa y mixta) la evaporación acumulada es de aproximadamente 10.878.000 m³, con una diferencia superior a 1.500.000 m³ entre ambos períodos. Tanto el gasto ecológico como el caudal de bombeo hacia la PTAB muestran las mismas condiciones que en años anteriores, es decir, se mantienen constantes en todo el año; al igual que en 2002, el embalse no alivió en todo el año.

Tabla 37. Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 2003

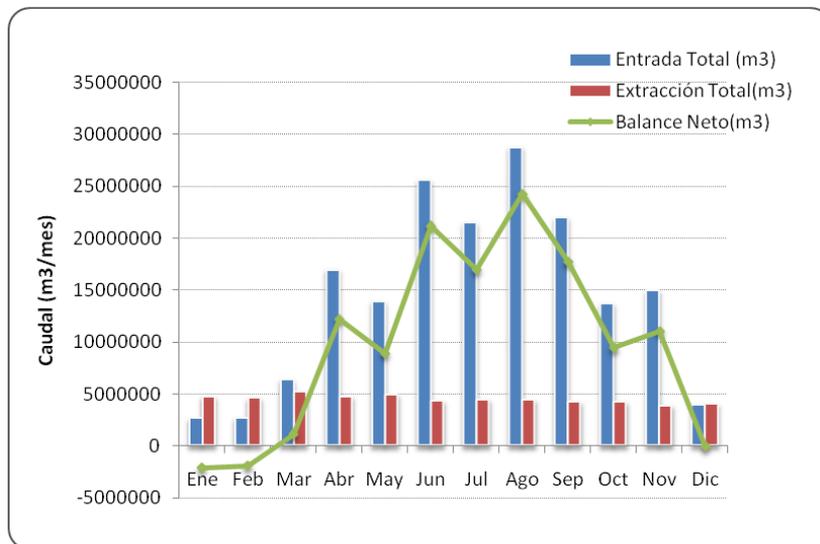
Mes	Aporte Ríos (m³)	Lluvia en el embalse (m³)	Volumen almacenado (m³)	Entrada Total (m³)	Evaporación (m³)	Gasto ecológico (m³)	Bombeo (m³)	Alivio (m³)	Extracción Total(m³)	Balance neto (m³)
Enero	2.629.188	0	154.000.000	2.629.188	2.030.000	S/I	2.720.000	0	4.750.000	-2.120.812
Febrero	2.668.949	0	147.000.000	2.668.949	2.116.056	S/I	2.460.304	0	4.576.360	-1.907.411
Marzo	6.354.414	0	139.000.000	6.354.414	2.480.000	S/I	2.720.000	0	5.200.000	1.154.414
Abril	15.565.657	1.365.730	134.000.000	16.931.387	2.102.491	S/I	2.636.040	0	4.738.531	12.192.856
Mayo	11.774.235	2.100.000	136.000.000	13.874.235	2.230.000	S/I	2.720.000	0	4.950.000	8.924.235
Junio	22.250.507	3.290.000	149.000.000	25.540.507	1.690.000	S/I	2.640.000	0	4.330.000	21.210.507
Julio	17.688.666	3.750.000	162.000.000	21.438.666	1.730.000	S/I	2.720.000	0	4.450.000	16.988.666
Agosto	25.439.855	3.270.000	164.000.000	28.709.855	1.800.000	S/I	2.640.000	0	4.440.000	24.269.855
Septiembre	20.425.638	1.492.222	163.000.000	21.917.860	1.550.440	S/I	2.636.040	0	4.186.480	17.731.380
Octubre	11.424.690	2.230.000	163.000.000	13.654.690	1.580.000	S/I	2.640.000	0	4.220.000	9.434.690
Noviembre	13.262.749	1.671.361	163.000.000	14.934.110	1.247.175	S/I	2.626.040	0	3.873.215	11.060.895
Diciembre	3.733.116	180.000	160.000.000	3.913.116	1.280.000	S/I	2.720.000	0	4.000.000	-86.884
Total	153.217.664	19.349.313	1.834.000.000	172.566.977	21.836.162	-	31.878.424	0	53.714.586	118.852.391

Fuente. Elaboración propia. Datos tomados de la base de datos diaria del balance hídrico para el embalse Pao-Cachinche. HIDROCENTRO

S/I: Sin Información

El balance neto en el embalse es de ganancia (alrededor de 119.000.000 m³ al año) ya que mientras las entradas superan los 172.500.000 m³ las salidas son de alrededor de 53.715.000 m³. La máxima ganancia se registra en agosto: 24.270.000 m³ (ver Tabla 38) como resultado del mayor aporte proveniente de los afluentes en ese mes, el cual fue mayor a 25.000.000 m³. Los meses de enero, febrero y diciembre fueron de pérdida (las salidas superan a las entradas) debido al menor aporte de los ríos afluentes (sobre los 3.000.000 m³ mensuales) así como de las lluvias registradas en esos meses.

En la Gráfica 40 se observa que las entradas muestran una tendencia creciente de enero a agosto, cuando se alcanza el máximo superior a 28.000.000 m³; mientras que a partir de septiembre la tendencia decrece. Las salidas muestran, por su parte, una tendencia casi lineal a lo largo del año, siendo la salida mensual promedio de alrededor de 4.500.000 m³.



Gráfica 40. Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 2003. Elaboración propia a partir del balance hídrico del embalse

Balance hídrico año 2004. Entre enero a mayo el aporte neto proveniente de los afluentes al embalse muestra una tendencia creciente ya que ingresan alrededor de 79.500.000 m³; a partir del mes mayo se observa un marcado incremento del aporte como consecuencia del desvío del Lago de Valencia hacia el embalse Pao-Cachinche, registrándose en promedio un aporte superior a los 200 billones de metros cúbicos mensuales, ya que el ingreso diario pasa de alrededor de 500.000 m³ a 10.000 x 10⁶ m³.

Se registran en total más de 18.000.00 m³ de lluvia en el embalse, que respecto a 2003 representa un aumento superior a 900.000 m³, siendo mayo el mes de mayor precipitación, con 3.890.000 m³. De la Tabla 38 se observa que en febrero y marzo no llueve en el embalse.

El volumen almacenado muestra la misma tendencia de los años anteriores, pues desciende de 158.000.000 m³ en enero a 149.000.000 m³ en abril para luego aumentar hasta alcanzar el máximo de 165.000.000 m³ en octubre, el cual constituye el mes de mayor entrada al embalse por el aporte de más de 700 billones de metros cúbicos.

La evaporación total del embalse disminuye en más de 600.000 m³ (apenas un tres por ciento) con respecto a 2003, pues se evaporan alrededor de 21.192.000 m³ de agua del embalse. La máxima evaporación, de 2.500.000 m³ mensuales, se registra en marzo y la mínima, de aproximadamente 1.280.000 m³, se registra en noviembre.

Al igual que en años anteriores, no hay registro del gasto ecológico, sin embargo el mismo estaría entre los 600 a 800 LPS diarios, de acuerdo a Hidrocentro. Con respecto al caudal de bombeo diario hacia la PTAB, el mismo pasa de 1020 LPS en 2003 a 5400 LPS en 2004, lo que representa un aumento del 80 por ciento con

respecto a los años anteriores, como resultado del marcado incremento de las entradas diarias al embalse por el trasvase del Lago de Valencia. Durante todo el año se bombearon aproximadamente 170.700.000 m³ de agua del embalse hacia la planta potabilizadora Alejo Zuloaga.

El embalse comienza a aliviar a partir de julio, que corresponde al mes cuando se da inicio al trasvase del Lago de Valencia hacia el mismo. De la Tabla 38 se observa que el volumen aliviado mensualmente corresponde al volumen que ingresa al embalse proveniente del aporte de los afluentes más el desvío superior a los 200 billones de metros cúbicos del trasvase. En cuanto al balance neto en el embalse, el mismo es de pérdida (alrededor de 94.000.000 m³) ya que, con excepción del mes de mayo, las salidas mensuales fueron mayores a las entradas mensuales.

Balance hídrico año 2005. El aporte neto que ingresa al embalse durante el año, el cual proviene de los afluentes al mismo, totaliza más de 430.000.000 m³, lo que equivale a una disminución superior a 12 veces el aporte neto en 2004, cuando ingresan aproximadamente 5×10^{12} m³ de agua al embalse. Durante todo el año, el aporte muestra una tendencia cíclica e irregular, siendo el mes de agosto, con alrededor de 70.000.000 m³, el mes de mayor aporte por ríos y el mes de marzo, con 14.800.000 m³, el de menor ingreso.

Tabla 38. Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 2004

Mes	Aporte Ríos(m ³)	Lluvia en el embalse (m ³)	Volumen almacenado (m ³)	Entrada Total (m ³)	Evaporación (m ³)	Gasto ecológico (m ³)	Bombeo (m ³)	Alivio (m ³)	Extracción Total(m ³)	Balance Neto (m ³)
Enero	14.990.000	20.000	158.000.000	15.010.000	1.850.000	S/I	14.460.000	0	16.310.000	-1.300.000
Febrero	13.475.456	0	155.000.000	13.475.456	1.945.216	S/I	13.530.240	0	15.475.456	-2.000.000
Marzo	12.870.000	0	154.000.000	12.870.000	2.510.000	S/I	14.463.360	0	16.973.360	-4.103.360
Abril	12.677.812	1.235.669	149.000.000	13.913.481	1.916.681	S/I	13.996.800	0	15.913.481	-2.000.000
Mayo	25.480.000	3.890.000	156.000.000	29.370.000	1.600.000	S/I	14.463.360	0	16.063.360	13.306.640
Junio	217.000.620.000	1.994.498	161.000.000	217.002.614.498	1.714.594	S/I	13.996.800	217.000.620.000	217.016.331.394	-13.716.896
Julio	272.148.420.000	2.360.000	161.000.000	272.150.780.000	1.740.000	S/I	14.463.360	272.148.420.000	272.164.623.360	-13.843.360
Agosto	396.963.540.000	2.920.000	163.000.000	396.966.460.000	1.770.000	S/I	14.463.360	396.963.540.000	396.979.773.360	-13.313.360
Septiembre	415.753.315.686	2.788.639	163.000.000	415.756.104.325	1.793.013	S/I	13.996.800	415.753.315.686	415.769.105.499	-13.001.174
Octubre	742.066.700.000	2.120.000	165.000.000	742.068.820.000	1.570.000	S/I	14.463.360	742.066.700.000	742.082.733.360	-13.913.360
Noviembre	280.485.365.110	893.392	162.000.000	280.486.258.502	1.282.666	S/I	13.996.800	280.485.365.110	280.500.644.576	-14.386.074
Diciembre	116.504.710.000	230.000	156.000.000	116.504.940.000	1.500.000	S/I	14.463.360	116.504.710.000	116.520.673.360	-15.733.360
Total	2.441.002.164.064	18.452.198	1.903.000.000	5.917.411.266.262	21.192.170	-	170.757.600	2.440.922.670.796	5.917.505.270.566	-94.004.304

Fuente. Elaboración propia. Datos tomados de la base de datos diaria del balance hídrico para el embalse Pao-Cachinche. HIDROCENTRO

S/I: Sin Información

De enero a marzo se registra la menor cantidad de lluvia en el embalse, con apenas 230.954 m³, período que corresponde a la época seca, mientras que de abril a noviembre llueve un aproximado de 19.830.000 m³, período que corresponde a la época lluviosa. En mayo se registra la máxima precipitación en el embalse con alrededor de 3.830.000 m³, mientras que en marzo se registra la mínima, de aproximadamente 14.796.000 m³.

El volumen almacenado disminuye de 159.000.000 m³ en enero a 152.000.000 m³ en abril (ver Tabla 39), período que corresponde a la época seca, comienza a ascender el volumen a partir de mayo y alcanza el almacenamiento máximo de 164.000.000 m³ en agosto, el cual corresponde al mes de mayor ingreso al embalse, superior a 73.780.000 m³.

La evaporación en el embalse muestra la misma tendencia de años anteriores, donde se observa que los mayores volúmenes de agua evaporados se totalizan entre febrero y marzo (siendo el máximo de 2.760.000 m³), mientras que el resto del año la evaporación promedio mensual es de alrededor de 1.500.000 m³. Durante todo el año se evaporan aproximadamente 21.990.000 m³, que comparado con 2004 representa un aumento del cuatro por ciento (alrededor de 800.000 m³).

Durante todo el año se registra un gasto ecológico de 600 LPS diarios, alrededor de 51.840 m³, descargándose al cauce del río Pao un volumen de aproximadamente 18.870.000 m³ de agua provenientes del embalse.

Tabla 39. Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 2005

Mes	Aporte Ríos (m³)	Lluvia en el embalse (m³)	Volumen almacenado (m³)	Entrada Total (m³)	Evaporación (m³)	Gasto ecológico (m³)	Bombeo (m³)	Alivio (m³)	Extracción Total(m³)	Balance neto (m³)
Enero	24.154.569	171.341	159.000.000	24.325.910	1.700.999	1.607.040	16.074.400	5.447.471	24.829.910	-504.000
Febrero	19.830.189	59.640	158.000.000	19.889.829	1.802.961	1.451.520	14.999.040	2.436.308	20.689.829	-800.000
Marzo	14.796.042	0	156.000.000	14.796.042	2.760.305	1.607.040	14.195.520	33.177	18.596.042	-3.800.000
Abril	16.878.267	1.989.048	152.000.000	18.867.315	2.260.435	1.555.200	16.951.680	0	20.767.315	-1.900.000
Mayo	46.124.391	3.831.190	158.000.000	49.955.581	1.875.809	1.607.040	16.139.520	17.933.212	37.555.581	12.400.000
Junio	37.295.555	2.016.564	161.000.000	39.312.119	1.749.708	1.555.200	15.448.320	24.058.891	42.812.119	-3.500.000
Julio	52.389.247	3.634.629	162.000.000	56.023.876	1.499.280	1.607.040	14.195.520	37.122.036	54.423.876	1.600.000
Agosto	69.848.720	3.934.095	164.000.000	73.782.815	1.980.738	1.607.040	14.195.520	56.399.517	74.182.815	-400.000
Septiembre	40.665.368	1.156.265	161.000.000	41.821.633	1.745.653	1.555.200	13.737.200	25.183.200	42.221.253	-399.620
Octubre	33.879.602	1.730.000	161.000.000	35.609.602	1.710.768	1.555.200	13.703.040	20.945.500	37.914.508	-2.304.906
Noviembre	44.771.778	1.536.206	162.000.000	46.307.984	1.388.022	1.555.200	13.737.600	29.427.200	46.108.022	199.962
Diciembre	30.919.747	645.516	160.000.000	31.565.263	1.515.747	1.607.040	14.973.120	15.069.400	33.165.307	-1.600.044
Total	431.553.475	20.704.494	1.914.000.000	452.257.969	21.990.425	18.869.760	178.350.480	234.055.912	453.266.577	-1.008.608

Fuente. Elaboración propia. Datos tomados de la base de datos diaria del balance hídrico para el embalse Pao-Cachinche. HIDROCENTRO

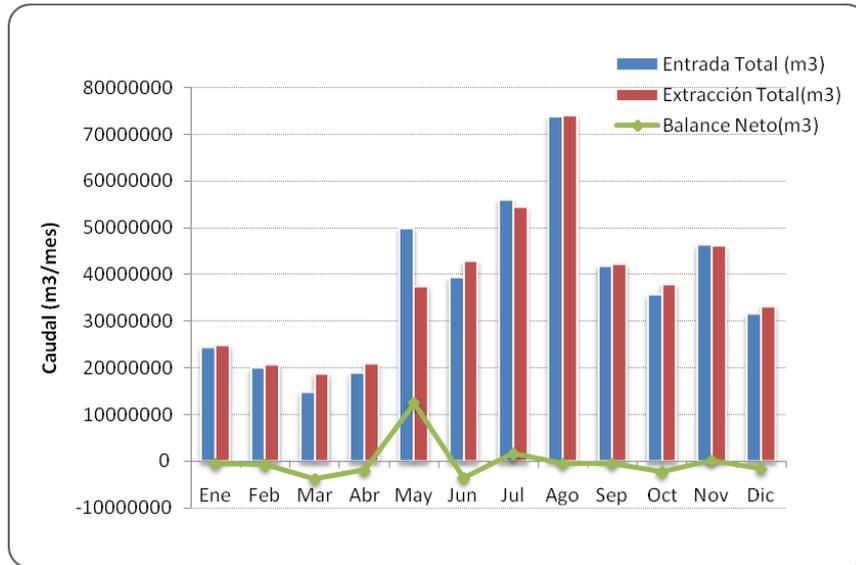
Al igual que en 2004, el caudal de bombeo se mantiene constante a lo largo del año en 5400 LPS diarios, con un total de agua bombeada hacia la PTAB de alrededor de 178.350.000 m³. A diferencia de años anteriores donde el caudal de bombeo diario permanece constante durante todo el año, en 2005 el mismo varía diariamente. Así se tiene que, durante los dos primeros meses del año se bombearon diariamente 6200 LPS, en marzo se redujo a 5300 LPS al día debido a la disminución del aporte de los ríos y la ausencia de lluvia. Entre abril y mayo el bombeo se intercala entre 5300, 6200 y 6800 LPS diarios, con una periodicidad que no sigue una frecuencia establecida. En junio el bombeo disminuye de 6200 LPS diarios, hasta mediados del mes, a 5300 LPS al día el resto del mes. Desde julio a diciembre el bombeo se mantiene en 5300 LPS diarios.

El embalse registra alivio durante todo el año, con excepción del mes de abril, cuando se alcanza un volumen de almacenamiento de 152.000.000 m³, a tan solo 2.000.000 m³ del volumen útil del embalse. De la Tabla 39 se observa que el embalse Pao-Cachinche alivia tanto en el período de lluvias, tendencia que históricamente se ha evidenciado, como en el período seco; lo que puede ser atribuido al trasvase del Lago de Valencia desde junio de 2004, adquiriendo el mismo la condición de alivio permanente.

El balance neto del embalse, al igual que en 2004, fue de pérdida ya que las entradas mensuales totalizan alrededor de 452.257.969 m³ mientras que las salidas superan en más de 1.000.000 m³ a las entradas, al totalizar 453.266.577 m³.

En la Gráfica 41 se observa que tanto las entradas como las salidas muestran una tendencia creciente de enero a agosto, cuando se alcanza la máxima entrada y por ende la máxima salida (ver Tabla 39). Se observa, además, que solamente los

meses de mayo y noviembre arrojan balances positivos, debido al aumento de las lluvias en el embalse en el mes de mayo y a la disminución de la evaporación en el mes de noviembre. De septiembre a diciembre la tendencia de las entradas y las salidas decrece debido al menor volumen de agua que ingresa al embalse de los afluentes.



Gráfica 41. Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 2005. Elaboración propia a partir del balance hídrico del embalse

Balance hídrico año 2006. El volumen neto de agua proveniente de los afluentes al embalse muestra una tendencia cíclica e irregular durante todo el año, siendo el aporte máximo de 85.022.143 m³ en el mes de agosto y el mínimo aporte de alrededor de 1.515.329 m³ en marzo. El aporte neto total al embalse es de aproximadamente 355.000.000 m³ y al compararse con el de 2005 representa una disminución del 18 por ciento, alrededor de 77.500.000 m³.

En la Tabla 40 se observa que durante todo el año se registran lluvias en el embalse, donde el máximo ocurre en agosto, con aproximadamente 6.580.000 m³, y el mínimo ocurre en febrero, con apenas 26.360 m³. En total se registra en el

embalse un volumen de 21.290.000 m³ de lluvia en 2006, que comparado con 2005 representa un aumento de alrededor de 580.000 m³.

La evaporación en el embalse sigue el mismo patrón de años anteriores, ya que la evaporación mensual es superior a los 2.000.000 m³ de enero a abril (correspondiente al período seco) mientras que de mayo a diciembre (correspondiente los períodos lluvioso y mixto) es aproximadamente 1.500.000 m³. En todo el año se evapora un volumen de agua de 21.760.000 m³, que comparado con el registrado en 2005 (alrededor de 21.990.000 m³) representa una disminución del uno por ciento.

El gasto ecológico en 2006 muestra un aumento del 30 por ciento con respecto a 2005, con una descarga diaria al cauce del río Pao de 835 LPS durante todo el año; esta variación de la descarga puede ser atribuida al aumento del aporte de los afluentes al embalse por el trasvase del Lago de Valencia.

El volumen almacenado en el embalse disminuye de 159.000.000 m³ en enero a 152.000.000 m³ en abril, como resultado del bajo aporte proveniente de los ríos afluentes durante la época seca, de alrededor de 34.000.000 m³, lo cual representa un 10 por ciento del aporte en época de lluvia superior a 300.000.000 m³.

Tabla 40. Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 2006

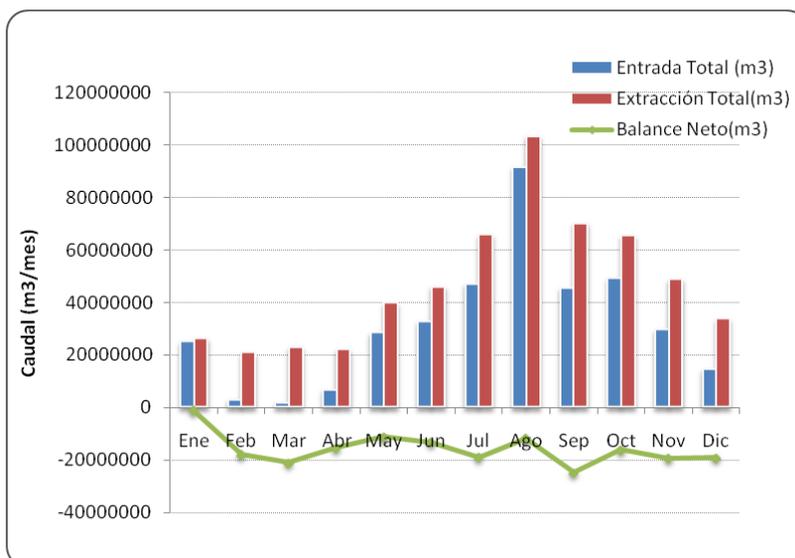
Mes	Aporte Ríos (m³)	Lluvia en el embalse (m³)	Volumen almacenado (m³)	Entrada Total (m³)	Evaporación (m³)	Gasto ecológico (m³)	Bombeo (m³)	Alivio (m³)	Extracción Total(m³)	Balance neto (m³)
Enero	24.453.533	661.510	159.000.000	25.115.043	1.735.066	2.236.464	17.798.400	4.445.112	26.215.042	-1.099.999
Febrero	2.894.429	26.360	157.000.000	2.920.789	2.058.143	2.020.032	16.450.560	280.997	20.809.732	-17.888.943
Marzo	1.515.329	264.697	154.000.000	1.780.026	2.361.071	2.236.464	18.213.120	0	22.810.655	-21.030.629
Abril	5.520.049	1.094.927	152.000.000	6.614.976	2.173.975	2.173.975	17.625.600	0	21.973.550	-15.358.574
Mayo	24.839.077	3.644.323	160.000.000	28.483.400	1.654.254	1.654.254	18.213.120	18.192.682	39.714.310	-11.230.910
Junio	30.440.106	2.361.028	161.000.000	32.801.134	1.649.691	1.649.691	17.625.600	25.087.123	46.012.105	-13.210.971
Julio	44.567.315	2.409.509	163.000.000	46.976.824	1.677.747	1.677.747	18.213.120	44.262.610	65.831.224	-18.854.400
Agosto	85.022.143	6.581.167	165.000.000	91.603.310	1.864.349	1.864.349	18.213.120	81.402.500	103.344.318	-11.741.008
Septiembre	44.593.112	949.592	163.000.000	45.542.704	1.878.253	1.878.253	17.625.600	48.900.130	70.282.236	-24.739.582
Octubre	47.721.530	1.625.510	163.000.000	49.347.040	1.731.355	1.731.355	18.213.120	43.779.221	65.455.051	-16.108.011
Noviembre	28.327.160	1.234.454	162.000.000	29.561.614	1.589.760	1.589.760	17.625.600	28.007.534	48.812.654	-19.251.040
Diciembre	14.121.485	438.290	160.000.000	14.559.775	1.387.789	1.387.789	18.213.120	12.635.522	33.624.220	-19.064.995
Total	354.015.268	21.291.367	1.919.000.000	375.306.635	21.761.453	22.100.133	214.030.080	306.993.431	564.885.092	-189.578.462

Fuente. Elaboración propia. Datos tomados de la base de datos diaria del balance hídrico para el embalse Pao-Cachinche. HIDROCENTRO

A diferencia de 2005, año en que se manejan tres caudales de bombeo mensuales hacia la planta potabilizadora Alejo Zuloaga: 5300 LPS, 6200 LPS y 6800 LPS, respectivamente; en 2006 se fija el bombeo en 6800 LPS diarios. El aumento del caudal de agua extraída del embalse puede ser atribuido al aporte de alrededor de 12.000 LPS diarios provenientes río Paito, hacia el cual son desviados diariamente alrededor de 7000 LPS del Lago de Valencia. Según estimaciones de HIDROCENTRO, al embalse ingresa un volumen de alrededor de 220 millones de metros cúbicos al año, provenientes del trasvase.

El embalse alivia todo el año, excepto en marzo y abril, siendo la máxima descarga la registrada en agosto, de aproximadamente 81.400.000 m³, este mes corresponde además al máximo aporte de los afluentes y en consecuencia, a la máxima entrada al embalse. Durante todo el año se alivian más de 300.000.000 m³ (ver Tabla 41).

El balance neto en el embalse arrojó una pérdida de aproximadamente 190.000.000 m³ en el año, ya que las salidas mensuales superan en más del 30 por ciento a las entradas mensuales al mismo. En la Gráfica 43 se observa que tanto las entradas como las salidas muestran una tendencia creciente de enero a agosto, cuando se alcanzan los máximos correspondientes, y de septiembre a diciembre la tendencia es decreciente.



Gráfica 42. Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 2006. Elaboración propia a partir del balance hídrico del embalse

Balance hídrico año 2007. El aporte neto al embalse mantiene una tendencia cíclica e irregular durante todo el año, donde los meses de menor aporte son noviembre y diciembre, que juntos acumulan alrededor de 8.430.000 m³. El máximo aporte proveniente de los afluentes se registra en septiembre con más de 66.460.000 m³, que corresponde además al máximo ingreso al embalse: 68.530.000 m³. En todo el año ingresa un volumen total de 341.366.701 m³, que comparado con 2006 representa una disminución de alrededor del cuatro por ciento (mas de 12.600.000 m³).

Al igual que el aporte neto, la lluvia en el embalse disminuye alrededor del 24 por ciento (mas de 5.150.000 m³) de 2006 a 2007, ya que en este año se totalizan 16.140.000 m³ frente a 21.290.000 m³ del año anterior. Solo en el mes de febrero no se registran lluvias en el embalse, asimismo, de enero a abril (correspondiente a la época seca) se registra en conjunto el menor volumen de precipitación, con alrededor de 1.700.000 m³ mientras que agosto constituye el mes de mayor precipitación con 3.216.000 m³.

Al igual que en años anteriores, el volumen almacenado sigue una tendencia decreciente de enero a marzo, al pasar de 159 a 155 millones de metros cúbicos (ver Tabla 41) para luego comenzar a ascender hasta alcanzar, en septiembre, el máximo de 162.000.000 m³ debido al aumento del aporte proveniente de los afluentes al embalse y a la baja evaporación de la época lluviosa.

En cuanto a la evaporación en el embalse, la misma muestra la tendencia de años anteriores, donde la mayor evaporación mensual se registra en marzo con 2.280.000 m³ y la más baja se registra en abril, con 1.280.000 m³. En todo el año se evaporan alrededor de 20.234.000 m³, que al compararse con la misma variable en 2006 registra un total de 21.760.000 m³.

El gasto ecológico se mantiene igual que el año anterior, ya que se mantiene constante en 835 LPS diarios en todo el año. En total se descarga al cauce del río Pao un aproximado de 26.400.000 m³ en el año.

El caudal de bombeo hacia la PTAB fue variable a lo largo de 2007, así se tiene que en enero se mantiene constante en 5200 LPS diarios. Entre febrero y mayo se opera con tres caudales de bombeo, los cuales van desde 5200 LPS, 6200 LPS hasta 7200 LPS, establecidos con una duración diaria y una periodicidad variable a lo largo del mes. En junio se mantiene constante dicho caudal en 5200 LPS diarios, de julio a octubre asciende a 6200 LPS diarios y de noviembre a diciembre se reduce a 1020 LPS diarios.

Tabla 41. Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 2007

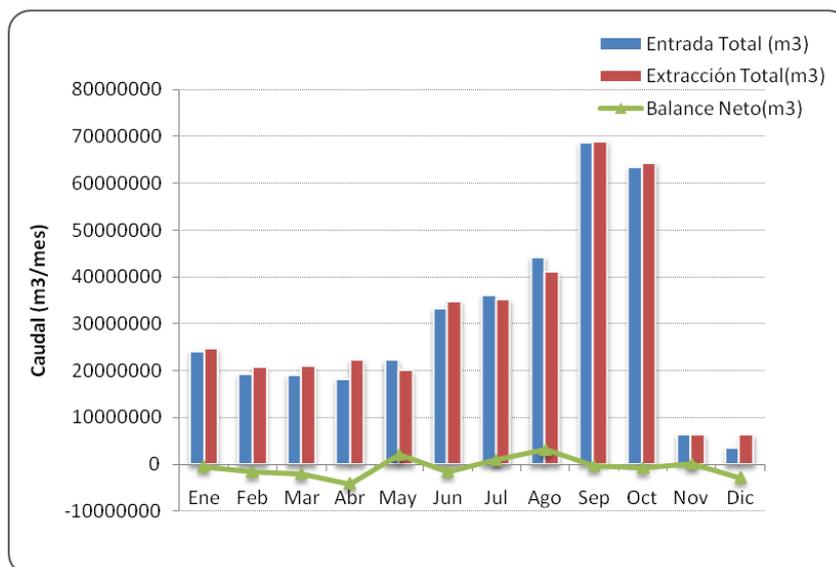
Mes	Aporte Ríos (m³)	Lluvia en el embalse (m³)	Volumen almacenado (m³)	Entrada Total (m³)	Evaporación (m³)	Gasto ecológico (m³)	Bombeo (m³)	Alivio (m³)	Extracción Total(m³)	Balance neto (m³)
Enero	24.076.948	15.960	159.000.000	24.092.908	1.657.239	2.236.464	13.331.520	7.367.685	24.592.908	-500.000
Febrero	19.122.645	0	158.000.000	19.122.645	1.952.743	2.020.032	15.690.240	1.159.631	20.822.646	-1.700.001
Marzo	17.875.879	1.034.574	155.000.000	18.910.453	2.288.869	2.236.464	16.485.120	0	21.010.453	-2.100.000
Abril	17.374.884	656.072	157.000.000	18.030.956	1.282.302	2.236.464	16.485.120	2.201.264	22.205.150	-4.174.194
Mayo	20.581.039	1.643.427	158.000.000	22.224.466	1.896.530	2.236.464	13.893.120	2.098.351	20.124.465	2.100.001
Junio	31.507.341	1.692.210	161.000.000	33.199.551	1.655.752	2.164.320	13.996.800	16.982.679	34.799.551	-1.600.000
Julio	33.925.315	2.134.451	160.000.000	36.059.766	1.707.215	2.236.464	15.552.000	15.664.090	35.159.769	899.997
Agosto	40.931.715	3.216.889	161.000.000	44.148.604	1.645.071	2.236.464	16.606.080	20.560.389	41.048.004	3.100.600
Septiembre	66.333.208	2.195.950	162.000.000	68.529.158	1.703.799	2.164.320	16.070.400	48.914.660	68.853.179	-324.021
Octubre	61.207.725	2.231.476	162.000.000	63.439.201	1.648.295	2.236.464	16.606.080	43.784.826	64.275.665	-836.464
Noviembre	5.498.425	788.656	162.000.000	6.287.081	1.450.261	2.164.320	2.636.040	0	6.250.621	36.460
Diciembre	2.931.577	530.448	160.000.000	3.462.025	1.346.185	2.236.464	2.723.908	0	6.306.557	-2.844.532
Total	341.366.701	16.140.113	1.915.000.000	357.506.814	20.234.261	26.404.704	160.076.428	158.733.575	365.448.968	-7.942.154

Fuente. Elaboración propia. Datos tomados de la base de datos diaria del balance hídrico para el embalse Pao-Cachinche. HIDROCENTRO

Entre los meses de febrero a mayo el caudal bombeado hacia la planta potabilizadora varía por la ocurrencia del período seco, de junio a octubre (período de lluvias) el bombeo es constante; mientras que de noviembre a diciembre el caudal bombeado disminuye por el menor aporte de los afluentes al embalse.

El embalse alivia durante todo el año, excepto en los meses de marzo (por la mayor evaporación registrada en ese mes), y entre noviembre a diciembre por la disminución del aporte proveniente de los afluentes (ver Tabla 41). De abril a octubre se descargan por el aliviadero más de 150.000.000 m³, siendo el máximo registrado en septiembre, de alrededor de 49.000.000 m³, mes que corresponde al mayor aporte al embalse, superior a los 60.000.000 m³. Se descargan por el vertedero libre del embalse más de 158.000.000 m³, en todo el año.

Tal como se observa desde 2004, el balance neto en el embalse es de pérdida, de aproximadamente 8.000.000 m³, ya que las extracciones mensuales exceden en alrededor del uno por ciento, a las entradas al embalse. En la Gráfica 43 se observa que tanto las entradas como las salidas poseen una tendencia creciente de enero a septiembre, cuando se alcanza el máximo ingreso y por consiguiente la máxima salida (ver Tabla 41); a partir de octubre la tendencia es decreciente, disminuyendo abruptamente los dos últimos meses del año por la reducción en más de 55.000.000 m³ del aporte proveniente de los afluentes, lo que representa una disminución superior al 90 por ciento.



Gráfica 43. Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 2007. Elaboración propia a partir del balance hídrico del embalse

Balance hídrico año 2008. El aporte al embalse, proveniente de los afluentes, muestra una tendencia cíclica e irregular durante todo el año, siendo el mínimo de alrededor de 18.800.000 m³ en febrero y el máximo de 74.300.000 m³ en noviembre que corresponde al máximo ingreso mensual del año, superior a 77.000.000 m³, aunado a la mayor precipitación en el embalse (alrededor de 2.900.000 m³) tal como se observa en la Tabla 42. En todo el año ingresan al embalse un total de 460.000.000 m³, que comparado con la misma variable en 2007 (superior a los 340.000.000 m³) representa un aumento de aproximadamente 86.000.000 m³.

Durante todo el año se registran lluvias en el embalse, alcanzándose el máximo en julio, con alrededor de 4.000.000 m³ mientras que el menor registro corresponde a enero, con apenas 7.900 m³. En todo el año se totalizan más de 19.000.000 m³ de lluvia en el embalse, que comparado con la misma variable en 2007 representa un aumento superior al 15 por ciento, alrededor de 3.500.000 m³.

Tabla 42. Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 2008

Mes	Aporte Ríos (m³)	Lluvia en el embalse (m³)	Volumen almacenado (m³)	Entrada Total (m³)	Evaporación (m³)	Gasto ecológico (m³)	Bombeo (m³)	Alivio (m³)	Extracción Total(m³)	Balance neto (m³)
Enero	23.656.474	7.962	159.000.000	23.664.436	1.965.359	2.236.464	14.800.320	6.362.294	49.028.873	-25.364.437
Febrero	18.875.760	171.862	158.000.000	19.047.622	2.130.432	2.092.176	15.266.880	658.133	39.195.243	-20.147.621
Marzo	20.627.578	10.528	157.000.000	20.638.106	2.684.362	2.236.464	16.217.280	0	41.776.212	-21.138.106
Abril	23.453.737	1.181.472	157.000.000	24.635.209	2.530.343	2.164.320	15.059.520	1.781.025	46.170.417	-21.535.208
Mayo	26.559.600	857.820	159.000.000	27.417.420	2.044.671	2.236.464	16.372.800	6.363.486	54.434.841	-27.017.421
Junio	27.047.067	3.038.993	160.000.000	30.086.060	1.835.721	2.164.320	15.448.320	9.837.698	59.372.119	-29.286.059
Julio	53.553.440	4.082.749	162.000.000	57.636.189	1.654.051	2.236.464	15.672.960	33.435.690	110.635.354	-52.999.165
Agosto	48.958.984	2.023.020	162.000.000	50.982.004	1.867.223	2.164.320	16.295.040	32.883.277	104.191.864	-53.209.860
Septiembre	44.823.231	2.614.394	162.000.000	47.437.625	1.834.741	2.164.320	13.919.040	27.119.524	92.475.250	-45.037.625
Octubre	67.320.384	2.360.914	163.000.000	69.681.298	1.486.517	2.236.464	16.994.880	49.863.437	140.262.596	-70.581.298
Noviembre	74.381.651	2.981.630	164.000.000	77.363.281	1.459.052	2.164.320	17.029.440	56.610.469	154.626.562	-77.263.281
Diciembre	38.236.691	349.584	161.000.000	38.586.275	1.715.180	2.236.464	15.724.800	21.009.830	79.272.549	-40.686.274
Total	467.494.597	19.680.928	1.924.000.000	487.175.525	23.207.652	26.332.560	188.801.280	245.924.863	971.441.880	-484.266.355

Fuente. Elaboración propia. Datos tomados de la base de datos diaria del balance hídrico para el embalse Pao-Cachinche. HIDROCENTRO

El volumen almacenado en el embalse muestra la misma tendencia de años anteriores, ya que disminuye de 159.000.000 m³ en enero a 158.000.000 m³ en marzo, período que corresponde a la época seca; mientras que a partir de mayo y hasta noviembre, cuando se alcanza el máximo de 164.000.000 m³, el volumen asciende, debido a la ocurrencia del período de lluvia.

La evaporación en el embalse muestra la misma tendencia de años anteriores, donde se observa que durante el período seco, aproximadamente de enero a mayo, se registran las mayores tasas de evaporación mensuales, siendo la máxima la registrada en marzo, con 2.236.000 m³; mientras que durante el período de lluvias, aproximadamente de junio a octubre, disminuye la tasa mensual de evaporación, que en promedio es de aproximadamente 1.600.000 m³ mensuales. En todo el año se evapora un volumen de agua de aproximadamente 23.200.000 m³, que representa un aumento de alrededor de 2.900.000 m³ con respecto a 2007.

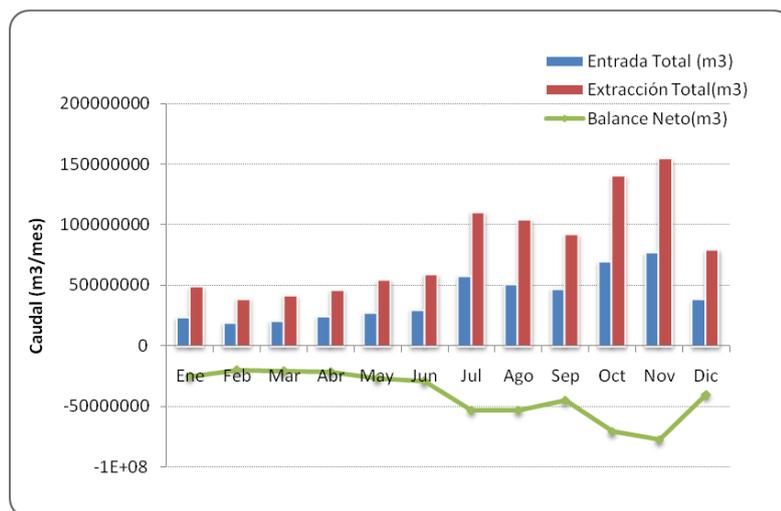
El gasto ecológico, al igual que en 2007, se mantiene constante durante todo el año, en 835 LPS diarios, siendo el total descargado en el año al cauce del río Pao superior a 26.000.000 m³, tal como se observa en la Tabla 42.

Entre enero y febrero operan tres caudales de bombeo hacia la PTAB, con valores fijos diarios de 3.200 LPS, 6.200 LPS hasta los 7.200 LPS; la programación muestra una periodicidad variable a lo largo del mes. A partir de marzo y hasta diciembre, período correspondiente a las estaciones lluviosa y mixta, se opera con dos caudales diarios de bombeo: 5.300 LPS y 6.200 LPS, respectivamente, cuya periodicidad varía durante el mes.

El embalse alivia durante todo el año, excepto en el mes de marzo, ya que en dicho mes se registra la mayor evaporación sumado a la escasa precipitación. El

alivio permanente en el embalse se debe al desvío de alrededor de 220.000.000 m³ del Lago de Valencia en el año. El máximo alivio se registra en noviembre, con aproximadamente 5.600.000 m³ y durante todo el año se descargan en total alrededor de 245.000.000 m³.

El balance neto en el embalse es de pérdida (alrededor de 485.000.000 m³ al año) ya que las salidas superan en un cinco por ciento a las entradas, las cuales totalizan más de 487.000.000 m³, siendo las salidas superiores a 970.000.000 m³ (ver Gráfica 44). En 2008 se extrae más agua de la que ingresa debido a que el embalse se mantuvo aliviando durante todo el año como resultado del aumento, con respecto a 2007, del 30 por ciento del aporte proveniente de los afluentes y del 20 por ciento de la lluvia registrada en el embalse. Asimismo, el aumento del aporte por ríos condujo al incremento del 15 por ciento del caudal bombeado hacia la PTAB. Cabe destacar que el caudal de agua desviada desde el Lago de Valencia hacia el embalse se mantuvo constante durante todo el año, en alrededor de 7 m³/s. En la Gráfica 44 se observa que tanto las entradas como las salidas poseen una tendencia cíclica e irregular a lo largo del año.



Gráfica 44. Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 2008. Elaboración propia a partir del balance hídrico del embalse

Balance hídrico año 2009. El aporte neto proveniente de los afluentes al embalse muestra, al igual que en 2008, una tendencia cíclica e irregular durante todo el año, siendo el máximo aporte de 44.685.000 m³ en agosto y el mínimo de 19.620.000 m³ en abril. En todo el año ingresó un volumen de agua de aproximadamente 377.000.000 m³, que comparado con el aporte neto de 2008 constituye una disminución de alrededor de 90.560.000 m³ (ver Tabla 43).

Durante todo el año se registran lluvias en el embalse, siendo el mes de julio el de máxima precipitación, con aproximadamente 2.500.000 m³, mientras que febrero representa el mes de más baja precipitación, con apenas 75.843 m³. En todo el año se registra un total de 10.624.346 m³ de lluvia que al compararse con la registrada en 2008 representa una disminución de alrededor de 9.000.000 m³.

El volumen almacenado en el embalse muestra una tendencia cíclica a lo largo del año, debido a la ocurrencia de las estaciones seca y lluviosa, ya que de enero a abril pasa de 160.000.000 m³ a 158.000.000, respectivamente; a partir de mayo comienza a ascender dicho volumen alcanzando en agosto el máximo de 161.000.000 m³, que corresponde además a la máxima entrada al embalse: 46.115.312 m³, y disminuye nuevamente de septiembre a diciembre cuando alcanza los 158.000.000 m³.

Contrariamente a la tendencia histórica mostrada por la evaporación en el embalse durante el período estudiado, donde las tasas más altas se registran en la época seca, en 2009 las mayores tasas de evaporación se prolongan más allá del período seco (aproximadamente de enero a abril), por la incidencia de una prolongada sequía en Venezuela para ese año. En total se evaporan del embalse aproximadamente 23.700.000 m³, que comparado con 2008 representa un aumento de alrededor de 500.000 m³ en 2009.

Tabla 43. Balance hídrico en el embalse Pao-Cachinche para el año 2009

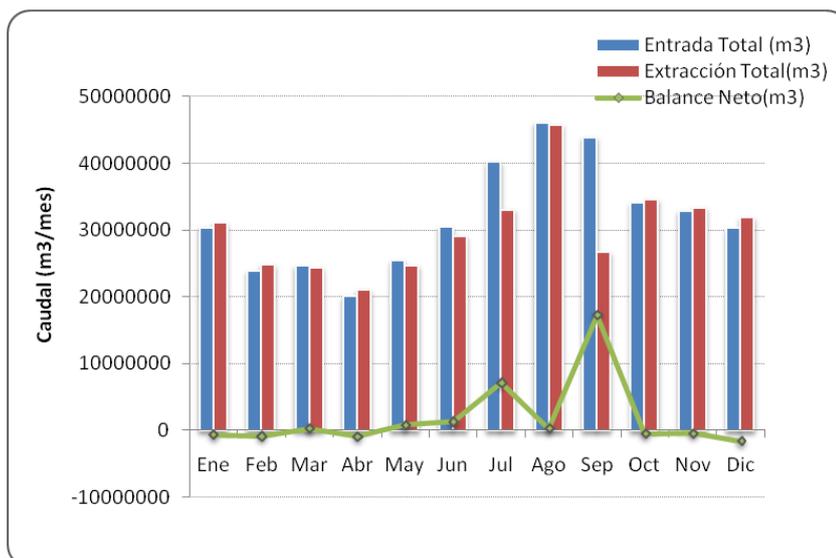
Mes	Aporte Ríos(m ³)	Lluvia en el embalse (m ³)	Volumen almacenado (m ³)	Entrada Total (m ³)	Evaporación (m ³)	Gasto ecológico (m ³)	Bombeo (m ³)	Alivio (m ³)	Extracción Total(m ³)	Balance neto (m ³)
Enero	30.087.577	330.942	160.000.000	30.418.519	1.761.908	2.236.464	14.428.800	12.691.357	31.118.529	-700.010
Febrero	23.849.069	75.843	159.000.000	23.924.912	1.853.103	2.020.032	14.999.040	5.952.737	24.824.912	-900.000
Marzo	24.246.006	405.920	159.000.000	24.651.926	2.241.852	2.236.464	16.139.520	3.734.090	24.351.926	300.000
Abril	19.617.277	492.918	158.000.000	20.110.195	2.488.505	2.164.320	14.065.920	2.335.299	21.054.044	-943.849
Mayo	24.414.093	1.054.397	159.000.000	25.468.490	2.149.395	2.236.464	13.970.920	6.311.711	24.668.490	800.000
Junio	29.316.358	1.145.311	159.000.000	30.461.669	2.044.959	1.164.320	13.279.720	12.672.670	29.161.669	1.300.000
Julio	37.710.543	2.503.010	160.000.000	40.213.553	2.032.562	2.236.464	14.264.640	14.567.400	33.101.066	7.112.487
Agosto	44.685.337	1.429.975	161.000.000	46.115.312	1.785.354	2.236.464	15.595.200	26.198.294	45.815.312	300.000
Septiembre	42.797.017	1.134.796	160.000.000	43.931.813	1.791.045	2.164.320	16.139.520	6.607.600	26.702.485	17.229.328
Octubre	33.022.410	1.050.437	159.000.000	34.072.847	1.832.010	2.236.464	15.595.200	14.909.173	34.572.847	-500.000
Noviembre	32.129.402	775.359	159.000.000	32.904.761	1.850.362	2.164.320	16.139.520	13.200.638	33.354.840	-450.079
Diciembre	30.057.973	225.438	158.000.000	30283411	1.867.573	2.236.464	15.595.200	12.200.638	31899875	-1.616.464
Total	371.933.062	10.624.346	1.910.000.000	382.557.408	23.698.628	25.332.560	180.213.200	131.381.607	360.625.995	21.931.413

Fuente. Elaboración propia. Datos tomados de la base de datos diaria del balance hídrico para el embalse Pao-Cachinche. HIDROCENTRO

El gasto ecológico en 2009 se mantiene, al igual que desde 2007, en 835 LPS diarios, descargándose al cauce del río Pao un aproximado de 25.300.000 m³ en todo el año. En cuanto a la extracción de agua del embalse hacia la planta potabilizadora Alejo Zuloaga, se manejan dos caudales al mes: 5.300 LPS y 6.200 LPS, que corresponde al uso de 3 a 4 equipos de bombeo, respectivamente; cada uno de los cuales se mantiene fijo a lo largo del día y son alternados en períodos de duración variable. En todo el año se bombearon alrededor de 180.000.000 m³ hacia la planta potabilizadora.

Tal como se observa desde 2005, el embalse alivia durante todo el año, por el desvío hacia el río Paito de alrededor de 3.500 LPS provenientes del Lago de Valencia, siendo el mes de agosto el que registra el máximo alivio, con más de 26.000.000 m³ y el mes de abril el de menor alivio, con alrededor de 3.700.000 m³.

El balance neto en el embalse es de ganancia pues aunque alivia durante todo el año, la alternancia de dos caudales de operación para la extracción por bombeo (5.300 LPS y 6.200 LPS, respectivamente) permitió disminuir las salidas mensuales, con la finalidad de garantizar el abastecimiento de agua durante los últimos meses del año, ya que por la prolongada sequía ocurrida de 2009 el volumen máximo almacenado estuvo por debajo de 165.000.000 m³, que corresponde al rendimiento garantizado del embalse y a 9.000.000 m³ por encima de su volumen útil (ver Tabla 44). En la Gráfica 45 se observa que tanto las entradas como las salidas muestran una tendencia cíclica e irregular a lo largo del año.



Gráfica 45. Entradas totales vs salidas totales en el embalse Pao-Cachinche para el año 2009. Elaboración propia a partir del balance hídrico del embalse

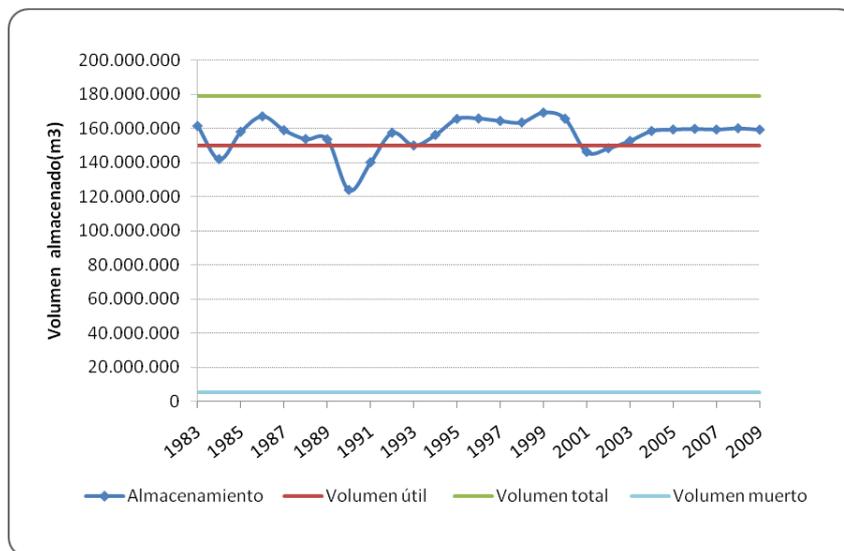
Con la finalidad de evaluar la operación del embalse Pao-Cachinche, se elaboró la curva de operación en el período 1983-2009 (ver Gráfica 46); dicha curva permite analizar el manejo del volumen de agua almacenada en el embalse a lo largo de un ciclo de 26 años de operación.

En la Gráfica 46 se observa que en 1990 se registra el menor volumen promedio de almacenamiento en el embalse: 12.380.000 m³, ya que de enero a mayo de ese año el volumen descendió de 136 a 87 millones de metros cúbicos, representando, éste último, el volumen más bajo de todo el registro histórico del embalse. Mientras que en 1999 se registra el mayor volumen promedio almacenado en el embalse, con alrededor de 169,5 millones de metros cúbicos.

La curva de operación del embalse muestra que, durante el ciclo de operación comprendido desde 1983 a 2009, el almacenamiento se mantuvo dentro de los límites de operación, donde el nivel mínimo de agua o volumen muerto es de 500.000 m³ (en la cota 319,51 msnm) y la capacidad total del embalse es de 179 millones de metros cúbicos (aproximadamente en la cota 356 msnm). Asimismo se observa que, con

excepción de los años 1984, 1990, 1991 y 2001; el volumen almacenado estuvo por encima del volumen útil del embalse, lo que garantizó el cumplimiento de los propósitos para los que fue diseñado el embalse: irrigación, abastecimiento de agua y control de inundaciones.

Entre 1983 a 2003 el volumen de almacenamiento muestra una tendencia cíclica e irregular acorde con la estación del año, es decir, de recarga o llenado del embalse en los períodos seco y mixto (entre enero a abril y de noviembre a diciembre, respectivamente) y de descarga en el período de lluvia (entre mayo a octubre); mientras que de 2004 a 2009 el almacenamiento muestra una tendencia lineal debido a la condición de alivio permanente que exhibe el embalse con el trasvase del Lago de Valencia desde 2004.



Gráfica 46. Curva de operación del embalse Pao-Cachinche en el período 1983-2009. Elaboración propia a partir del balance hídrico del embalse

Reglas Generales de Operación del Embalse Pao-Cachinche

Se observan dos períodos de operación del embalse Pao-Cachinche, según la estación del año: el primero, aproximadamente de enero a abril, correspondiente a la estación seca; caracterizado por la disminución del volumen almacenado en el mismo y el segundo período, aproximadamente de mayo a octubre, correspondiente a la estación de lluvias; caracterizado por el aumento o recarga del almacenamiento de agua en el embalse. Los meses de noviembre y diciembre constituyen un período mixto por la presencia de lluvias esporádicas, donde el volumen almacenado muestra una tendencia histórica de decrecimiento.

En el período de estudio se distinguen dos etapas de extracción de agua por bombeo hacia la planta potabilizadora Alejo Zuloaga: el primero, de 1983 a 2003, caracterizado por el bombeo diario de 1020 LPS tanto en la época seca como en la lluviosa; y el segundo, de 2004 a 2009, caracterizado por la variación mensual del caudal bombeado, en un rango comprendido entre 5.300 LPS a 7.200 LPS diarios, debido al trasvase de aproximadamente 7.000 LPS del Lago de Valencia.

Se distinguen dos caudales de descarga del gasto ecológico hacia el cauce del río Pao: el primero, de 1983 a 2005, con una descarga de 600 LPS a 800 LPS diarios y el segundo, de 2006 a 2009, período en el que el gasto ecológico se mantuvo constante en 835 LPS. Cabe destacar que el caudal del gasto ecológico es establecido por HIDROCENTRO en base a los niveles de agua tanto del embalse Pao-Cachinche como del embalse Pao-La Balsa, siendo este último el receptor del alivio más el gasto ecológico del Pao-Cachinche. El porcentaje de apertura de la válvula de descarga al cauce del río Pao queda a criterio de la propia hidrológica, previa autorización del Minamb.

Ante un evento de sequía hidrológica, se establece el caudal de operación para la extracción de agua por bombeo, de acuerdo a la capacidad de abastecimiento del embalse, en el rango de 3.100 LPS a 5.300 LPS (de 2 a 3 equipos en funcionamiento) y se mantiene la descarga del caudal ecológico mínimo de 600 LPS a través de la válvula Howell-Bunger de 36 pulgadas, con un 25 por ciento de apertura; todo ello a objeto de garantizar la demanda y evitar que el volumen almacenado descienda por debajo del volumen útil del mismo.

Ante un prolongado período de lluvias, se incrementa el caudal de extracción del agua del embalse entre 6.500 a 7.000 LPS (4 a 5 equipos en funcionamiento), rango que corresponde a la capacidad instalada de la planta potabilizadora Alejo Zuloaga; y se establece un caudal de descarga del gasto ecológico entre 800 a 1.250 LPS.

Modelación del Aporte Hídrico de las Subcuencas afluentes al Embalse Pao-Cachinche

El *Aporte-Extracción* es una variable de entrada que el operador del embalse cuantifica de forma indirecta, a partir del balance hídrico; por ello, se modela dicha variable con la finalidad de pronosticar el comportamiento del volumen de agua proveniente de los afluentes al embalse, dada su relevancia en la estimación de la disponibilidad de agua almacenada para el abastecimiento durante una sequía hidrológica. Se aplican los modelos estocásticos (ARIMA) y de red neuronal (RNA) a las series de tiempo del aporte neto diario y el aporte neto mensual al embalse. A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada modelo:

Modelos Estocásticos

Para esta modelación se establece como dato de entrada el *Aporte-Extracción* al embalse; variable que fue utilizada para calibrar y validar, en la primera fase; los *Aportes-Extracciones Diarios* y en la segunda fase, los *Aportes-Extracciones Mensuales*. Los resultados de ambas fases se muestran a continuación:

Modelación del Aporte-Extracción Diario al Embalse Durante el Período 2005-2008.

Esta fase comprende la calibración y validación de un modelo estocástico con los aportes netos diarios al embalse. La calibración se realizó primero alimentando el modelo con los datos originales del aporte neto diario; y luego con los datos estandarizados de la serie de tiempo. La evaluación de la estacionalidad (s) de los datos originales de la serie de tiempo para el aporte neto diario, mediante el análisis estadístico, permitió fijar una longitud de s igual a 3 días. Los datos cubren 1.461 períodos de tiempo, el índice inicial corresponde al 01 de Enero de 2005 y el intervalo

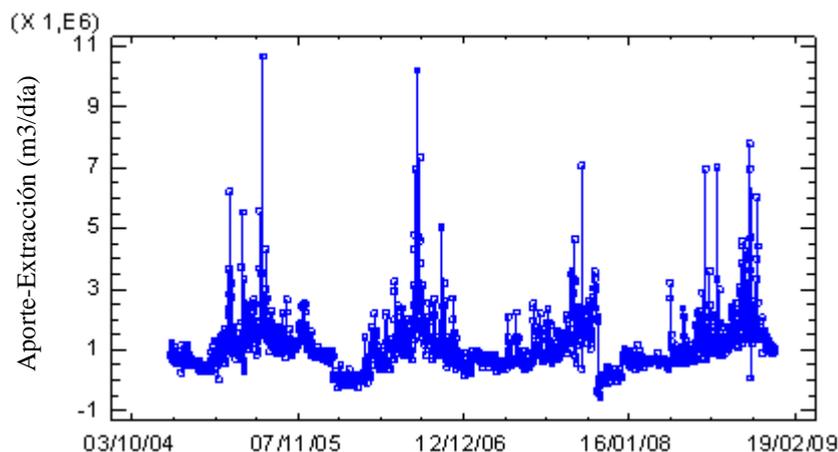
de la muestra es de 1 día. Asimismo, la media del conjunto de datos es de $1,14577 \times 10^7 \pm 50747,5 \text{ m}^3$; la desviación estándar es igual a 989672, siendo el mínimo -593826 m^3 y el máximo $1,06958 \times 10^7 \text{ m}^3$; todos estos resultados se muestran en la Tabla 44.

Tabla 44. Resumen del análisis del aporte-extracción diario en el período 2005-2009

RESUMEN ANÁLISIS SERIE DE TIEMPO	
Datos/Variable	Aporte-Extracción ($\text{m}^3/\text{día}$)
Índice inicial	01-01-05
Intervalo de muestra	1,0 día
Longitud de la estacionalidad	3
Media (μ)	$1,14577 \times 10^6 \pm 50747,5$
Desviación estándar	989672
Mínimo	-593826 m^3
Máximo	$1,06958 \times 10^7 \text{ m}^3$

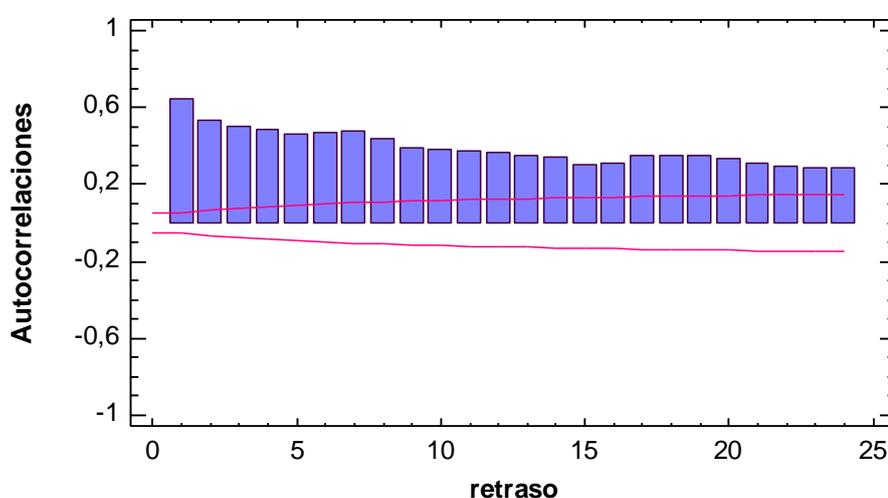
Fuente. Elaboración propia. Datos procesados en StatGraphics

En la Gráfica 47 se muestra la serie de tiempo de los datos de entrada del *aporte-extracción diario* al embalse, donde se observa que entre 2005 y 2006, dicha variable presenta variaciones cíclicas con una frecuencia anual debido a la ocurrencia de las estaciones seca y lluviosa; mientras que en 2007 la ciclicidad de la serie se ve alterada por las extracciones de agua del embalse como resultado de un marcado período de sequía.



Gráfica 47. Aporte-Extracción diaria al Embalse Pao-Cachinche durante el período 2005-2009. Datos procesados en StatGraphics

En la Gráfica 48 se muestran las autocorrelaciones estimadas entre los valores del aporte-extracción diario a diferentes retrasos. En este caso se observa que 24 de los 24 coeficientes de autocorrelación son estadísticamente significativos al nivel de confianza del 95,0 por ciento, por lo que la serie de tiempo no es completamente aleatoria; en la Tabla H-1 del Anexo H se presentan los resultados de tales correlaciones con su correspondiente error estándar y límites superior e inferior al 95 por ciento, respectivamente, por cada retraso.



Gráfica 48. Autocorrelación del aporte-extracción diaria al embalse Pao-Cachinche durante el período 2005-2009. Datos procesados en StatGraphics

El mejor modelo de pronóstico seleccionado para la serie de tiempo estandarizada del aporte-extracción diario, mediante la aplicación del StatGraphics, es el $ARIMA(2,0,2) \times (2,0,0)_3$ con constante igual a 493231; ya que las estadísticas del error (ver Tabla 45) muestran que el modelo con la menor raíz cuadrada del error cuadrado medio (RMSE) durante el período de estimación del modelo es el modelo ARIMA y el modelo con el menor error medio absoluto (MAE) es también el modelo ARIMA. Asimismo, durante el período de validación, el modelo con los menores RMSE y MAE,

respectivamente, es el modelo ARIMA. Este modelo retiene 700 períodos para la validación y genera 30 pronósticos.

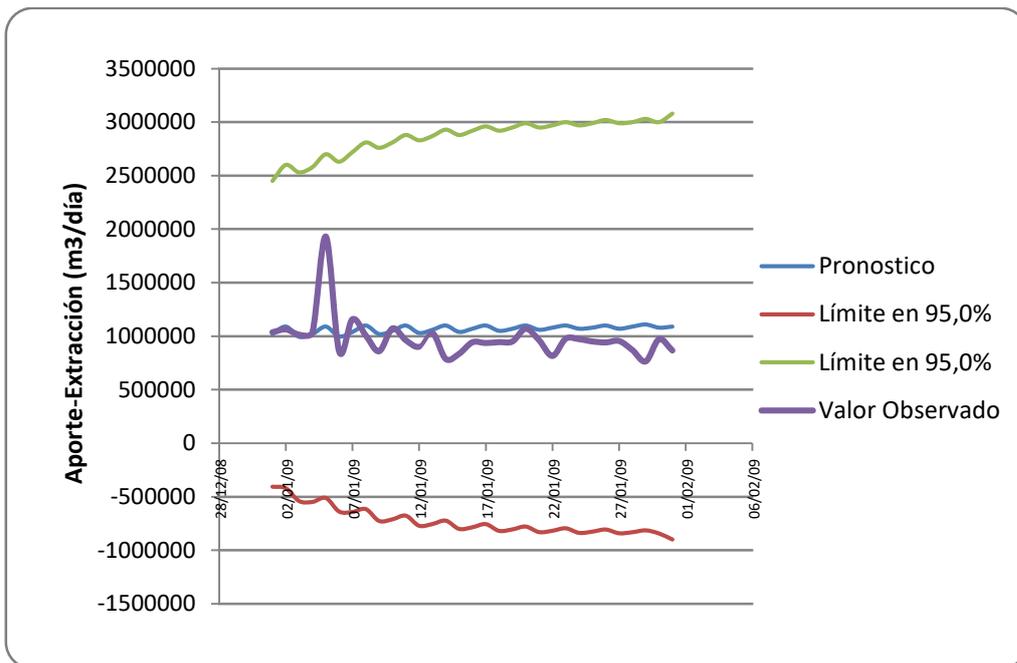
Tabla 45. Modelación estocástica del aporte-extracción diaria al embalse Pao-Cachinche en el período 2005-2009

Modelo	RMSE	MAE	ME
Período de Estimación			
ARIMA(2,0,2)x(2,0,0)3 con constante	730024	369152	1000,87
Tendencia Lineal=-1,11887x10 ⁶ (*)	1,04761x10 ⁶	674893,	54850,7
Suavización exponencial simple con $\alpha=0,2344$ (*)	833685	478432	63020,3
Suavización exp. de Brown con $\alpha=0,1221$ (*)	861799	492195	62991,7
Período de Validación			
ARIMA(2,0,2)x(2,0,0)3 con constante	709037	367862	11522,8
Tendencia Lineal=-1,11887x10 ⁶ (*)	1,00747x10 ⁶	711772	82656,3
Suavización exponencial simple con $\alpha=0,2344$ (*)	835702	492964	68035,6
Suavización exp. de Brown con $\alpha=0,1221$ (*)	865859	516947	72413,4

Fuente. Elaboración propia. Datos procesados en StatGraphics

(*) *Modelo con ajuste estacional multiplicativo*

En la Gráfica 49 se muestran los límites del 95,0 por ciento para el pronóstico del aporte-extracción diario en Enero de 2009, donde se observa que el valor estimado muestra una línea de tendencia más suavizada (casi lineal) en comparación con la línea de valores observados cuyo aporte neto máximo registrado en el embalse corresponde al 05-01-2009, con un volumen de agua vertida al embalse de aproximadamente 1.930.000 m³. Los resultados arrojados por el modelo para el pronóstico del aporte-extracción diario al embalse son mostrados en la Tabla 46.



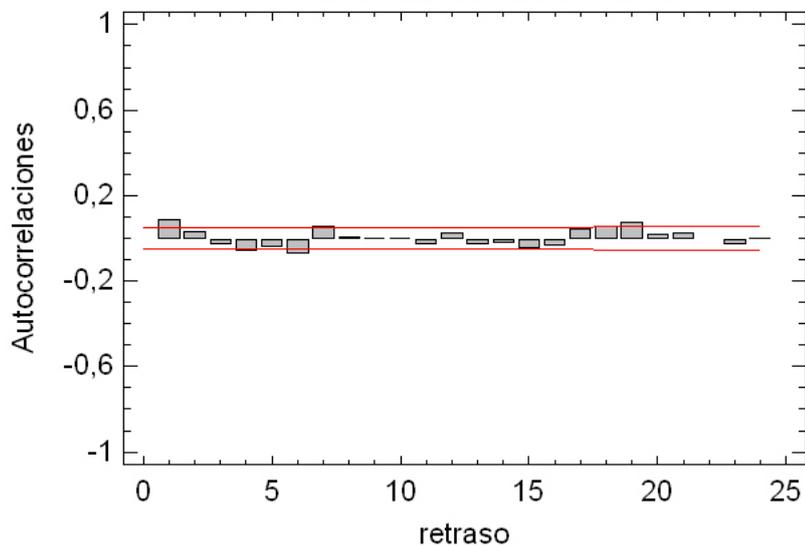
Gráfica 49. Pronósticos del aporte-extracción diaria para enero de 2009 con el modelo ARIMA(2,0,2)x(2,0,0)3 con constante. Elaboración propia

Las autocorrelaciones estimadas para los residuos de la serie del aporte-extracción diario, a diferentes retrasos (ver Gráfica 50), muestran que 6 de los 24 coeficientes de autocorrelación son estadísticamente significativos al nivel de confianza del 95 por ciento, lo que implica que los residuos no son completamente aleatorios. En la Tabla H-2 del Anexo H se presentan los resultados de estas correlaciones.

Tabla 46. Pronósticos del aporte-extracción diario para enero 2009 con el modelo ARIMA(2,0,2)x(2,0,0)3 con constante

Período	Pronóstico	Límite en 95,0% Inferior	Límite en 95,0% Superior
01/01/09	1,02353E6	-407333	2,45439E6
02/01/09	1,08974E6	-421855	2,60133E6
03/01/09	994399	-541565	2,53036E6
04/01/09	1,0164E6	-549379	2,58219E6
05/01/09	1,09404E6	-512553	2,70063E6
06/01/09	996806	-639085	2,6327E6
07/01/09	1,03958E6	-643319	2,72248E6
08/01/09	1,09783E6	-616339	2,812E6
09/01/09	1,01664E6	-727007	2,76028E6
10/01/09	1,04758E6	-711673	2,80683E6
11/01/09	1,1E6	-677475	2,87748E6
12/01/09	1,02911E6	-771504	2,82972E6
13/01/09	1,05772E6	-755713	2,87116E6
14/01/09	1,10155E6	-723986	2,92709E6
15/01/09	1,04166E6	-801192	2,88452E6
16/01/09	1,06513E6	-785823	2,91609E6
17/01/09	1,10264E6	-756299	2,96158E6
18/01/09	1,0518E6	-819560	2,92316E6
19/01/09	1,07182E6	-805479	2,94912E6
20/01/09	1,10349E6	-779309	2,98629E6
21/01/09	1,06057E6	-831068	2,95221E6
22/01/09	1,07736E6	-818439	2,97317E6
23/01/09	1,10417E6	-795458	3,0038E6
24/01/09	1,06791E6	-837975	2,9738E6
25/01/09	1,0821E6	-826768	2,99097E6
26/01/09	1,10474E6	-806828	3,01631E6
27/01/09	1,07413E6	-841870	2,99014E6
28/01/09	1,08609E6	-832025	3,00421E6
29/01/09	1,10521E6	-814815	3,02524E6

Fuente. Elaboración propia. Datos procesados en StatGraphics



Gráfica 50. Autocorrelaciones de residuos para ajuste del aporte-extracción diaria con el modelo ARIMA(2,0,2)x(2,0,0)3 con constante. Datos procesados en StatGraphics

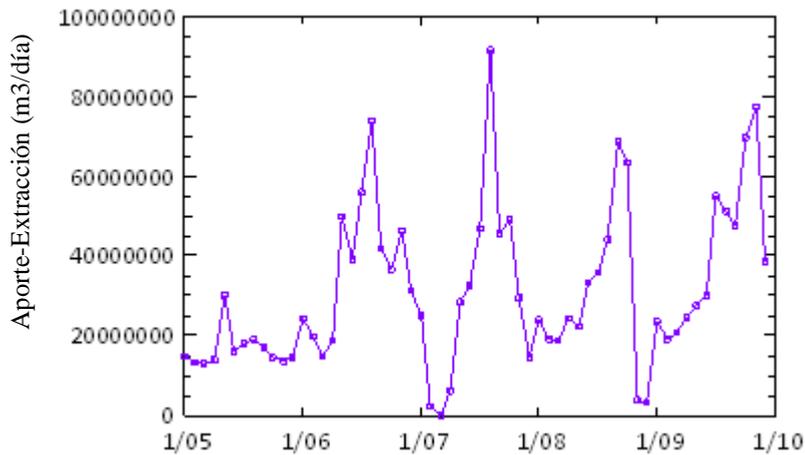
Modelación del Aporte-Extracción Mensual al Embalse en el Período 2005-2008. Esta fase comprende la calibración y validación de un modelo con los aportes-extracciones mensuales al embalse. La calibración se realizó alimentando el modelo con los datos del aporte-extracción acumulado mensual. Los datos cubren 60 períodos de tiempo, el índice inicial corresponde al 01 de Enero de 2005 y el intervalo de la muestra es de 1 mes, siendo la longitud de la estacionalidad igual a 6. Asimismo, la media del conjunto de datos es de $3,1182 \times 10^7 \pm 5,17522 \times 10^6 \text{ m}^3$; la desviación estándar es igual a $2,00335 \times 10^7$, siendo el mínimo 197535 m^3 y el máximo $9,16033 \times 10^7 \text{ m}^3$; todos estos resultados se muestran en la Tabla 47.

Tabla 47. Resumen del análisis del aporte-extracción mensual durante el período 2005-2009

RESUMEN ANÁLISIS SERIE DE TIEMPO	
Datos/Variable	Aporte-Extracción(m ³ /mes)
Índice inicial	01/05
Intervalo de Muestra	1 mes
Longitud de la estacionalidad	6
Media (μ)	$3,1182 \times 10^7 \pm 5,17522 \times 10^6$
Desviación estándar	$2,00335 \times 10^7$
Mínimo	197535
Máximo	$9,16033 \times 10^7$

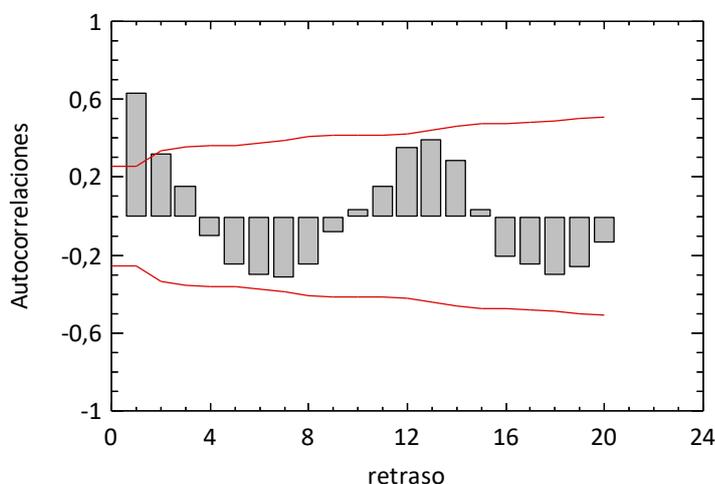
Fuente. Elaboración propia. Datos procesados en StatGraphics

En la Gráfica 51 se muestra la serie de tiempo de los datos de entrada del *aporte-extracción mensual* al embalse, donde se observa de forma mas clara dos descensos del volumen de agua en el embalse en los primeros meses de 2007 y finales de 2008 debido a un marcado período de sequía.



Gráfica 51. Aporte-Extracción mensual al embalse Pao-Cachinche durante el período 2005-2009. Datos procesados en StatGraphics

En la Gráfica 52 se muestra la autocorrelación estimada para el aporte-extracción mensual a diferentes retrasos. En este caso se observa que 1 de los 24 coeficientes de autocorrelación son estadísticamente significativos al nivel de confianza del 95,0 por ciento, por lo que la serie de tiempo no es completamente aleatoria, en la Tabla H-3 (ver Anexo H) se presentan los resultados de tales correlaciones con su correspondiente error estándar y límites superior e inferior al 95 por ciento, respectivamente, para cada retraso.



Gráfica 52. Autocorrelación del aporte-extracción mensual al embalse Pao-Cachinche durante el período 2005-2009. Datos procesados en StatGraphics

El mejor modelo de pronóstico seleccionado para la serie de tiempo del aporte-extracción mensual, empleando la herramienta StatGraphics, es el ARIMA(0,0,1)x(2,0,1)₆; ya que las estadísticas del error (ver Tabla 48) muestran que el modelo con la menor raíz cuadrada del error cuadrado medio (RMSE) durante el período de estimación, el menor error medio absoluto (MAE) y el menor porcentaje del error medio absoluto (MAPE) es el modelo ARIMA. Para el período de validación, el modelo con el menor MAE es el modelo ARIMA. Este modelo retiene 12 períodos para la validación y genera 36 pronósticos.

Tabla 48. Modelación estocástica del aporte-extracción mensual al embalse Pao-Cachinche en el período 2005-2009

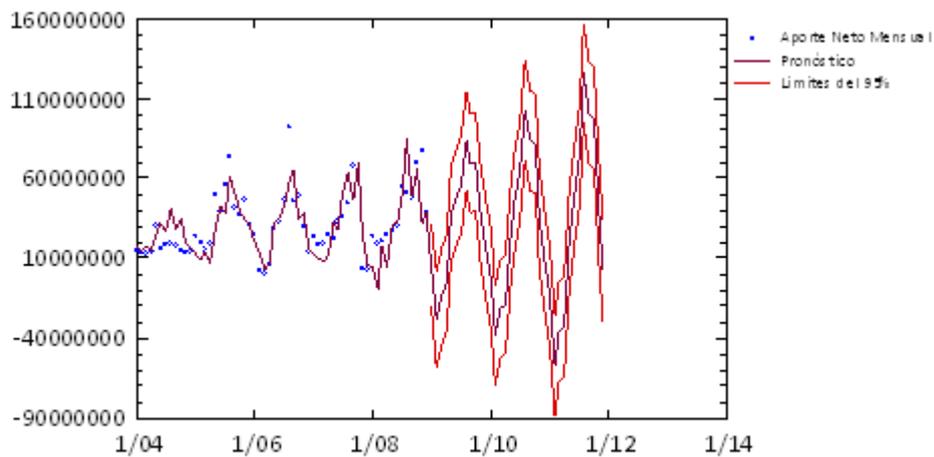
Modelo	RMSE	MAE	MAPE	ME	MPE
Período de Estimación					
ARIMA(0,0,1)x(2,0,1) ⁶ con constante	1,2999E7	9,7275E6	86,1861	8127,66	58,9611
Tendencia lineal= - 2,4726E8 + 410966 t ^(*)	2,0409E7	1,4413E7	394,757	-192680	369,008
Suavización exp Simple con $\alpha=0,9215^{(*)}$	1,9700E7	1,1171E7	130,529	-450936	100,798
Suavización exp de Brown con $\alpha=0,095^{(*)}$	2,2100E7	1,4831E7	431,255	1,5859E6	-394,283
Suavización exp de Winter con $\alpha=0,1035$; $\beta=0,0676$ y $\gamma=0,0001$	2,2208E7	1,6414E7	639,62	-4,086E6	-619,568
Período de Validación					
ARIMA(0,0,1)x(2,0,1) ⁶ con constante	2,0063E7	1,3829E7	40,7748	6,9230	25,5605
Tendencia lineal= - 2,4726E8 + 410966 t ^(*)	1,8003E7	1,5040E7	45,8436	-1,036E6	-24,4527
Suavización exp Simple con $\alpha=0,9215^{(*)}$	1,4293E7	1,1623E7	30,1868	3,2117E6	9,8889
Suavización exp de Brown con $\alpha=0,095^{(*)}$	1,7555E7	1,4451E7	35,6286	6,4545E6	1,30886
Suavización exp de Winter con $\alpha=0,1035$; $\beta=0,0676$ y $\gamma=0,0001$	1,9348E7	1,5346E7	36,8075	7,0454E6	-0,24533

Fuente. Elaboración propia. Datos procesados en StatGraphics

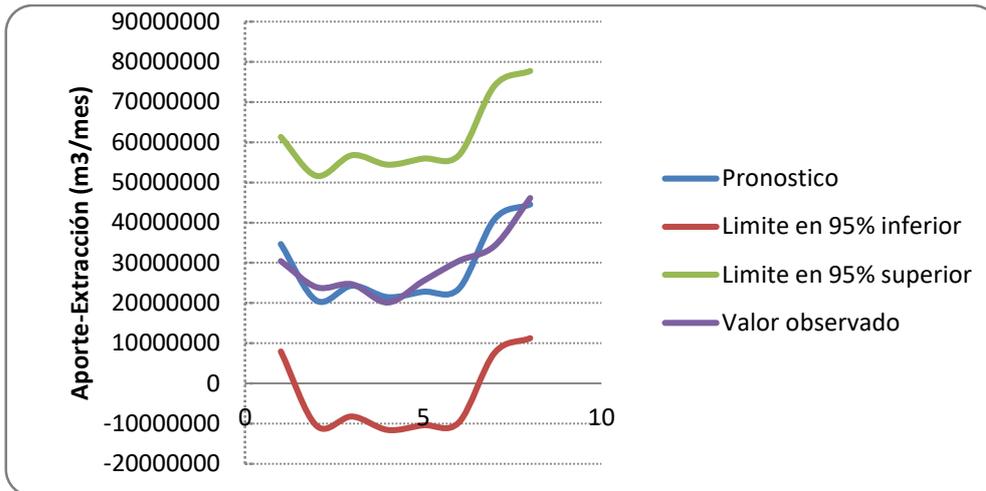
(*) Modelo con ajuste estacional multiplicativo

En la Gráfica 53 se muestra la secuencia de tiempo del aporte-extracción mensual entre 2005 a 2009; en la misma se observan los valores pronosticados durante el período en donde existen datos disponibles, mientras que para los períodos de tiempo más allá de la serie de tiempo, se muestran los límites del 95.0 por ciento de predicción

para los pronósticos. Estos límites muestran en donde podría estar el valor verdadero del dato, al tiempo futuro seleccionado, con 95.0 por ciento de confianza, asumiendo que el modelo ajustado es apropiado para los datos. En la Gráfica 54 se grafican los valores observados frente a los valores estimados del aporte-extracción mensual durante el período comprendido entre enero a agosto de 2009. Los resultados arrojados por el modelo para el pronóstico del aporte-extracción mensual al embalse son mostrados en la Tabla 49.



Gráfica 53. Secuencia de tiempo para el aporte-extracción mensual durante el período 2005-2009 con el modelo $ARIMA(0,0,1) \times (2,0,1)_6$ con constante. Datos procesados en StatGraphics



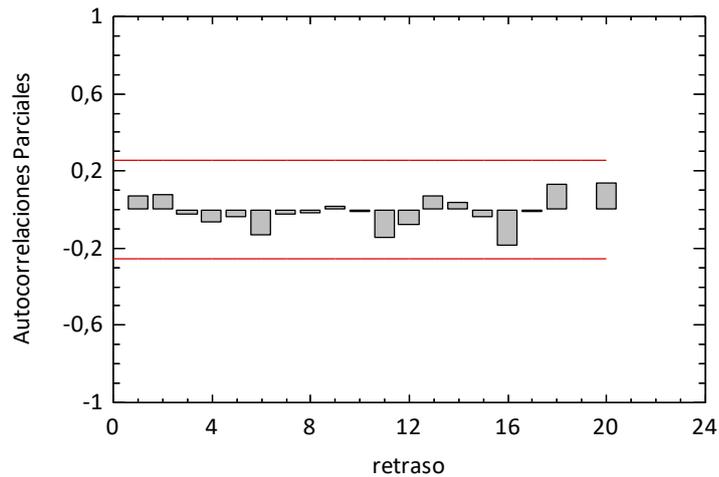
Gráfica 54. Pronósticos del aporte-extracción mensual durante el período enero-agosto de 2009 con el modelo ARIMA(0,0,1)x(2,0,1)6 con constante. Elaboración propia

Las autocorrelaciones estimadas para los residuos de la serie del aporte-extracción mensual, a diferentes retrasos (ver Gráfica 55), muestran que ninguno de los 24 coeficientes de autocorrelación son estadísticamente significativos, lo que implica que la serie de tiempo bien puede ser completamente aleatoria. En la Tabla H-4 del Anexo H se presentan los resultados de estas correlaciones.

Tabla 49. Pronósticos del aporte-extracción mensual entre enero-agosto de 2009 con el modelo ARIMA(0,0,1)x(2,0,1)6 con constante

Período	Pronóstico	Límite en 95,0% Inferior	Límite en 95,0% Superior
1/09	5,22889E6	-2,08498E7	3,13076E7
2/09	-2,84512E7	-5,84797E7	1,57741E6
3/09	-1,35954E7	-4,3624E7	1,64332E7
4/09	-5,05574E6	-3,50843E7	2,49728E7
5/09	3,75035E7	7,47489E6	6,7532E7
6/09	4,7438E7	1,74094E7	7,74665E7
7/09	5,60123E7	2,54315E7	8,65932E7
8/09	8,33749E7	5,26163E7	1,14134E8
9/09	6,95568E7	3,87982E7	1,00315E8
10/09	6,96976E7	3,89389E7	1,00456E8
11/09	3,60492E7	5,29059E6	6,68079E7
12/09	1,46878E7	-1,60709E7	4,54464E7
1/10	-3,71223E6	-3,46999E7	2,72754E7
2/10	-3,82032E7	-6,92651E7	-7,14124E6
3/10	-2,1502E7	-5,25639E7	9,55998E6
4/10	-1,87786E7	-4,98405E7	1,22834E7
5/10	2,40159E7	-7,04606E6	5,50778E7
6/10	4,54959E7	1,4434E7	7,65579E7
7/10	6,40038E7	3,29158E7	9,50918E7
8/10	1,02456E8	7,13592E7	1,33552E8
9/10	8,36472E7	5,25507E7	1,14744E8
10/10	8,13772E7	5,02807E7	1,12474E8
11/10	3,37687E7	2,67221E6	6,48652E7
12/10	8,38338E6	-2,27131E7	3,94799E7
1/11	-1,34875E7	-4,46715E7	1,76965E7
2/11	-5,76823E7	-8,88948E7	-2,64697E7
3/11	-3,61212E7	-6,73337E7	-4,90871E6
4/11	-3,32834E7	-6,44959E7	-2,07088E6
5/11	2,14655E7	-9,74697E6	5,26781E7
6/11	5,02126E7	1,90001E7	8,14252E7
7/11	7,49804E7	4,3675E7	1,06286E8
8/11	1,25379E8	9,40438E7	1,56715E8
9/11	1,00775E8	6,94395E7	1,32111E8
10/11	9,76053E7	6,62696E7	1,28941E8
11/11	3,51791E7	3,84343E6	6,65147E7
12/11	2,27188E6	-2,90638E7	3,36075E7

Fuente. Elaboración propia. Datos procesados en StatGraphics



Gráfica 55. Autocorrelaciones de residuos para el ajuste del aporte-extracción mensual con el modelo ARIMA(0,0,1)x(2,0,1)6 con constante. Datos procesados en Statgraphics

Modelos de Red Neuronal Artificial

En esta modelación se establecen como datos de entrada las series de tiempo de la evaporación, el gasto ecológico, el gasto de alivio y el bombeo; mientras que los datos de salida están constituidos por los aportes-extracción de agua al embalse. La aplicación de los modelos de red neuronal se realizó en dos fases: en la primera se modela el aporte-extracción diario y en la segunda fase se modela el aporte-extracción mensual.

Modelación del Aporte-Extracción Diario al Embalse. Esta primera fase comprende los siguientes períodos: 1983 a 2009: RNA (1), 2005 a 2009: RNA (2) y 2008 a 2009: RNA (3); cuyos resultados se presentan a continuación:

- (a) RNA (1): 1983-2009.** Los resultados de la aplicación del modelo de red neuronal a la serie diaria del aporte-extracción al embalse, durante este período, se muestran en la Figura 33.

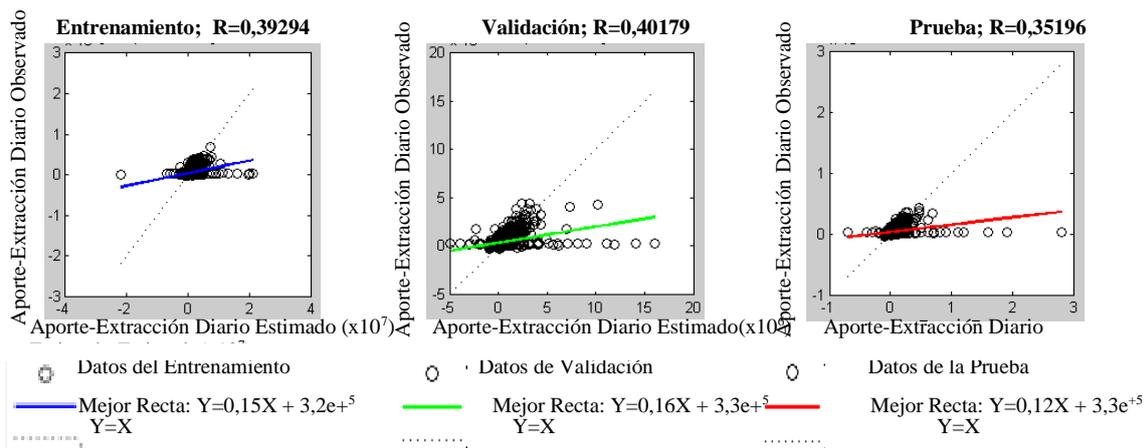


Figura 33. Aporte-extracción diaria observada vs aporte-extracción diaria estimada en el embalse Pao-Cachinche durante el período 1983-2009. Datos procesados en MATLAB

(b) RNA (2): 2005-2009. Los resultados de la aplicación del modelo de red neuronal a la serie diaria del aporte-extracción al embalse, durante este período, se muestran en la Figura 34.

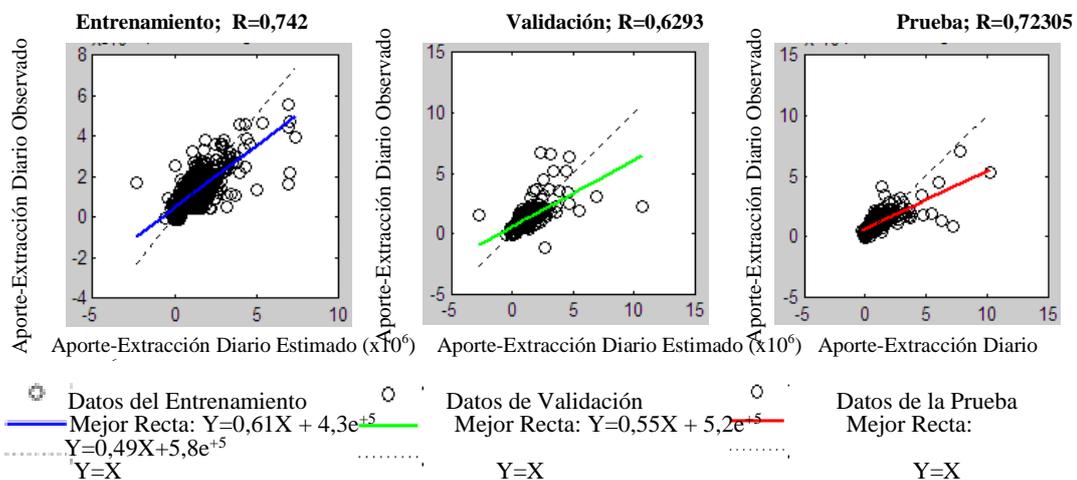


Figura 34. Aporte-extracción diario observado vs aporte-extracción diario estimado en el embalse Pao-Cachinche durante el período 2005-2009. Datos procesados en MATLAB

(c) **RNA (3): 2008-2009.** Los resultados de la aplicación del modelo de red neuronal a la serie diaria del aporte-extracción al embalse, durante este período, se muestran en la Figura 35.

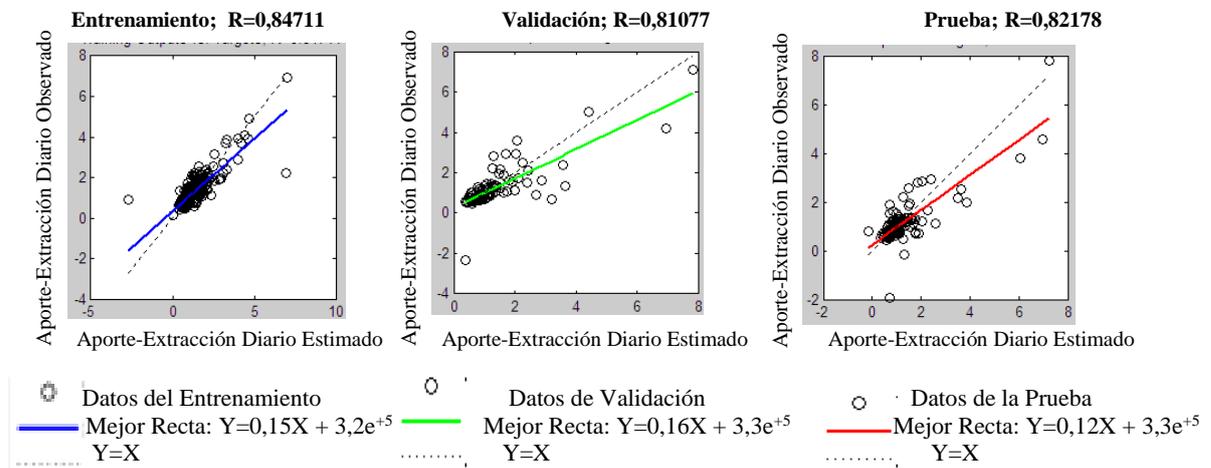


Figura 35. Aporte-extracción diario observado vs aporte-extracción diario estimado en el embalse Pao-Cachinche durante el período 2008-2009. Datos procesados en MATLAB

Modelación del Aporte-Extracción Mensual al Embalse. En esta fase se modela la serie mensual del aporte-extracción al embalse durante el período 2005-2009, correspondiente a la RNA (2); tal como se muestra en la Figura 36; en la cual se muestran los resultados del aporte-extracción mensual observado y estimado mediante el modelo de red neuronal con el mejor ajuste alcanzado: RNA (2), en las etapas de entrenamiento, validación y prueba; donde se observa que el conjunto de los datos observados y estimados en la fase de prueba se aproxima a la recta 1:1, con un valor de R^2 igual a 0,83 (ver Tabla 50).

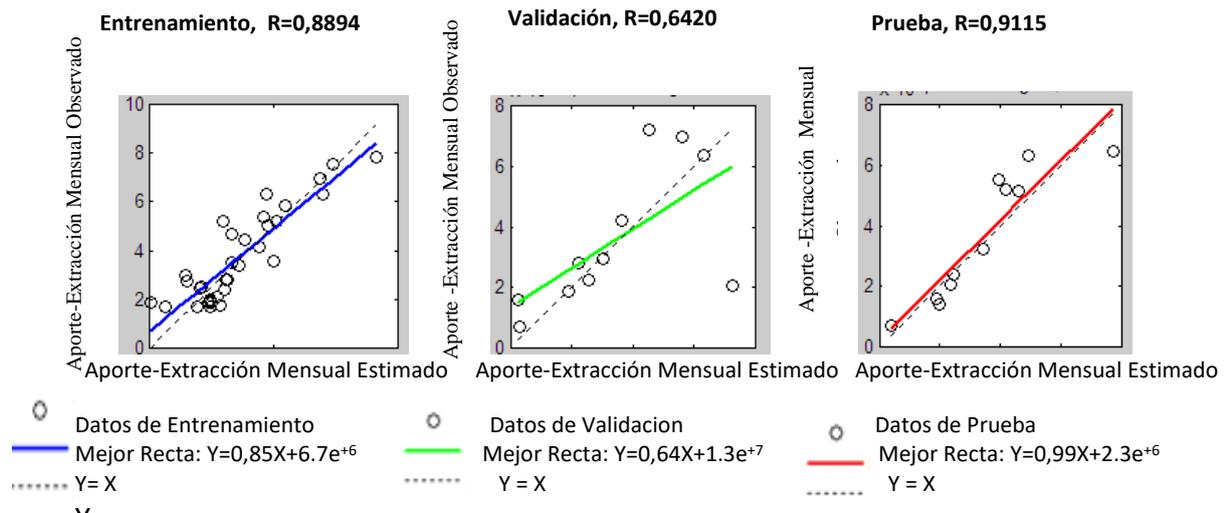


Figura 36. Aporte-extracción mensual observado vs aporte-extracción mensual estimado en el embalse Pao-Cachinche durante el período 2005-2009. Datos procesados en MATLAB

Calidad de Ajuste de los Modelos Estocásticos (ARIMA) vs los Modelos de Red Neuronal Artificial (RNA)

En la Tabla 50 se muestran los resultados de los ajustes obtenidos con el modelo estocástico y de red neuronal para la estimación del aporte-extracción diario, donde se observa que en la fase de entrenamiento se obtienen los siguientes coeficientes de correlación (R^2): ARIMA: 0,57; RNA(1): 0,15; RNA(2): 0,55 y RNA(3): 0,72; el error medio absoluto (EMA) con el modelo ARIMA es de $3,8 \times 10^5$; mientras que para los modelos RNA(1), RNA(2) y RNA(3) son, en las fases de entrenamiento, validación y prueba, iguales a 0,0024, 0,0066 y 0,0065; respectivamente. La fase de validación arroja los siguientes R^2 : ARIMA: 0,56; RNA (1): 0,16; RNA (2): 0,40 y RNA (3): 0,67; con un error medio absoluto de $3,3 \times 10^5$ para el modelo ARIMA. En la etapa de prueba se obtienen los siguientes ajustes para R^2 : ARIMA: 0,18; RNA (1): 0,12; RNA (2): 0,52 para el y 0,68 para el RNA (3), siendo el error medio absoluto del modelo ARIMA de $1,3 \times 10^5$.

Tabla 50. Calidad de ajuste de modelos para series diarias

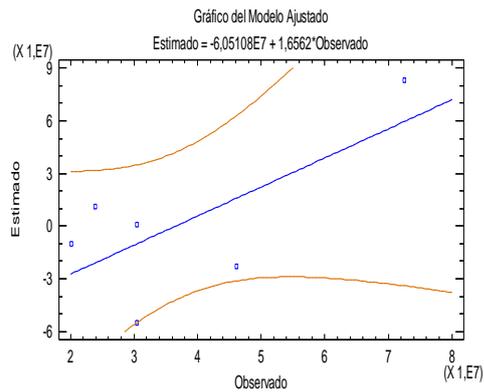
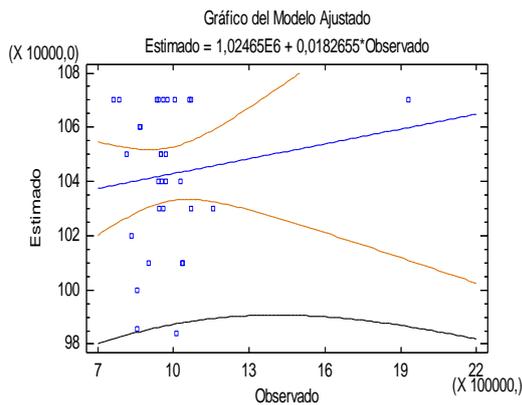
Modelo	R	R²	EMA*
Entrenamiento-Calibración			
ARIMA(2,0,2)x(2,0,0)3	0,7541	0,5687	3,8 x 10 ⁵
RNA(1): 4-20-1	0,3929	0,1544	0,00236
RNA(2): 4-20-1	0,7420	0,5505	0,00655
RNA(3): 4-20-1	0,8471	0,7175	0,00648
Validación			
ARIMA(2,0,2)x(2,0,0)3	0,7493	0,5615	3,3 x 10 ⁵
RNA(1): 4-20-1	0,4017	0,1614	0,00236
RNA(2): 4-20-1	0,6293	0,3960	0,00655
RNA(3): 4-20-1	0,8107	0,6735	0,00648
Pronóstico-Prueba			
ARIMA(2,0,2)x(2,0,0)3	0,1359	0,1848	1,3 x 10 ⁵
RNA(1): 4-20-1	0,3519	0,1238	0,00236
RNA(2): 4-20-1	0,7230	0,5228	0,00655
RNA(3): 4-20-1	0,8217	0,6753	0,00648

Fuente. Elaboración propia. Datos procesados en StatGraphics
 (*)Error Medio Absoluto

Con base a los resultados arrojados por los modelos para cada una de las fases, se puede afirmar que el ajuste alcanzado por el modelo RNA (3) resulta el más satisfactorio ya que R² es ligeramente menor a 0,70 (Gutiérrez y De la Vara, 2004) en las etapas de entrenamiento, validación y prueba con errores medios absolutos del orden de 10⁻³; mientras que para el modelo ARIMA, R² es aproximadamente 0,50 en las etapas de entrenamiento y validación; no así en la etapa de prueba donde R² se aproxima a 0,20; con errores medios absolutos del orden de 10⁵. Los resultados del ajuste del modelo RNA (1) se deben al cambio del régimen de caudales del río Paito en

el año 2004. El modelo RNA incrementa el ajuste debido a la baja variación de los valores en la serie de tiempo para ese período.

En las Gráficas 56(a) y 56(b) se muestran los resultados de la representación gráfica de los aportes-extracción observados y estimados en el embalse para intervalos de muestreo diario y mensual, mediante los modelos ARIMA, donde se observa que el conjunto de los datos de entrada “mensuales” se ajustan mejor al modelo que el conjunto de los datos “diarios” ya que, el R^2 de la serie mensual es de 0,70 mientras que para la serie diaria es de 0,20; esto indica que la relación entre las variables observadas y estimadas es mas estrecha en la serie mensual que en la diaria y por lo tanto el coeficiente de correlación para la serie mensual es estadísticamente significativo, con un nivel de confianza del 95 por ciento o más.



(a)

(b)

Gráfica 56. Correlación del aporte-extracción observado vs aporte-extracción estimado: (a) serie diaria y (b) serie mensual. Datos procesados en StatGraphics

En la Tabla 51 se muestran los resultados de la calidad del ajuste de los modelos ARIMA y RNA empleando como datos de entrada los aportes-extracción mensuales al embalse durante el período 2005-2009; donde se observa que el ajuste del modelo RNA es satisfactorio; ya que aunque se obtiene un R^2 de alrededor de 0,68 (cercano a 0,70) para las etapas de entrenamiento, validación y prueba; no supera al modelo

ARIMA con el cual se obtiene un R^2 de alrededor de 0,55; todo lo cual es corroborado al comparar los errores medios absolutos, siendo del orden de 10^6 a 10^7 para el modelo ARIMA y del orden de 10^{-3} para el modelo RNA (2).

Tabla 51. Calidad de ajuste de modelos para series mensuales

Modelo	R	R²	EMA *
Entrenamiento/Calibración			
ARIMA(0,0,1)x(2,0,1) ₆	0.7960	0.6336	9.7×10^6
RNA(2): 4-20-1	0.9890	0.9781	0.0027
Validación			
ARIMA(0,0,1)x(2,0,1) ₆	0.7343	0.5393	1.4×10^7
RNA(2): 4-20-1	0.8040	0.6464	0.0027
Pronóstico/Prueba			
ARIMA(0,0,1)x(2,0,1) ₆	0.6960	0.4845	3.8×10^7
RNA(2): 4-20-1	0.6724	0.4522	0.0027

Fuente: Elaboración propia. Datos procesados en StatGraphics
Error Medio Absoluto

En general, el ajuste logrado con los modelos de serie mensual es mayor al ajuste de los modelos de serie diaria, debido a la poca variación de los datos de entrada registrados en el período de tiempo seleccionado. La selección del período obedece a dos razones: 1) en el año 2001 se disminuyeron 22 millones de metros cúbicos en el Embalse Pao-Cachinche por la realización de una batimetría y 2) en 2004 se desvía el Lago de Valencia hacia el río Paito, aumentando el aporte al embalse.

Simulación de la Operación de Crecientes del Subsistema Embalse Pao-Cachinche

La operación de simulación de crecientes comprende el tránsito por el cauce mediante la modelación lluvia-escorrentía aplicando el programa HEC-HMS y el tránsito por el embalse mediante la modelación determinística.

Modelación del Proceso Lluvia-Escorrentía para la Estimación del Gasto de Entrada en el Subsistema Cuenca Río Pao

El procesamiento de las subcuencas con el programa HEC-GeoHMS genera tanto las características geomorfológicas de las cuencas y de la red de drenaje hacia el embalse, así como los parámetros para la modelación hidrológica de cada una. El modelo HEC-HMS requiere tanto los parámetros antes mencionados así como también aquellos relacionados con las condiciones iniciales de las subcuencas; a saber: el número de curva (CN), el tiempo de concentración (T_c), el tiempo de retardo (T_r) y el índice de abstracción inicial (I_a) para cada subcuenca, los cuales se presentan a continuación.

Parámetros de Entrada al Modelo HEC-HMS

Cálculo del número de curva (CN). A partir de la combinación, por cada subcuenca, del tipo de suelo con el uso de la tierra, se obtiene un CN para cada condición de humedad antecedente: (a) CNI para condición de humedad antecedente seca, (b) CNII para condición de humedad antecedente normal y (c) CNIII para condición de humedad antecedente húmeda, los cuales se muestran a continuación (ver Tablas 52 a 56).

Tabla 52. Números de curva para la cuenca del río Chirgua

Uso del suelo	Descripción Tipo de suelo	Número de Curva (CN)		
		CN I	CNII	CNIII
Agrícola (tierras cultivadas)	IIs			
	IVs, VIe VIIes Vles, VIIIes, IIIse	64-71	35-50	79-83
Bosques	VIIe, VIIes	53-63	34	78
Pecuario (pastizales)	VIIe	82-89	60-77	89-94
Residencial	VIIes	72-81	51-59	84-88

Fuente. Elaboración propia

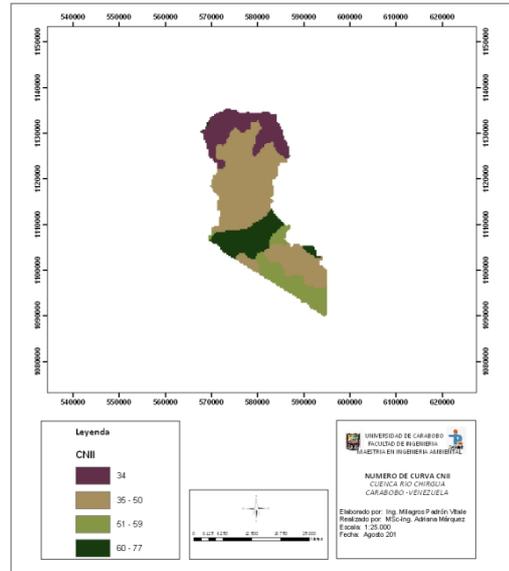
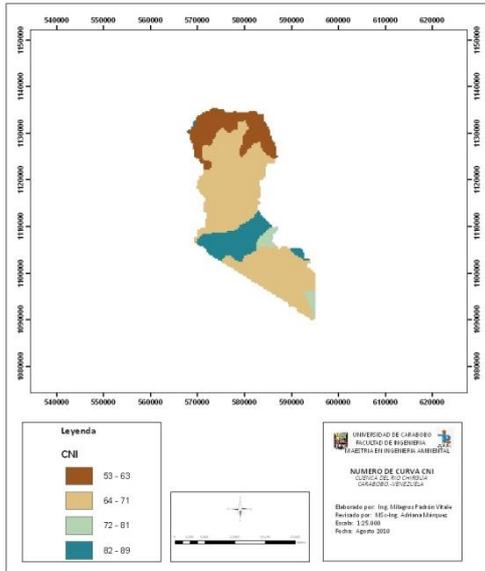
En la Tabla 52 se presentan los CNI, CNII y CNIII correspondientes a la subcuenca del río Chirgua, obtenidos a partir de la combinación del tipo de suelo (ver Tabla 4 y Figura 23) con el uso de la tierra (ver Tabla 6 y Figura 26).

La condición de humedad antecedente (CNI) se muestra en la Figura 37(a); donde se observa que el CNI de los suelos de uso agrícola (color beige) está en el rango de 64-71, que corresponde a suelos de moderadamente alto potencial de escorrentía, moderada fertilidad, moderado drenaje y texturas medias. El CNI para los bosques (color marrón) está entre 53-63, indicando un moderadamente bajo a alto potencial de escorrentía, son suelos poco profundos, bien drenados y de baja fertilidad. El uso pecuario (color turquesa) arrojó un CNI entre 82-89, que indica un alto potencial de escorrentía, son suelos de textura franco-arcillosa a arcillosa, ácidos y de baja fertilidad y el uso residencial (color verde claro) arrojó un CNI en el rango de 72-81, que indica que son suelos de moderado a alto potencial de escorrentía, poco profundos, de baja fertilidad, con frecuentes afloramientos rocosos y piedras superficiales.

La Figura 37(b) muestra los resultados del CN para la condición de humedad antecedente II, donde se observa que aquellos suelos de uso agrícola tienen un CNII entre 35-50 (color marrón) indicando un moderado potencial de escorrentía y moderada infiltración; el uso para bosques arrojó un CNII igual a 34 (color púrpura),

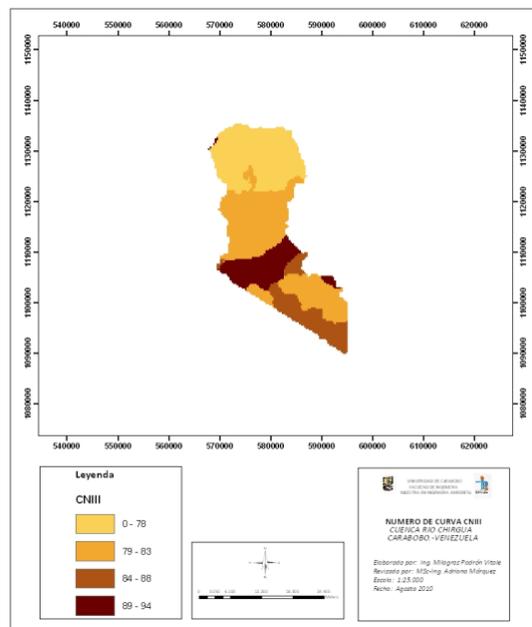
por lo que se trata de suelos con un moderadamente bajo potencial de escorrentía e infiltración media, el uso del suelo con fines pecuarios arrojó un CNII entre 51-59 (color verde claro) y el uso residencial tiene un CNII de 60-77 (color verde oscuro), tratándose de suelos con un moderadamente alto potencial de escorrentía y baja infiltración.

Los resultados del CN para la condición III en la cuenca del río Chirgua se presentan en la Figura 37(c), los cuales arrojan los siguientes resultados: el CNIII para uso agrícola está en el rango de 79-83 (color naranja), el CNIII para uso como bosques es igual a 78 (color amarillo), el CNIII para uso pecuario esta entre 84-88 (color marrón claro) y el CNIII para uso residencial está en el rango 89-94 (color marrón oscuro); todo lo cual indica que en general, los suelos de la subcuenca poseen un moderadamente alto a alto potencial de escorrentía bajo condiciones de suelo húmedo.



(a)

(b)



(c)

Figura 37. Números de curva para la cuenca del río Chirgua bajo la condición de humedad antecedente: (a) I, (b) II y (c) III. Elaboración propia

En la Tabla 53 se presentan los resultados de los CNI, CNII y CNIII correspondientes a la subcuenca del río Chirgua, obtenidos a partir de la combinación del tipo de suelo de la subcuenca (ver Tabla 5 y Figura 24) con el uso de la tierra (ver Tabla 7 y Figura 26).

Tabla 53. Números de curva para la cuenca del río Paito

Uso del suelo	Descripción Tipo de suelo	Número de Curva (CN)		
		CN I	CNII	CNIII
Agrícola (tierras cultivadas)	IVs, IVsd	47-57	29-38	64-73
	IIs			
	VIIe			
Bosques	VIIe, VIIes	57-68	38-49	73-83
	VIIes			
Pecuario (pastizales)	VIIes, VIIIe	75-86	56-73	88-93
	IIs			
	VIIIIs			
	IVs, VIIsd			
	VIs, VIIes			
Residencial	VIIe	68-75	49-56	83-88
	IIs, IIIIsd			
	VIIes, VIIc + VIc			

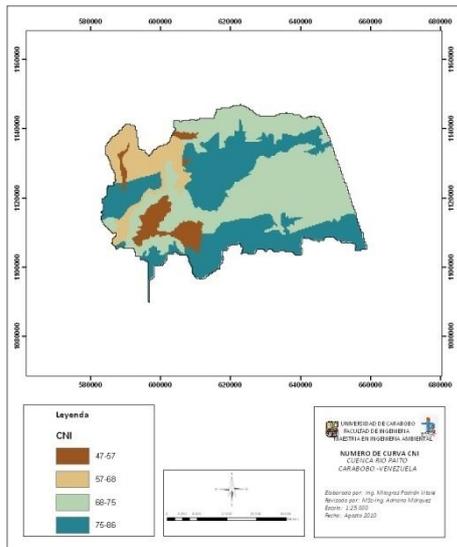
Fuente. Elaboración propia

En la Figura 38 se muestran los mapas de los números de curva para la cuenca del río Paito, donde se observa que los cálculos para la condición I, tal como se muestra en la Figura 38(a), arrojan los siguientes resultados: el rango del CNI para los suelos de uso agrícola es 47-57 (color marrón), lo que indica que son suelos de moderado a bajo potencial de escorrentía, de moderada a alta fertilidad, drenaje externo rápido y texturas medias; el rango de CNI para bosques está entre 57-68 (color crema) pues se trata de suelos poco profundos, de baja fertilidad, con afloramientos rocosos y un moderado potencial de escorrentía; el rango de CNI para el uso pecuario esta entre 68-75, que indica un moderadamente alto potencial de escorrentía, son suelos de

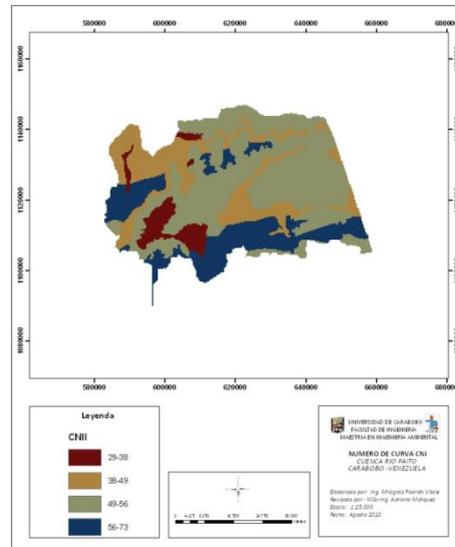
moderada profundidad y fertilidad y moderado drenaje; el CNI para el uso residencial está en el rango de 75-86 (color turquesa), que indica un alto potencial de escorrentía, moderada a baja fertilidad, moderada profundidad y textura mixta.

En la Figura 38(b) se muestran los resultados del número de curva para la condición II; en la misma se observa que el CNII para uso agrícola y bosques es de 29-38 (color vinotinto) y 38-49 (color amarillo ocre), respectivamente, lo que indica que son suelos que presentan un moderadamente bajo potencial de escorrentía; el CNII para uso residencial y pecuario arrojaron rangos de 49-56 (color gris) y 56-73, respectivamente, indicando un moderadamente alto potencial de escorrentía y moderada infiltración.

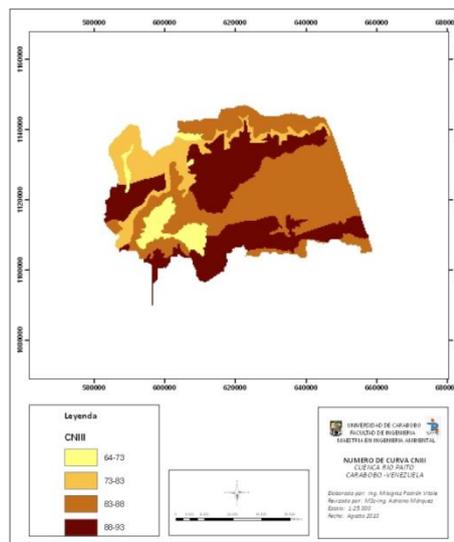
En la Figura 38(c) se muestran los CN para la condición de humedad antecedente III, en la misma se observa que el CNIII para uso agrícola arrojó un rango entre 64-73 (color amarillo claro), por lo que se trata de una condición de moderadamente alto potencial de escorrentía y baja infiltración; mientras que los usos para bosques, pecuario y residencial tienen, respectivamente, rangos de 73-83 (color amarillo oscuro), 88-73 (color naranja) y 83-88 (color vino tinto), lo que indica que se trata de suelos de alto potencial de escorrentía y baja infiltración.



(a)



(b)



(c)

Figura 38. Números de curva para la cuenca del río Paito bajo la condición de humedad antecedente: (a) I, (b) II y (c) III. Elaboración propia

En la Tabla 54 se muestran los resultados del cálculo de los números de curva en la cuenca del río Pirapira para las tres condiciones del suelo: seca (CNI), normal (CNII) y húmeda (CNIII); resultantes de la combinación del tipo de suelo de la subcuenca (ver Tabla 8 y Figura 27) con el uso actual de la tierra (ver Tabla 11 y Figura 26).

Tabla 54. Números de curva para la cuenca del río Pirapira

Uso del suelo	Descripción Tipo de suelo	Número de Curva (CN)		
		CN I	CNII	CNIII
Agrícola(tierras cultivadas), Residencial	Vles, IIIse, IVse	50-55	35-40	65-70
Bosques	VIIes	45-50	30-35	60-65
Pecuario (pastizales)	VIIes VIIes, VIIe, VIIIe VIIes, VIIc + VIc	40-45	20-25	56-60

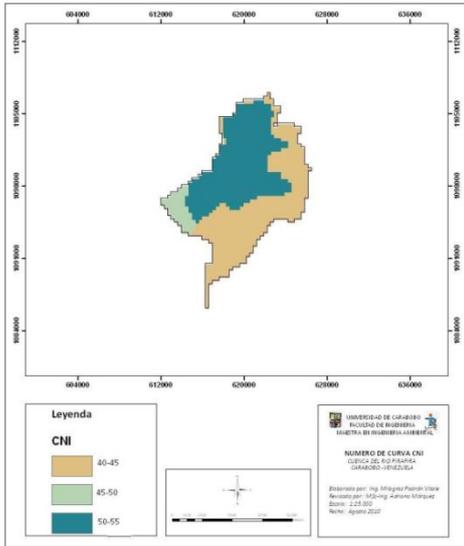
Fuente. Elaboración propia

En la Figura 39 se muestran los mapas de los números de curva para la subcuenca del río Pirapira, donde se observa que el CN I para suelos de uso agrícola y residencial están en el rango de 50-55 (color turquesa) tal como se muestra en la Figura 39(a), lo que indica que se trata de suelos con un moderado potencial de escorrentía, de texturas medias, arcillosos y moderadamente profundos. Los CN I para bosques y uso pecuario están en los rangos de 45-50 (color aguamarina) y 40-45 (color beige), respectivamente, lo que indica que se trata de suelos de moderado potencial de escorrentía, son de baja fertilidad, moderada a baja profundidad y moderadamente drenados.

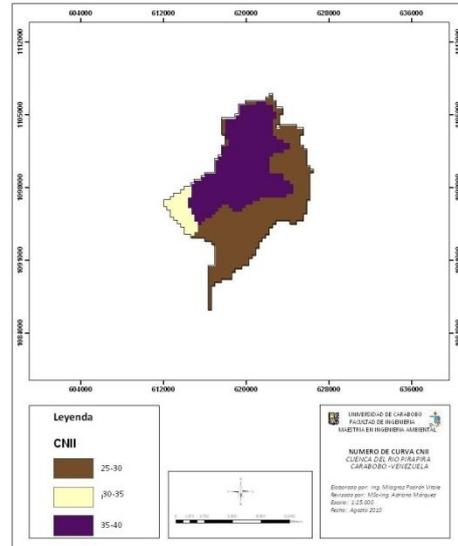
En la Figura 39(b) se presentan los números de curva para la condición II; en la misma se observa que los suelos de uso agrícola y residencial tienen un CN II en el rango de 35-40 (color morado), que indica un potencial de escorrentía de moderado a bajo y moderada infiltración. Los CN II para los bosques y uso pecuario están en el rango de 30-35 (color crema) y 25-30 (color marrón) respectivamente; esto indica que bajo condiciones normales, los suelos de la cuenca son de moderadamente bajo potencial de escorrentía.

En la Figura 39(c) se muestran los números de curva para la condición de suelo húmedo en la cuenca del río Pirapira, donde se observa que los tres principales usos

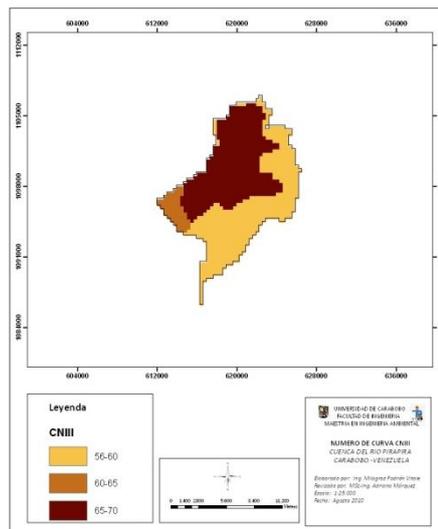
del suelo dan como resultado rangos de CN correspondientes a suelos con un moderadamente alto potencial de escorrentía; ya que se obtuvieron los siguientes rangos de CNIII: entre 65-70 (color vinotinto) para uso agrícola y residencial, entre 60-65 (color terracota) para bosques y entre 56-60 (color amarillo ocre) para uso pecuario.



(a)



(b)



(c)

Figura 39. Números de curva para la cuenca del río Pirapira bajo las condiciones de humedad antecedente: (a) I, (b) II y (c) III. Elaboración propia

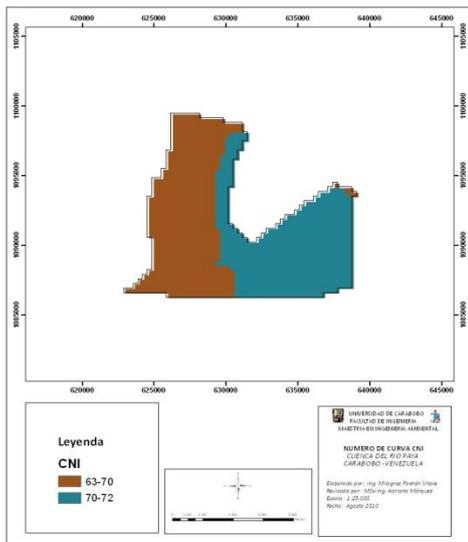
Los números de curva para las condiciones de suelo CNI, CNII y CNIII en la subcuenca del río Paya se presentan en la Tabla 55; la cual muestra que los valores de CNI tanto para uso agrícola y residencial como para uso agropecuario están en el rango de 70-72, área de color turquesa en la Figura 40(a); y de 63-70, área de color marrón en la misma figura, estos suelos corresponden a terrenos con un moderadamente alto potencial de escorrentía en condiciones de suelo seco, baja fertilidad, moderada a baja profundidad, pedregosos y de textura franco-arcillosa con moderado drenaje.

Tabla 55. Números de curva para la cuenca del río Paya

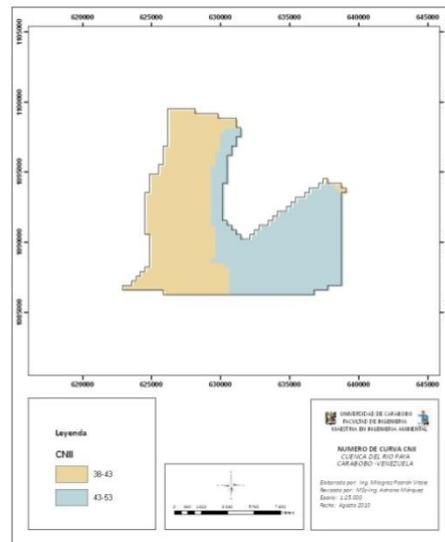
Uso del suelo	Descripción Tipo de suelo	Número de Curva (CN)		
		CN I	CNII	CNIII
Agrícola (tierras cultivadas), Residencial	VI + VIIe, VIIe; VIIe VIIes, VIIe, VIIIe	70-72	43-53	83-54
Agropecuario (bosques, pastizales)	VIIes, VIIe, VIIIe VIIes VIIe, VIe	63-70	38-43	79-83

Fuente. Elaboración propia

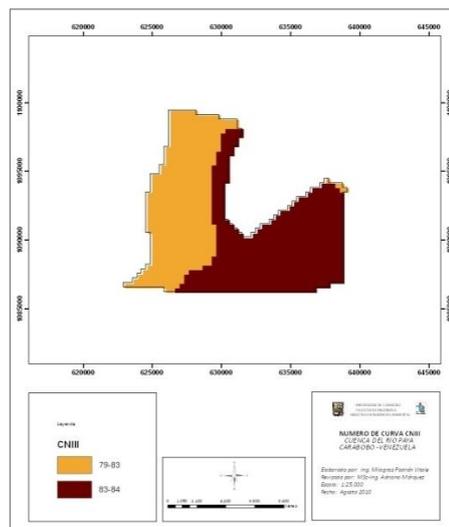
En la Figura 40(b) se presentan los números de curva para la condición de humedad antecedente II en la subcuenca, donde se observa que tanto los usos agrícola y residencial como el uso agropecuario arrojan rangos de CNII de respectivamente 43-53 (color azul) y 38-43 (color beige); esto indica que bajo esta condición los suelos de la subcuenca presentan un moderadamente bajo potencial de escorrentía y moderada infiltración. Los resultados del número de curva para la condición III, los cuales se muestran en la Figura 40(c), indican que los suelos de la subcuenca poseen un alto potencial de escorrentía pues se obtuvieron rangos de CNIII de 83-54 (color vinotinto) para los suelos de uso agrícola y residencial; y de 79-83 (color amarillo ocre) para los suelos de uso agropecuario.



(a)



(b)



(c)

Figura 40. Números de curva para la cuenca del río Paya bajo las condiciones de humedad antecedente: (a) I, (b) II y (c) III. Elaboración propia

En la Tabla 56 se muestran los resultados del cálculo del CN para las condiciones I, II y III en la subcuenca del río San Pedro. Los resultados obtenidos del CNI comprenden los rangos de 60-69 para suelos de uso agrícola y residencial, tal como se observa en la zona de color turquesa de la Figura 41(a), lo cual es indicativo de un moderadamente alto potencial de escorrentía, moderada a baja fertilidad, moderada profundidad, moderado drenaje y texturas medias; asimismo los rangos de CNI para bosques y uso pecuario son, respectivamente, de 50-51 (zona de color marrón) y 51-60 (zona color verde claro); esto indica que bajo condiciones de sequía los suelos para estos usos poseen un moderadamente bajo potencial de escorrentía, son suelos moderadamente drenados, moderada a baja profundidad con moderada fertilidad.

Tabla 56. Números de curva para la cuenca del río San Pedro

Uso del suelo	Descripción Tipo de suelo	Número de Curva (CN)		
		CN I	CNII	CNIII
Agrícola (tierras cultivadas), Residencial	Vles, IIIse, IVse VIIes, VIIe, VIIIe VI + VIIe, VIIe	60-69	40-50	76-83
Bosques	VIIes	50-51	29-31	64-67
Pecuario (pastizales)	VI + VIIe, VIIe VIIe	51-60	31-40	67-76

Fuente. Elaboración propia

En la Figura 41(b) se muestran los resultados del cálculo del número de curva para la condición de humedad antecedente II; en la misma se observa que los CN tanto para uso agrícola y residencial como para uso pecuario se obtienen rangos que van de 40-50 (color turquesa) y de 31-40 (color verde), respectivamente. Esto indica que se trata de suelos con un moderadamente bajo potencial de escorrentía mientras que para los suelos con bosques se obtuvo un rango de CNII entre 29-31, lo que indica que se trata de suelos con bajo potencial de escorrentía e infiltración moderada.

En la Figura 41(c) se muestran los resultados obtenidos del cálculo del CN para la condición III, donde se observa que los suelos boscosos y de uso pecuario poseen un moderadamente bajo potencial de escorrentía ya que los rangos del CNIII obtenidos son de 64-67 (área de color amarillo claro) y de 67-76 (área de color amarillo ocre), respectivamente; asimismo, del cálculo del CNIII para suelos de uso agrícola y residencial se obtuvo un rango de 76-83 (área de color vino tinto), por lo que se trata de suelos con un alto potencial de escorrentía bajo condiciones de humedad e infiltración lenta.

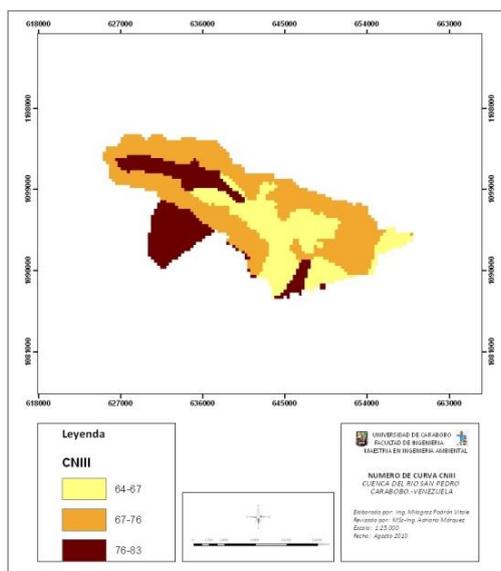
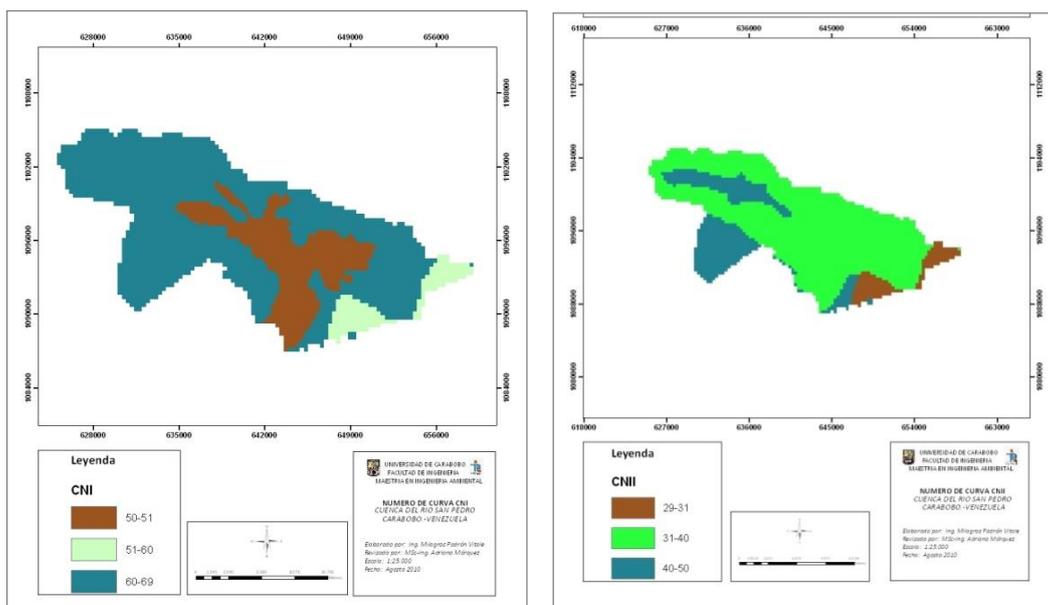


Figura 41. Números de curva para la cuenca del río San Pedro bajo las condiciones de humedad antecedente: (a) I, (b) II y (c) III. Elaboración propia

Cálculo del tiempo de concentración (T_c) y del tiempo de retardo (T_r). En la Tabla 57 se presentan los resultados obtenidos del cálculo de los tiempos de concentración y de retardo para las subcuencas de los ríos Chirgua, Paito, Pirapira, Paya y San Pedro, respectivamente; donde T_c se calcula a partir de la Ecuación (49), la cual considera la longitud del cauce principal y el desnivel entre el punto mas alto (elevación aguas arriba) y el punto más bajo (elevación aguas abajo) de la cuenca y que se muestran en la Tabla 2; mientras que T_r se calcula a partir de la Ecuación (17).

Tabla 57. Tiempos estimados de concentración (T_c) y de retardo (T_r), en el subsistema cuenca río Pao

Subcuenca	T_c (h)	T_r (h)
Chirgua	7,88	4,73
Paito	14,58	8,75
Pirapira	3,84	2,30
Paya	3,02	1,81
San Pedro	3,56	2,13

Fuente. Elaboración propia

En la Tabla 57 se observa que la cuenca del río Paito es la que requiere el mayor tiempo para que toda el área aporte agua a la cuenca ya que el T_c es igual a 14,58 h (alrededor de 874,8 min); mientras que el tiempo de retardo T_r es igual a 8,75 h (alrededor de 525 min). El resto de las subcuencas arrojaron los siguientes tiempos de concentración: 7,88 h para la cuenca del río Chirgua; 3,84 para la cuenca del río Pirapira; 3,56 para la cuenca del río San Pedro y 3,02 h (alrededor de 181,2 min) para la cuenca del río Paya; siendo ésta última la que requiere el menor tiempo para aportar agua al área de estudio y con un tiempo de retardo de 1,81 h (alrededor de 108,6 min). Por su parte, los tiempos de retardo obtenidos para el resto de las subcuencas fueron: 4,73 h para la cuenca del río Chirgua; 2,30 h para la cuenca del río Pirapira y 2,13 h para la cuenca del río San Pedro.

Cálculo del índice de abstracción inicial (I_a) y de la retención máxima superficial.

En la Tabla 58 se presentan los resultados obtenidos del cálculo de las pérdidas por infiltración mediante los índices de abstracción inicial para cada subcuenca, utilizando la Ecuación (9); la cual requiere de la estimación previa de la retención máxima superficial (S) aplicando la Ecuación (11), la cual considera el número de curva de la subcuenca.

Tabla 58. Índice de abstracción inicial (I_a), número de curva (CN) y retención máxima potencial (S) del subsistema cuenca río Pao

Subcuenca	I_a (mm)	CN ^(*)	S (mm)
Chirgua	22,82	69	114,12
Paito	8,96	85	44,82
Pirapira	28,58	64	142,88
Paya	11,15	82	55,76
San Pedro	16,93	75	84,67

Fuente. Elaboración propia

(*) Resultado proveniente del procesamiento de la cuenca con HEC-GeoHMS

La cuenca con el mayor índice de abstracción inicial corresponde a la del río Pirapira, con un I_a igual a 28,58 mm y CN igual a 64; lo que sugiere que se trata de la subcuenca con las mayores pérdidas por infiltración respecto al resto de las áreas de estudio, debido al almacenamiento de la precipitación en las depresiones del terreno; en cuanto al valor de la retención máxima potencial ésta es igual a 142,88; resultado que es cónsono con el valor de I_a obtenido ya que S depende de ésta última. Para las demás subcuencas se obtuvieron los siguientes resultados: la cuenca del río Chirgua tiene un I_a igual 22,82; S igual a 114,12 y CN igual a 69; la cuenca del río Paito obtuvo un I_a igual a 8,96 (el más bajo con respecto a las demás subcuencas), S igual 44,82 y CN igual a 85. La cuenca del río Paya arrojó un I_a igual a 11,15; S igual a 55,76 y CN igual a 82 y la cuenca del río San Pedro obtuvo un I_a de 16,93; S igual a 84,67 y CN igual a 75.

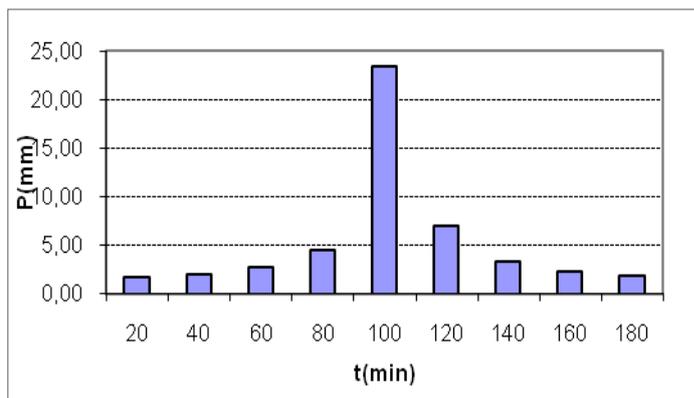
Generación de tormentas de diseño en el subsistema cuenca río Pao. Debido a la escasa disponibilidad de datos pluviométricos de las subcuencas afluentes al embalse: Chirgua, Paito, Pirapira, Paya y San Pedro, se generan eventos torrenciales o patrones de precipitación a la entrada del embalse para la predicción de caudales pico; para ello se emplean tormentas sintéticas de 3 y 6 horas de duración (D) y períodos de retorno (Tr) de 5, 10 y 50 años, respectivamente.

En la Tabla 59 se presentan los resultados del cálculo de la tormenta sintética de Tr=5 años y D=3 h para la cuenca del río Chirgua, donde se observa que la intensidad y la cantidad de precipitación ajustada (P_{red}) disminuye con el tiempo; así se tiene que a las 3 horas (180 min) la tormenta alcanza una intensidad máxima de 21 mm, la precipitación acumulada (P_{acum}) es de alrededor de 66 mm, la precipitación sin ajustar es de 2,30 mm y la precipitación corregida es de 1,72 mm. La última columna de la tabla: *Bloques Alternos* representa el hidrograma de la tormenta, mostrada en la Gráfica 57. En el Anexo I se incluyen las tablas y gráficas generadas para la cuenca del río Chirgua.

Tabla 59. Tormenta de diseño para Tr=5 años y D=3 h en la cuenca del río Chirgua

Intervalo (h)	Intervalo (min)	Intensidad (mm/h)	P_{acum} (mm)	P(mm)	P_{red} (mm)	Bloques Alternos
0,33	20	93,71	31,24	31,24	23,43	1,72
0,67	40	60,79	40,53	9,29	6,97	2,11
1,00	60	46,52	46,52	5,99	4,50	2,80
1,33	80	38,31	51,08	4,56	3,42	4,50
1,67	100	32,89	54,82	3,74	2,80	23,43
2,00	120	29,01	58,02	3,20	2,40	6,97
2,33	140	26,07	60,84	2,82	2,11	3,42
2,67	160	23,76	63,36	2,53	1,89	2,40
3,00	180	21,89	65,66	2,30	1,72	1,89

Fuente. Elaboración propia



Gráfica 57. Histograma de creciente en la cuenca del río Chirgua para tormenta de $Tr=5$ años y $D=3$ h. Elaboración propia

Modelación del Proceso Lluvia-Escorrentía con HEC-HMS

Una vez que han sido cargados todos los parámetros hidrológicos y las tormentas sintéticas al programa HEC-HMS, éste modela el tránsito por el cauce de la subcuenca mediante la alternativa de modelación seleccionada, en este caso la que emplea los modelos de pérdidas del SCS–US y el de Muskingum-Cunge, respectivamente; generando el hidrograma de escorrentía para la creciente correspondiente al período de retorno y duración seleccionada, el cual representa en este estudio el caudal máximo de entrada al embalse, aportado por la subcuenca. A continuación se presenta, por subcuenca, las tablas e hidrogramas correspondientes a los periodos de retorno y duraciones seleccionadas.

Modelación de crecientes en la subcuenca del río Chirgua. En la Tabla 60 se presentan los resultados de las corridas realizadas con el programa HEC-HMS, para cada una de las combinaciones de períodos de retorno y duración seleccionadas, cuyos hidrogramas se muestran en la Figura 41.

Tabla 60. Modelación lluvia-escorrentía en la cuenca del río Chirgua para períodos de retorno (Tr) de 5, 10 y 50 años y duraciones (D) de 3 y 6 horas

CUENCA RÍO CHIRGUA						
Resultados de la modelación	Tr=5 años		Tr=10 años		Tr=50 años	
	D=3h	D=6h	D=3h	D=6h	D=3h	D=6h
Caudal pico (m ³ /s)	77,873	163,30	152,26	246,76	398,03	634,30
Precipitación total (m ³)	26,49	33,71	32,51	39,13	46,96	59,0
Pérdida total (m ³)	24,32	20,02	28,29	32,03	35,88	40,70
Exceso total (m ³)	2,17	4,70	4,21	7,10	11,08	18,30
Escorrentía directa total (m ³)	2,17	4,70	4,21	7,10	11,08	18,30
Flujo base total (m ³)	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
Descarga total (m ³)	2,29	4,82	4,33	7,22	11,26	18,42

Fuente. Elaboración propia. Datos procesados en HEC-HMS

De la Tabla 60 se observa que los resultados estimados por el modelo HEC-HMS (todos en millones de metros cúbicos), para una tormenta de Tr=5 años y D=3h, son los siguientes: el caudal pico es igual 77,9 m³/s, la precipitación total es de 26,49 m³, las pérdidas por infiltración en la cuenca es de 24,32 m³; el modelo asume que el exceso total de lluvia corresponde al escurrimiento directo en la cuenca, el cual arrojó un valor de 2,17 m³; el flujo base estimado es constante para todas las corridas de la subcuenca e igual a 0,12 m³ y el volumen total de agua aportado por la corriente principal es de 2,29 m³. Con respecto a la tormenta de igual período de retorno y duración igual a 6 horas se obtienen los siguientes resultados: el caudal pico es de 163,30 m³/s; la precipitación total es de 33,71 m³, la pérdida total por infiltración es igual a 20 m³; la escorrentía total es de 4,7 m³ y el volumen total descargado por la subcuenca es igual a 4,82 m³.

La modelación lluvia-escorrentía para una tormenta de Tr=10 años y D=3 horas arrojó un caudal pico de 152,26 m³/s; la precipitación total es de 32,51 m³, las pérdidas por infiltración son de aproximadamente 28,29 m³, la escorrentía directa total es igual a 4,21 m³ y la descarga total es igual a 4,33 m³; por su parte, para una tormenta de

igual periodo de retorno y dirección de 6 horas se tiene que el caudal pico alcanza los 246,76 m³/s; la precipitación total es de alrededor de 39 de agua, las pérdidas totales por infiltración son se estiman en 32 m³; la escorrentía directa total es de 7,1 m³ y el volumen descargado al cauce del río principal es de 7,22 m³.

Con respecto a las tormentas modeladas para Tr=50 años y D=3 horas se tiene que, el caudal pico estimado es de 398 m³/s, con una precipitación total estimada de 47 m³, las pérdidas por infiltración arrojan un valor de 35,88 m³; la escorrentía directa total es igual a 11 m³ y la descarga total es de 11,26 m³. Para una tormenta de igual Tr y duración de 6 horas se tiene que el caudal pico es de 634,3 m³/s; la precipitación total es de alrededor de 59 m³, las pérdidas totales por infiltración son de aproximadamente 40,7 m³; la escorrentía directa se estima en 18,3 m³ y la descarga o volumen total aportado a la corriente principal es de 18,42 m³.

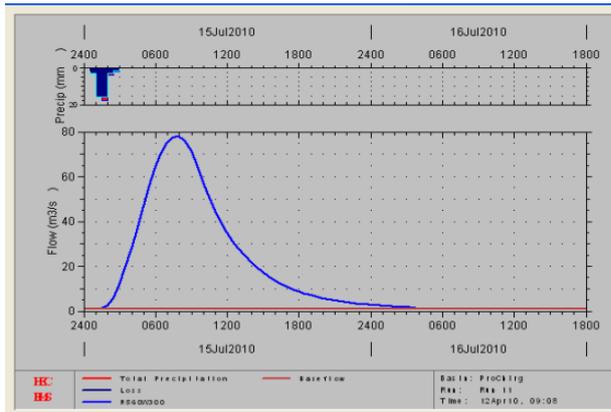
En la Figura 42 se muestran los hidrogramas de escorrentía correspondientes a las tormentas de diseño para periodos de retorno de 5, 10 y 50 años y duraciones de 3 y 6 horas donde se observa los siguientes tiempos de escorrentía en la cuenca: (a) 28 horas (1 día y 4 horas) para una tormenta de Tr=5 años y D=3 horas; (b) 31 horas (1 día y medio) para una tormenta de Tr=5 años y D=6 horas; (c) 27 horas (1 día y 3 horas) para una tormenta de Tr=10 años y D=3 horas; (d) 29 horas (1 día y 5 horas) para una tormenta de Tr=10 años y D= 6 horas; (e) 28 horas para una tormenta de Tr=50 años y D=3 horas y (f) 31 horas para una tormenta de Tr=50 años y D=6 horas. En el Anexo I se muestra un ejemplo de las tablas que arroja el programa HEC-HMS para la corrida correspondiente a la tormenta de Tr=5 años y D=3 horas en la cuenca del río Chirgua.

Modelación de crecientes en la subcuenca del río Paito. En la Tabla 61 se presentan los resultados de las corridas realizadas con el programa HEC-HMS, para cada una de las combinaciones de períodos de retorno y duración seleccionadas, cuyos hidrogramas se muestran en la Figura 43.

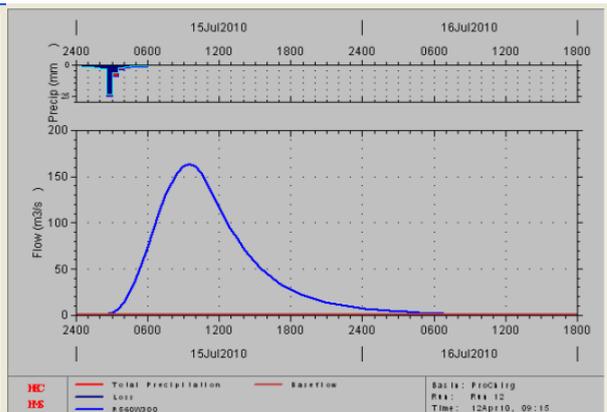
Tabla 61. Modelación lluvia-escorrentía en la cuenca del río Paito para períodos de retorno (Tr) de 5, 10 y 50 años y duraciones (D) de 3 y 6 horas

CUENCA RÍO PAITO						
Resultados de la modelación	Tr=5 años		Tr=10 años		Tr=50 años	
	D=3h	D=6h	D=3h	D=6h	D=3h	D=6h
Caudal pico (m ³ /s)	150,38	254,05	254,64	401,05	450,40	1012,9
Precipitación total (m ³)	56,73	69,62	69,62	85,09	90,25	139,24
Pérdida total (m ³)	48,22	54,92	54,92	61,88	64,20	79,16
Exceso total (m ³)	8,51	14,70	14,70	23,21	26,05	60,08
Escorrentía directa total (m ³)	8,51	14,70	14,70	23,21	26,05	60,08
Flujo base total (m ³)	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
Descarga total (m ³)	8,77	14,70	14,70	23,21	26,30	60,34

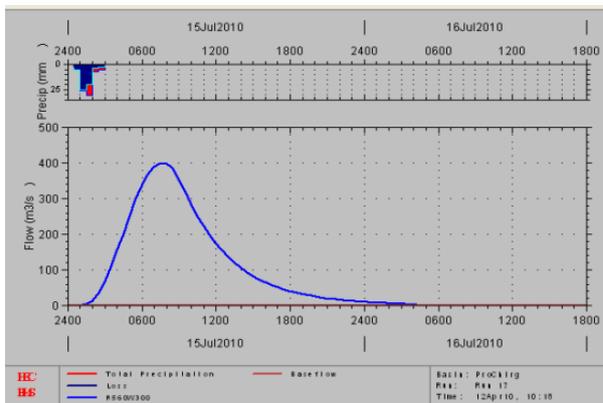
Fuente. Elaboración propia. Datos procesados en HEC-HMS



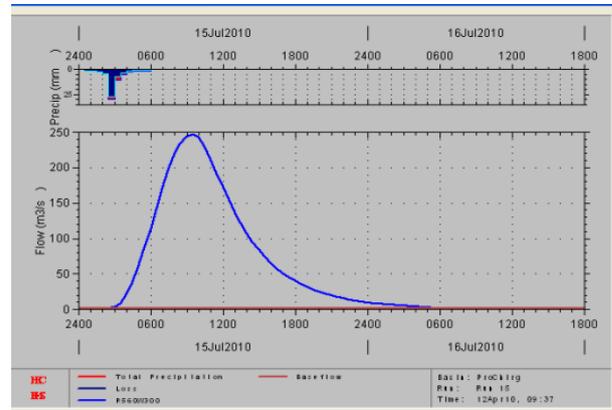
(a)



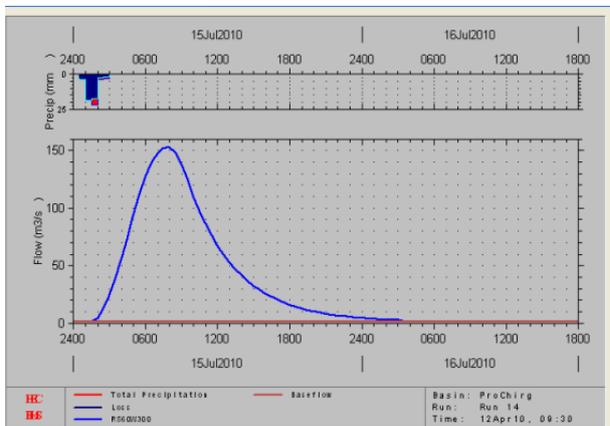
(b)



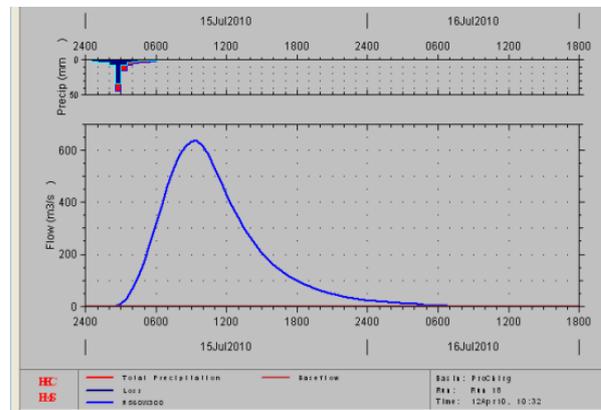
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 42. Hidrogramas de escorrentía en la cuenca del río Chirgua para tormentas de diseño de: (a) 5 años y 3h, (b) 5 años y 6h, (c) 10 años y 3h, (d) 10 años y 6h, (e) 50 años y 3h y (f) 50 años y 6h. Datos procesados en HEC-HMS

En la Tabla 62 se muestran los resultados obtenidos de la modelación con HEC-HMS para crecientes generadas a partir de tormentas sintéticas en la subcuenca del río Paito, donde se tiene que el caudal pico para la tormenta de $Tr=5$ años y $D=3$ horas es de $150,38 \text{ m}^3/\text{s}$; la precipitación total es de $56,73 \text{ m}^3$, la pérdida total por infiltración es de $48,2 \text{ m}^3$; la escorrentía directa total es de $8,51 \text{ m}^3$; el flujo base para todas las corridas del modelo se asume constante e igual a $0,26 \text{ m}^3$ y la descarga total al cauce principal es igual a $8,77 \text{ m}^3$. Por su parte, para una tormenta de igual período de retorno y duración de 6 horas el caudal pico estimado en la cuenca es de $254,95 \text{ m}^3/\text{s}$; la precipitación total es de alrededor de $69,6 \text{ m}^3$ de los cuales 55 m^3 se infiltran en el suelo y alrededor de $14,7 \text{ m}^3$ de agua escurren sobre la superficie de la cuenca y se estima que la descarga al cauce principal es la misma cantidad de agua que escurre, es decir; $14,7 \text{ m}^3$.

La modelación de crecientes a partir de la tormenta de período de retorno igual a 10 años y 3 horas de duración arrojó los mismos resultados que la modelación de la tormenta de período de retorno igual a 5 años y duración de 3 horas con excepción del caudal pico, el cual es apenas 0,2 por ciento superior, esto es $254,64 \text{ m}^3/\text{s}$; mientras que para una tormenta de igual período de retorno y duración de 6 horas se tiene que el caudal pico es de aproximadamente $401 \text{ m}^3/\text{s}$, la precipitación total estimada es de 85 m^3 , la pérdida total por infiltración es de $61,8 \text{ m}^3$ de los cuales $23,2 \text{ m}^3$ de agua escurren hasta la cauce principal de la cuenca, para un volumen total de agua descargada de $26,3 \text{ m}^3$.

Para una tormenta de período de retorno igual a 50 años y 3 horas de duración se obtuvo un caudal pico de $450,4 \text{ m}^3/\text{s}$; la precipitación total es de $90,5 \text{ m}^3$ de los cuales $64,2 \text{ m}^3$ se consideran como pérdidas por infiltración y 26 m^3 es agua que escurre superficialmente sobre la superficie de la cuenca, la cual aporta un volumen de $26,3 \text{ m}^3$ al cauce principal; mientras que para una tormenta de igual período de retorno y 6

horas de duración se obtuvo un caudal pico de 1012,9 m³/s; la precipitación total es igual a 139,24 m³ de los cuales 79,1 m³ son las pérdidas totales por infiltración; 60 m³ corresponden a la escorrentía total y 60,34 m³ de agua son descargados al cauce principal.

En la Figura 43 se muestran los hidrogramas de escorrentía directa en la subcuenca del río Paito, para las tormentas de diseño con períodos de retorno de 5, 10 y 50 años y duraciones de 3 y 6 horas, respectivamente; donde se observa que el tiempo de escurrimiento para una tormenta de $T_r=5$ años y $D=3h$ es de alrededor de 52 horas (2 días y 4 horas), el tiempo de escurrimiento para una tormenta de igual período de retorno y duración de 6 horas es de 54 horas (2 días y medio), para una tormenta de $T_r=10$ años y 3 horas de duración el tiempo de escorrentía es de 52 horas mientras que para una tormenta con igual T_r y 6 horas de duración el agua escurre durante 3 horas. Asimismo si la tormenta es de $T_r=50$ años y $D=3$ horas el tiempo de escurrimiento es de 55 horas (2 días y 7 horas) mientras para el mismo T_r pero duración de 6 horas, el escurrimiento alcanza las 53 horas (2 días y 5 horas).

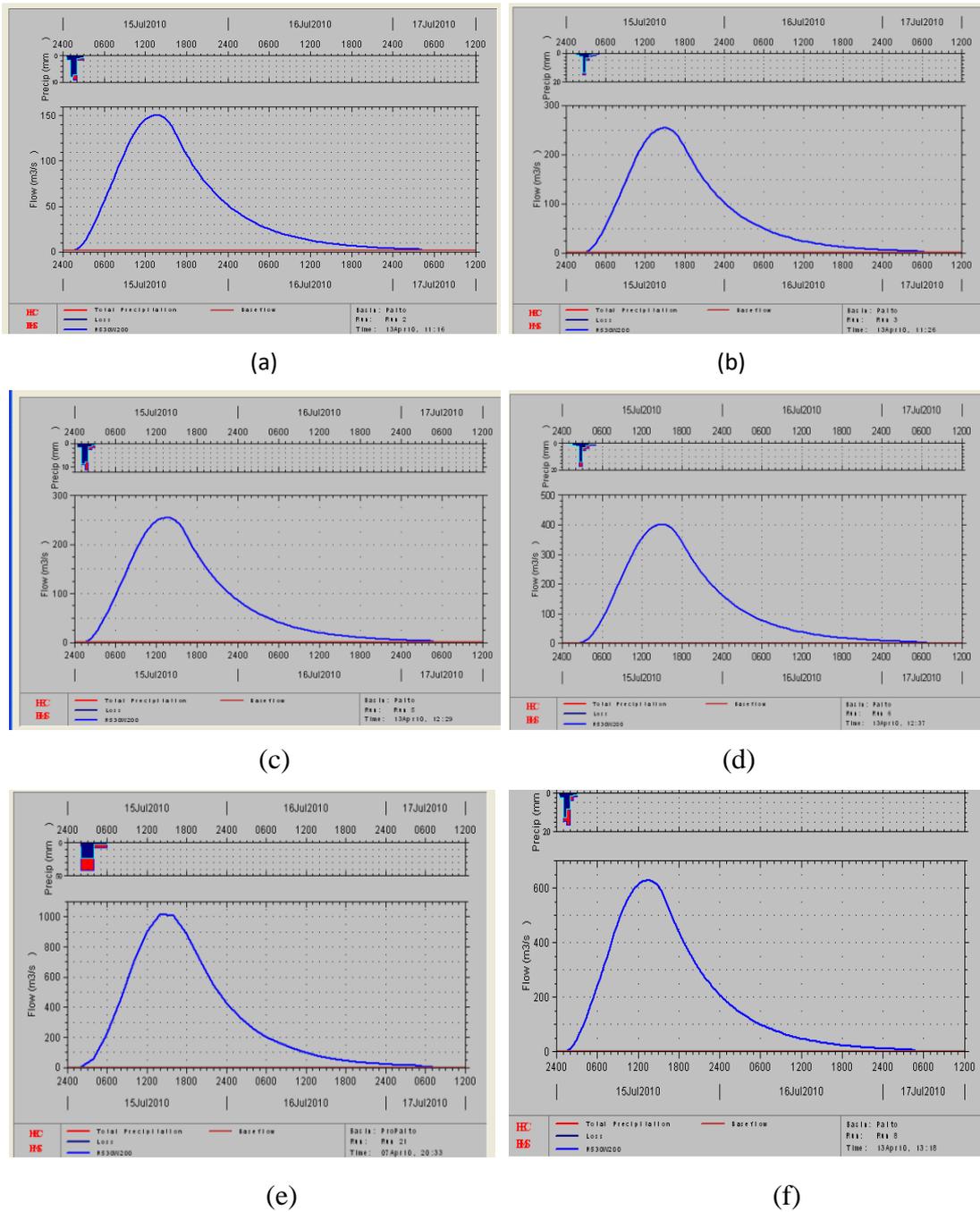


Figura 43. Hidrogramas de escorrentía en la cuenca del río Paito para tormentas de diseño de: (a) 5 años y 3h, (b) 5 años y 6h, (c) 10 años y 3h, (d) 10 años y 6h, (e) 50 años y 3h y (f) 50 años y 6h. Datos procesados en HEC-HMS

Modelación de crecientes en la subcuenca del río Pirapira.

En la Tabla 62 se presentan los resultados de las corridas realizadas con el programa HEC-HMS, para cada una de las combinaciones de periodos de retorno y duración seleccionadas, cuyos hidrogramas se muestran en la Figura 44

Tabla 62. Modelación lluvia-escorrentía en la cuenca del río Pirapira para períodos de retorno (T_r) de 5, 10 y 50 años y duraciones (D) de 3 y 6 horas

CUENCA RÍO PIRAPIRA						
Resultados de la modelación	Tr=5 años		Tr=10 años		Tr=50 años	
	D=3h	D=6h	D=3h	D=6h	D=3h	D=6h
Caudal pico (m^3/s)	47,646	67,896	81,023	118,28	215,66	281,91
Precipitación total(m^3)	7,75	9,11	67,0	11,02	13,19	16,05
Pérdida total (m^3)	7,09	7,97	58,6	9,07	10,13	11,32
Exceso total (m^3)	0,67	1,15	1,15	14,3	3,06	4,73
Escorrentía directa total (m^3)	0,67	1,15	1,15	14,3	3,06	4,73
Flujo base total (m^3)	0,08	0,08	0,08	0,6	0,08	0,08
Descarga total (m^3)	0,75	1,22	1,22	15,0	3,14	4,82

Fuente. Elaboración propia. Datos procesados en HEC-HMS

En la Tabla 62 se observa que el modelo HEC-HMS arroja los siguientes resultados para una tormenta de $T_r=5$ años y $D=3$ horas: el caudal pico es igual a $47,64 m^3/s$; la precipitación total es de $7,75 m^3$ con una pérdida total por infiltración de $7,09 m^3$; el exceso de precipitación se transforma en escorrentía con un valor de $0,67 m^3$; el flujo base total que utiliza el programa para todas las modelaciones de la subcuenca del río Pirapira es igual a $0,08 m^3$ y el volumen total descargado al cauce principal es de $0,75 m^3$. Para una tormenta de igual T_r y duración de 6 horas se tiene que el caudal pico es de $67,9 m^3/s$; la precipitación total es de $9,11 m^3$, las pérdidas totales son de $7,87 m^3$; la escorrentía directa total es igual a $1,15 m^3$ y la descarga a la corriente principal es de $1,22 m^3$.

La modelación hidrológica de la tormenta de 10 años y 3 horas en la subcuenca de río Pirapira resultó en un caudal pico de $81 \text{ m}^3/\text{s}$, una precipitación total de $9,11 \text{ m}^3$, una pérdida total y una escorrentía directa total iguales en número a los resultados arrojados para tales parámetros con el modelo que emplea un $T_r=5$ años y $D=6\text{h}$. Con respecto a la tormenta con igual período de retorno y 6 horas de duración se obtienen los siguientes resultados: el caudal pico es de $118,28 \text{ m}^3/\text{s}$; la precipitación es igual a 11 m^3 , la pérdida total es de 9 m^3 , con una escorrentía igual a 14 m^3 y una descarga total a la corriente principal igual a 15 m^3 .

De la Tabla 62 se observa que el caudal pico para una tormenta con período de retorno igual 50 años y duración de 3 horas es igual a $215,66 \text{ m}^3/\text{s}$; la precipitación total estimada es de $13,19 \text{ m}^3$; las pérdidas totales por infiltración arrojaron un valor de $10,13 \text{ m}^3$; el modelo HEC-HMS asume que el exceso de lluvia que no se infiltra escurre por la cuenca a un volumen de 3 m^3 por hora y la descarga total es igual a $3,14 \text{ m}^3$.

En la Figura 44 se muestran los hidrogramas de escorrentía para directa para la subcuenca del río Pirapira, empleando las tormentas de diseño con períodos de retorno de 5, 10 y 50 años y duraciones de 3 y 6 horas, respectivamente.

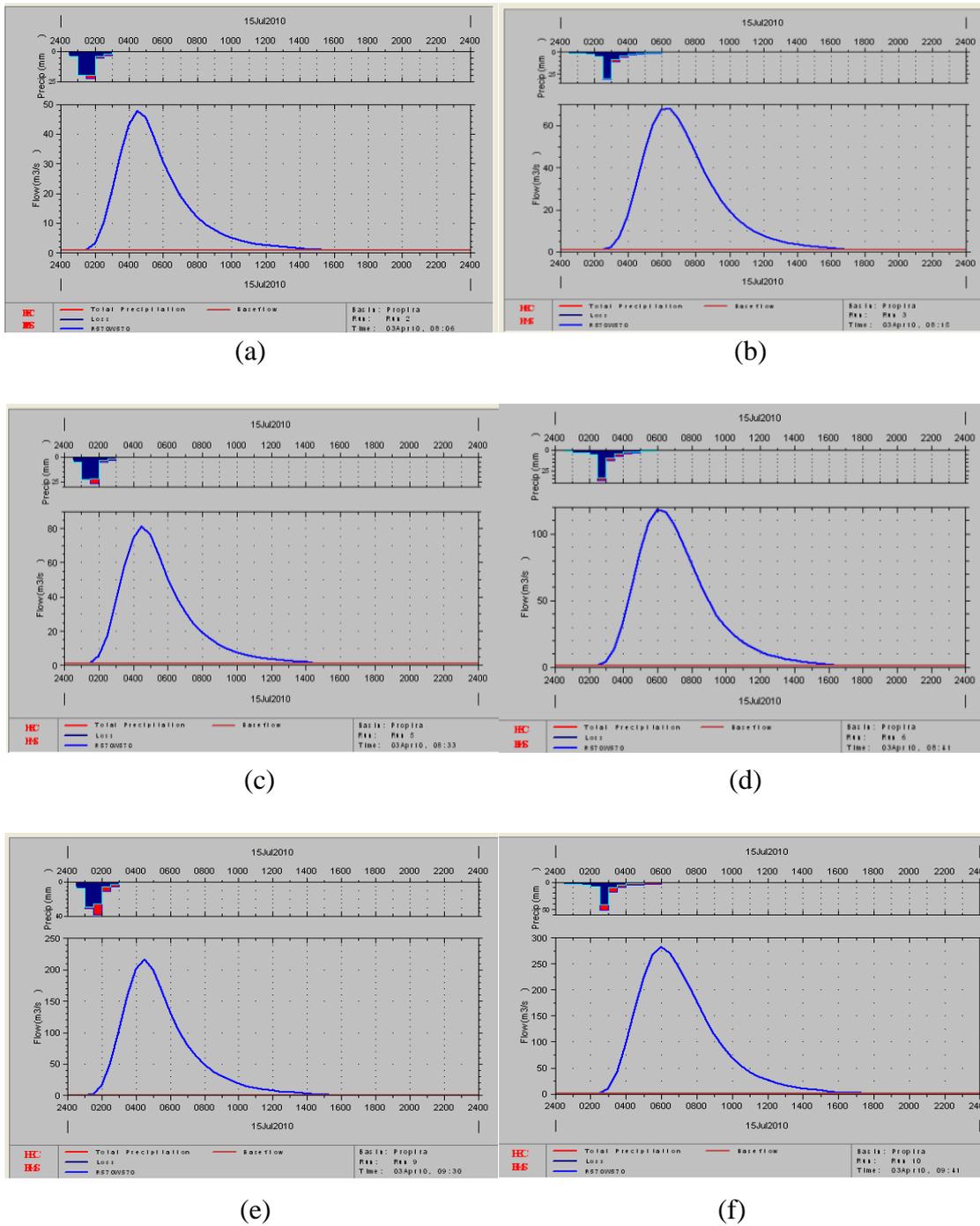


Figura 44. Hidrogramas de escorrentía en la cuenca del río Pirapira para tormentas de diseño de: (a) 5 años y 3h, (b) 5 años y 6h, (c) 10 años y 3h, (d) 10 años y 6h, (e) 50 años y 3h y (f) 50 años y 6h. Datos procesados en HEC-HMS

De la Figura 44 se observa que el tiempo de escurrimiento para una tormenta de $T_r=5$ años y $D=3h$ es de alrededor de 15 horas (900 min), el tiempo de escurrimiento para una tormenta de igual periodo de retorno y duración de 6 horas es de 17 horas (1020 min), para una tormenta de $T_r=10$ años y 3 horas de duración el tiempo de escurrimiento es de 14 horas (840 min) mientras que para una tormenta con igual T_r y 6 horas de duración el agua escurre durante 16 horas (960 min). Asimismo si la tormenta es de $T_r=50$ años y $D=3$ horas el tiempo de escurrimiento es de 15 horas mientras para el mismo período de retorno y duración de 6 horas, el escurrimiento alcanza las 17 horas.

Modelación de crecientes en la subcuenca del río Paya. En la Tabla 63 se presentan los resultados correspondientes a la modelación hidrológica del tránsito por el cauce del río Paya, observándose que para una tormenta de período de retorno igual a 5 años y 3 horas de duración se estima un caudal pico de $241,29 \text{ m}^3/\text{s}$; la precipitación total es de 7 m^3 ; la pérdida total por infiltración es de $4,35 \text{ m}^3$; la escurrimiento directa total es de $2,6 \text{ m}^3$; el flujo base total se asume, para efectos de cálculo, constante e igual a $0,08 \text{ m}^3$ y la descarga total es igual a $2,68 \text{ m}^3$; mientras que para una tormenta de igual período de retorno y duración de 6 horas el caudal pico es de $299,62 \text{ m}^3/\text{s}$; la precipitación total es de $8,46 \text{ m}^3$; la pérdida total se estima en $4,8 \text{ m}^3$; la escurrimiento directa total es de $3,6 \text{ m}^3$ y la descarga o volumen aportado al cauce principal es igual a $3,76 \text{ m}^3$.

Tabla 63. Modelación lluvia-escorrentía en la cuenca del río Paya para períodos de retorno (Tr) de 5, 10 y 50 años y duraciones (D) de 3 y 6 horas

CUENCA RÍO PAYA						
Resultados de la modelación	Tr=5 años		Tr=10 años		Tr=50 años	
	D=3h	D=6h	D=3h	D=6h	D=3h	D=6h
Caudal pico (m ³ /s)	241,29	299,62	333,38	402,51	594,99	747,36
Precipitación total (m ³)	7,01	8,46	8,34	10,03	11,84	15,11
Pérdida total (m ³)	4,35	4,80	4,76	5,12	5,44	5,85
Exceso total (m ³)	2,60	3,66	3,58	4,90	6,40	9,26
Escorrentía directa total (m ³)	2,60	3,66	3,58	4,90	6,40	9,26
Flujo base total (m ³)	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Descarga total (m ³)	2,68	3,76	3,66	5,0	6,49	9,34

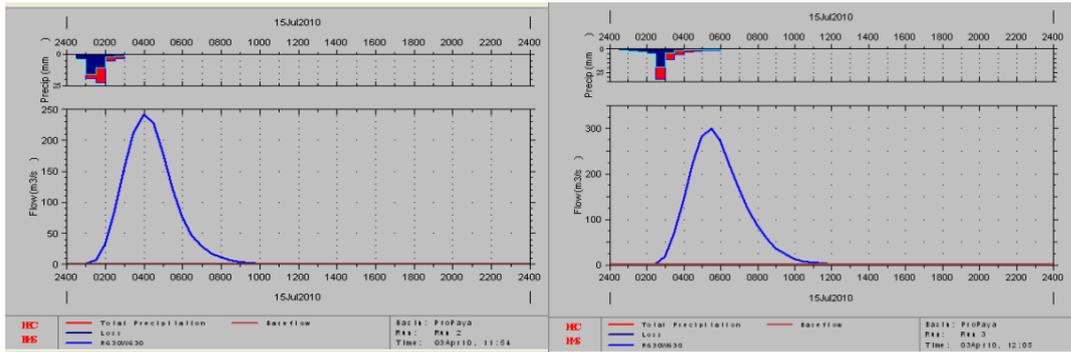
Fuente. Elaboración propia. Datos procesados en HEC-HMS

De la Tabla 63 se observa que los resultados obtenidos para la modelación lluvia-escorrentía a partir de una tormenta de diseño de Tr=10 años y 3 horas de duración en la subcuenca del río Paya son los siguientes: el caudal pico es de 333,38 m³/s; la precipitación total estimada por el modelo es de 8,34 m³, la pérdida total por infiltración es igual a 4,76 m³ el exceso de lluvia que no se infiltra en el suelo es de 3,66; la escorrentía directa es igual a 3,58 m³ y la descarga total al cauce principal es de 3,66 m³. La modelación lluvia-escorrentía para una tormenta de igual período de retorno y duración de 6 horas arrojó un caudal pico de 402,51 m³/s; la precipitación total es de 10 m³, la pérdida total por infiltración es de 5,12 m³; la escorrentía directa es de 4,9 m³ y el volumen total descargado al cauce es de 5 m³.

Respecto a la modelación lluvia-escorrentía a partir de la tormenta sintética de período de retorno igual a 50 años y duración de 3 horas se tiene que el caudal pico estimado es de alrededor de 595 m³/s; la precipitación total es de 11,8 m³; la pérdida total es igual a 5,4 m³; la escorrentía directa se estima en 6,4 m³ y la descarga total a

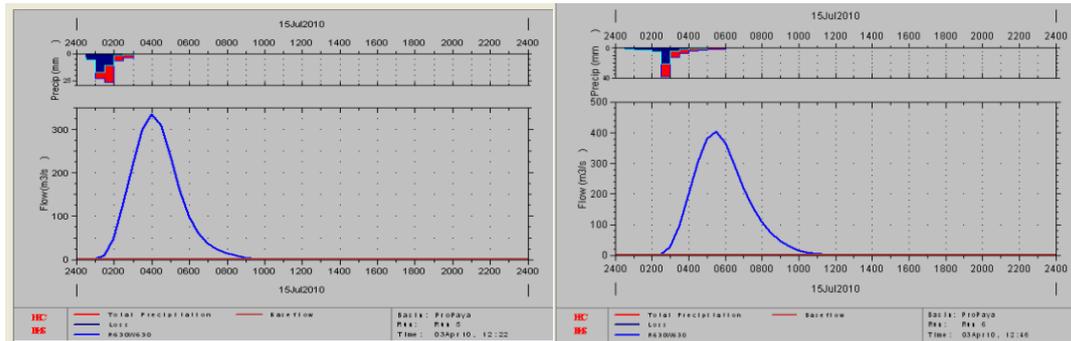
la corriente principal es igual a $6,5 \text{ m}^3$. Por otra parte, con la modelación a partir de la tormenta de igual período de retorno y duración de 6 horas, el caudal pico estimado es de $747,36 \text{ m}^3/\text{s}$; la precipitación total en la subcuenca se estima en 15 m^3 ; la pérdida total por infiltración es de $5,85 \text{ m}^3$; la escorrentía directa total es igual a $9,26 \text{ m}^3$ y la descarga total es de $9,34 \text{ m}^3$.

En la Figura 45 se presentan los hidrogramas de escorrentía para la generación de crecientes con períodos de retorno de 5, 10 y 50 años y duraciones de 3 y 6 horas; en la que se observan las siguientes duraciones de la escorrentía en la subcuenca del río Paya: para tormentas de período de retorno igual a 5 años y duraciones de 3 y 6 horas, los tiempos que tarda la lluvia tarda en escurrir son de 9 y media y 12 horas, respectivamente; para tormentas de período de retorno igual a 10 años y duraciones de 3 y 6 horas los tiempos de escurrimiento son de 9 y 11 horas, respectivamente; mientras que para tormentas con período de retorno igual a 50 años y duraciones de 3 y 6 horas, los tiempos de escurrimiento son de 9 y 13 horas, respectivamente.



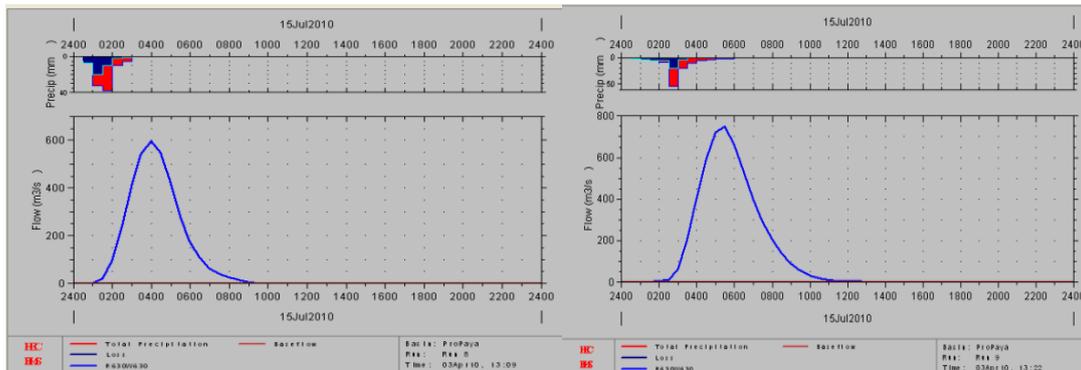
(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

(f)

Figura 45. Hidrogramas de escorrentía en la cuenca del río Paya para tormentas de diseño de: (a) 5 años y 3h, (b) 5 años y 6h, (c) 10 años y 3h, (d) 10 años y 6h, (e) 50 años y 3h y (f) 50 años y 6h. Datos procesados en HEC-HMS

Modelación de crecientes en la subcuenca del río San Pedro. En la Tabla 64 se presentan los resultados correspondientes a la modelación hidrológica de crecientes en la subcuenca del río San Pedro, para períodos de retorno de 5, 10 y 50 años y duraciones de 3 y 6 horas, respectivamente.

Tabla 64. Modelación lluvia-escorrentía en la cuenca del río San Pedro para períodos de retorno (Tr) de 5, 10 y 50 años y duraciones (D) de 3 y 6 horas

CUENCA RÍO SAN PEDRO						
Resultados de la modelación	Tr=5 años		Tr=10 años		Tr=50 años	
	D=3h	D=6h	D=3h	D=6h	D=3h	D=6h
Caudal pico (m ³ /s)	136,64	198,88	215,31	271,67	454,34	579,47
Precipitación total (m ³)	14,53	18,23	17,66	21,08	25,64	31,91
Pérdida total (m ³)	11,62	13,28	13,05	14,36	15,81	17,38
Exceso total (m ³)	2,91	4,96	4,62	6,72	9,83	14,53
Escorrentía directa total (m ³)	2,91	4,96	4,62	6,72	9,83	14,53
Flujo base total (m ³)	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
Descarga total (m ³)	3,02	5,04	4,70	6,81	9,97	14,64

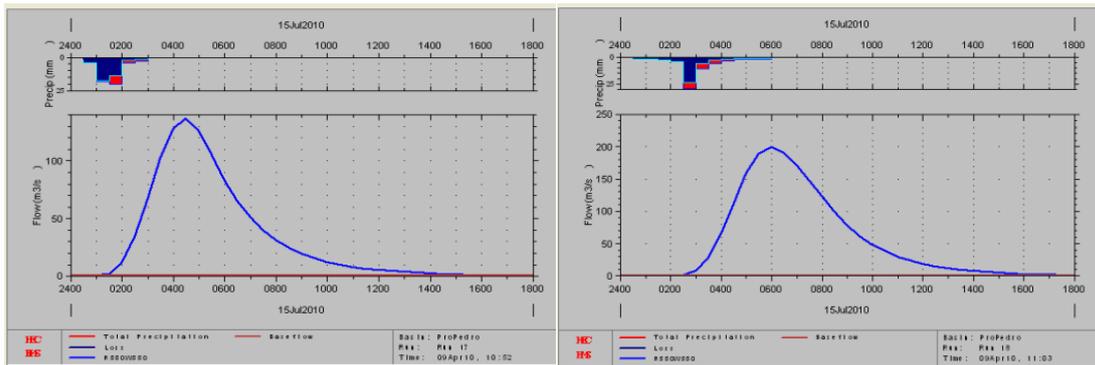
Fuente. Elaboración propia. Datos procesados en HEC-HMS

De la Tabla 64 se observa que la modelación lluvia-escorrentía a partir de una tormenta con período de retorno igual a 5 años y 3 horas de duración arroja un caudal pico de 136,64 m³/s; la precipitación total estimada es de 14,5 m³; la pérdida total es de 11,6 m³; el flujo base empleado en todas las corridas del modelo para la subcuenca del río San Pedro es de 0,09 m³ y la descarga total a la corriente principal es de 3 m³. Por su parte, para una tormenta de igual período de retorno y 6 horas de duración, el caudal pico es de alrededor de 199 m³/s; la precipitación total es de 18,2 m³; la pérdida total por infiltración es de 13,98 m³; la escorrentía directa total es de 4,96 m³ y la descarga total es igual a 5 m³.

La modelación hidrológica de crecientes para una tormenta con período de retorno igual a 10 años y duración de 3 horas estima un caudal pico en la subcuenca del río San Pedro en 215,31 m³/s; la precipitación total es de 17,66 m³; las pérdidas totales por infiltración se estiman en 13 m³ con una escorrentía total de 4,62 m³ y un volumen total descargado al cauce principal igual a 4,7 m³. Asimismo, para una tormenta de igual período de retorno y duración igual a 6 horas se obtiene un caudal pico de 271,67 m³/s; una precipitación total de 21 m³, una pérdida total por infiltración de 14,36 m³, la escorrentía directa total es de 6,72 m³ y un volumen total descargado al cauce principal igual a 6,81 m³.

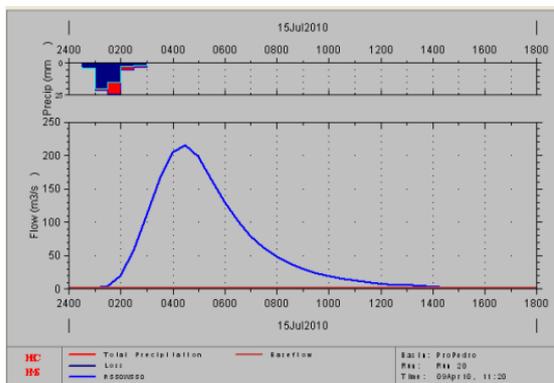
Para una tormenta de período de retorno igual a 50 años y duración de 3 horas el caudal pico estimado es de 454,34 m³/s; la precipitación total es de 25,64 m³; la pérdida total es de 15,81 m³; la escorrentía directa total es de 9,83 m³ y el volumen total de descarga es de 9,97 m³. Por su parte, para una tormenta de igual período de retorno y duración de 6 horas, el caudal estimado es de 579,47 m³/s; la precipitación total es igual a 31,91 m³; las pérdidas totales por infiltración es de 17,38 m³; la escorrentía directa es de 14,53 m³ y el volumen total de agua descargado al cauce principal es de 14,64 m³.

En la Figura 46 se muestran los hidrogramas de escorrentía para la modelación de las crecientes en la subcuenca del río San Pedro a partir de tormentas de diseño con períodos de retorno de 5, 10 y 50 años y duraciones de 3 y 6 horas.

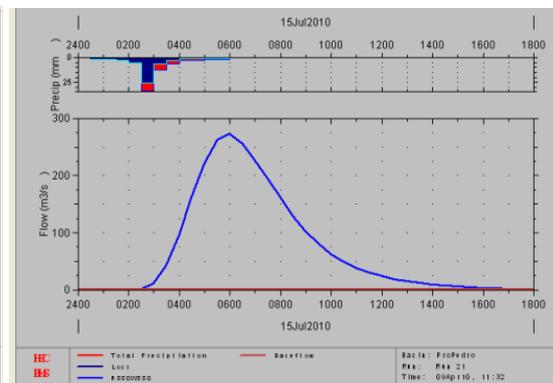


(a)

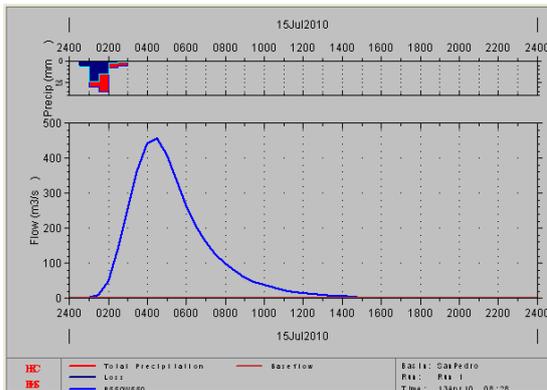
(b)



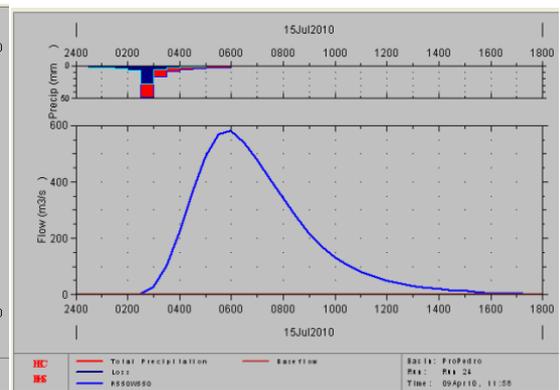
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 46. Hidrogramas de escorrentía en la cuenca del río San Pedro para tormentas de diseño de: (a) 5 años y 3h, (b) 5 años y 6h, (c) 10 años y 3h, (d) 10 años y 6h, (e) 50 años y 3h y (f) 50 años y 6h. Datos procesados en HEC-HMS

De la Figura 46 se observa que el tiempo de escorrentía para el modelo de creciente a partir de una tormenta de período de retorno igual a 5 años y 3 horas de duración es de 15 horas (900 min), para una tormenta con igual período de retorno y duración de 6 horas el tiempo de escurrimiento de la cuenca es de 17 horas (1.020 min), si la tormenta es de período de retorno igual a 10 años con una duración de 3 horas el tiempo de escorrentía es de alrededor de 14 horas (840 min), para una tormenta de igual período de retorno y duración de 6 horas el tiempo de escurrimiento es de 17 horas. Asimismo, si la tormenta tiene una duración de 3 horas para un período de retorno de 50 años, el tiempo que tarda la lluvia en escurrir alcanza las 15 horas y si la tormenta dura 6 horas permaneciendo igual el período de retorno, entonces el tiempo de escurrimiento se aproxima a las 17 horas.

Caudales máximos de crecientes en el subsistema cuenca río Pao. En la Tabla 65 se comparan los caudales pico resultantes de la modelación lluvia-escorrentía con el programa HEC-HMS para cada una de las subcuencas, con períodos de retorno de 5, 10 y 50 años y duraciones de 3 y 6 horas, respectivamente.

De la Tabla 65 se observa que las mayores crecientes generadas con el modelo lluvia-escorrentía a partir de las tormentas sintéticas, provienen de la subcuenca del río Paya. Se usaron tormentas sintéticas o de diseño. Esto puede ser explicado con base en las características físicas de la subcuenca ya que aun cuando es la menos extensa-tiene alrededor de 120 Km²-su forma es la menos irregular, posee la segunda mayor pendiente con 12,2 m, sólo superada por la pendiente de la cuenca del río San Pedro con 13,4 m; la cuenca tiene la mayor pendiente entre puntos extremos, alrededor de 0,029 m; lo que indica que posee los mayores desniveles de terreno y la densidad de drenaje aun cuando es pobre (alrededor de 0,114 Km/Km²) resulta superior a las del resto de las áreas de estudio con excepción de la cuenca del río Paito,

cuya densidad de drenaje es de 0,158 Km/Km²; asimismo, la corriente principal es de orden 2 y la pendiente entre puntos extremos del cauce principal es la mas baja, con 0,0038 m.

Tabla 65. Caudales máximos de creciente en el subsistema cuenca río Pao

Subcuenca	Duración (h)	Caudal Máximo(en millones de m ³ /s)		
		Período de Retorno (años)		
		5 años	10 años	50 años
Chirgua	3	77,873	152,26	398,03
	6	163,30	246,76	634,30
Paito	3	150,38	254,64	450,40
	6	254,05	401,05	1012,9
Pirapira	3	47,646	81,023	215,66
	6	67,896	118,28	281,91
Paya	3	241,29	333,38	594,99
	6	299,62	402,51	747,36
San Pedro	3	136,64	215,31	454,34
	6	198,88	271,67	579,47

Fuente. Elaboración propia

La subcuenca del río Paito constituye la segunda cuenca en registrar elevados caudales máximos; ante un evento de crecientes generadas a partir de una tormenta de diseño con período de retorno igual a 50 años y duración de 6 horas, el modelo estima que se alcanzaría un caudal máximo de 1.013 m³/s; lo que podría ser atribuido, tal como en el caso de la cuenca del río Paya, a las características físicas de la cuenca y su red de drenaje. La cuenca del río Paito es la mas grande en extensión con aproximadamente un área de 2.578,5 Km²; con una pendiente de alrededor de 8 m la cual es inferior a la de las cuencas de los ríos San Pedro, Paya y Pirapira; asimismo la pendiente entre puntos extremos es la mas baja: 0,007 m; su forma es más irregular(Kc igual a 1,93) que las cuencas de los ríos Paya y San Pedro pero menos que las cuencas de los ríos Chirgua y San Pedro; posee la mayor densidad de drenaje de 0,158 Km/Km².

Aun cuando la subcuenca del río Paito arroja caudales máximos considerablemente más elevados que aquellos generados por el resto de las áreas de estudio, posee un

factor de forma K_f igual a 0,94; lo que indica que, con respecto al resto de las zonas de estudio, es la cuenca más susceptible a la ocurrencia de eventos de crecientes. Aunado a ello, posee la mayor red de drenaje de las áreas de estudio, con un caudal principal de 3º orden, donde la pendiente entre puntos extremos a lo largo del cauce principal es de 0,928 m.

De la Tabla 65 se observa que la subcuenca del río Pirapira es la que genera los menores caudales máximos de creciente respecto a las otras cuatro zonas de estudio. De acuerdo a las características físicas de la cuenca y de la red de drenaje de la misma obtenidas con HEC-GeoHMS, se observa que abarca una extensión de aproximadamente 136 Km²; la pendiente de la subcuenca es de 8,37 m lo cual la sitúa como una cuenca que en términos generales es más elevada que las cuencas de los ríos Paito y Chigua y menos que San Pedro y Paya, sin embargo, entre los puntos extremos de la cuenca la pendiente es una de las más bajas con 0,016 m lo que significa que se trata de una cuenca con pocos desniveles de terreno.

El menor caudal pico que aporta la subcuenca del río Pirapira es de 47,67 m³/s para una tormenta de T_r igual a 5 años y 3 horas de duración, con una densidad de drenaje igual a 0,105 Km/Km², significando un mejor drenaje con respecto a las cuencas de los ríos Chirgua y San Pedro; asimismo, la subcuenca es una de las menos irregulares pues tiene un K_c de 1,84 mientras que el factor de forma K_f de la cuenca es de 0,66; tratándose de una cuenca más susceptible a la ocurrencia de eventos de crecidas que las cuencas de los ríos Paya, San Pedro y Chirgua. En cuanto a la red de drenaje, el cauce principal de la subcuenca del río Pirapira es de 3º orden, con una pendiente entre puntos extremos del cauce de alrededor de 0,0079 m; la cual es más baja que la de los ríos Paito, San Pedro y Chirgua.

Modelación Determinística del Subsistema Embalse Pao-Cachinche

En la Tabla 66 se muestran los caudales máximos para cada una de las subcuencas afluentes al embalse (subsistema cuenca del río Pao), resultantes de la aplicación del modelo determinístico para realizar el tránsito de crecientes en el embalse, con base en las tormentas de diseño estimadas para períodos de retorno de 5, 10 y 50 años y duraciones de 3 y 6 horas.

Asimismo, se observa que los mayores gastos de salida obtenidos corresponden a la cuenca del río Paito donde el caudal máximo alcanzado es igual a $697,78 \text{ m}^3/\text{s}$; correspondiente a una tormenta de período de retorno igual a 50 años y 3 horas de duración (ver Tabla 66); cabe destacar que dicho caudal no supera la capacidad máxima de descarga para la cual fue diseñado el aliviadero del embalse: $760 \text{ m}^3/\text{s}$. El aporte simultáneo de los afluentes para tormentas de 3 y 6 horas se muestra en las Tablas 68 y 69, respectivamente. Cabe destacar que la modelación de las crecientes en las subcuencas de los ríos Paya y San Pedro aportarían al embalse, de acuerdo a los resultados obtenidos, caudales de entrada de considerable magnitud, siendo incluso superiores a los gastos máximos de salida generados en las cuencas de los ríos Chirgua y Pirapira, éste último aporta los menores gastos de entrada al embalse.

Tabla 66. Caudales máximos de salida del embalse vs caudal máximo de diseño del aliviadero del embalse

Río	Tr(años)	D(h)	Caudal Máximo de salida (m ³ /s)	Caudal Máximo de diseño (m ³ /s)	
Chirgua	5	3	81,01	760	
	10	3	175,79		
	50	3	291,40		
			<i>Total</i>		548,20
	5	6	170,49		
	10	6	291,40		
Paito	50	6	294,11	760	
			<i>Total</i>		756,00
	5	3	63,83		
	10	3	153,04		
	50	3	697,78		
			<i>Total</i>		914,65
Pirapira	5	6	172,41	760	
	10	6	267,45		
	50	6	675,06		
			<i>Total</i>		1.114,92
	5	3	37,78		
	10	3	83,93		
Paya	50	3	87,93	760	
			<i>Total</i>		209,64
	5	6	41,98		
	10	6	53,96		
	50	6	172,41		
			<i>Total</i>		268,35
San Pedro	5	3	114,73	760	
	10	3	143,81		
	50	3	151,06		
			<i>Total</i>		409,6
	5	6	188,01		
	10	6	256,18		
Chirgua	50	6	337,87	760	
			<i>Total</i>		782,06
	5	3	76,76		
	10	3	112,06		
	50	3	111,04		
			<i>Total</i>		299,86
Chirgua	5	6	147,38	760	
	10	6	218,75		
	50	6	301,64		
			<i>Total</i>		667,77

Fuente. Elaboración propia

Los caudales máximos de salida para la cuenca del río Chirgua son los siguientes: 81,01 m³/s para una tormenta de Tr=5 años y D=3h; 170,49 m³/s para una tormenta de Tr=5 años y D=6h; 175,79 m³/s para una tormenta de Tr=10 años y D=3h; 291,4 m³/s para una tormenta de Tr=10 años y D=6h; 291,4 m³/s para una tormenta de Tr=50 años y D=3h y 294,11 m³/s para una tormenta de Tr=50 años y D=6h. En el caso de la cuenca del río Paito se obtienen los siguientes caudales máximos: para una tormenta de Tr=5 años y D=3 h el caudal máximo es 63,83 m³/s; para una tormenta de Tr=5 años y D=6h el caudal máximo es 172,41 m³/s; si la tormenta es de Tr=10 años y D=3 h el caudal máximo es de 153,04 m³/s; con una tormenta de Tr=10 años y D=6h el caudal máximo es de 267,4 m³/s, para una tormenta de Tr=50 años y D=3h el caudal máximo es de 697,78 m³/s y para una tormenta de Tr=50 años y D=6h el caudal máximo es de 675,06 m³/s.

Por su parte, se encontraron los siguientes resultados para la cuenca del río Pirapira: para tormentas de 3 horas de duración y períodos de retorno de 5, 10 y 50 años, los caudales máximos de salida son, respectivamente: 37,78 m³/s; 83,93 m³/s y 87,93 m³/s; mientras que si las tormentas son de igual período de retorno y duración de 6 horas, los caudales máximos de salida son: 41,98 m³/s; 53,96 m³/s y 172,41 m³/s.

Los caudales máximos de salida obtenidos para la cuenca del río Paya, de acuerdo a la frecuencia y duración de la tormenta, son los siguientes: para tormentas de períodos de retorno de 5, 10 y 50 años y duración de 3 horas son, respectivamente 114,73 m³/s; 151,06 m³/s y 256,18 m³/s; si solo cambia la duración a 6 horas los caudales máximos de descargas son de 143,81 m³/s; 188,01 m³/s y 337,87 m³/s. En cuanto a la cuenca del río San Pedro, los caudales máximos de salida tormentas de Tr=5, 10 y 50 años y D=3 y 6 horas, respectivamente, son: 76,76 m³/s; 111,04 m³/s y 218,75 m³/s; mientras

que si la duración de las tormentas es de 6 horas, los caudales máximos de salida de la cuenca son: 112,06 m³/s; 147,38 m³/s y 301,64 m³/s; respectivamente.

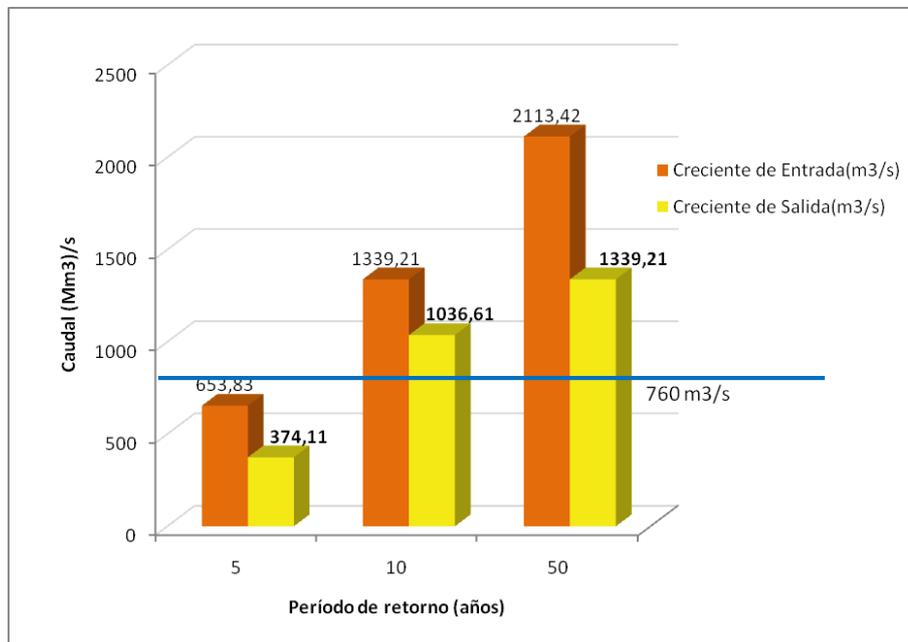
En general y de acuerdo a los resultados obtenidos con el modelo determinístico, se observa que aun para la condición de embalse lleno-tal como sucede en el presente-ninguna de las cuencas afluentes al embalse Pao-Cachinche pone en riesgo la estructura de la presa, y por ende de los asentamientos humanos próximos al embalse; ya que todos los caudales máximos resultantes son inferiores al caudal máximo del aliviadero. De acuerdo a la serie de tiempo del aporte-extracción al embalse (ver Gráfica 5), el caudal máximo de entrada durante el período 1983-2009 se registra en junio de 1998, el mismo fue de 335 m³/s (29 millones de m³/día), lo que representa el 44 por ciento del caudal máximo de descarga por el aliviadero.

Ante un evento de aporte simultáneo de los ríos afluentes al embalse, para una tormenta de 3 horas de duración, se observa que sólo las crecientes de entrada y salida para un período de retorno de 5 años no exceden la capacidad máxima del aliviadero del embalse, tal como se observa en la Tabla 67, ya que el caudal de entrada estimado es de 653 m³/s y el caudal salida es de 374 m³/s frente a un caudal de diseño del aliviadero de 760 m³/s (ver Gráfica 58).

Tabla 67. Aporte simultáneo de los afluentes al embalse Pao-Cachinche, para una tormenta de 3 horas y períodos de retorno de 5, 10 y 50 años

T_r (años)	Creciente de entrada (m^3/s)	Creciente de salida (m^3/s)	Caudal Máximo de diseño del aliviadero (m^3/s)
5	653,83	374,11	
10	1339,21	1036,61	760
50	2113,42	1339,21	

Fuente. Elaboración propia



Gráfica 58. Crecientes de entrada vs crecientes de salida para el aporte simultáneo de los afluentes al embalse Pao-Cachinche, para una tormenta de 3 horas. Fuente: Elaboración propia

De la Tabla 68 se observa que ante un evento de aporte simultáneo de crecidas provenientes de los ríos afluentes al embalse, para una tormenta de 6 horas de duración, solo el caudal de salida del embalse para un período de retorno de 5 años, de aproximadamente 374 m^3/s , no supera el caudal máximo del aliviadero (760 m^3/s),

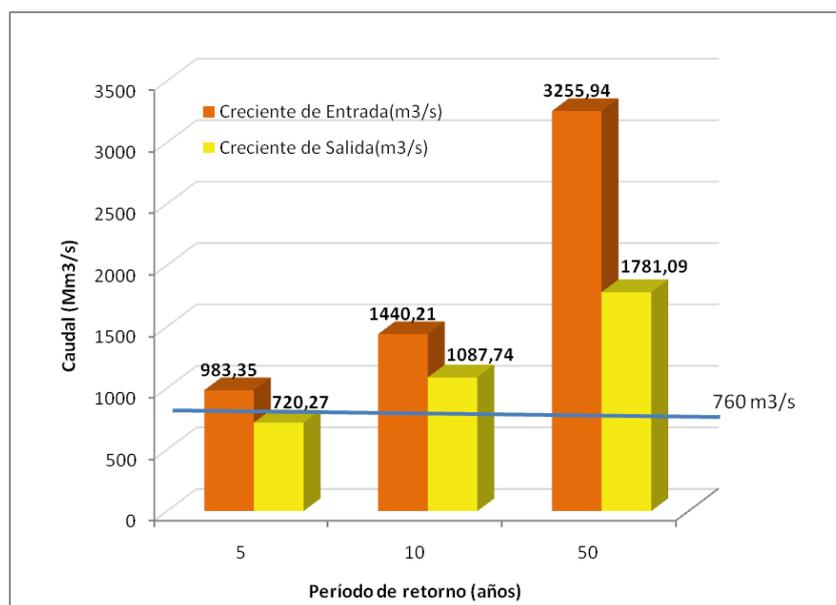
aun cuando el caudal de entrada para dicho período de retorno es de 983 m³/s. Para períodos de retorno de 10 y 50 años, el aporte simultáneo de los afluentes para una tormenta de 6 horas rebasaría la capacidad del aliviadero y en el caso de una tormenta de Tr= 50 años y 6 horas de duración, el caudal de creciente estimado excedería en más del 50 por ciento la descarga del aliviadero (ver Gráfica 59), lo que pondría en riesgo la estructura del mismo en.

Tabla 68. Aporte simultáneo de los afluentes al embalse Pao-Cachinche, para una tormenta de 6 horas y períodos de retorno de 5, 10 y 50 años

T_r (años)	Creciente de entrada (m³/s)	Creciente de salida (m³/s)	Caudal Máximo de diseño del aliviadero (m³/s)
5	983,83	374,11	
10	1339,21	1036,61	760
50	2113,42	1339,21	

Fuente. Elaboración propia

De la Tabla 69 se observa que los para una tormenta de 3 horas y períodos de retorno de 5, 10 y 50 años, respectivamente, los volúmenes totales descargados al embalse por el aporte simultaneo de los afluentes, no exceden el volumen útil del embalse; así se tiene que para una tormenta de T_r= 5 años y D=3h el volumen total descargado al embalse es de 18.000.000 m³, para una tormenta de T_r= 10 años y 3h el volumen total es de 29.000.000 m³ y para una tormenta con T_r= 50 años y 3h el volumen total descargado es de 57.000.000 m³ frente a una capacidad útil de 150.000.000 m³. Mientras que para una tormenta de 6 horas e iguales períodos de retorno, el máximo volumen descargado corresponde a una tormenta de T_r= 50 años y duración de 6h es de 108.000.000 m³ frente a un volumen útil de 150.000.000 m³ (ver Gráfica 60).

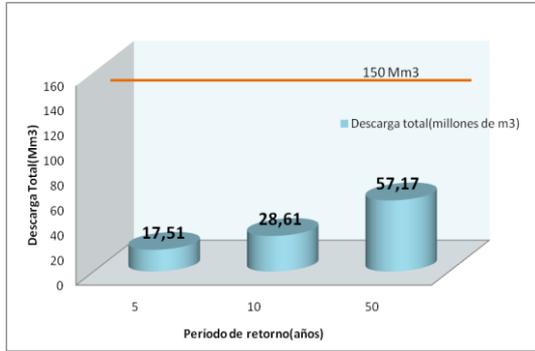


Gráfica 59. Crecientes de entrada vs crecientes de salida para el aporte simultáneo de los afluentes al embalse Pao-Cachinche, para una tormenta de 6 horas. Elaboración propia

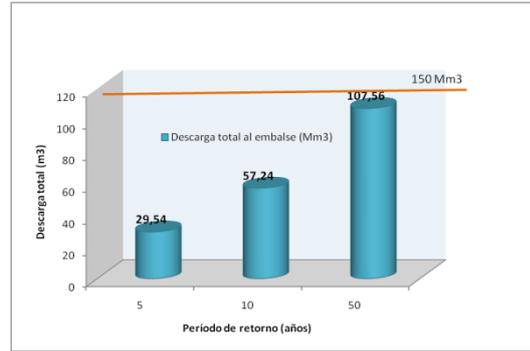
Tabla 69. Volumen total descargado al embalse por el aporte simultáneo de los afluentes para tormentas de 3 y 6 horas

T_r (años)	Duración (h)	Descarga total (Mm ³)	Volumen útil del embalse (Mm ³)
5	3	17,81	150
	6	29,54	
10	3	28,51	
	6	57,24	
50	3	57,17	
	6	107,56	

Fuente. Elaboración propia



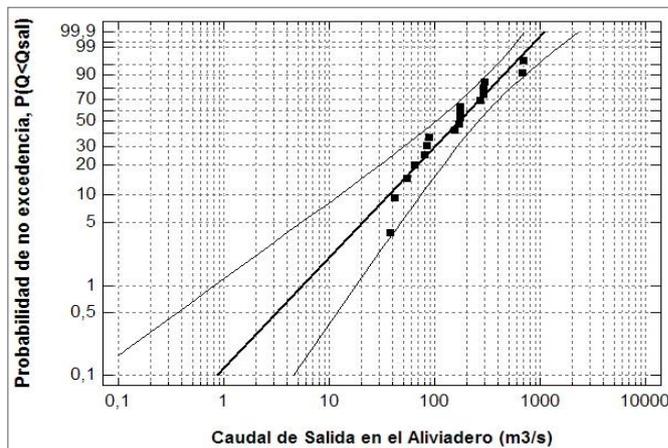
(a)



(b)

Gráfica 60. Descarga total al embalse por el aporte simultáneo de los afluentes al embalse Pao-Cachinche para tormentas de: (a) 3 h y (b) 6 h. Elaboración propia

En la Gráfica 61 se muestra el ajuste a la distribución de Weibull de los gastos máximos de salida del embalse; donde se observa que los caudales pico correspondientes a las tormentas con período de retorno T_r igual a 50 años y una probabilidad de excedencia de dos por ciento, no superan la capacidad máxima del aliviadero del embalse.



Gráfica 61. Distribución de Weibull para caudales máximos de salida en el aliviadero del embalse Pao-Cachinche. Elaboración propia

Simulación de Eventos de Crecida con HEC-ResSim

La aplicación del programa HEC-ResSim para representar la operación de crecidas en el embalse Pao-Cachinche arrojó resultados sobredimensionados, tal como se presenta en la Figura 47, la cual muestra la curva de los caudales de entrada y salida del embalse, denominada *Flow*, versus la curva de almacenamiento, denominada *Stor* (abreviatura de Storage); para una corrida que simula la descarga del embalse; cuya ventana de tiempo abarca la fijación de una condición inicial (lookback) el 08-09-2009, con fecha de inicio el 10-09-2009 y fecha de finalización el 13-09-2009; el tiempo de simulación es representado mediante una línea negra punteada.

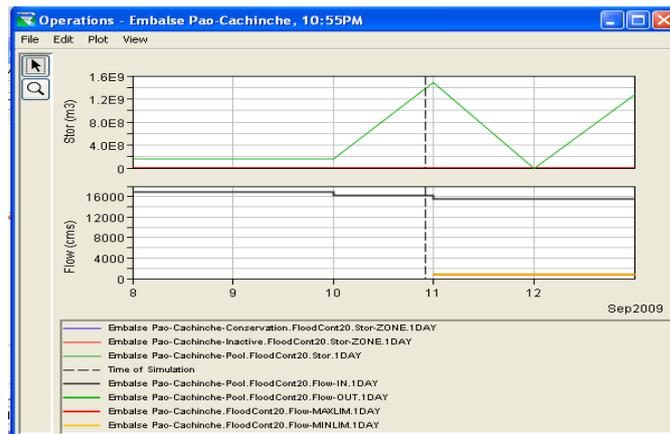


Figura 47. Resultados operacionales en el embalse. Tomado del HEC-ResSim

Tal como se observa en la Figura 47, el programa representa gráficamente y de forma simultánea, el comportamiento del volumen almacenado en el estanque del embalse frente a las variaciones en los flujos de entrada y salida del mismo, todas en unidades del SI. La línea gris representa el flujo de entrada al estanque del embalse manteniéndose invariable durante los dos primeros días de la simulación, obteniéndose un caudal de alrededor de $18.000 \text{ m}^3/\text{s}$ frente a $12 \text{ m}^3/\text{s}$ que corresponde

al valor registrado en el balance hídrico del embalse para esa fecha. La línea amarilla representa el flujo mínimo en la zona de control de crecidas (*Flood Control*), que corresponde a aproximadamente 1.000 m³/s (86,4 millones de m³/día) frente a 925 m³/s (alrededor de 80.000.000 m³/día).

Por su parte, a medida que disminuye el flujo en el embalse, entre los días 10 y 11, aumenta el volumen almacenado, lo cual es cónsono con la realidad; sin embargo, el volumen máximo almacenado en el estanque del embalse, alcanzado el día 11 es de alrededor de 1.500 millones de metros cúbicos; sin embargo, el volumen máximo de almacenamiento para el cual fue diseñado el embalse es 180 millones de metros cúbicos, por lo que el volumen simulado es casi ocho veces mayor que el volumen real registrado.

En la Figura 48 se presenta la gráfica correspondiente a la descarga en el embalse, la cual forma parte de la corrida de simulación previamente establecida, donde se observa que los caudales máximos de alivio y la caudal total de salida alcanzan máximos de 32.000 m³/s y 42.000 m³/s; respectivamente, que resultan sobredimensionados si se comparan con el caudal de diseño máximo del aliviadero en el embalse: 760 m³/s y 7 m³/s, que representa la descarga máxima de agua hacia la Planta Potabilizadora Alejo Zuloaga.

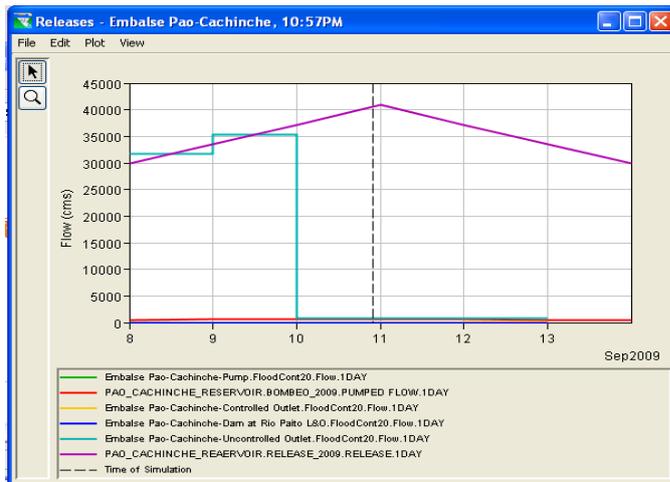


Figura 48. Descarga del embalse. Tomada del HEC-ResSim

En general, para ejecutar las corridas de simulación con HEC-ResSim se requiere contar con un conjunto de variables físicas y operacionales del embalse, muchas de las cuales no se llevan en los registros diarios e incluso nunca se han determinado in situ, tal es el caso de la infiltración en el estanque, las fugas en la presa, las curvas de calibración de elevación de la cresta de agua versus altura o fecha, entre otras.

Establecimiento del Modelo Óptimo de Operación del Embalse Pao-Cachinche

De acuerdo al estudio del balance hídrico del subsistema embalse Pao-Cachinche se observa que durante el período de estudio, comprendido entre 1983 a 2009, la tendencia del aporte neto de agua al embalse es cíclica e irregular por la incidencia de los períodos seco y lluvioso; donde el caudal promedio de aporte neto presenta poca variabilidad entre los meses de enero a junio, que corresponde a la época seca; y a partir del segundo semestre del año dicho caudal se incrementa con la llegada de las lluvias, evento que coincide con el período de alivio del embalse; alcanzándose históricamente los caudales máximos de entrada al mismo entre los meses de agosto a septiembre.

Asimismo, del análisis de los registros históricos en el embalse durante el período de estudio, se observa que durante la época seca las extracciones de agua superan a los volúmenes de entrada y durante la época lluviosa la tendencia se revierte, lo que en esencia constituye la dinámica de un embalse. Durante el período 1983 a 2003 el balance hídrico en el mismo fue de ganancia o positivo ya que el aporte neto fue superior al caudal de extracción, en un rango que varía de alrededor de 6 a 70 por ciento, sin embargo; a partir de 2004 el balance hídrico en el embalse ha sido de pérdida o negativo, debido a la condición de alivio permanente del embalse aunado a la ocurrencia de marcados períodos de sequía.

Con base al análisis de los balances hídricos mensuales durante un período de estudio de 26 de operación y a las reglas de operación que de los mismos se desprenden, se evidencia que el embalse es manejado apropiadamente; con el propósito de generar un aporte con base científica-técnica para mejorar la operación del mismo, se establece una metodología para modelar la operación óptima del

embalse mediante la aplicación de modelos de sistemas, de pronóstico y de inteligencia artificial, la cual se presenta a continuación:

Aplicación de las Técnicas de Modelado para la Operación del Embalse

Modelación de las Entradas y Salidas del Embalse

Comprende la calibración, validación y pronóstico de la serie de tiempo correspondiente a las entradas o las salidas del embalse, mediante la aplicación del modelo estocástico ARIMA (satisfactorio para pronosticar) o del modelo de red neuronal artificial: RNA, (satisfactorio para calibrar, validar y pronosticar); la selección del modelo a usar dependerá de si los datos de alimentación del programa son diarios o mensuales. Asimismo, el modelo ARIMA emplea la herramienta estadística Statgraphics y el modelo RNA aplica la herramienta MATLAB®; en la Figura 49 se muestra un esquema de mismo:

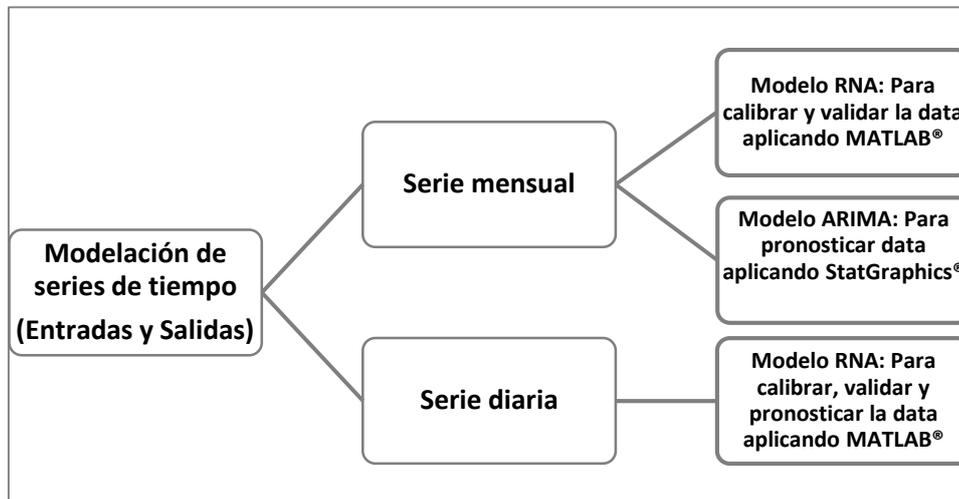


Figura 49. Esquema de modelación de las series de tiempo para el embalse Pao-Cachinche. Elaboración propia

Modelación de Eventos de Crecidas

Comprende la modelación del proceso lluvia-escorrentía para generar los caudales máximos de salida aportados por los afluentes al embalse (Tránsito por el cauce), mediante la aplicación de los modelos HEC; así como el tránsito por el embalse para generar los caudales máximos de salida por el aliviadero, mediante la aplicación del modelo propuesto por Guevara (2004). En la Figura 50 se muestra el esquema propuesto para la modelación de crecientes en el embalse:

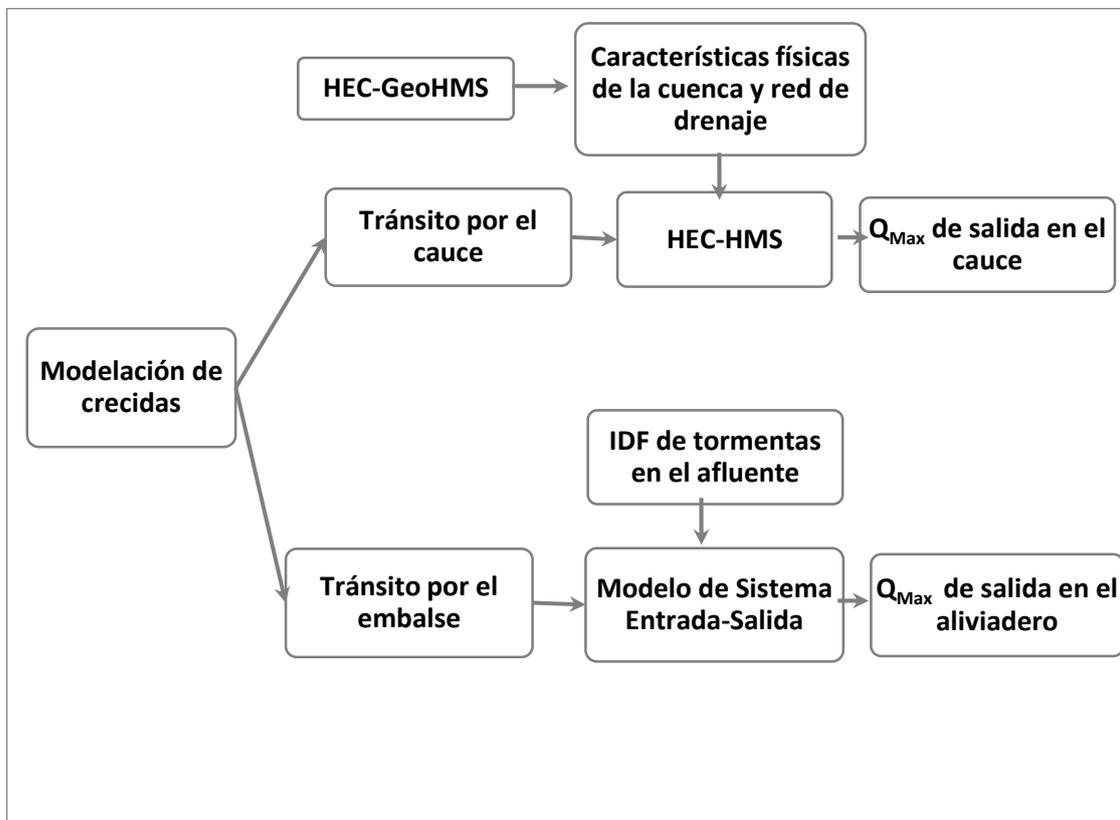


Figura 50. Esquema de modelación de eventos de crecida en el embalse Pao-Cachinche. Elaboración propia

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- ✓ El modelo HEC-GeoHMS resulta una herramienta útil para el procesamiento digital de las características morfológicas e hidrográficas de las subcuencas afluentes al embalse Pao-Cachinche.
- ✓ La subcuenca del río Paito ocupa la mayor extensión entre las cuencas afluentes al embalse, con un área de 2.579 Km², tiene la mejor drenaje ($Dd=0,2$ Km/Km²) y su forma es la menos irregular ($K_f=0,94$).
- ✓ La subcuenca del río Paya ocupa la menor extensión entre las cuencas afluentes al embalse, con un área de 120,84 Km² y es la menos susceptible a la ocurrencia de eventos de crecidas ($K_c=1,81$).
- ✓ La subcuenca del río Chirgua posee la forma más irregular entre las cuencas afluentes al embalse ($K_f=0,35$) y el drenaje más pobre ($Dd=0,087$).
- ✓ La subcuenca del río San Pedro es la más susceptible a la ocurrencia de eventos de crecidas ($K_c=2$) y tiene la mayor pendiente entre las cuencas afluentes al embalse, con 13,42 m.

- ✓ La tendencia de larga duración de los registros históricos del aporte y la extracción durante el período 1983-2003 es cíclica e irregular, por la ocurrencia de las estaciones seca y lluviosa; con una tendencia decreciente del 30 por ciento. Con el desvío del Río Cabriales en 1999 y el trasvase del Lago de Valencia en 2004; la tendencia muestra una tasa de crecimiento del 17 por ciento.
- ✓ Desde 2005 el embalse Pao-Cachinche opera a capacidad, mostrando una condición de alivio permanente, aun en época de sequía, por el aumento de los volúmenes de entrada.
- ✓ El caudal de extracción por bombeo entre 1983-2003 mantuvo una tendencia lineal (1.020 LPS al día) y con el trasvase del Lago de Valencia en 2004, el mismo creció 80 por ciento.
- ✓ A partir de 2005 el caudal de extracción de agua por bombeo en el embalse muestra una gradual tendencia hacia el aumento, con un incremento de aproximadamente cinco (5) por ciento anual, por el trasvase del Lago de Valencia. Si se mantiene esta tendencia podría disminuir el volumen útil del embalse y comprometer el suministro de agua.
- ✓ El gasto ecológico muestra una tendencia lineal entre 1983-2003. Con el trasvase del Lago de Valencia en 2004, aumenta un 25 por ciento el caudal descargado al cauce del río Pao. Si se mantiene esta tendencia podría significar, a largo plazo, una alteración del ecosistema de río Pao.
- ✓ Durante el período 1983-2009 el espejo de agua del embalse disminuyó alrededor del 25 por ciento, por la reducción del aporte en un 30 por ciento y de la lluvia registrada en el embalse, en alrededor del cuatro por ciento.

- ✓ El máximo caudal de salida del embalse corresponde al aporte de la cuenca del río Paito, con 697 m³/s, para una tormenta de 3h y período de retorno de 50 años, el cual no supera la capacidad máxima de descarga del aliviadero: 760 m³/s.
- ✓ Los modelos de red neuronal artificial (RNA) se ajustan satisfactoriamente a los aportes netos al embalse Pao-Cachinche y superan a los modelos de pronóstico ARIMA.
- ✓ El modelo HEC-HMS es una herramienta útil para modelar el proceso lluvia-escorrentía en las subcuencas afluentes al embalse Pao-Cachinche.
- ✓ Los caudales máximos de crecientes con período de retorno de 50 años y probabilidad de excedencia de dos (2) por ciento, no superan la capacidad de alivio del embalse.
- ✓ La simulación de eventos de crecidas en el embalse Pao-Cachinche mediante la aplicación del programa HEC-ResSim no arrojó resultados satisfactorios, pues no permitió validar las entradas y salidas del embalse; por lo que no se recomienda su aplicación si se dispone de una limitada base de datos de las características físicas y operaciones de la presa y el estanque del embalse.
- ✓ El balance hídrico del embalse Pao-Cachinche muestra un punto de inflexión en 2004, por el transvase del Lago de Valencia; lo que significó un aumento del aporte al mismo del orden de 1x10¹⁰ millones de metros cúbicos sólo en ese año.
- ✓ El análisis de los balances hídricos demuestra que el embalse Pao-Cachinche es adecuadamente manejado durante el período 1983-2009. Si se mantiene la

condición actual de alivio permanente del embalse por el aumento del aporte hídrico (superior al 20%), significará la reducción de la vida útil del embalse y la alteración del ecosistema acuático del mismo.

- ✓ Se recomienda realizar mediciones in situ de variables climatológicas tales como la precipitación y la evaporación, para validar las tormentas de diseño empleadas en este estudio y ajustar los modelos aplicados a la operación de embalse.
- ✓ Se recomienda modelar otros escenarios de aporte simultáneo de las subcuencas afluentes al embalse Pao-Cachinche.
- ✓ Se recomienda utilizar tormentas de diseño con períodos de retorno y duración inferiores a las estudiadas para modelar la operación de crecientes en las subcuencas afluentes al embalse Pao-Cachinche.
- ✓ Para ampliar el estudio se recomienda evaluar el ajuste de los datos observados con otra técnica de inteligencia artificial, tal como la lógica difusa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARRETO, Ana Cristina** (2010). *Estimación de la producción hídrica mediante la aplicación de modelos hidrológicos en la cuenca del río Pira-Pira, subcuenca del río Pao-Estado Carabobo*. Tesis de grado no publicada, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela
- BOLINAGA, Juan José et al.** (1999). *Proyectos de Ingeniería Hidráulica Volumen I*, Fundación Polar, Caracas, Venezuela.
- CABRERA, Amadyne** (2010). *Estimación de la producción hídrica mediante la aplicación de modelos hidrológicos en la cuenca del río San Pedro, subcuenca del río Pao-Estado Carabobo*. Tesis de grado no publicada, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.
- CEPAL** (2000). *Anuario Estadístico 2008* [Datos en línea] Disponible: http://websie.eclac.cl/anuario_estadistico/anuario_2008/esp/index.asp: Autor.
- CHOW, Ven Te** (1994). *Hidráulica de canales abiertos*, Editorial McGrawHill, Colombia.
- DAIGGER, Glen T.** (Noviembre 2006). *Water Management in the 21st Century*. [Abstract]. *Water Environment Research*, 78(12), 2295.
- DEMUTH, Howard et al.** (Septiembre 2009). *Neural Network Toolbox 6 MATLAB versión 6.0.3*. USA.
- FAO** (2007). *La nueva generación de programas y proyectos de gestión de cuencas hidrográficas* (Estudio FAO: Montes N°150). [Libro en línea], Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Disponible: <http://www.fao.org/docrep/010/a0644s/a0644s00.htm>: Autor.
- GONZÁLEZ, Ernesto J. et al.** (Octubre 2004). *Fitoplacton de un embalse tropical hipereutrófico (Pao-Cachinche, Venezuela): Abundancia, Biomasa y Producción Primaria*. *Revista Interciencia* [Revista en línea]. Disponible: http://www.interciencia.org/v29_10/gonzalez.pdf.
- GUEVARA, Edilberto** (Junio 2000). *Diagnóstico de la situación ambiental del estado Carabobo*. *Revista Ingeniería UC*. 7(1), 2, 4,6-7.

GUEVARA, Edilberto (Junio 4-9, 2000). *Patrón de distribución del hietograma de las tormentas en Venezuela*. III Congreso de Investigación en la Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.

GUEVARA, E. y CARTAYA, H. (2001): *An Intensity -Duration- Frequency Model for Design Storms in Venezuela*. Proceedings of XXI American Geophysical Union Hydrology Days. Hydrology Days Publication. Colorado State University, Fort Collins, CO, USA. 85- 96.

GUEVARA, Edilberto (2002 a). *Modelo Intensidad-Duración-Frecuencia para las lluvias de diseño en la región central de Venezuela*. Revista Ingeniería UC. 9(2).

GUEVARA, Edilberto (Julio 22-26, 2002 b). *Design parameter modeling of tropical storms in Venezuela*. [Ponencia] 3rd. International Conference on Water Resources and Environment Research. Dresden, Alemania.

GUEVARA, Edilberto (Noviembre 4, 2003). *Modelo regional para la estimación de las lluvias de diseño en la región central de Venezuela*. Memorias en CD del IV Congreso de Investigación y I Congreso de Postgrado en la Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.

GUEVARA, Edilberto (2003). *Un Modelo de Área-Altura-Duración (AAD) de tormentas de Venezuela*. Revista INGENIERIA UC. 10(1). Valencia, Venezuela.

GUEVARA, Edilberto (2007). *Modelo de IDF para el diseño de obras de Conservación de Cuencas*. Congreso Internacional sobre Manejo de Recursos Naturales, Sostenibilidad a varias escalas, Cochabamba, Bolivia.

GUEVARA, E. y CARBALLO, N. (Diciembre 2008). *Modelo IDF regional para el Estado Cojedes, Venezuela*. Revista Ingeniería UC. 15(3) 53-63.

GUEVARA, E. y CARTAYA, H. (2004). *Hidrología, Una Introducción a la Ciencia Hidrológica Aplicada*. Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.

GUILLÉN, Joeli (2001). *Determinación de las prioridades de atención conservacionista según los riesgos de erosión potencial y actual en la cuenca media del río Pao, estados Carabobo y Cojedes*. Trabajo de grado no publicado, Universidad Central de Venezuela, Maracay, Aragua, Venezuela.

GUTIÉRREZ, H. y DE LA VARA, R. (2004). *Análisis de diseño de experimentos*, Editorial McGraw Hill, México.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS, HYDROLOGIC ENGINEERS CENTER (Diciembre 2003). Geospatial Hydrologic Modeling Extension (HEC-GeoHMS) versión 1.1, USA.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS, HYDROLOGIC ENGINEERS CENTER (Agosto 2009). Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) versión 3.4, USA.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS, HYDROLOGIC ENGINEERS CENTER (Abril 2007). Reservoir System Simulation (HEC-ResSim) versión 3.0, USA.

HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto et al. (2008). Metodología de la Investigación (4ª ed.). México: McGraw Hill.

HIDROCENTRO (2001). *Levantamiento batimétrico y geofísico del embalse Paocachinche en el Estado Carabobo*. Oficina Técnica Del Monte S.G.A. C.A, Valencia, Venezuela.

HIDROVEN (2006). Sistemas de Producción. [Página web en línea]. Disponible: <http://www.hidrocentro.gob.ve/hc/sispro/informacionGeneral/> [Consulta: 2009, Noviembre 21].

HIDROCENTRO (s.f.). *Planta de Potabilización Alejo Zuloaga* [Folleto]. Caracas: Autor.

HIDROVEN (Octubre 2009). *Plan especial de abastecimiento de agua potable*. [Documento en línea]. http://www.hidroven.gob.ve/ls_ver_noticia.php?ID=650&u=6 [Consulta: 2009, Noviembre 21].

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICA (2006). *Embalses en funcionamiento por capacidad según entidad federal*. <http://www.ine.gob.ve/aspectosambientales/ambienEspProtegidos2.htm>: Autor.

LEY DE AGUAS (2007, Enero 02). Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela, 38.595.

LEY ORGÁNICA PARA LA PLANIFICACIÓN Y GESTIÓN DE LA ORDENACIÓN DEL TERRITORIO (2006, Marzo 01). Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela, 38.388.

- MÁRQUEZ, Adriana** (2006). *Aplicación de los modelos HEC en el análisis de variables hidrológico-ambientales. Caso de estudio de zonificación de las manchas de inundación en la cuenca del río Urama. Estado Carabobo*. Tesis de Maestría en línea, Universidad de Carabobo. Disponible: [http://produccion-uc.cid.uc.edu.ve/cgi-bin/wwwisis/\[in=fichero/fichero.in\]](http://produccion-uc.cid.uc.edu.ve/cgi-bin/wwwisis/[in=fichero/fichero.in]).
- MONSALVE SÁENZ, Germán** (1995). *Hidrología en la ingeniería* (2º ed.), Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Colombia.
- NACIONES UNIDAS** (2008). *Objetivos de Desarrollo del Milenio Informe 2008*. Disponible: http://www.un.org/spanish/millenniumgoals/pdf/goal7_2008.pdf [Consulta: 2009, Octubre 12].
- NACIONES UNIDAS** (2010). *Indicadores de los Objetivos de Desarrollo del Milenio*. Disponible: <http://mdgs.un.org/unsd/mdg/Data.aspx> [Consulta: 2010, Enero 15].
- NAVA, Nelly** (2006). *Actualización de las curvas de intensidad-duración-frecuencia para las regiones hidrológicas de Venezuela*. Tesis especial de grado no publicado, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.
- NORMA SOBRE LA REGULACIÓN Y CONTROL DEL APROVECHAMIENTO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS Y CUENCAS HIDROGRÁFICAS** (Decreto Nº 1.400). (1996, Agosto 02). *Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela*, 36.013.
- PALENCIA, Marlis y MACHADO, Alexis** (2005). *Simulación de crecientes con la aplicación del software HEC-HMS en el Dique-Toma "José Laurencio Silva" del Río Urama-Municipio Juan José Mora-Estado Carabobo*. Trabajo de grado no publicado, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.
- PEREZ P., Andrés V. y DUEÑAS G., Rodolfo V.** (2003). *Operación estocástica de embalses*, [Documento en línea] Presentado en el XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Capítulo de Ingeniería Civil del Consejo Departamental de Loreto del Colegio de Ingenieros del Perú. Iquitos, Perú. Disponible: <http://eicunsa.iespana.es/descargas/ficunsapachari.pdf> [Consulta: 2009, Octubre 12].
- PNUD** (2010). *Situación de los ODM en Venezuela*. [Documento en línea] Disponible: <http://www.pnud.org.ve/content/view/176/169/> [Consulta: 2010, Noviembre 21].
- RIVAS MIJARES, Gustavo** (1983). *Abastecimiento de aguas y alcantarillas*. Ediciones Vega (3º ed.) Caracas, Venezuela.

SIMONOVIC, S. P. (1992). *Reservoir system analysis: closing the gap between theory and practice*, Journal of Water Resources, 118(3), 262-280.

SOLÓRZANO, Annedys (2010). *Estimación de la producción hídrica mediante la aplicación de modelos hidrológicos en la cuenca del río Paya, subcuenca del río Pao- Estado Carabobo*. Tesis de pregrado no publicada, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

STATGRAPHICS (2006). Centurion XV, USA.

UNESCO (2005). *Decenio Internacional para la acción* [Datos en línea] En El agua como fuente de vida, 2005-2015. Disponible: http://www.unesco.org/water_celebrations/decades/index_es.shtml [Consulta: 2009, Noviembre 21].

YEH, W. y W. G. (1985). *Reservoir managment and operation models: A state of the art review*, Water Resources Research, 21(12), 1797-1818.

ANEXOS

ANEXO A

TABLAS PARA EL CÁLCULO DE CNI, CNII Y CNIII

Anexo A-1. Tabla para el cálculo del CNI en HEC-GeoHMS

Valor	Lanotuse	A	B	C	D
1	Tierra cultivada sin tratamiento conservacional	72	81	88	91
2	Tierra cultivada con tratamiento conservacional	62	71	78	81
3	Pradero o partizal de condicion mala	68	79	86	89
4	Pradero o partizal de condicion buena	39	61	74	80
5	Sabanas de condicion buena	30	58	71	78
6	Bosque ralo cobertura pobre	45	66	77	83
7	Bosque cobertura buena	26	55	70	77
8	Espacios abiertos, jardines, parques, campos de golf, cementerio, etc.	39	61	74	80
9	Espacios abiertos, jardines, parques, campos de golf, cementerio, etc.	49	69	79	84
10	Areas comerciales y de negocios (85% impermeable)	81	82	91	93
11	Residencial Parcela Promedio del 500 m2 o menos, 65% de Impermeabi	77	85	90	92
12	Residencial Parcela Promedio del 1000 m2 o menos, 38% de Impermeabi	61	75	83	87
13	Residencial Parcela Promedio del 1500 m2 o menos, 30% de Impermeabi	57	72	81	86
14	Residencial Parcela Promedio del 2000 m2 o menos, 25% de Impermeabi	54	70	80	85
15	Residencial Parcela Promedio del 4000 m2 o menos, 20% de Impermeabi	51	69	79	84
16	Estacionamientos, parcelas, techos, autopistas, etc.	98	98	98	98
17	Calles y caminos: Pavimentos con cunetas y alcantarillas	98	98	98	98
18	Calles y caminos: Granzon	76	85	89	91
19	Calles y caminos: Tierra	72	82	87	89

Fuente. Elaboración propia

Anexo A-2. Tabla para el cálculo del CNII en HEC-GeoHMS

Valor	Lanotuse	A	B	C	D
1	Tierra cult	52	64	75	81
2	Tierra cult	41	51	60	64
3	Pradero o p	47	61	72	77
4	Pradero o p	21	40	54	63
5	Sabanas de	15	37	51	60
6	Bosque ralo	26	45	59	67
7	Bosque cobe	12	34	49	58
8	Espacios ab	21	40	54	63
9	Espacios ab	29	48	61	69
10	Areas comer	64	66	81	85
11	Residencial	58	70	79	83
12	Residencial	40	56	67	74
13	Residencial	36	52	64	72
14	Residencial	33	49	63	70
15	Residencial	30	47	61	69
16	Estacionami	95	95	95	95
17	Calles y ca	95	95	95	95
18	Calles y ca	57	70	77	81
19	Calles y ca	52	66	74	77

Fuente. Elaboración propia

Anexo A-3. Tabla para el cálculo del CNIII en HEC-GeoHMS

The screenshot shows the ArcView GIS 3.2 interface with a table named 'cn3.dbf' open. The table contains 19 rows of data, each representing a different land use type. The columns are labeled 'Value', 'Landuse', 'A', 'B', 'C', and 'D'. The 'Value' column contains integers from 1 to 19, and the 'Landuse' column contains descriptive text. The columns A, B, C, and D contain numerical values for each land use type.

Value	Landuse	A	B	C	D
1	Tierra cult	86	91	94	96
2	Tierra cult	79	85	89	91
3	Pradero o p	83	90	93	95
4	Pradero o p	60	78	87	90
5	Sabanas de	50	76	85	89
6	Bosque ralo	65	82	89	92
7	Bosque cobe	43	74	84	89
8	Espacios ab	60	78	87	90
9	Espacios ab	69	84	90	92
10	Areas comer	91	91	96	97
11	Residencial	89	93	95	96
12	Residencial	78	87	92	94
13	Residencial	75	86	91	93
14	Residencial	73	84	90	93
15	Residencial	71	83	90	92
16	Estacionami	99	99	99	99
17	Calles y ca	99	99	99	99
18	Calles y ca	88	93	95	96
19	Calles y ca	86	91	94	95

Fuente. Elaboración propia

ANEXO B

TABLAS DE ATRIBUTOS DE LA CUENCA Y DE LAS CORRIENTES

Anexo B-1. Características físicas de la cuenca del río Chirgua

Gribcode	Area	Wshld	Perimeter	Elevation	Slp_EndPt	Slp_1085	LongestFL	CentroIdaFL	bcr	BasinSlp	BasinLag	LagMethod	Name
30	602023797.2	30	168501.6846	774.9785	0.017	0.006	64595.507	41784.465	69	7.50	11.548	CNLag	R560w300

Fuente. HEC-GeoHMS

Anexo B-2. Atributos de las corrientes en la cuenca del río Chirgua

RivId	Length	Riv_Length	Slp_Endpt	us_Elv	ds_Elv	ChnSubSlp	ChnWidth	ChnShape	ChnManW	Name	Riv_Length_HMA	us_Elv
31	8666	8665.6	0.0000	700.0000	700.0000	3.00	20.00	PRISM	0.0700	R310	8665.600	7C
30	10820	10820.0	0.0000	700.0000	700.0000	3.00	20.00	PRISM	0.0700	R300	10820.000	7C
39	22287	22287.1	0.0089	700.0000	500.6301	3.00	20.00	PRISM	0.0700	R390	22287.100	7C
48	3504	3504.4	0.0284	600.0000	500.6301	3.00	20.00	PRISM	0.0700	R480	3504.400	6C
54	7538	7537.5	0.0065	449.2942	400.0000	3.00	20.00	PRISM	0.0700	R540	7537.500	44
50	10700	10699.8	0.0094	500.6301	400.0000	3.00	20.00	PRISM	0.0700	R500	10699.800	5C
56	8564	8564.0	0.0000	400.0000	400.0000	3.00	20.00	PRISM	0.0700	R560	8564.000	4C

Fuente. HEC-GeoHMS

Anexo B-3. Características físicas de la cuenca del río Paito

Area	Wshld	Perimeter	Elevation	Slp_EndPt	Slp_1085	LongestFL	CentroidaFL	bcn	BasinSlp	Name	LongestFL_HMA	CentroidaFL_HMA
2578495760	20	347576.0239	500.0000	0.007	0.003	89639.149	43606.503	85	8.04	R530W200	89639.149	43606.503

Fuente. HEC-GeoHMS

Anexo B-4. Atributos de las corrientes en la cuenca del río Paito

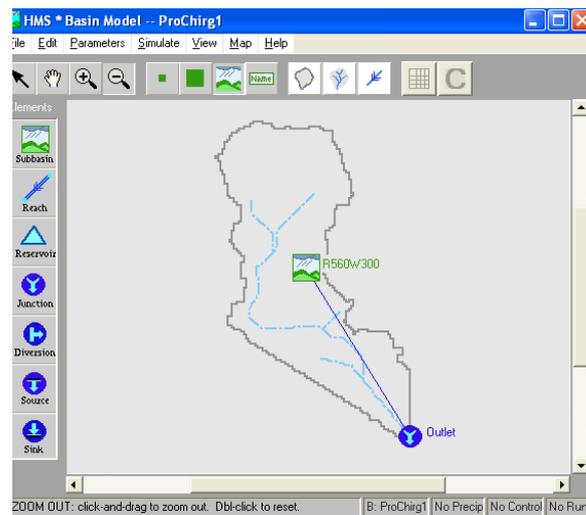
Shape	Acid	Grid_coord	From_node	To_node	Wshld	Rivld	Length	Riv_Length	Slp_Endpt	us_Elv	ds_Elv	ChnSdsA	ChnWidth	ChnShape	ChnM
PolyLine	1	24	1	2	20	24	701	700.9	0.0000	500.0000	500.0000	3.00	20.00	PRISM	0.0
PolyLine	2	22	3	2	20	22	12493	12493.5	0.0000	500.0000	500.0000	3.00	20.00	PRISM	0.0
PolyLine	3	20	4	5	20	20	12071	12071.2	0.0036	543.2034	500.0000	3.00	20.00	PRISM	0.0
PolyLine	4	25	2	5	20	25	9709	9708.6	0.0000	500.0000	500.0000	3.00	20.00	PRISM	0.0
PolyLine	5	26	6	7	20	26	9223	9222.7	0.0000	500.0000	500.0000	3.00	20.00	PRISM	0.0
PolyLine	6	28	5	7	20	28	9812	9812.2	0.0000	500.0000	500.0000	3.00	20.00	PRISM	0.0
PolyLine	7	27	8	9	20	27	12196	12196.3	0.0014	717.4458	700.0000	3.00	20.00	PRISM	0.0
PolyLine	8	34	10	9	20	34	1168	1168.1	0.0000	700.0000	700.0000	0.00	0.00		0.0
PolyLine	9	23	11	12	20	23	19227	19226.5	0.0052	600.0000	500.0000	3.00	20.00	PRISM	0.0
PolyLine	10	32	7	12	20	32	8878	8877.7	0.0000	500.0000	500.0000	3.00	20.00	PRISM	0.0
PolyLine	11	37	12	13	20	37	3271	3270.7	0.0000	500.0000	500.0000	3.00	20.00	PRISM	0.0
PolyLine	12	41	14	13	20	41	26262	26261.6	0.0000	500.0000	500.0000	3.00	20.00	PRISM	0.0
PolyLine	13	29	15	16	20	29	15979	15979.2	0.0063	600.0000	500.0000	3.00	20.00	PRISM	0.0
PolyLine	14	40	13	16	20	40	6074	6074.2	0.0000	500.0000	500.0000	3.00	20.00	PRISM	0.0
PolyLine	15	38	17	12	20	38	47381	47380.6	0.0045	712.2325	500.0000	3.00	20.00	PRISM	0.0
PolyLine	16	42	18	14	20	42	6933	6933.4	0.0000	500.0000	500.0000	3.00	20.00	PRISM	0.0
PolyLine	17	35	9	19	20	35	18152	18152.3	0.0110	700.0000	500.0000	3.00	20.00	PRISM	0.0
PolyLine	18	33	20	19	20	33	13711	13711.4	0.0073	600.0000	500.0000	3.00	20.00	PRISM	0.0
PolyLine	19	44	21	14	20	44	9966	9965.7	0.0023	522.6841	500.0000	3.00	20.00	PRISM	0.0
PolyLine	20	43	16	22	20	43	2803	2803.5	0.0000	500.0000	500.0000	3.00	20.00	PRISM	0.0
PolyLine	21	45	19	23	20	45	3271	3270.7	0.0000	500.0000	500.0000	3.00	20.00	PRISM	0.0
PolyLine	22	46	22	23	20	46	2667	2666.6	0.0000	500.0000	500.0000	3.00	20.00	PRISM	0.0
PolyLine	23	49	23	24	20	49	3578	3577.7	0.0280	500.0000	400.0000	3.00	20.00	PRISM	0.0
PolyLine	24	51	25	24	20	51	1635	1635.4	0.0000	400.0000	400.0000	3.00	20.00	PRISM	0.0
PolyLine	25	47	26	22	20	47	18886	18886.4	0.0053	600.0000	500.0000	3.00	20.00	PRISM	0.0
PolyLine	26	53	24	27	20	53	15205	15205.1	0.0000	400.0000	400.0000	3.00	20.00	PRISM	0.0

Fuente. HEC-GeoHMS

ANEXO C

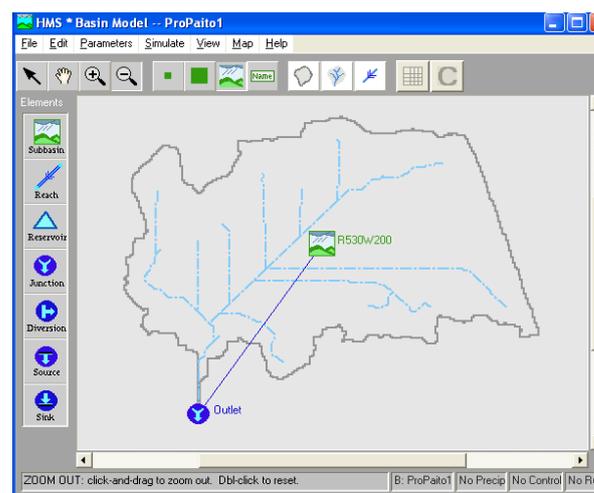
MODELOS DE CUENCA ALIMENTADOS AL PROGRAMA HEC-HMS

Anexo C-1. Modelo de cuenca río Chirgua



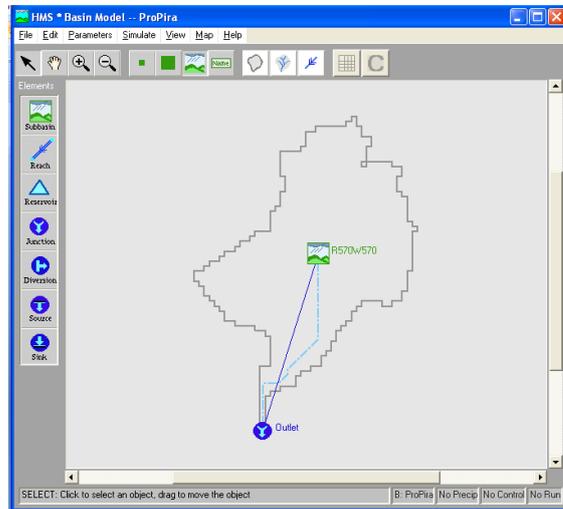
Fuente. Mapa procesado con HEC-GeoHMS

Anexo C-2. Modelo de cuenca río Paito



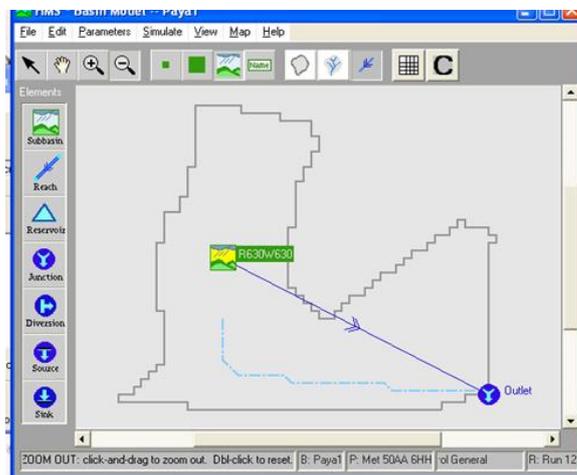
Fuente. Mapa procesado con HEC-GeoHMS

Anexo C-3. Modelo de cuenca río Pirapira



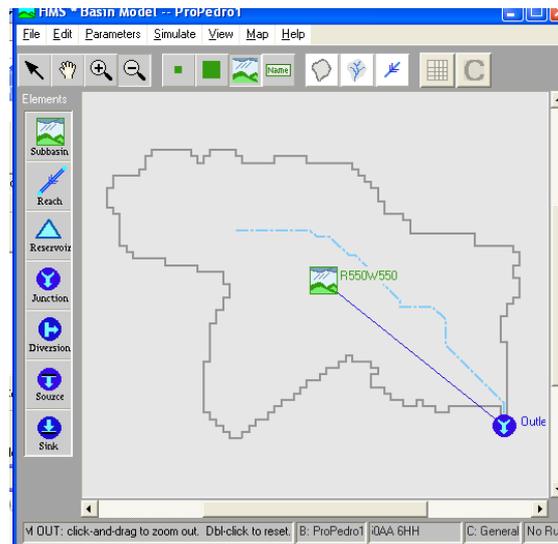
Fuente. Mapa procesado con HEC-GeoHMS

Anexo C-4. Modelo de cuenca río Paya



Fuente. Mapa procesado con HEC-GeoHMS

Anexo C-5. Modelo de cuenca río San Pedro



Fuente. Mapa procesado con HEC-GeoHMS

ANEXO D

TORMENTAS DE DISEÑO PARA LA CUENCA DEL RÍO PAITO

Anexo D-1. Tormenta de diseño para $Tr=5$ años y $D=3$ h en la cuenca del río Paito

Intervalo(h)	Intervalo (min)	Intensidad (mm/h)	P_{acum} (mm)	P(mm)	P_{red} (mm)	Bloques Alternos
0,33	20	93,71	31,24	31,24	12,81	0,94
0,67	40	60,79	40,53	9,29	3,81	1,15
1,00	60	46,52	46,52	5,99	2,46	1,53
1,33	80	38,31	51,08	4,56	1,87	2,46
1,67	100	32,89	54,82	3,74	1,53	12,81
2,00	120	29,01	58,02	3,20	1,31	3,81
2,33	140	26,07	60,84	2,82	1,15	1,87
2,67	160	23,76	63,36	2,53	1,04	1,31
3,00	180	21,89	65,66	2,30	0,94	1,04

Fuente. Elaboración propia

Anexo D-2. Tormenta de diseño para $Tr=5$ años y $D=6$ h en la cuenca del río Paito

Intervalo(h)	Intervalo (min)	Intensidad (mm/h)	P_{acum} (mm)	P(mm)	P_{red} (mm)	Bloques Alternos
0,33	20	93,71	31,24	31,24	14,37	0,62
0,67	40	60,79	40,53	9,29	4,27	0,68
1,00	60	46,52	46,52	5,99	2,76	0,75
1,33	80	38,31	51,08	4,56	2,10	0,84
1,67	100	32,89	54,82	3,74	1,72	0,97
2,00	120	29,01	58,02	3,20	1,47	1,16
2,33	140	26,07	60,84	2,82	1,30	1,47
2,67	160	23,76	63,36	2,53	1,16	2,10
3,00	180	21,89	65,66	2,30	1,06	14,37
3,33	200	20,33	67,77	2,11	0,97	4,27
3,67	220	19,02	69,74	1,96	0,90	2,76
4,00	240	17,89	71,57	1,83	0,84	1,72
4,33	260	16,91	73,29	1,72	0,79	1,30
4,67	280	16,05	74,92	1,63	0,75	1,06
5,00	300	15,29	76,46	1,54	0,71	0,90
5,33	320	14,61	77,93	1,47	0,68	0,79
5,67	340	14,00	79,34	1,40	0,65	0,71
6,00	360	13,45	80,68	1,34	0,62	0,65

Fuente. Elaboración propia

Anexo D-3. Tormenta de diseño para $Tr=10$ años y $D=3$ h en la cuenca del río Paito

Intervalo (h)	Intervalo (min)	Intensidad (mm/h)	P_{acum} (mm)	P(mm)	P_{red} (mm)	Bloques Alternos
0,33	20	109,30	36,43	36,43	14,94	1,10
0,67	40	70,90	47,27	10,84	4,44	1,35
1,00	60	54,26	54,26	6,99	2,87	1,79
1,33	80	44,68	59,58	5,32	2,18	2,87
1,67	100	38,36	63,94	4,36	1,79	14,94
2,00	120	33,84	67,67	3,73	1,53	4,44
2,33	140	30,41	70,96	3,28	1,35	2,18
2,67	160	27,71	73,90	2,95	1,21	1,53
3,00	180	25,53	76,58	2,68	1,10	1,21

Fuente. Elaboración propia

Anexo D-4. Tormenta de diseño para $Tr=10$ años y $D=6$ h en la cuenca del río Paito

Intervalo (h)	Intervalo (min)	Intensidad (mm/h)	P_{acum} (mm)	P(mm)	P_{red} (mm)	Bloques Alternos
0,33	20	109,30	36,43	36,43	16,76	0,72
0,67	40	70,90	47,27	10,84	4,98	0,79
1,00	60	54,26	54,26	6,99	3,22	0,87
1,33	80	44,68	59,58	5,32	2,45	0,98
1,67	100	38,36	63,94	4,36	2,01	1,13
2,00	120	33,84	67,67	3,73	1,72	1,35
2,33	140	30,41	70,96	3,28	1,51	1,72
2,67	160	27,71	73,90	2,95	1,35	2,45
3,00	180	25,53	76,58	2,68	1,23	16,76
3,33	200	23,71	79,05	2,47	1,13	4,98
3,67	220	22,18	81,34	2,29	1,05	3,22
4,00	240	20,87	83,47	2,14	0,98	2,01
4,33	260	19,73	85,48	2,01	0,92	1,51
4,67	280	18,72	87,38	1,90	0,87	1,23
5,00	300	17,84	89,18	1,80	0,83	1,05
5,33	320	17,04	90,90	1,71	0,79	0,92
5,67	340	16,33	92,54	1,64	0,75	0,83
6,00	360	15,68	94,11	1,57	0,72	0,75

Fuente. Elaboración propia

Anexo D-5. Tormenta de diseño para $T_r=50$ años y $D=3$ h en la cuenca del río Paito

Intervalo(h)	Intervalo (min)	Intensidad (mm/h)	P_{acum} (mm)	P (mm)	P_{red} (mm)	Bloques Alternos
0,33	20	156,24	52,08	52,08	21,35	1,57
0,67	40	101,35	67,57	15,49	6,35	1,92
1,00	60	77,56	77,56	9,99	4,10	2,56
1,33	80	63,87	85,17	7,60	3,12	4,10
1,67	100	54,84	91,40	6,23	2,56	21,35
2,00	120	48,37	96,74	5,34	2,19	6,35
2,33	140	43,47	101,43	4,69	1,92	3,12
2,67	160	39,62	105,64	4,21	1,73	2,19
3,00	180	36,49	109,47	3,83	1,57	1,73

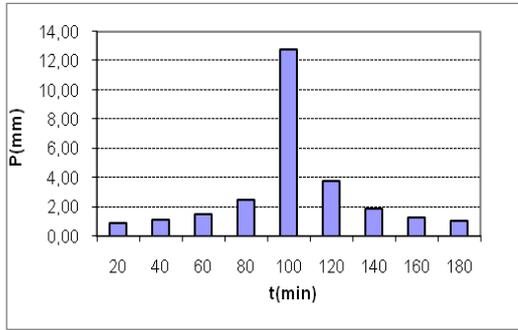
Fuente. Elaboración propia

Anexo D-6. Tormenta de diseño para $T_r=50$ años y $D=6$ h en la cuenca del río Paito

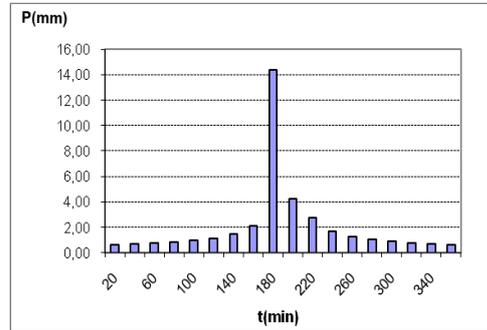
Intervalo(h)	Intervalo (min)	Intensidad (mm/h)	P_{acum} (mm)	P (mm)	P_{red} (mm)	Bloques Alternos
0,33	20	156,24	52,08	52,08	23,96	1,03
0,67	40	101,35	67,57	15,49	7,12	1,13
1,00	60	77,56	77,56	9,99	4,60	1,25
1,33	80	63,87	85,17	7,60	3,50	1,41
1,67	100	54,84	91,40	6,23	2,87	1,62
2,00	120	48,37	96,74	5,34	2,45	1,94
2,33	140	43,47	101,43	4,69	2,16	2,45
2,67	160	39,62	105,64	4,21	1,94	3,50
3,00	180	36,49	109,47	3,83	1,76	23,96
3,33	200	33,90	113,00	3,52	1,62	7,12
3,67	220	31,71	116,27	3,27	1,50	4,60
4,00	240	29,83	119,32	3,06	1,41	2,87
4,33	260	28,20	122,20	2,87	1,32	2,16
4,67	280	26,77	124,91	2,71	1,25	1,76
5,00	300	25,50	127,48	2,57	1,18	1,50
5,33	320	24,36	129,94	2,45	1,13	1,32
5,67	340	23,34	132,28	2,34	1,08	1,18
6,00	360	22,42	134,52	2,24	1,03	1,08

Fuente. Elaboración propia

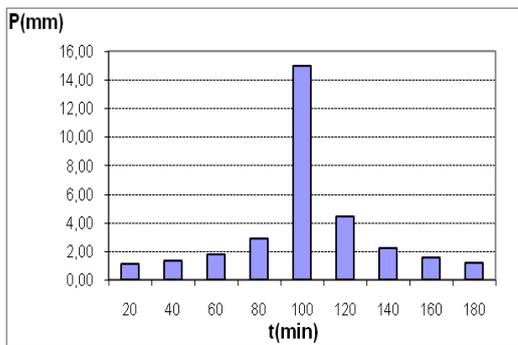
Anexo D-7. Histograma de tormenta en la cuenca del río Paito para: (a) 5 años y 3h, (b) 5 años y 6h, (c) 10 años y 3h, (d) 10 años y 6h, (e) 50 años y 3h y (f) 50 años y 6h. Elaboración propia



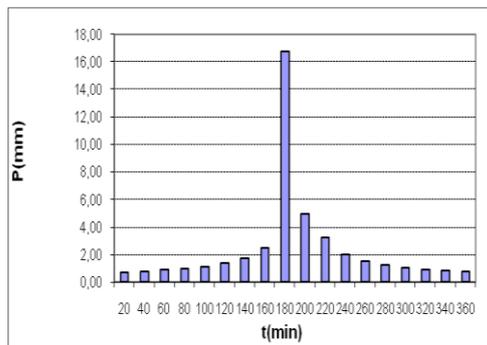
(a)



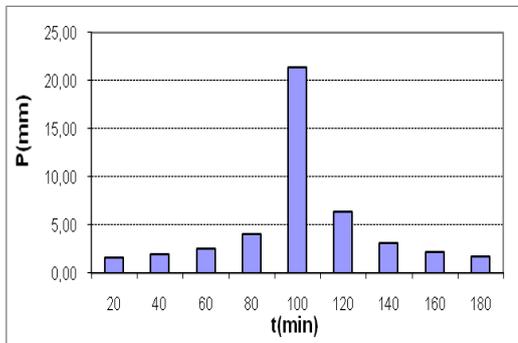
(b)



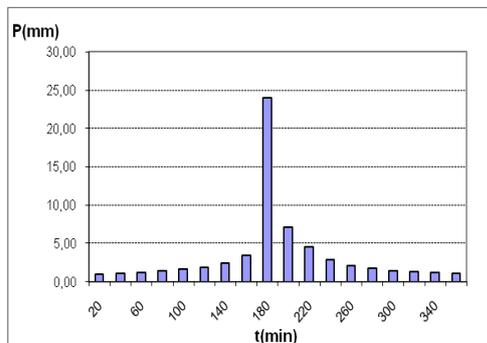
(c)



(d)



(e)



(f)

ANEXO E

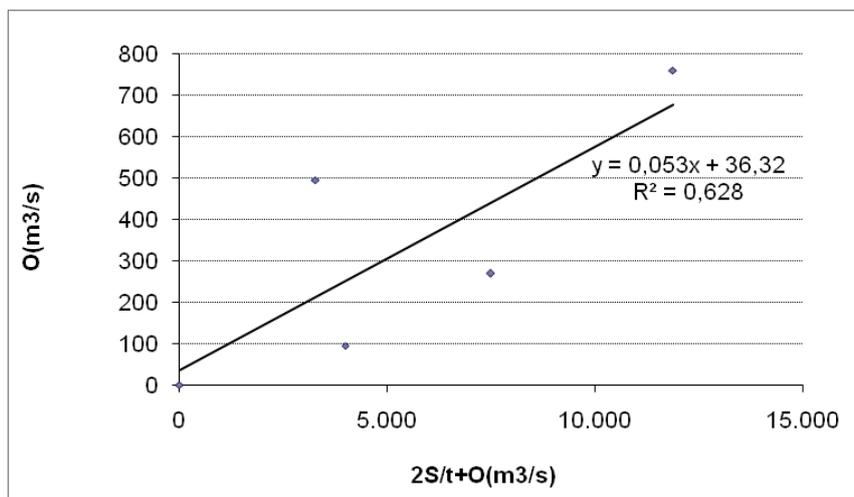
CÁLCULO DEL TRÁNSITO DE CRECIENTES EN LA CUENCA DEL RÍO CHIRGUA

Anexo E-1. Caudales de descarga del vertedero vs altura sobre la cresta

Altura sobre la cresta H(m)	Caudal de descarga del vertedero O (m ³ /s)
0	0,00
1	95,00
2	268,70
3	493,63
4	760,00

Fuente. Elaboración propia

Anexo E-2. Gráfica de $(2S/t + O)$ vs O



Fuente. Elaboración propia

Anexo E-3. Tránsito de la creciente para $Tr=5$ años y $D=3h$, con $L=47.5$ m

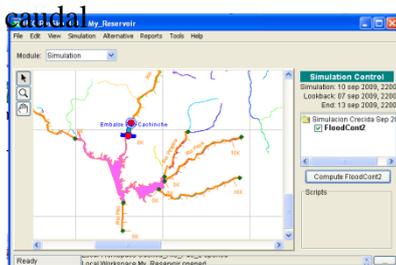
Intervalo	t(h)	I(m ³ /s)	I1+I2 (m ³ /s)	S1/t-O (m ³ /s)	2S1/t+O (m ³ /s)	O(m ³ /s)
1	0	1	2	0	0	0
2	1	1	2	0	2	36,43
3	2	1	2	0	2	36,43
4	3	1	51	0	51	39,07
5	4	50	200	105,79	200	47,10
6	5	150	450	423,23	555,79	66,28
7	6	300	750	974,11	1173,23	99,56
8	7	450	1000	1688,65	1974,11	142,73
9	8	550	1150	2460,00	2838,65	189,33
10	9	600	1150	3148,19	3610,00	230,90
11	10	550	1050	3672,98	4198,19	262,61
12	11	500	900	4007,36	4572,98	282,81
13	12	400	725	4149,57	4732,36	291,40
14	13	325	550	4120,30	4699,57	289,63
15	14	225	425	3982,67	4545,30	281,32
16	15	200	350	3792,96	4332,67	269,86
17	16	150	150	3445,26	3942,96	248,85

Fuente. Elaboración propia

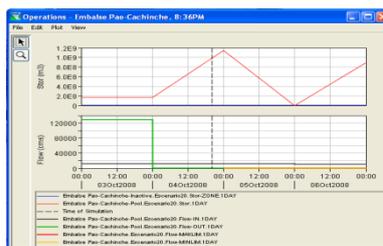
ANEXO F

SIMULACIÓN DE CRECIDAS CON HEC-ResSim

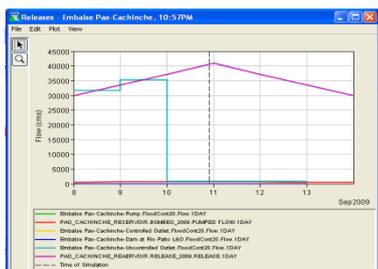
F-1. Módulo de simulación



F-2. Almacenamiento vs



F-3. Entrada-Salida del embalse



F-4. Caudal de salida en aliviadero



F-5. Descarga del embalse



F-6. Reporte decisión de descarga

Release Decision Report: Embalse Pap-Cachinche

Alternative: FloodCont2 FloodCont2
Run: FloodCont2D

Lookback: 08 Sep 2009, 0000
Start Time: 10 Sep 2009, 0000
End Time: 13 Sep 2009, 0000
Rule Key: GC=Guide Cune, RC=Release Override, EO=Elevation Override, ZB=Zone Boundary

Date-Time	Active Zone Elev (m)	Net inflow (cms)	Embalse Pap-Cachinche		
			-Cachinche Active Rule Flow (cms)	-Cachinche-Dam Active Rule Flow (cms)	-Cachinche Uncontd Flow (cms)
08Sep2009, 24:00	311,940,324,00	16962,0			
10Sep2009, 24:00	309,657,128,00	14208,999234375	GC:BackLimit	GC:BackLimit	
11Sep2009, 24:00	310,00	570281,875	WashLeads	WashLeads	
12Sep2009, 24:00	310,00	569,0	GC:BackLimit	GC:BackLimit	
12Sep2009, 24:00	355,432,264,00	15555,999234375		774,0	774,0

ANEXO G

IMÁGENES CUENCA DEL RÍO PAO Y EMBALSE PAO-CACHINCHE

Anexo G-1. *Imágenes cuenca río Pao*

Ganado bufalino. Subcuenca río Pirapira



Fuente. Padrón (2009)

Sembradíos. Subcuenca río Pirapira



Fuente. Padrón (2009)

Río San Pedro



Fuente. Padrón (2009)

Pastizales. Subcuenca río Pirapira



Fuente. Padrón (2009)

Anexo G-2. Imágenes embalse Pao-Cachinche

Vista Embalse Pao-Cachinche



Fuente. Padrón (2009)

Vista frontal presa del embalse



Fuente. HIDROCENTRO (2010)

Obra de Torre toma



Fuente. HIDROCENTRO (2010)

Vista Aliviadero del embalse



Fuente. HIDROCENTRO (2010)

Descarga al cauce río Pao



Fuente. HIDROCENTRO (2010)

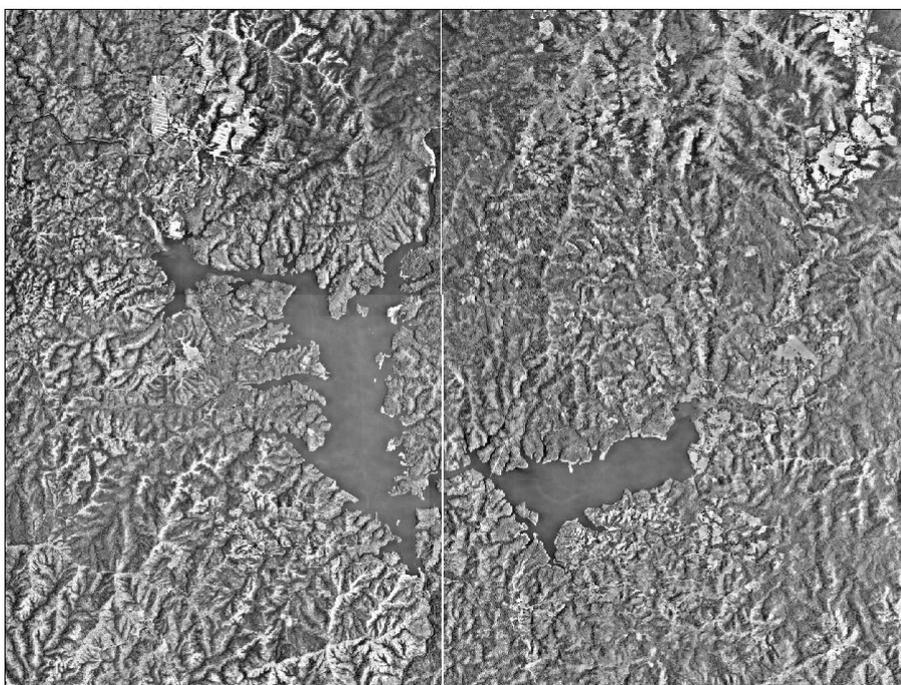
Vista canal de alivio



Fuente. HIDROCENTRO (2010)

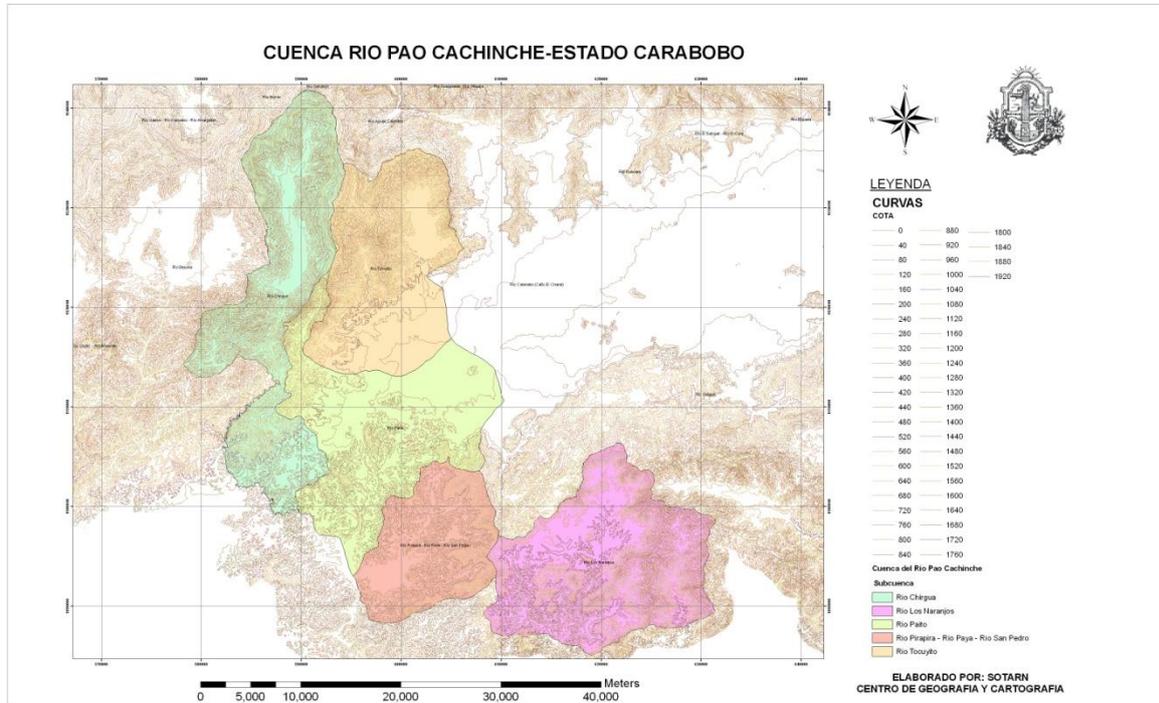
Anexo G-3. Ortofotomapa área de influencia del embalse Pao-Cachinche

ORTOFOTOMAPA DEL AREA DE INFLUENCIA DEL EMBALSE PAO CACHINCHE



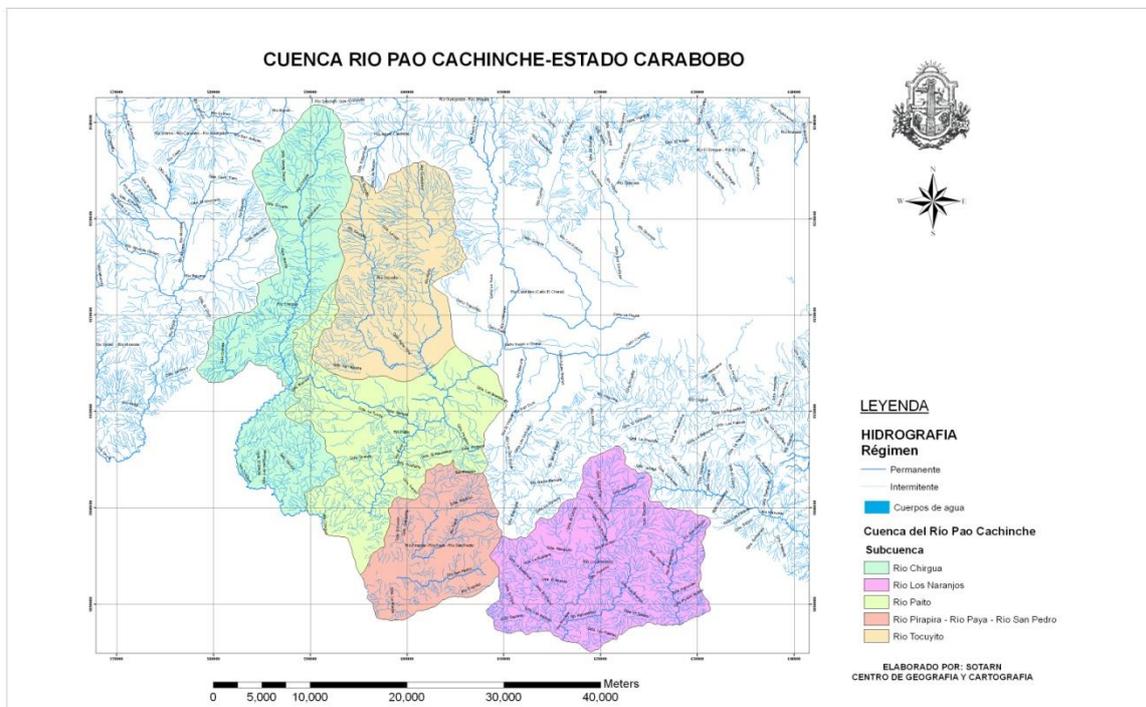
Fuente: SOTARN.
Centro de Geografía y Cartografía

Anexo G-4. Mapa de curvas de nivel de la cuenca del río Pao



Fuente. SOTARN (2010)

Anexo G-5. Mapa de la hidrografía en la cuenca del río Pao



Fuente. SOTARN (2010)

ANEXO H

AUTOCORRELACIONES PARA EL APOORTE-EXTRACCIÓN DIARIO Y MENSUAL

Anexo H-1. Autocorrelaciones estimadas para el aporte-extracción diaria en el período 1983-2009, con el modelo $ARIMA(2,0,2) \times (2,0,0)_3$ con constante

Retraso	Autocorrelación	Error Estándar	Límite en 95,0% Inferior	Límite en 95,0% Superior
1	0,644269	0,0261622	-0,0512771	0,0512771
2	0,529382	0,0353932	-0,0693695	0,0693695
3	0,500855	0,0404514	-0,0792834	0,0792834
4	0,482936	0,044494	-0,0872068	0,0872068
5	0,458175	0,0479478	-0,093976	0,093976
6	0,463298	0,0508562	-0,0996766	0,0996766
7	0,473735	0,0536674	-0,105186	0,105186
8	0,433061	0,0564572	-0,110654	0,110654
9	0,387718	0,0586868	-0,115024	0,115024
10	0,383148	0,0604146	-0,118411	0,118411
11	0,372493	0,0620555	-0,121627	0,121627
12	0,364063	0,0635675	-0,12459	0,12459
13	0,345325	0,064979	-0,127357	0,127357
14	0,338272	0,0662232	-0,129795	0,129795
15	0,302066	0,0673955	-0,132093	0,132093
16	0,308005	0,0683159	-0,133897	0,133897
17	0,348863	0,0692599	-0,135747	0,135747
18	0,344391	0,0704523	-0,138084	0,138084
19	0,3447	0,0715954	-0,140325	0,140325
20	0,32849	0,0727224	-0,142534	0,142534
21	0,309506	0,073731	-0,14451	0,14451
22	0,292211	0,074615	-0,146243	0,146243
23	0,28659	0,0753942	-0,14777	0,14777
24	0,281266	0,0761362	-0,149225	0,149225

Fuente. Datos tomados de Statgraphics

Anexo H-2. Autocorrelaciones parciales estimadas para el aporte-extracción diaria en el período 1983-2009, con el modelo ARIMA(2,0,2)x(2,0,0)3 con constante

Retraso	Autocorrelación parcial	Error Estándar	Límite en 95,0% Inferior	Límite en 95,0% Superior
1	0,0880368	0,0261622	-0,0512771	0,0512771
2	0,0273438	0,0263642	-0,051673	0,051673
3	-0,0320716	0,0263836	-0,0517111	0,0517111
4	-0,0636792	0,0264103	-0,0517633	0,0517633
5	-0,0428467	0,0265152	-0,0519689	0,0519689
6	-0,0765913	0,0265625	-0,0520617	0,0520617
7	0,0551397	0,0267133	-0,0523571	0,0523571
8	0,00622308	0,0267911	-0,0525096	0,0525096
9	-0,000164065	0,026792	-0,0525115	0,0525115
10	0,000760069	0,026792	-0,0525115	0,0525115
11	-0,0324184	0,0267921	-0,0525116	0,0525116
12	0,0242607	0,0268189	-0,0525642	0,0525642
13	-0,028778	0,0268339	-0,0525936	0,0525936
14	-0,0273683	0,026855	-0,052635	0,052635
15	-0,0502265	0,0268741	-0,0526724	0,0526724
16	-0,0381949	0,0269383	-0,0527982	0,0527982
17	0,042978	0,0269753	-0,0528708	0,0528708
18	0,0564742	0,0270222	-0,0529626	0,0529626
19	0,0774583	0,0271028	-0,0531207	0,0531207
20	0,0208692	0,0272539	-0,0534168	0,0534168
21	0,0276882	0,0272649	-0,0534382	0,0534382
22	-0,0048587	0,0272841	-0,053476	0,053476
23	-0,0329644	0,0272847	-0,0534771	0,0534771
24	-0,00293627	0,0273119	-0,0535305	0,0535305

Fuente. Datos tomados de Statgraphics

Anexo H-3. . Autocorrelaciones estimadas para el aporte-extracción mensual en el período 2005-2009, con el modelo ARIMA(0,0,1)x(2,0,1)6 con constante

Retraso	Autocorrelación	Error Estándar	Límite en 95,0% Inferior	Límite en 95,0% Superior
1	0,625519	0,129099	-0,253031	0,253031
2	0,314773	0,172363	-0,337827	0,337827
3	0,150779	0,181692	-0,35611	0,35611
4	-0,107989	0,183765	-0,360174	0,360174
5	-0,256162	0,18482	-0,362241	0,362241
6	-0,310451	0,190645	-0,373659	0,373659
7	-0,318695	0,198893	-0,389824	0,389824
8	-0,252949	0,207229	-0,406162	0,406162
9	-0,0897902	0,212313	-0,416126	0,416126
10	0,0317811	0,212945	-0,417365	0,417365
11	0,149517	0,213024	-0,41752	0,41752
12	0,350342	0,214766	-0,420934	0,420934
13	0,386229	0,224088	-0,439206	0,439206
14	0,280858	0,234921	-0,460438	0,460438
15	0,0287585	0,240453	-0,471279	0,471279
16	-0,213627	0,24051	-0,471391	0,471391
17	-0,253523	0,243652	-0,47755	0,47755
18	-0,307644	0,248009	-0,48609	0,48609
19	-0,271173	0,25429	-0,498401	0,498401
20	-0,14341	0,259065	-0,507759	0,507759

Fuente. Datos tomados de Statgraphics

Anexo H-4. Autocorrelaciones parciales estimadas para el aporte-extracción mensual en el período 2005-2009, con el modelo ARIMA(0,0,1)x(2,0,1)₆ con constante

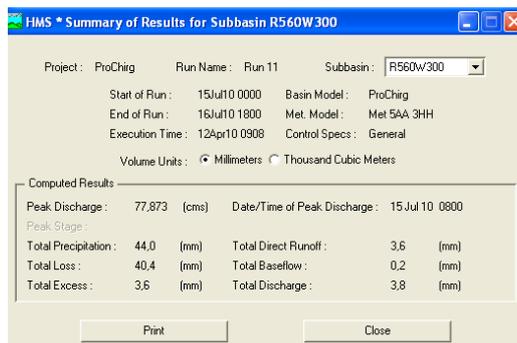
Retraso	Autocorrelación parcial	Error Estándar	Límite en 95,0% Inferior	Límite en 95,0% Superior
1	0,0700853	0,129099	-0,253031	0,253031
2	0,0774043	0,129732	-0,254271	0,254271
3	-0,0233476	0,130499	-0,255775	0,255775
4	-0,0694878	0,130569	-0,255911	0,255911
5	-0,0592247	0,131184	-0,257116	0,257116
6	-0,154169	0,131629	-0,257988	0,257988
7	-0,0556883	0,134605	-0,263821	0,263821
8	-0,0426471	0,134988	-0,264572	0,264572
9	0,0190339	0,135212	-0,265012	0,265012
10	0,00877694	0,135257	-0,2651	0,2651
11	-0,127859	0,135267	-0,265118	0,265118
12	-0,067781	0,137266	-0,269037	0,269037
13	0,0519301	0,137823	-0,270128	0,270128
14	0,0411977	0,138149	-0,270767	0,270767
15	-0,0106889	0,138353	-0,271168	0,271168
16	-0,15263	0,138367	-0,271195	0,271195
17	0,0112694	0,141145	-0,27664	0,27664
18	0,111393	0,14116	-0,276669	0,276669
19	0,00469224	0,142618	-0,279526	0,279526
20	0,151282	0,14262	-0,279531	0,279531

Fuente. Datos tomados de Statgraphics

ANEXO I

RESULTADOS DE LA MODELACIÓN LLUVIA-ESCORRENTÍA PARA TORMENTA DE DISEÑO DE $T_r=5$ AÑOS Y $D=3$ HORAS EN LA CUENCA DEL RÍO CHIRGUA

Anexo I-1. Resumen de resultados de la corrida con HEC-HMS



Anexo I-2. Resultados de la corrida con HEC-HMS

HMS * Time Series Results for Subbasin R560W300

Project: ProChig Run Name: Run 11 Subbasin: R560W300

Start of Run: 15Jul10 0000 Basin Model: ProChig
 End of Run: 16Jul10 1800 Met. Model: Met 5AA 3HH
 Execution Time: 12Apr10 0908 Control Specs: General

Date	Time	Precip. (mm)	Loss (mm)	Excess (mm)	Direct Q (cms)	Base-flow (cms)	Total Q (cms)
14 Jul 10	2400				0.000	1.000	1.000
15 Jul 10	0030	2.0	2.0	0.0	0.000	1.000	1.000
15 Jul 10	0100	3.0	3.0	0.0	0.000	1.000	1.000
15 Jul 10	0130	15.5	15.5	0.0	0.000	1.000	1.000
15 Jul 10	0200	17.5	15.5	2.0	1.093	1.000	2.093
15 Jul 10	0230	4.0	3.0	1.0	4.621	1.000	5.621
15 Jul 10	0300	2.0	1.4	0.6	10.578	1.000	11.578
15 Jul 10	0330	0.0	0.0	0.0	18.255	1.000	19.255
15 Jul 10	0400	0.0	0.0	0.0	26.903	1.000	27.903
15 Jul 10	0430	0.0	0.0	0.0	36.081	1.000	37.081
15 Jul 10	0500	0.0	0.0	0.0	45.544	1.000	46.544
15 Jul 10	0530	0.0	0.0	0.0	54.818	1.000	55.818
15 Jul 10	0600	0.0	0.0	0.0	63.044	1.000	64.044
15 Jul 10	0630	0.0	0.0	0.0	69.524	1.000	70.524
15 Jul 10	0700	0.0	0.0	0.0	74.002	1.000	75.002
15 Jul 10	0730	0.0	0.0	0.0	76.458	1.000	77.458
15 Jul 10	0800	0.0	0.0	0.0	76.873	1.000	77.873
15 Jul 10	0830	0.0	0.0	0.0	74.935	1.000	75.935
15 Jul 10	0900	0.0	0.0	0.0	70.145	1.000	71.145
15 Jul 10	0930	0.0	0.0	0.0	63.357	1.000	64.357
15 Jul 10	1000	0.0	0.0	0.0	56.222	1.000	57.222
15 Jul 10	1030	0.0	0.0	0.0	49.608	1.000	50.608
15 Jul 10	1100	0.0	0.0	0.0	43.771	1.000	44.771
15 Jul 10	1130	0.0	0.0	0.0	38.622	1.000	39.622
15 Jul 10	1200	0.0	0.0	0.0	34.078	1.000	35.078
15 Jul 10	1230	0.0	0.0	0.0	30.069	1.000	31.069
15 Jul 10	1300	0.0	0.0	0.0	26.531	1.000	27.531
15 Jul 10	1330	0.0	0.0	0.0	23.410	1.000	24.410
15 Jul 10	1400	0.0	0.0	0.0	20.656	1.000	21.656

Anexo I-2 (cont.)

HMS * Time Series Results for Subbasin R560W300

Project: ProChig Run Name: Run 11 Subbasin: R560W300

Start of Run: 15Jul10 0000 Basin Model: ProChig
 End of Run: 16Jul10 1800 Met. Model: Met 5AA 3HH
 Execution Time: 12Apr10 0908 Control Specs: General

Date	Time	Precip. (mm)	Loss (mm)	Excess (mm)	Direct Q (cms)	Base-flow (cms)	Total Q (cms)
15 Jul 10	1400	0.0	0.0	0.0	20.656	1,000	21.656
15 Jul 10	1430	0.0	0.0	0.0	18.226	1,000	19.226
15 Jul 10	1500	0.0	0.0	0.0	16.082	1,000	17.082
15 Jul 10	1530	0.0	0.0	0.0	14.190	1,000	15.190
15 Jul 10	1600	0.0	0.0	0.0	12.520	1,000	13.520
15 Jul 10	1630	0.0	0.0	0.0	11.047	1,000	12.047
15 Jul 10	1700	0.0	0.0	0.0	9.748	1,000	10.748
15 Jul 10	1730	0.0	0.0	0.0	8.601	1,000	9.601
15 Jul 10	1800	0.0	0.0	0.0	7.589	1,000	8.589
15 Jul 10	1830	0.0	0.0	0.0	6.696	1,000	7.696
15 Jul 10	1900	0.0	0.0	0.0	5.908	1,000	6.908
15 Jul 10	1930	0.0	0.0	0.0	5.213	1,000	6.213
15 Jul 10	2000	0.0	0.0	0.0	4.600	1,000	5.600
15 Jul 10	2030	0.0	0.0	0.0	4.059	1,000	5.059
15 Jul 10	2100	0.0	0.0	0.0	3.581	1,000	4.581
15 Jul 10	2130	0.0	0.0	0.0	3.160	1,000	4.160
15 Jul 10	2200	0.0	0.0	0.0	2.788	1,000	3.788
15 Jul 10	2230	0.0	0.0	0.0	2.460	1,000	3.460
15 Jul 10	2300	0.0	0.0	0.0	2.171	1,000	3.171
15 Jul 10	2330	0.0	0.0	0.0	1.915	1,000	2.915
15 Jul 10	2400	0.0	0.0	0.0	1.690	1,000	2.690
16 Jul 10	0030	0.0	0.0	0.0	1.491	1,000	2.491
16 Jul 10	0100	0.0	0.0	0.0	1.316	1,000	2.316
16 Jul 10	0130	0.0	0.0	0.0	1.161	1,000	2.161
16 Jul 10	0200	0.0	0.0	0.0	1.024	1,000	2.024
16 Jul 10	0230	0.0	0.0	0.0	0.904	1,000	1.904
16 Jul 10	0300	0.0	0.0	0.0	0.798	1,000	1.798
16 Jul 10	0330	0.0	0.0	0.0	0.344	1,000	1.344
16 Jul 10	0400	0.0	0.0	0.0	0.119	1,000	1.119

HMS * Time Series Results for Subbasin R560W300

Project: ProChig Run Name: Run 11 Subbasin: R560W300

Start of Run: 15Jul10 0000 Basin Model: ProChig
 End of Run: 16Jul10 1800 Met. Model: Met 5AA 3HH
 Execution Time: 12Apr10 0908 Control Specs: General

Date	Time	Precip. (mm)	Loss (mm)	Excess (mm)	Direct Q (cms)	Base-flow (cms)	Total Q (cms)
16 Jul 10	0400	0.0	0.0	0.0	0.119	1,000	1.119
16 Jul 10	0430	0.0	0.0	0.0	0.000	1,000	1.000
16 Jul 10	0500	0.0	0.0	0.0	0.000	1,000	1.000
16 Jul 10	0530	0.0	0.0	0.0	0.000	1,000	1.000
16 Jul 10	0600	0.0	0.0	0.0	0.000	1,000	1.000
16 Jul 10	0630	0.0	0.0	0.0	0.000	1,000	1.000
16 Jul 10	0700	0.0	0.0	0.0	0.000	1,000	1.000
16 Jul 10	0730	0.0	0.0	0.0	0.000	1,000	1.000
16 Jul 10	0800	0.0	0.0	0.0	0.000	1,000	1.000
16 Jul 10	0830	0.0	0.0	0.0	0.000	1,000	1.000
16 Jul 10	0900	0.0	0.0	0.0	0.000	1,000	1.000
16 Jul 10	0930	0.0	0.0	0.0	0.000	1,000	1.000
16 Jul 10	1000	0.0	0.0	0.0	0.000	1,000	1.000
16 Jul 10	1030	0.0	0.0	0.0	0.000	1,000	1.000
16 Jul 10	1100	0.0	0.0	0.0	0.000	1,000	1.000
16 Jul 10	1130	0.0	0.0	0.0	0.000	1,000	1.000
16 Jul 10	1200	0.0	0.0	0.0	0.000	1,000	1.000
16 Jul 10	1230	0.0	0.0	0.0	0.000	1,000	1.000
16 Jul 10	1300	0.0	0.0	0.0	0.000	1,000	1.000
16 Jul 10	1330	0.0	0.0	0.0	0.000	1,000	1.000
16 Jul 10	1400	0.0	0.0	0.0	0.000	1,000	1.000
16 Jul 10	1430	0.0	0.0	0.0	0.000	1,000	1.000
16 Jul 10	1500	0.0	0.0	0.0	0.000	1,000	1.000
16 Jul 10	1530	0.0	0.0	0.0	0.000	1,000	1.000
16 Jul 10	1600	0.0	0.0	0.0	0.000	1,000	1.000
16 Jul 10	1630	0.0	0.0	0.0	0.000	1,000	1.000
16 Jul 10	1700	0.0	0.0	0.0	0.000	1,000	1.000
16 Jul 10	1730	0.0	0.0	0.0	0.000	1,000	1.000
16 Jul 10	1800	0.0	0.0	0.0	0.000	1,000	1.000

Fuente. HEC-HMS