

**ELABORACIÓN DE UN MODELO PARA EL ANÁLISIS DEL BALANCE
HÍDRICO A CORTO PLAZO DEL EMBALSE DE BUCARAMANGA**

**PAOLA ANDREA SALAS NEIRA
ANDRÉS FELIPE MANRIQUE RIOS**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2017**

**ELABORACIÓN DE UN MODELO PARA EL ANÁLISIS DEL BALANCE
HÍDRICO A CORTO PLAZO DEL EMBALSE DE BUCARAMANGA**

**PAOLA ANDREA SALAS NEIRA
ANDRÉS FELIPE MANRIQUE RIOS**

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil

Director

**ANDRÉS ALMEYDA ORTÍZ
Ingeniero Civil Ms.C.**

Co-Directora

**SULLY GÓMEZ ISIDRIO
Ingeniera Civil Ph. D.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2017

DEDICATORIA

A Dios por acompañarme, guiarme, y darme sabiduría y fortaleza en todo momento.

A mis padres, Janeth y Orlando, por su formación ejemplar, su apoyo y su esfuerzo. Todo lo que soy se lo debo a ellos.

A mis hermanos, Yuli y Fabián, por su infinito amor y por ser una de las razones más importantes para salir adelante.

A mi Familia: María del Rosario Parra, Mercedes Salas, Nelson Salas, Miguel Salas, Lauriano Salas y Rubiela Torres, por su apoyo incondicional, sin ellos no hubiera podido llegar tan lejos.

A mi amigo y compañero de proyecto, Andrés Manrique, por su comprensión, compañía e incondicionalidad.

A mis amigos, especialmente a Tatiana Macabeo por su comprensión y compañía desde el inicio del camino.

A todas las personas que siempre me apoyaron y acompañaron en este largo caminar.

Paola Andrea Salas Neira

DEDICATORIA

*A Dios por guiarme y darme la sabiduría para enfrentar éste camino
A mi madre Claudia por ser el motor de mi vida y apoyo constante
A mi padre Mauricio por enseñarme que la humildad nos hace grandes
A mi hermano Cristian por ser mi ejemplo a seguir
A mi hermana Camila por darme la alegría que necesita mi vida
A Harold por estar en todo momento, por ser mi apoyo y ayuda incondicional
A Paola por ser una amiga excepcional con la que siempre podré confiar
A Tatiana por acompañarme con su amistad durante toda la carrera
A Coro UIS por permitirme tener una formación integral
A la Universidad Industrial de Santander por ser un excelente espacio de
enseñanza académica y a todos los que de alguna u otra manera hicieron parte de
éste proceso*

Andrés Felipe Manrique Ríos

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al director del proyecto Ing. Ms.C. Andrés Almeyda Ortiz y codirectora Ing. Ph.D. Sully Gómez Isidro por sus aportes, dedicación, apoyo y seguimiento durante la ejecución de este proyecto. Al Acueducto Metropolitano de Bucaramanga e Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia IDEAM por facilitar la información necesaria para esta investigación.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	19
2. METODOLOGÍA	22
2.1 VARIABLES HIDROLÓGICAS QUE INTERACTÚAN EN EL BALANCE HÍDRICO DEL EMBALSE BUCARAMANGA	22
2.2 SELECCIÓN Y REVISIÓN DE LA INFORMACIÓN PARA REALIZAR EL BALANCE HÍDRICO DEL EMBALSE BUCARAMANGA	24
2.2.1 Precipitación	27
2.2.2 Evaporación de Tanque	30
2.2.3 Esguerrimiento superficial o caudales del río Tona.....	32
2.3 ELABORACIÓN DEL MODELO DE BALANCE HÍDRICO EN EL EMBALSE BUCARAMANGA.....	35
2.4 PLANTEAMIENTO DE HIPÓTESIS Y APLICACIÓN EN EL MODELO DE BALANCE HÍDRICO	38
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
3.1 PLANTEAMIENTO N°1	40
3.2 PLANTEAMIENTO N° 2.....	43
3.3 PLANTEAMIENTO N° 3.....	45
3.4 PLANTEAMIENTO N° 4.....	46
3.5 VOLÚMENES ANUALES DE LAS VARIABLES HIDROLÓGICAS QUE INTERACTÚAN EN EL BALANCE HÍDRICO PARA EL PERIODO 1990 A 2000..	47
4. CONCLUSIONES	50
5. RECOMENDACIONES.....	52
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53

BIBLIOGRAFÍA.....56
ANEXOS59

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Imagen satelital de la localización del embalse de Bucaramanga.	20
Figura 2. Captación y Niveles de operación del embalse Bucaramanga	21
Figura 3. Metodología para el desarrollo del proyecto	22
Figura 4. Ilustración del Balance hídrico en el Embalse de Bucaramanga	23
Figura 5. Estaciones automáticas, limnimétricas, climatológicas y pluviométricas del amb e IDEAM.....	25
Figura 6. Precipitación registrada por la estación Climatológica Total del Embalse	27
Figura 7. Precipitación media mensual multianual con y sin llenado de datos de la estación UIS (IDEAM).....	30
Figura 8. Tanque clase A Estación Climatológica.....	31
Figura 9. Evaporación media mensual multianual sin datos faltantes de la estación UIS (IDEAM) para el periodo 1990 a 2000.	31
Figura 10. Caudales medios diarios del río Tona de la estación del embalse	33
Figura 11. Caudales medios mensuales multianuales Río Tona del periodo 1984 a 2014.....	34
Figura 12. Ejemplo gráfico de llenado de datos de caudal del río Tona (Estación puente Tona) para el año 1990.....	35
Figura 13. Vertederos triangulares instalados para medición de infiltraciones	37
Figura 14. Comportamiento del nivel del embalse cuando suministra una demanda de 0,571 m ³ /s confiabilidad de 100% en el periodo de 1990 a 2000.	41
Figura 15. Llenado del Embalse en fenómeno del niño	46

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Estaciones estudiadas.	26
Tabla 2. Precipitación media anual de las estaciones UIS, Brasil, Plazuela y Floresta.	29
Tabla 3. Vertederos de medición de infiltraciones	37
Tabla 4. Caudal demandado por la población para el periodo de 1990 a 2000 con su respectiva confiabilidad y días de no operación del embalse cuando inicia en el nivel máximo de operación.	40
Tabla 5. Caudales de demanda en época del fenómeno de El Niño (1991-1993 y 1997-1998) con su respectiva confiabilidad y días de no operación del embalse Bucaramanga.	42
Tabla 6. Confiabilidades de operación y días de no operación del embalse cuando el nivel inicial del embalse es 841 msnm en el periodo 1990 a 2000.	43
Tabla 7. Total de días que el embalse puede abastecer un caudal de demanda de 2 m ³ /s a la PTAP Bosconia en el periodo de 1990 a 2000 y en los años con fenómeno ENSO.	44
Tabla 8. Número de días que demora el embalse en llenarse los periodos de 1991-1992, 1992-1993, 1997-1998 y 2014-2016.	46
Tabla 9. Número de días de descarga de fondo con y sin operación a la planta los Angelinos	47
Tabla 10. Porcentaje de volúmenes anual de caudal del río Tona, precipitación sobre el embalse, evaporación sobre el embalse e infiltración a través de la presa para el periodo de 1990 a 2000.	48

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Precipitación total mensual estación Brasil (amb) y estación UIS (IDEAM)	59
ANEXO B. Porcentaje mensual de datos faltantes de las variables hidrológicas diarias: precipitación (Estación UIS- IDEMA), evaporación (Estación UIS- IDEAM) y caudal del río Tona (Estación Puente Tona - amb) para el periodo de 1990 a 2000.....	62
ANEXO C. Ejemplo Llenado de datos faltantes de Evaporación (mm) diaria de la estación UIS-IDEAM para el Año 2000.....	64
ANEXO D. Registro histórico fenómenos El Niño y La Niña.....	66
ANEXO E. Comparación de los caudales del río Tona (estación puente Tona - amb) con los caudales de la suma de las caudales de las estaciones Arnania, Carrizal y Golondrinas del amb.....	68
ANEXO F. Curvas de infiltración vs Nivel msnm.....	69
ANEXO G. Curva de Área del espejo del agua vs Nivel del embalse.....	71
ANEXO H. Curva de Nivel msnm vs Volumen del embalse.....	72
ANEXO I. Curva de correlación de gasto del vertedero de excesos del embalse..	73
ANEXO J. Comportamiento del embalse para el periodo de 1990 a 2000 cuando suministra una demanda de 1,2 m ³ /s.....	74
ANEXO K. Comportamiento del embalse frente a fenómeno del niño confiabilidad del 100% para el periodo de 1991 a 1993, 1997 a 1998	75
ANEXO L. Comportamiento del embalse frente al fenómeno de la Niña confiabilidad del 100% para el periodo de 1999 a 2000	76
ANEXO M. Variación de la demanda que puede suministrar el embalse cuando opera y no opera la PTAP Bosconia.	77

ANEXO N. Descarga de fondo del embalse Bucaramanga cuando opera y no a la planta los Angelinos.....	79
ANEXO O. Explicación de la programación del modelo en Excel del balance hídrico del embalse Bucaramanga.....	82

RESUMEN

TITULO: ELABORACIÓN DE UN MODELO PARA EL ANÁLISIS DEL BALANCE HÍDRICO A CORTO PLAZO DEL EMBALSE DE BUCARAMANGA.

AUTORES: PAOLA ANDREA SALAS NEIRA**
ANDRÉS FELIPE MANRIQUE RÍOS

PALABRAS CLAVES: Balance hídrico, Modelo, Embalse, Demanda, abastecimiento.

DESCRIPCIÓN:

Con la finalidad de estudiar la regulación del embalse de Bucaramanga en el tiempo, se desarrolló e implementó un modelo de balance hídrico a escala diaria mediante el software Excel, involucrando las variables hidrológicas registradas en la zona como precipitación, escorrentía del río Tona, evaporación, caudales de infiltración a través de la presa y demanda de la futura población, a las cuales se realizó un análisis de calidad de datos para su respectivo uso utilizando como parámetro el comportamiento bimodal de la lluvia y el porcentaje de datos faltantes de cada una de los registros. En el modelo se utilizaron las curvas asociadas a la geometría del embalse, Cota vs Volumen, Cota vs Área del espejo de agua, y a su vez, al comportamiento hidráulico del embalse como la curva de gasto del vertedero de excesos y del caudal evacuado por la descarga de fondo, para obtener así la variación del nivel del embalse con respecto al tiempo. Se estudiaron los años comprendidos entre 1990 a 2000 y los años en que se presentaron fenómenos ENSO, se evidenciaron tres (3) eventos de fenómenos de El Niño y dos (2) de La Niña, donde se plantearon escenarios hipotéticos operativos como la variación del caudal de demanda para abastecimiento, llenado y vaciado del embalse para trabajos de inspección y mantenimiento, con el fin de estudiar diariamente el comportamiento del volumen del embalse, estableciendo una demanda asociada a una confiabilidad de operación.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de ingeniería Civil. Director Andrés Almeyda Ortíz.
Ingeniero

ABSTRACT

TITLE: ELABORATION OF A MODEL FOR THE ANALYSIS OF THE SHORT-TERM WATER BALANCE OF THE EMBALSE DE BUCARAMANGA

AUTHORS: PAOLA ANDREA SALAS NEIRA**
ANDRÉS FELIPE MANRIQUE RÍOS

KEYWORDS: Water Balance, Model, Dam, Demand, Supply.

DESCRIPTION:

With the aim of studying behavior over time of Bucaramanga's dam, a model of the daily water balance at a daily scale using the Excel software was developed and implemented, involving the hydrological variables reported in the area such as precipitation, evaporation, runoff of Tona's river, infiltration rates through the dam and demand of the future population, to which an analysis of data quality for their corresponding use was made using as a parameter the bimodal behavior of the rain and the percentage of missing data of each one of the records. The curves associated with the geometry of the dam were used in the model, Water Mark vs. Volume, Water Mark vs. Area of water mirror, and at the same time, with the hydraulic behavior of the dam as the rating curve of excesses spillway and flow evacuated by bottom flush, to obtain the level variation over time of the dam. A study was carried out between 1990 and 2000 and the years when ENSO phenomena occurred with three events of "El Niño" and two of "La Niña" phenomena, in which some operating scenarios raised as the flow demand variation to supply, filling and emptying the dam for inspection and maintenance work, in order to study the behavior of the volume of the dam by establishing a demand associated with a reliability of operation.

* Degree Thesis

** Faculty of Engineering Physics- Mechanics. School of Civil Engineering. Directed by Andrés Almeyda Ortíz. Engineer

INTRODUCCIÓN

El aumento de la población es inminente con el paso de los años, incrementando la preocupación de las entidades gubernamentales por brindar un servicio eficiente de agua potable. Una de las obras de ingeniería que posibilitan el aprovechamiento del recurso hídrico es un embalse, ya que permite acumular el flujo de un río aprovechando el exceso del recurso en épocas de lluvias para compensarlo en épocas de estiaje.

El embalse de Bucaramanga tiene la capacidad de almacenar el agua proveniente del río Tona, y para lograr una óptima eficiencia de este sistema hidráulico es necesario realizar un análisis de las variables hidrológicas que definen la oferta hídrica del embalse. Uno de los métodos útiles para llevar a cabo una valoración de la oferta es el cálculo del balance hídrico [1], ya que hace posible una evaluación cuantitativa del recurso, donde el conocimiento de su ecuación es fundamental para conseguir un uso racional de la oferta hídrica en el tiempo, así como para mejorar su control y redistribución [2]. La principal dificultad que se presenta al momento de realizar estudios de balance hídrico es la falta de información de calidad en la zona de estudio, ya sea por pocas estaciones climatológicas o por inexistencia de las mismas, lo cual hace interesante e importante elaborar planes de manejo del recurso hídrico [3].

En este trabajo se elaboró e implementó un modelo de balance hídrico para el embalse Bucaramanga entre los años 1990 a 2000 con el fin de estudiar el comportamiento del embalse frente a diferentes escenarios hipotéticos de operación para obtener los posibles caudales de abastecimiento a la población y el número máximo de días de los procesos de llenado y vaciado del embalse en los periodos con presencia de fenómenos ENSO. Para la elaboración del modelo del

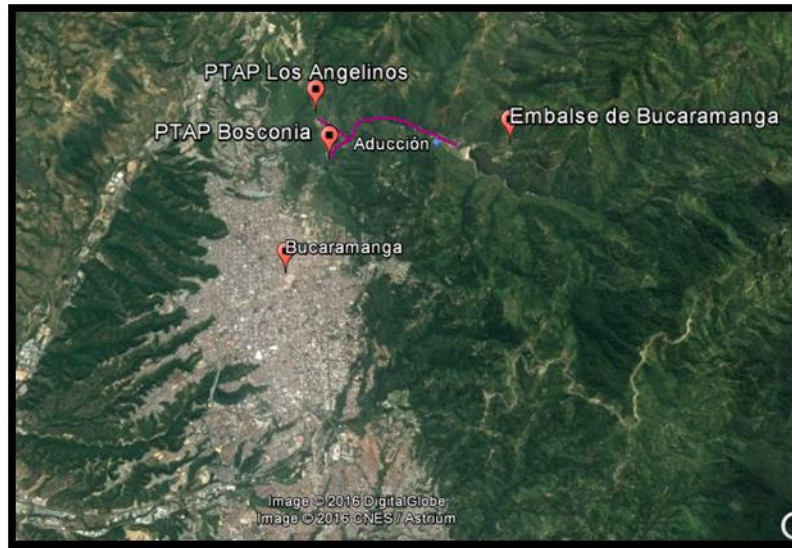
balance hídrico se realizó un análisis de calidad y llenado de los datos diarios disponibles de las estaciones seleccionadas.

1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El proyecto Regulación Embalse de Bucaramanga se encuentra ubicado en el punto de cierre de la cuenca del río Tona en el departamento de Santander, a 12 km al norte de la ciudad de Bucaramanga, Colombia. El río Tona tiene una longitud de 28,26 km desde su nacimiento al nordeste de la cabecera municipal de Tona hasta la desembocadura en el río Suratá, siendo su área total de drenaje de 193,8 km² y sus afluentes principales las quebradas Golondrinas, Arnania y Carrizal [4]. La climatología en esta zona se caracteriza por tener temperatura media de 23°C, humedad relativa promedio de 82,5%, evaporación anual promedio de 1.288 mm y una precipitación media multianual de 1.317 mm, siendo febrero el mes más seco y octubre el más lluvioso. [5]

El embalse, que inició su construcción el 24 de septiembre de 2010 y su primer llenado el 28 de agosto de 2015, tiene una longitud de 2,1 Km, una presa de tipo enrocado con cara de concreto, un volumen total de 17,6 Hm³ con un volumen muerto de 3,0 Hm³ y un volumen útil de 14,6 Hm³ [5]. Su estructura de captación tiene tres niveles de toma de agua a las elevaciones 836,51 msnm, 851,46 msnm y 866,41 msnm, cada una con capacidad para captar la totalidad del caudal de diseño de 3,2 m³/s, del cual se utilizaría un caudal 1,20 m³/s para alimentar la Planta de Tratamiento Los Angelinos y ocasionalmente, en situaciones de emergencia sanitaria, un caudal de 2,0 m³/s adicional para la Planta de Tratamiento Bosconia [6] (Figura 1).

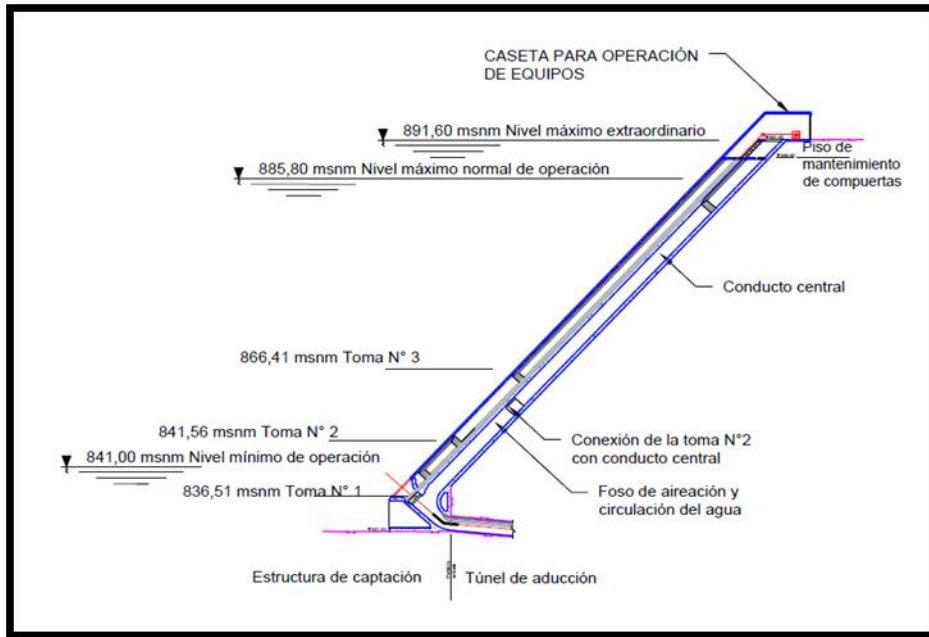
Figura 1. Imagen satelital de la localización del embalse de Bucaramanga.



Fuente. Google Earth

La altura en el eje de la presa es de 103,6 m, la elevación del lecho del río en su eje es de 785 msnm y la elevación mínima de operación es de 841 msnm, ya que en este nivel la compuerta más baja de captación está completamente sumergida haciendo que la tubería trabaje a presión. El nivel máximo de operación normal es de 885,8 msnm (cota del vertedero de excesos) y el nivel máximo de operación extraordinario es de 891,6 msnm (cota máxima sobre el labio del vertedero) (Figura 2), donde el área del espejo de agua es 51,5 Ha y 53,9 Ha, respectivamente [5].

Figura 2. Captación y Niveles de operación del embalse Bucaramanga

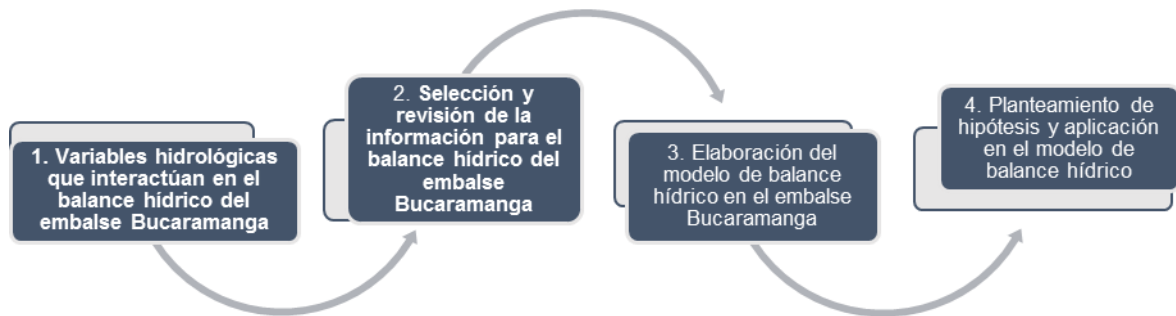


Fuente. Tomado de plano N° amb – ADC- CAP- EST-S-030

2. METODOLOGÍA

El objetivo de este proyecto fue implementar un modelo del balance hídrico a escala diaria del embalse de Bucaramanga para facilitar la toma de decisiones operacionales en épocas de estiaje o de fuertes lluvias a partir de la información disponible, y para esto, se establecieron y se desarrollaron una serie de pasos secuenciales (Figura 3) que serán explicados en éste numeral.

Figura 3. Metodología para el desarrollo del proyecto



2.1 VARIABLES HIDROLÓGICAS QUE INTERACTÚAN EN EL BALANCE HÍDRICO DEL EMBALSE BUCARAMANGA

El estudio del balance hídrico en hidrología se basa en la aplicación del principio de conservación de masas, también conocido como ecuación de continuidad y establece que la variación del volumen de agua almacenada está condicionada por la diferencia entre las entradas y salidas de agua [2]. Para realizar el balance hídrico del embalse de Bucaramanga, las variables hidrológicas de entrada son el escurrimiento superficial del río Tona y la precipitación sobre el embalse, y las variables hidrológicas de salida son la evaporación sobre el embalse, la infiltración

a través de la presa y el caudal ecológico establecido para el río Tona (Figura 4). No se consideran las infiltraciones a través del embalse.

Figura 4. Ilustración del Balance hídrico en el Embalse de Bucaramanga



Fuente. Adaptado de fotografía de Carlos Oswaldo Cortés

Se considera que el aporte más significativo en el llenado y operación del embalse de Bucaramanga es el escurrimiento superficial, y no se consideró el escurrimiento subsuperficial y subterráneo debido a que no están dentro del objeto de estudio [7]. Además, también se considera para el balance hídrico el volumen aportado por la precipitación sobre el área del embalse, teniendo en cuenta que el régimen de precipitación y escorrentía superficial es típicamente bimodal [8] y se produce por el paso de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), lo cual se evidencia en dos temporadas intensas y dos secas a nivel interanual [4].

También se tuvo en cuenta la evaporación sobre el embalse ya que hace parte importante del ciclo hidrológico y su estimación en los proyectos de ingeniería, como en un embalse, sirve para la planificación de los recursos hídricos a una escala temporal [9], y de igual forma se consideró la infiltración a través de la presa puesto que el agua almacenada en el embalse penetra desde la superficie

del terreno hacia el suelo y las paredes de la presa [10]. Su magnitud depende de factores como materiales y forma de construcción de la estructura, el tipo de cimentación, la geología de la zona, la condición de la superficie, las propiedades del suelo y el nivel de agua del embalse.

Finalmente, en el balance hídrico se tuvo en cuenta el caudal ecológico porque es la cantidad y calidad de los recursos hídricos necesarios para mantener en buenas condiciones el hábitat del río y su entorno aguas abajo de la presa [11]. La descarga de caudal que se entrega al río Tona cuando el embalse está en el nivel máximo extraordinario a la elevación 891,60 msnm es de 66 l/s y cuando el embalse está en el nivel mínimo a la elevación 841 msnm es de 50 l/s. Estos valores de caudal fueron definidos por la Corporación de Defensa de la Meseta de Bucaramanga, CDMB [6] [4].

2.2 SELECCIÓN Y REVISIÓN DE LA INFORMACIÓN PARA REALIZAR EL BALANCE HÍDRICO DEL EMBALSE BUCARAMANGA

Se tuvo en cuenta las estaciones climatológicas Universidad Industrial de Santander (UIS) y del embalse, las estaciones pluviométricas Brasil, La Plazuela y La Floresta, las estaciones limnimétricas Puente Tona, Arnanía, Carrizal y Golondrinas, y la estación automática Cola del embalse, las cuales se encuentran en inmediaciones al embalse Bucaramanga (Figura 5). Las anteriores estaciones se describen en la Tabla 1.

Para revisar la calidad de los datos disponibles que van a ser utilizados en el balance hídrico se aplican los conceptos de hidrología (el ciclo anual de la lluvia y fenómenos ENSO), así como el cálculo de porcentaje de datos faltantes. A continuación, se presenta el proceso desarrollado para cada una de las variables.

Tabla 1. Estaciones estudiadas.

TIPO DE ESTACIÓN	ESTACIÓN	ENTIDAD	COORDENADAS		ELEVACIÓN (m)	PERIODO DE REGISTRO
			NORTE	OESTE		
CP	UIS	IDEAM	1.280.325,06	1.108.074,47	1018	01/01/1969 – 31/03/2003
PM	Brasil	amb	1.282.860,24	1.114.643,13	1900	01/06/1982 - 31/08/2016
PM	La Plazuela	amb	1.283.173,25	1.118.719,24	2200	01/01/1983 - 31/07/1998
PM	La Floresta	IDEAM	1.278.950,62	1.105.152,31	925	01/01/1990 - 31/12/2000
LM	Puente Tona	amb	1.283.125,18	1.108.736,61	800	02/10/1984 - 29/08/2015
LM	Armania	amb	1.287.935,47	1.117.298,94	1340	02/10/1984 - 29/08/2015
LM	Carrizal	amb	1.285.306,08	1.117.325,40	1310	01/01/1990 - 31/12/2003
LM	Golondrinas	amb	1.285.030,83	1.116.496,66	1310	01/01/1990 - 31/12/2004
CP	Estación Climatológica Total	amb	7°09'08,77"	73°04'31,86"	1201	01/01/2014 - 30/09/2016
A	Cola del embalse	amb	7°08'55,91"	73°04'21,78"	967	13/08/2014 - 21/09/2016

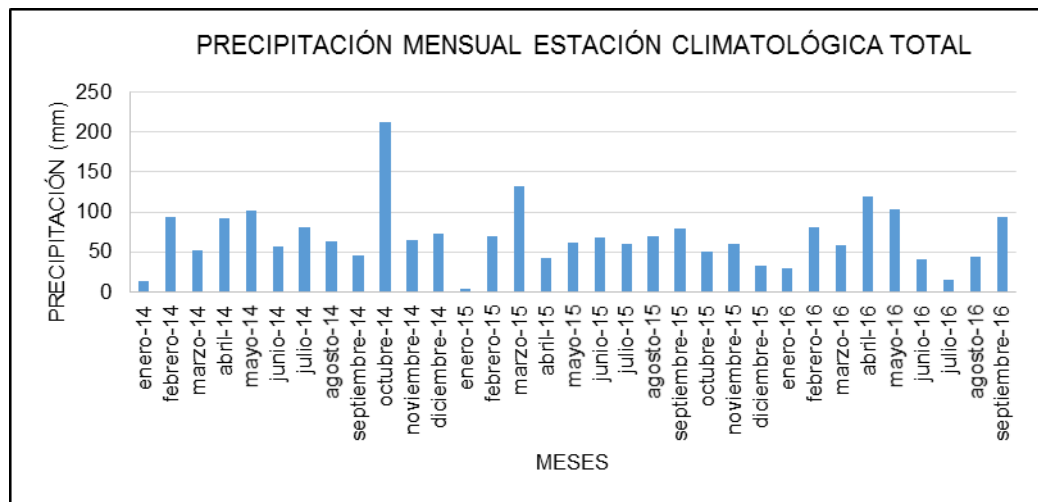
*PM= Estación Pluviométrica, CP= Estación climatológica principal, LM= Estación Limnimétrica y A= Automática de niveles

Fuente. Adaptado de amb. "Memorando técnico 03 - Hidrología, clima y sedimentos del embalse 2128-MT-03-R3", Bucaramanga, mayo 2012

2.2.1 Precipitación. Como se observa en la Tabla 1, se cuenta con cinco estaciones de medición de precipitación estación Brasil, La Plazuela, La floresta y UIS, que tienen un registro entre 10 y 34 años, y la estación climatológica del embalse que cuenta con un registro de casi dos años (2014-2016).

Para analizar la información registrada de precipitación en la estación Climatológica Total del embalse 2014-2016 (Figura 6) no se puede tomar como parámetro de referencia el comportamiento bimodal de las lluvias influenciado por el paso de la ZCIT en Colombia [12], ya que es necesario tener mínimo 10 años de registro [13] y esta estación solo tiene 2 años. Por lo tanto, no se incluyó esta estación.

Figura 6. Precipitación registrada por la estación Climatológica Total del Embalse



Se revisó la información de los años 1990 a 2000 de las estaciones más cercanas al embalse, estación Brasil y estación UIS (ver figura 5), seleccionando la última para ser utilizada en el balance hídrico ya que es la estación con menor porcentaje de datos faltantes (Anexo A) y también porque fue utilizada en los estudios de

hidrología para los diseños del embalse por ser representativa ante sus características similares de altitud [4].

Se realizó el gráfico de precipitación media mensual multianual para 34 años de registro (1969-2002) de la estación UIS y se tomó como parámetro de referencia el comportamiento bimodal de las lluvias [14] obteniendo que las mediciones registradas se aproximan a la tendencia bimodal, aunque presentan un ascenso en el mes de julio (Figura 7). La estación se acepta para ser utilizada en el balance hídrico del embalse de Bucaramanga.

La estación UIS en el periodo de 1990 a 2000 tiene un porcentaje mensual de datos faltantes del 6,1% para un total de 13 meses de datos faltantes entre junio de 1993 a junio de 1994 (Anexo A y B), y para su llenado diario se implementó el método de correlación diaria y el método de razones promedio [15] [7]. El primero no arrojó los resultados esperados ya que los valores de coeficiente de correlación de Pearson fueron menores a 0,8 (*UNESCO-ROSTLAC, 1982; Pizarro et al, 1993; 2009*), mientras que el segundo fue el que mejor se ajustó debido a que involucra los valores de precipitación de tres estaciones cercanas.

Para aplicar el método de razones promedio fueron utilizadas la estación Brasil – amb, estación La Plazuela- amb y la estación La Floresta- IDEAM (ver figura 7) las cuales son las más cercanas a la estación UIS – IDEAM (ver figura 5), así:

$$h_{px} = \frac{1}{n} \left[\frac{P_x}{P_1} h_{p1} + \frac{P_x}{P_2} h_{p2} + \dots + \frac{P_x}{P_n} h_{pn} \right] \quad (1)$$

Donde:

h_{pi}

= altura de precipitación registrada el día en cuestión en la estación auxiliar *i*.

h_{px} = altura de precipitación faltante en la estación en estudio.

P_i = precipitación media anual en la estación auxiliar i .

P_x = precipitación media anual en la estación en estudio.

n = número de estaciones auxiliares.

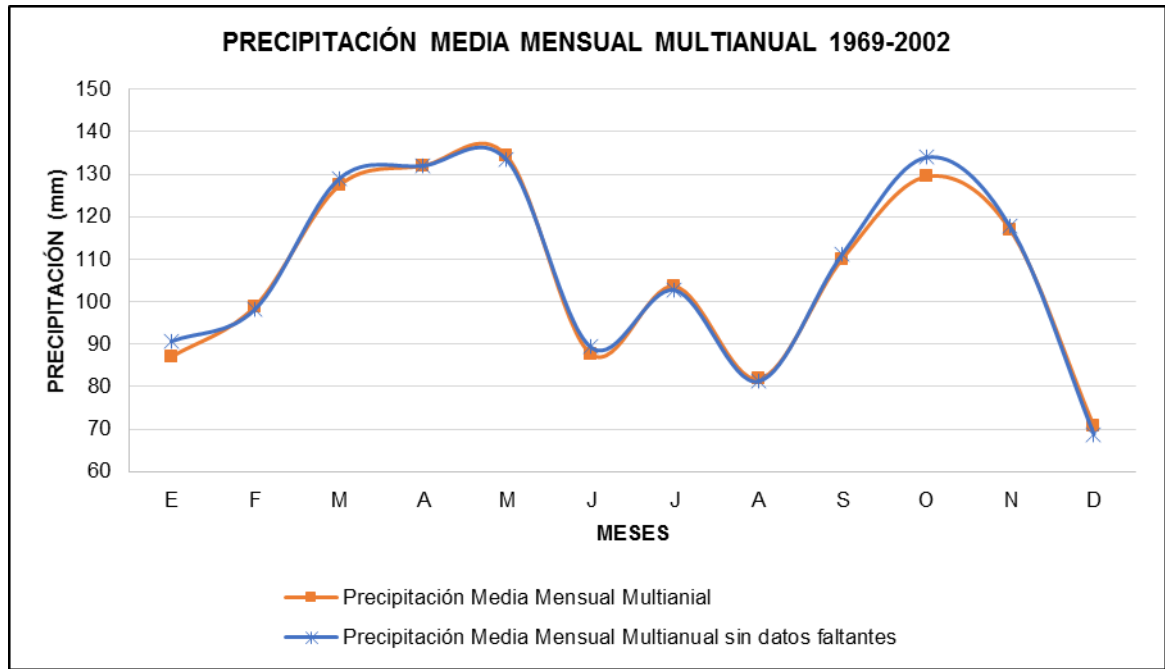
Este procedimiento es recomendado para zonas montañosas [15] y cuando la precipitación media anual difiere más del 10% de cualquiera de las estaciones circundantes [7].

Tabla 2. Precipitación media anual de las estaciones UIS, Brasil, Plazuela y Floresta.

	Precipitación media Anual (mm)	% Diferencia respecto a la estación UIS
ESTACIÓN UIS IDEAM	1180,7	
ESTACIÓN BRASIL	1234,9	6,1
ESTACIÓN PLAZUELA	1142,6	11,8
ESTACIÓN FLORESTA	1213,9	2,7

Aunque la precipitación media anual de las estaciones estudiadas no difiere más del 10% (Tabla 2) se utilizó el método de razones promedio ya que no tiene limitante de aplicación, pero se aclara que la incertidumbre de la calidad de la precipitación calculada aumenta. Para comprobar que el llenado de datos no presentara un comportamiento inusual se comparó la precipitación media mensual multianual calculada con la precipitación media mensual multianual inicial (con datos faltantes), obteniendo resultados favorables ya que se ajusta a la tendencia de la precipitación media mensual multianual inicial (Figura 7).

Figura 7. Precipitación media mensual multianual con y sin llenado de datos de la estación UIS (IDEAM)



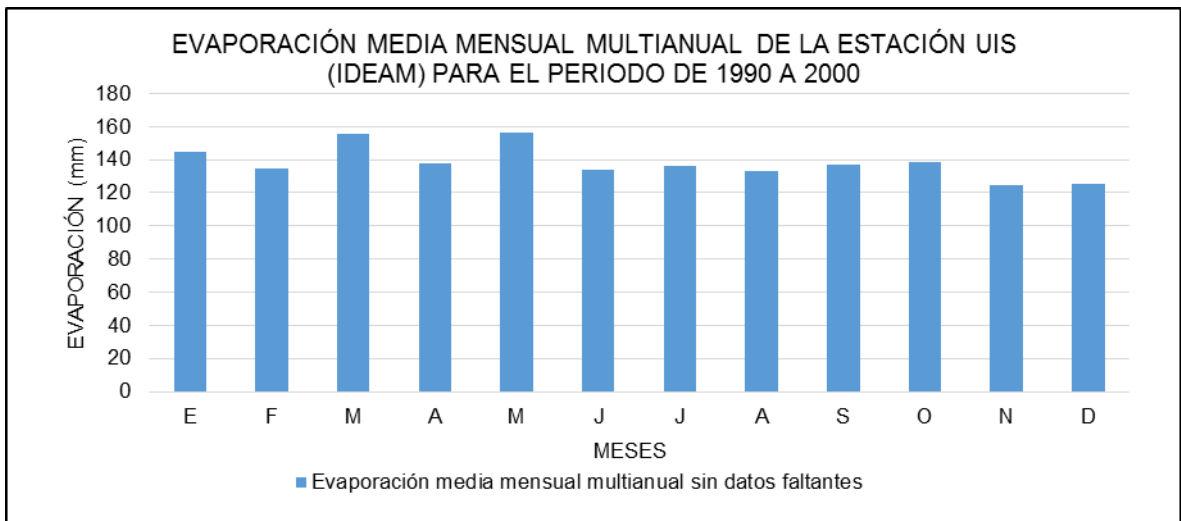
2.2.2 Evaporación de Tanque. Para estimar la evaporación en el balance hídrico, se cuenta con la estación climatología total del embalse (amb) y la estación UIS (IDEAM) (ver tabla 1). Al revisar los registros de la estación climatológica del embalse (amb) se encontró que los datos no habían sido procesados ni validados, y al realizar una inspección al sitio se observó que no hay un protocolo de medición establecido, que la estación no ha tenido el mantenimiento requerido y que está rodeada de maleza que la cubre del sol afectando la medición (Figura 8), por lo que los datos de evaporación provenientes de ésta estación no fueron utilizados.

Figura 8. Tanque clase A Estación Climatológica



Se utilizó la información de evaporación la estación UIS por ser la única estación cercana al embalse con datos de evaporación disponible. Los datos de evaporación de la estación UIS presentan un porcentaje de datos faltantes diarios del 32,1 % en el periodo de 1990 a 2000, los cuales se llenaron siguiendo el proceso mostrado en el anexo C. La evaporación presenta el comportamiento mostrado en la figura 9.

Figura 9. Evaporación media mensual multianual sin datos faltantes de la estación UIS (IDEAM) para el periodo 1990 a 2000.

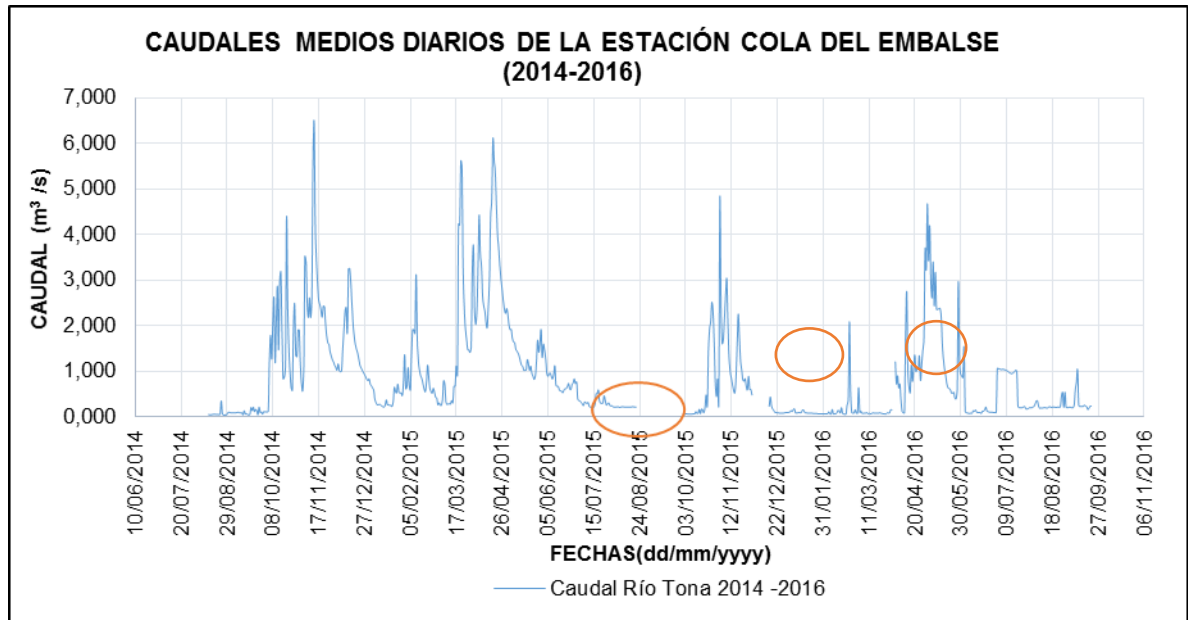


2.2.3 Escurrimiento superficial o caudales del río Tona. Los caudales diarios del río Tona son medidos por la estación Cola del embalse (amb), con registro de medición de 2 años desde 2014 a 2016 (Figura 10). La estación puente Tona (amb) cuenta con un registro de caudales diarios de 31 años desde 1984 hasta 2015.

Inicialmente se revisó la información registrada por la estación Cola del embalse entre 2014 y 2016. Ésta estación cuenta con un porcentaje de datos faltantes diario del 7,3% en 2 años de medición y únicamente tiene registros de caudales mínimos debido a que se presentó el fenómeno del Niño desde noviembre de 2014 hasta mayo de 2016 (Anexo D). Por lo tanto, los datos provenientes de la estación Cola del embalse no se utilizaron en el modelo ya que no se puede simular el llenado del embalse debido al alto porcentaje de datos faltantes³ y porque se debe disponer de más años de registro que involucren los fenómenos ENSO [16] para conocer el comportamiento de la estación frente a caudales medios y altos.

³ La estación Cola del embalse tiene datos faltantes desde el 22 de agosto de 2015.

Figura 10. Caudales medios diarios del río Tona de la estación del embalse

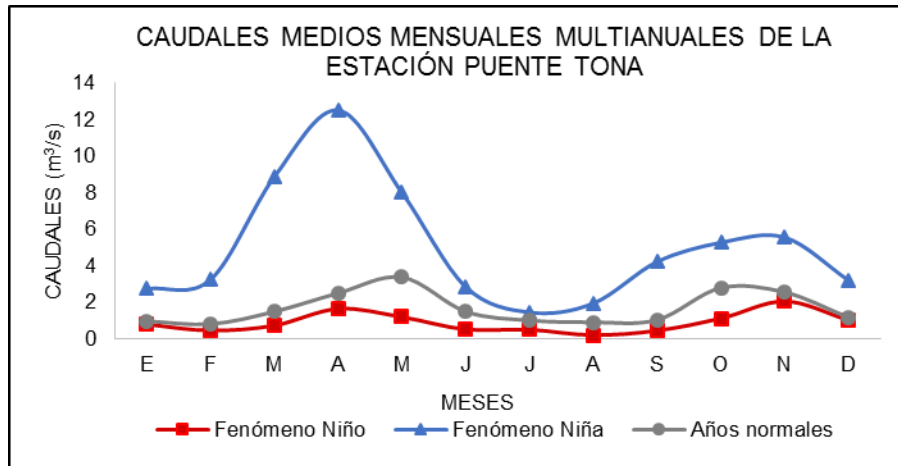


**Círculos rojos corresponden a los datos faltantes*

Se revisó el comportamiento de los caudales medios mensuales multianuales registrados por la estación Puente Tona durante el periodo de 1984 a 2014. Se graficaron los caudales medios mensuales multianuales de los años con fenómeno de El Niño, fenómeno de La Niña y años normales⁴ [17] (Figura 11) (Anexo D) obteniendo un comportamiento bimodal de los caudales mínimos, altos y medios, respectivamente. Por lo tanto, la información proporcionada por la estación Puente Tona se utilizó en el modelo de balance hídrico del embalse Bucaramanga.

⁴ Normales: Años sin presencia del fenómeno ENSO

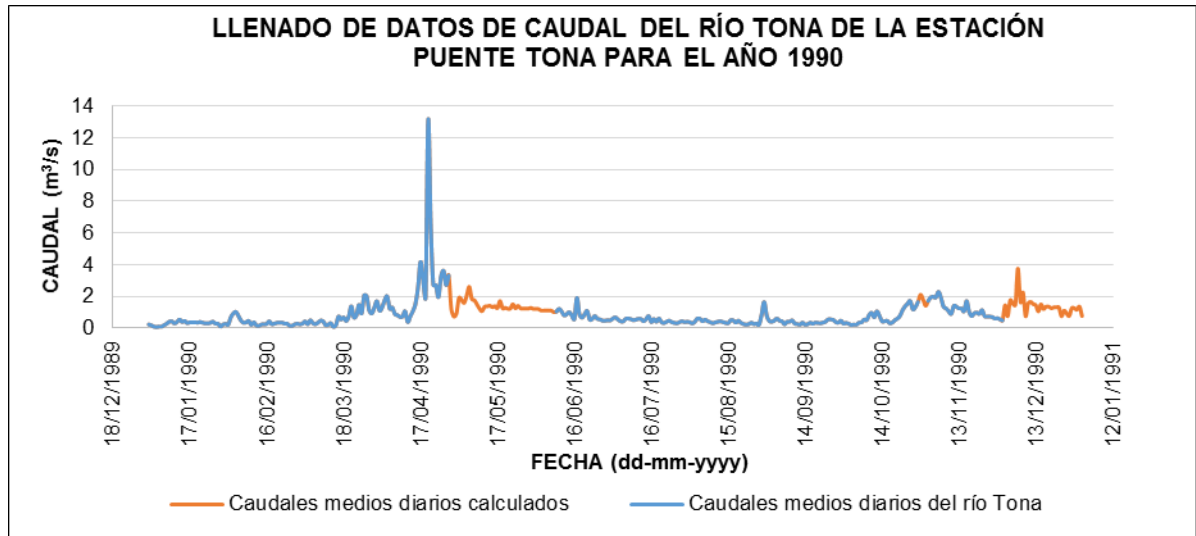
Figura 11. Caudales medios mensuales multianuales Río Tona del periodo 1984 a 2014



Se encontró que la estación puente Tona en el periodo de 1990 a 2000 tiene un porcentaje de datos faltantes diario del 8,2%, completándose con los caudales provenientes de las estaciones limnimétricas Arnania, Carrizal y Golondrinas ubicadas en los afluentes que forman el río Tona. Se graficó la suma de los caudales medios diarios de las tres estaciones (Arnania, Carrizal y Golondrinas) y se comparó con el caudal medio diario del río Tona para observar si tenían un comportamiento similar (Anexo E), encontrándose que en promedio el caudal del río Tona es 0,595 m³/s menor a la suma de los caudales de los afluentes Arnania, Carrizal y Golondrinas. Esta diferencia se da porque después de los tres afluentes se encuentran la captación a filo de agua del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.

Los datos faltantes de caudales medios diarios del río Tona se completaron restándole 0,595 m³/s a la suma de los caudales de los afluentes Arnania, Carrizal y Golondrinas. Finalmente se observó que en los días donde hay datos faltantes, los caudales calculados siguen la tendencia de los caudales de la estación Puente Tona (Figura 12).

Figura 12. Ejemplo gráfico de llenado de datos de caudal del río Tona (Estación puente Tona) para el año 1990



2.3 ELABORACIÓN DEL MODELO DE BALANCE HÍDRICO EN EL EMBALSE BUCARAMANGA

Para realizar la modelación del balance hídrico en el embalse de Bucaramanga se aplicó la ecuación de continuidad, donde las entradas y salidas son variables hidrológicas medibles que pueden expresarse como funciones del tiempo $E(t)$ y $S(t)$ respectivamente, en donde t pertenece al rango de tiempo en consideración. Para el modelo de simulación el intervalo de tiempo es diario porque permite visualizar convenientemente el nivel del embalse a esa escala.

Un embalse tiene su almacenamiento (V) relacionado con un caudal de salida (S) y una tasa de cambio del almacenamiento con respecto al tiempo (dV/dt) que es igual a la diferencia entre la entrada y la salida como se muestra en la siguiente expresión [10]:

$$E(t) - S(t) = \frac{dV}{dt} \quad (2)$$

Las variables hidrológicas de entrada son el caudal aportado por el río Tona ($Q_{esc}(t)$), la precipitación sobre la lámina de agua del embalse ($P(t)$), y las variables de salida son la evaporación sobre la lámina de agua ($E(t)$), los caudales que se infiltran a través del cuerpo de la presa ($Q_{inf}(t)$) y el caudal demandado por la población ($Q_{dem}(t)$). Además, las entradas por agua subterránea no se tendrán en cuenta, por lo que la ecuación de la modelo expresada en términos de las variables hidrológicas es:

$$Q_{esc}(t) + P(t) - E(t) - Q_{inf}(t) - Q_{dem}(t) = \frac{dV}{dt} \quad (3)$$

El modelo del balance hídrico del embalse Bucaramanga se realizó en el software Excel y fue diseñado para introducir la información de los años 1990 a 2000 de las variables hidrológicas, se aplicó la ecuación de continuidad para obtener la variación del volumen y del nivel del embalse diariamente. Para la precipitación y la evaporación se utilizó la estación UIS del IDEAM, para los caudales del río Tona se tomó la información de la estación Puente Tona del amb y para las infiltraciones a través de la presa se realizaron curvas de Infiltración vs Nivel del embalse (Anexo F) con la información recogida en campo mediante los vertederos triangulares (Tabla 3) instalados por el amb en sitios estratégicos (Figura 13) del cuerpo de la presa.

Tabla 3. Vertederos de medición de infiltraciones

TIPO DE ESTACIÓN	ESTACIÓN	ENTIDAD	COORDENADAS		ELEVACIÓN (m)	PERIODO DE REGISTRO
			NORTE	OESTE		
V	Vertedero de Excesos	amb	7°09'23.20'	73°05'31.97"	857	28/08/2015 - 01/11/2016
V	Vertedero Aforador Túnel de Desvío	amb	7°09'20.25'	73°05'31.51"	827	28/08/2015 - 01/11/2016
V	Vertedero Aforador Principal Presa	amb	7°09'19.92'	73°05'31.00"	825	28/08/2015 - 01/11/2016
V	Vertedero Aforador Túnel de Aducción	amb	7°09'18.53'	73°05'31.77"	844	28/08/2015 - 01/11/2016

Nota. V=volumétrico.

Figura 13. Vertederos triangulares instalados para medición de infiltraciones



Fuente. Adaptado de fotografía de Carlos Oswaldo Cortés

Además, se utilizaron las curvas Nivel del embalse Vs Área (Anexo G), Nivel del embalse Vs Volumen (Anexo H) y la Curva de gasto del vertedero de excesos morning glory (Anexo I) suministradas por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. La programación del modelo del balance hídrico en el embalse Bucaramanga se explica en detalle en el Anexo O.

2.4 PLANTEAMIENTO DE HIPÓTESIS Y APLICACIÓN EN EL MODELO DE BALANCE HÍDRICO

El planteamiento de hipótesis permitió tener una idea general de las situaciones relevantes que se pueden presentar en el embalse durante un determinado tiempo, y tener conocimiento del comportamiento de embalse frente a las variaciones climáticas, buscando siempre un abastecimiento constante del recurso para la población. Para la implementación del modelo de balance hídrico, se seleccionó el periodo de tiempo comprendido entre los años 1990 a 2000 por ser el más confiable debido a que se presentó la menor cantidad de datos faltantes. Para esto se hicieron los siguientes planteamientos:

- Planteamiento N°1: Variar los caudales de demanda cuando el embalse se encuentra en el nivel máximo (cota 885,8 msnm) y en el nivel mínimo (cota 841msnm) de operación, durante el periodo comprendido entre 1990 a 2000 y años con fenómenos ENSO.

Objetivo del Planteamiento N° 1: Hallar la demanda óptima para que el embalse no llegue a su nivel mínimo de operación, obtener los valores de confiabilidad correspondientes (*Días de operación / Total de días*) frente a diferentes valores de abastecimiento a la población.

- Planteamiento N°2: En caso de que se presente una emergencia sanitaria el embalse Bucaramanga suministra una demanda de 2,0 m³/s a la PTAP Bosconia, adicional a la demanda con que se abastece a la PTAP Los Angelinos.

Objetivo del planteamiento N°2: Obtener los valores de confiabilidad del sistema y el número de días que puede operar las plantas simultáneamente en los años donde se presenta fenómenos ENSO en el periodo de 1990 a 2000, partiendo de la suposición de que el embalse está en su nivel máximo de operación. Cabe resaltar que si el embalse se encuentra en el nivel 857 msnm operará únicamente con la demanda a la PTAP Los Angelinos, ya que por debajo de esta cota la tubería no tiene capacidad hidráulica para transportar $2 \text{ m}^3/\text{s}$.

- Planteamiento N°3: Simular el comportamiento del llenado del embalse en el inicio de la operación partiendo del nivel inicial 798 msnm donde el volumen es cero.

Objetivo del planteamiento N° 3: Analizar el llenado del embalse sin suministrar caudal de abastecimiento a la población en presencia del fenómeno de El Niño para comparar con la curva real de llenado obtenida en el periodo de 2015 a 2016 (amb).

- Planteamiento N°4: Realizar la operación de vaciado del embalse con un caudal máximo de $11 \text{ m}^3/\text{s}$ cuando no opera la PTAP Los Angelinos, y de $9,8 \text{ m}^3/\text{s}$ cuando sí lo hace, en años con fenómenos ENSO en el periodo de 1990 a 2000. Cabe resaltar que el vaciado del embalse debe hacerse con especial cuidado puesto que en caso de que se haga rápidamente y el nivel supere una tasa diaria de vaciado de 4 m/día podrían ocasionarse deformaciones inadmisibles del cuerpo de presa, daños en la cara de concreto de la presa, daños en estructuras anexas a la presa o generarse procesos de inestabilidad de las laderas en la zona del embalse [18] [6].

Objetivo del Planteamiento N°4: Calcular el tiempo que demora en realizar el vaciado en años con fenómenos ENSO en el periodo 1990 a 2000, y chequear que la velocidad de descenso de nivel no exceda la tasa de 4 m/día .

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 PLANTEAMIENTO N°1

En el estudio del planteamiento N° 1 para el periodo de 1990 a 2000 con un total de 4018 días, se obtuvo los valores de demanda y los días de no operación (Tabla 4) para diferentes confiabilidades del sistema, considerándose no operación cuando el nivel del embalse está por debajo de la cota 841msnm.

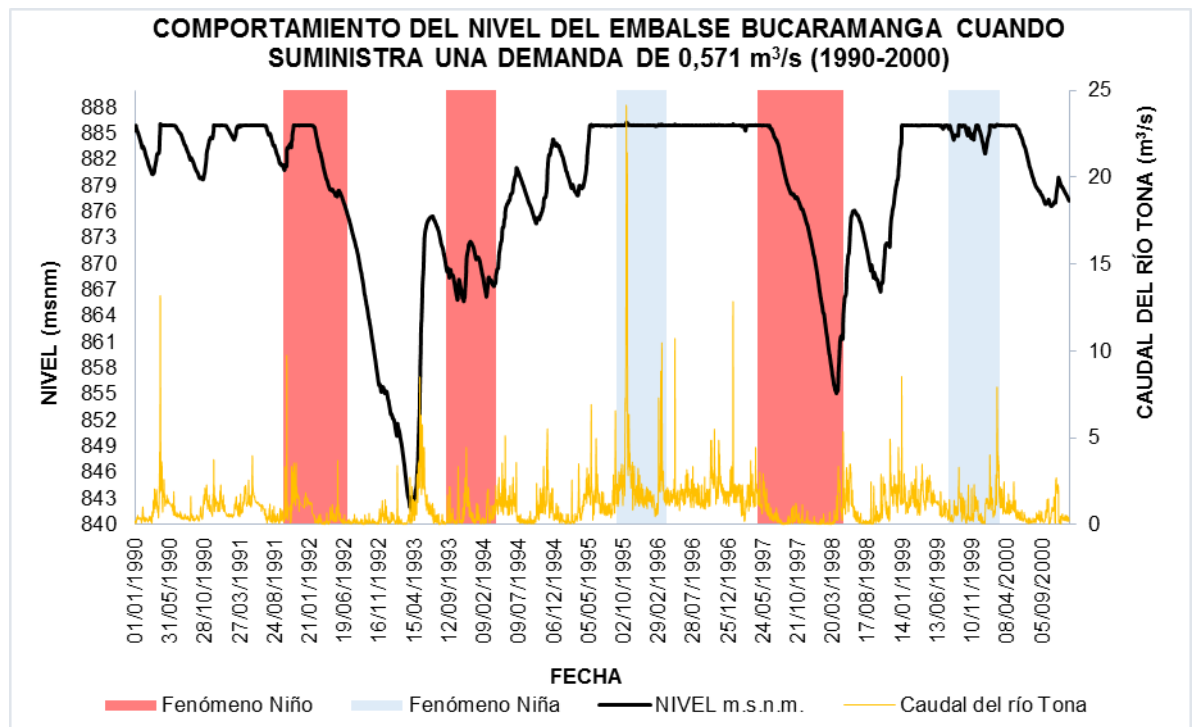
Tabla 4. Caudal demandado por la población para el periodo de 1990 a 2000 con su respectiva confiabilidad y días de no operación del embalse cuando inicia en el nivel máximo de operación.

CONFIABILIDAD (%)	CAUDAL DE DEMANDA (m ³ /s)	DÍAS DE NO OPERACIÓN DEL EMBALSE
100	0,571	0
99	0,638	40
98	0,714	80
97	0,763	120
96	0,804	160
95	0,828	199
90	0,931	401
85	1,023	602
80	1,118	802
76,3	1,2	952

**Confiabilidad = (Días de operación del embalse / Total de días),*

En el comportamiento del nivel del embalse con una confiabilidad del 100% (Figura 14) se puede observar que, aunque existieron fenómenos de El niño entre 1991 a 1992 el embalse continúa bajando su nivel debido a la poca entrada de caudal entre 1992 y 1993, por lo que éste periodo también debe ser estudiado variando el caudal de demanda. Además, si se envía un caudal de demanda de $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ ⁵ la confiabilidad disminuye a 76,3 % con 952 días de no operación del embalse (Anexo J).

Figura 14. Comportamiento del nivel del embalse cuando suministra una demanda de $0,571 \text{ m}^3/\text{s}$ confiabilidad de 100% en el periodo de 1990 a 2000.



⁵ Caudal $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$: Caudal para el que fue diseñadas las tuberías de la red para la PTAP Bosconia.

Para el fenómeno del niño presentado en los años 1991 a 1993 y 1997 a 1998 se hizo variación del caudal demandado, y se obtuvo que para una confiabilidad del 100% el caudal de demanda que puede suministrar el embalse es de 0,573 m³/s y 0,712 m³/s, respectivamente (Tabla 5), garantizando el funcionamiento del embalse durante todo el periodo. El comportamiento del embalse se muestra en el Anexo K.

Tabla 5. Caudales de demanda en época del fenómeno de El Niño (1991-1993 y 1997-1998) con su respectiva confiabilidad y días de no operación del embalse Bucaramanga.

CONFIABILIDAD (%)	CAUDAL DE DEMANDA (m ³ /s)		DÍAS DE NO OPERACIÓN DEL EMBALSE	
	1991-1993	1997-1998	1991-1993	1997-1998
100	0,573	0,71	0	0
99	0,59	0,731	10	7
98	0,61	0,75	23	14
97	0,63	0,774	34	22
96	0,65	0,795	46	29
95	0,67	0,812	58	37
90	0,78	0,887	108	73
85	0,91	0,975	163	109
80	0,999	1,099	225	150
75,2	1,07	1,2	274	181
70	1,15	1,35	327	219
67,5	1,2	1,399	356	230

Se simuló el fenómeno de La Niña en los años 1999 a 2000 (550 días) analizando la confiabilidad de operación del embalse del 100% y se encontró que el embalse puede abastecer un caudal de demanda diario máximo de 0,89 m³/s a la PTAP Los Angelinos. Para abastecer un caudal de demanda de 1,2 m³/s el embalse no operaría 79 de 550 días (Anexo L).

En el escenario en que el embalse está inicialmente en el nivel mínimo de operación 841 msnm, en el periodo entre 1990 a 2000 se encontró que las confiabilidades de operación disminuyen con las demandas establecidas en la tabla 4 (ver Tabla 6). Cabe recordar que la confiabilidad de operación es escogida por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga según la necesidad operativa.

Tabla 6. Confiabilidades de operación y días de no operación del embalse cuando el nivel inicial del embalse es 841 msnm en el periodo 1990 a 2000.

CONFIABILIDAD (%)	CAUDAL DE DEMANDA (m ³ /s)	DÍAS DE NO OPERACIÓN DEL EMBALSE
99,1	0,57	37
98,0	0,64	82
96,8	0,71	130
94,9	0,76	204
93,4	0,80	264
91,8	0,83	328
86,8	0,93	529
81,8	1,02	730
76,6	1,12	939
73,0	1,20	1083

3.2 PLANTEAMIENTO N° 2

A las demandas calculadas en el planteamiento N° 1 se adicionó la demanda ocasional de 2 m³/s suministrada a la PTAP Bosconia, obteniendo el número días que se puede realizar esta operación en el periodo de 1990 a 2000 y en los años con presencia del fenómeno ENSO. Para el fenómeno de La Niña, por la abundancia de oferta hídrica, solo se realizó el procedimiento para demandas obtenidas en el planteamiento N° 1 de 0,89 y 1,2 m³/s (tabla 7). Además, en el

anexo M se muestran las confiabilidades de operación del sistema según la demanda.

Tabla 7. Total de días que el embalse puede abastecer un caudal de demanda de 2 m³/s a la PTAP Bosconia en el periodo de 1990 a 2000 y en los años con fenómeno ENSO.

PERIODO	FENÓMENO	CAUDAL DE DEMANDA (m ³ /s)	TOTAL DE DÍAS ACUMULADOS DE OPERACIÓN A LA PLANTA BOSCONIA
1990-2000	ENSO y Normal	2,57	981
		2,64	883
		2,71	785
		2,76	724
		2,8	678
		2,83	651
		2,93	547
		3,02	478
		2,12	413
		3,2	365
1991-1993	F. Niño	2,57	177
		2,59	173
		2,6	170
		2,63	164
		2,65	159
		2,78	129
		2,91	102
		3	89
		3,07	82
		3,15	74
1997-1998	F. Niño	2,71	162
		2,73	161
		2,75	157

PERIODO	FENÓMENO	CAUDAL DE DEMANDA (m³/s)	TOTAL DE DÍAS ACUMULADOS DE OPERACIÓN A LA PLANTA BOSCONIA
		2,77	154
		2,8	151
		2,81	149
		2,89	137
		2,98	124
		3,1	110
		3,2	102
1997-1998	F. Niña	2,89	131
		3,2	93

3.3 PLANTEAMIENTO N° 3

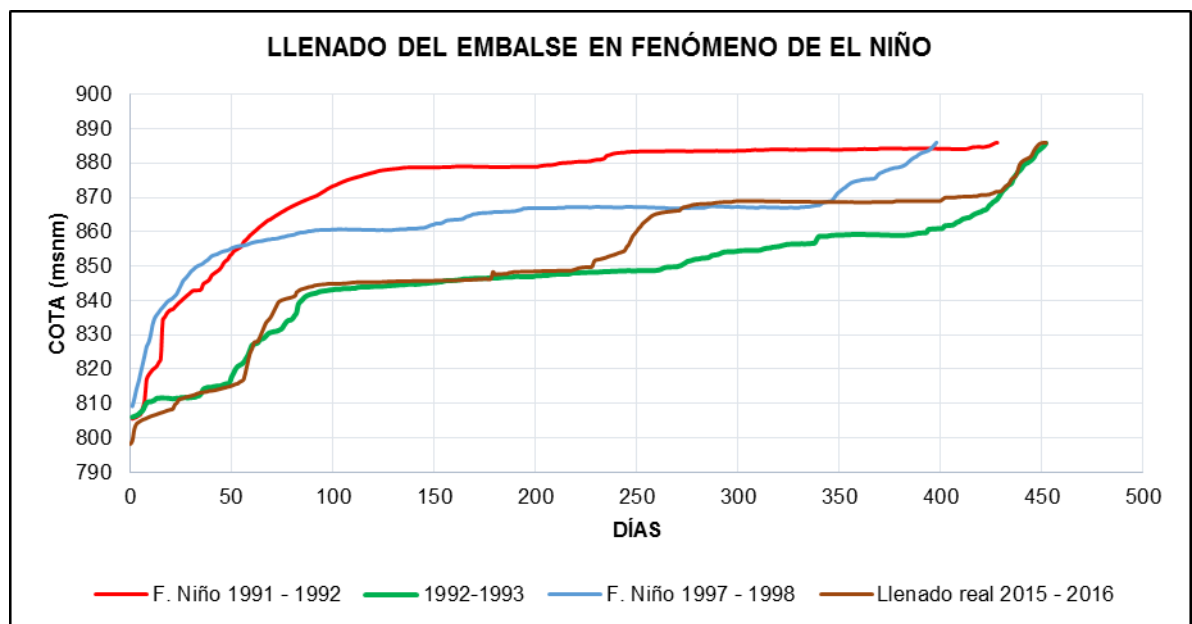
La simulación de llenado planteada se realizó para los periodos con fenómenos del Niño ya que en el llenado real del embalse en el año 2015 se evidenció la influencia de éste fenómeno. En los años estudiados se encontró que el llenado tarda entre 398 a 452 días y que el comportamiento del nivel del embalse depende de las condiciones climatológicas que se estén presentado en el momento. Cabe aclarar que se analiza el año 1992 a 1993⁶ por la poca entrada de caudal registrada. Los resultados obtenidos se pueden evidenciar en la tabla 8 y en la figura 15.

⁶ El fenómeno del niño se presentó desde mayo de 1991 hasta junio de 1992, pero al observar el comportamiento del embalse en el numeral 4.1 se evidenció que el nivel del embalse disminuye hasta abril de 1993, por lo que es conveniente analizar el llenado entre 1992 y 1993.

Tabla 8. Número de días que demora el embalse en llenarse los periodos de 1991-1992, 1992-1993, 1997-1998 y 2014-2016.

PERIODO	Nº DÍAS QUE DEMORA EL EMBALSE EN LLENARSE
F. Niño 1991-1992	428
1992-1993	452
F. Niño 1997-1998	398
F. Niño 2014-2016	451

Figura 15. Llenado del Embalse en fenómeno del niño



3.4 PLANTEAMIENTO N° 4

La descarga de fondo tiene como propósito durante la vida del Embalse bajar o mantener estable el nivel del embalse para hacer inspecciones, reparaciones de la cara de concreto de la Presa o de las laderas del embalse, como también

descenso del nivel o vaciado del embalse por una emergencia sanitaria o por deterioro de la presa causado por un sismo [6]. Al estudiar la posibilidad de un descenso del embalse en el año neutral 1990 y en los años con fenómeno ENSO, se obtuvo en promedio que la descarga se realiza aproximadamente en 17 días cuando no hay operación a la planta los angelinos (Tabla 9) y 20 días cuando hay operación a la misma para llegar al nivel mínimo de operación (cota 841 msnm), cumpliendo con la variación de nivel ya que en ninguno de los dos casos supera los 4m/día (Anexo N).

Tabla 9. Número de días de descarga de fondo con y sin operación a la planta los Angelinos

	NO OPERANDO PLANTA LOS ANGELINOS		OPERANDO PLANTA LOS ANGELINOS	
	<i>N° Días para el vaciado del embalse</i>	<i>Variación nivel mayor a 4m/día</i>	<i>N° Días para el vaciado del embalse</i>	<i>Variación nivel mayor a 4m/día</i>
Año 1990	17	NO	20	NO
Fenómeno de El Niño 1992	17	NO	20	NO
Fenómeno de La Niña 1999	18	NO	21	NO

3.5 VOLÚMENES ANUALES DE LAS VARIABLES HIDROLÓGICAS QUE INTERACTÚAN EN EL BALANCE HÍDRICO PARA EL PERIODO 1990 A 2000

Se obtuvo el porcentaje anual de volúmenes que aporta cada una de las variables hidrológicas que interactúan en el sistema para el periodo entre 1990 al 2000 (Tabla 10), observando que en promedio anualmente ingresa por parte del caudal del río Tona más del 100% del volumen total del embalse y por precipitación entre el 3,30% y el 4,29%. Además, las salidas por evaporación oscilan entre el 3,08% y

el 5,66%, y por infiltración a través de la presa entre el 19,52% y el 22,28% del volumen total del embalse.

Teniendo en cuenta que VQ= Volumen de caudal del río Tona (m³), VP = Volumen de precipitación (m³), VE = Volumen de evaporación (m³), VI = Volumen de infiltración (m³) y Vt= Volumen Total del embalse, los porcentajes anuales de las variables hidrológicas se calcularon de la siguiente forma:

$$\% \text{ Volumen de caudal del río Tona (\%VQ)} = \frac{\text{Volumen de caudal}}{\text{Volumen Total}} * 100 \quad (4)$$

$$\% \text{ Volumen de Precipitación (\%VP)} = \frac{\text{Volumen de precipitación}}{\text{Volumen Total}} * 100 \quad (5)$$

$$\% \text{ Volumen de Evaporación (\%VE)} = \frac{\text{Volumen de evaporación}}{\text{Volumen Total}} * 100 \quad (6)$$

$$\% \text{ Volumen de Infiltración (\%VI)} = \frac{\text{Volumen de infiltración}}{\text{Volumen Total}} * 100 \quad (7)$$

Tabla 10. Porcentaje de volúmenes anual de caudal del río Tona, precipitación sobre el embalse, evaporación sobre el embalse e infiltración a través de la presa para el periodo de 1990 a 2000.

	VQ (m ³)	%VQ	VP (m ³)	% VP	VE (m ³)	% VE	VI (m ³)	% VI	FENÓMENO
1990	28155218,74	165,32	706834,53	4,15	679179,46	3,99	3784320,00	22,22	Sin fenómeno
1991	32533116,51	191,02	562798,56	3,30	874894,85	5,14	3784320,00	22,22	Niño
1992	11750836,85	69,00	524847,71	3,08	668216,98	3,92	3444692,38	20,23	Niño
1993	25791086,95	151,44	736130,64	4,32	524202,76	3,08	2605880,08	15,30	Sin fenómeno
1994	27422928,88	161,02	714216,67	4,19	727278,66	4,27	3617127,77	21,24	Niño

	VQ (m³)	%VQ	VP (m³)	% VP	VE (m³)	% VE	VI (m³)	% VI	FENÓMENO
1995	57765686,03	339,18	594299,78	3,49	961984,80	5,65	3784320,00	22,22	Niña
1996	59950335,30	352,01	652785,85	3,83	815710,86	4,79	3794688,00	22,28	Niña
1997	30206733,55	177,36	565822,11	3,32	963715,93	5,66	3774830,45	22,16	Niño
1998	26590165,75	156,13	659550,36	3,87	618330,29	3,63	3324433,64	19,52	Niño
1999	36685097,64	215,40	730397,42	4,29	836131,68	4,91	3784320,00	22,22	Niña
2000	26266311,91	154,23	656320,29	3,85	711091,87	4,18	3794688,00	22,28	Niña

4. CONCLUSIONES

El modelo de balance hídrico del embalse de Bucaramanga representa una herramienta útil para la toma de decisiones puesto que permite simular actividades operacionales como suministrar el caudal demandado por las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) Los Angelinos y Bosconia, obtener el comportamiento del embalse durante determinado periodo, y simular el llenado y vaciado del embalse. El balance hídrico se realizó bajo la suposición de que no hay infiltraciones a través del embalse, y se escogió el periodo de 1990 a 2000 debido a la limitación de la información de las variables hidrológicas, pero cabe aclarar que para hidrologías más extremas no se tienen resultados.

El máximo caudal de demanda que se puede sustraer del embalse para el abastecimiento de la PTAP Los Angelinos es de $0,57 \text{ m}^3/\text{s}$ garantizando una confiabilidad entre el 99 y 100%. Por lo tanto, si la PTAP Los Angelinos desea tener un abastecimiento constante de $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ debe tener un sistema interconectado con otras fuentes, ya que con este caudal de demanda no se puede garantizar que el embalse esté en operación constante.

A partir del balance hídrico realizado en el embalse Bucaramanga en el periodo de 1990 a 2000 se obtuvo un caudal de demanda de $2,57 \text{ m}^3/\text{s}$ ($0,57 \text{ m}^3/\text{s}$ a la PTAP Los Angelinos y $2 \text{ m}^3/\text{s}$ a la PTAP Bosconia) durante 981 días, presentándose 311 días de no operación del embalse. Durante el fenómeno de El Niño se puede sustraer sin interrupción el caudal de demanda de $2,57 \text{ m}^3/\text{s}$ durante 73 días y en fenómeno de la niña durante 83 días, para que el embalse pueda recuperarse.

En la simulación del llenado de embalse en los años con fenómeno del niño 1991-1993, 1997-1998 se encontró que el tiempo de llenado promedio es de 433 días y es similar al tiempo de llenado real, que duró 451 días. Además, se evidencia que

el comportamiento del nivel del embalse es diferente en cada periodo analizado ya que las condiciones hidrológicas varían.

El vaciado del embalse hasta la cota 841 msnm en promedio tarda 20 días cuando está operando la PTAP Los Angelinos y 17 días cuando no opera. Además, se verificó con los resultados obtenidos en la simulación, que el caudal de vaciado establecido por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga es apropiado ya que la velocidad de descenso de nivel no supera 4 m/día.

5. RECOMENDACIONES

Se debe realizar el balance hídrico del embalse de Bucaramanga con las estaciones del sitio de implementación del embalse para poderlo comparar con el comportamiento real y así cuantificar de manera más precisa las pérdidas que se presenten. Además, para la medición de evaporación se recomienda establecer un protocolo que incluya la revisión de la información y mantenimiento constante del tanque de clase A. Así mismo, se deben estudiar las curvas de calibración de caudales de la estación automática del embalse para valores altos y bajos de caudal.

También se recomienda hacer un estudio de la influencia del fenómeno ENSO en las diferentes variables hidrológicas, ya que permitiría realizar un análisis del comportamiento del embalse después de dichos fenómenos, aumentando o disminuyendo la confiabilidad del sistema.

Es necesario estudiar detalladamente las pérdidas por infiltración en un rango de tiempo mayor para determinar si se deben establecer acciones correctivas para disminuir éste porcentaje, ya que en el modelo representan una pérdida del sistema entre el 20 y 22 % del volumen total del embalse a nivel anual.

Para la evaporación y precipitación, el porcentaje promedio a nivel anual respecto al volumen total del embalse es de 4,47% y 3,79%, respectivamente, por lo que se debe realizar un análisis más detallado en el llenado de datos faltantes ya que la influencia de estas variables en el balance hídrico es significativa.

Se recomienda realizar un estudio de aguas subterráneas para el embalse de Bucaramanga para determinar si ésta variable realiza aportes significativos al balance hídrico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M.F. Marini y M.C. Piccolo, "El balance hídrico en la cuenca del río Quequén Salado, Argentina" Papeles de geografía, Vol. 31, pp. 39-53, 2000.
- [2] A.A. Sokolov, T.G Chapman, Unesco, "Métodos de cálculo del balance hídrico", Primera Edición, Servicio de Edición del Centro de Estudios Hidrográficos de España, 1982, Introducción, p. 12.
- [3] L. A Otaya, G.L. Vásquez y G.J. Bustamante, "Estimación de la oferta hídrica con información escasa en ecosistemas estratégicos", Rev.fac.Nal.Agr.Medellín, Vol 61, N°1, noviembre 2017
- [4] amb. "Memorando técnico 03 - Hidrología, clima y sedimentos del embalse 2128-MT-03-R3", Bucaramanga, mayo 2012.
- [5] amb. "Resumen ejecutivo avance del proyecto", Bucaramanga, julio 2015.
- [6] amb. "Memorando Técnico 08 - Sistema de Aducción y Descarga de Fondo I-2128-MT-08 R4", Bucaramanga, noviembre de 2012.
- [7] F.J. Aparicio, "Fundamentos de hidrología de Superficie", Primera Edición, Editorial LIMUSA, Grupo Noriega Editores, México, pp, 1992.
- [8] C. Perea, J. Lamus, "Estudio de la precipitación en el área metropolitana de Bucaramanga" [Tesis de pregrado]; Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2005.

- [9] J.M. Molina, V. Martínez, A. Baille y M. M. Gonzáles, “Estimación de la evaporación en embalses de riego mediante un modelo de balance de energía”, *Ingeniería del Agua*, Vol. 13, N° 3, pp. 219-229, 2006.
- [10] V. T. Chow, D. R. Maidment, L.W. Ways, “Hidrología Aplicada”, Primera Edición, McGraw-Hill, Editorial Nomos, Colombia, 2000.
- [11] J.I. Vélez, L. Ríos, “Corrientes naturales intervenciones y condiciones ecológicas”, Seminario internacional sobre eventos extremos mínimos en regímenes de caudales: diagnóstico, modelamiento y análisis, Medellín, Colombia, 23 al 25 de junio, 2004.
- [12] W. Murillo, R. Palomino, S. Córdoba, G. Aragón, E. Banguero, “El régimen diario de la precipitación en el municipio de Quibdó (Colombia)”, *Revista de climatología*, Vol. 5, pp. 1-7, 2005.
- [13] L. Guenni, E. Degryze, K. Alvarado, “Análisis de la tendencia y la estacionalidad de la precipitación mensual en Venezuela”, *Revista Colombiana de Estadística*, Vol 31, N° 1, pp. 41-65, 2008.
- [14] O. Puertas, Y. Carvajal, M. Quintero, “Estudio de tendencias de la precipitación mensual en la cuenca alta-media del río Cauca, Colombia”, *Revista Dyna*, N° 169, pp 112- 120, 2011.
- [15] E. Luna, W. Lavado, “Evaluación de métodos hidrológicos para la completación de datos faltantes de precipitación en estaciones de la cuenca Jetepeque, Perú”, *Revista Tecnológica ESPOL*, Vol. 28, N° 3, pp. 42-52, 2015
- [16] M. Bedoya, C. Contreras y F. Ruiz, “Alteraciones del régimen hidrológico y de la oferta hídrica por variabilidad y cambio climático”, IDEAM, pp 282- 320, 2010.

[17] O. Enriquez, A. Guzmán, G. Narváez, “Análisis del comportamiento de la precipitación en el municipio de Buenaventura (Valle del Cauca, Colombia) en condiciones de desarrollo de los fenómenos El Niño y La Niña”, Revista Colombiana de geografía, Vol 23, N°1, pp 165- 178, 2014.

[18] amb.“Instructivo de vaciado del Embalse hasta la cota 841msnm I-2128-CT-179”, Bucaramanga, Diciembre 2016.

BIBLIOGRAFÍA

amb. “Memorando técnico 03 - Hidrología, clima y sedimentos del embalse 2128-MT-03-R3”, Bucaramanga, mayo 2012.

_____. “Memorando Técnico 08 - Sistema de Aducción y Descarga de Fondo I-2128-MT-08 R4”, Bucaramanga, noviembre de 2012.

_____. “Resumen ejecutivo avance del proyecto”, Bucaramanga, julio 2015.

_____. “Instructivo de vaciado del Embalse hasta la cota 841msnm I-2128-CT-179”, Bucaramanga, Diciembre 2016.

APARICIO, F.J. “Fundamentos de hidrología de Superficie”, Primera Edición, Editorial LIMUSA, Grupo Noriega Editores, México, pp, 1992.

BEDOYA, M.; CONTRERAS C. y RUIZ, F. “Alteraciones del régimen hidrológico y de la oferta hídrica por variabilidad y cambio climático”, IDEAM, pp 282- 320, 2010.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R. Y Ways, L.W. “Hidrología Aplicada”, Primera Edición, McGraw-Hill, Editorial Nomos, Colombia, 2000.

ENRIQUEZ, O.; GUZMÁN, A. y NARVÁEZ, G. “Análisis del comportamiento de la precipitación en el municipio de Buenaventura (Valle del Cauca, Colombia) en condiciones de desarrollo de los fenómenos El Niño y La Niña”, Revista Colombiana de geografía, Vol 23, N°1, pp 165- 178, 2014.

GUENNI, L.; DEGRYZE, E.; ALVARADO. “Análisis de la tendencia y la estacionalidad de la precipitación mensual en Venezuela”, Revista Colombiana de Estadística, Vol 31, N° 1, pp. 41-65, 2008.

LUNA, E.; LAVADO, W. “Evaluación de métodos hidrológicos para la completación de datos faltantes de precipitación en estaciones de la cuenca Jetepeque, Perú”, Revista Tecnológica ESPOL, Vol. 28, N° 3, pp. 42-52, 2015

MARINI, M.F. y PICCOLO, M.C. “El balance hídrico en la cuenca del río Quequén Salado, Argentina” Papeles de geografía, Vol. 31, pp. 39-53, 2000.

MOLINA, J.M.; MARTÍNEZ, V.; BAILLE A.; y GONZÁLES, M. M. “Estimación de la evaporación en embalses de riego mediante un modelo de balance de energía”, Ingeniería del Agua, Vol. 13, N° 3, pp. 219-229, 2006.

MURILLO, W.; PALOMINO, R.; CÓRDOBA, S.; ARAGÓN, G.; BANGUERO, E. “El régimen diario de la precipitación en el municipio de Quibdó (Colombia)”, Revista de climatología, Vol. 5, pp. 1-7, 2005.

OTAYA, L. A.; VÁSQUEZ, G.L. y BUSTAMANTE, G.J. “Estimación de la oferta hídrica con información escasa en ecosistemas estratégicos”, Rev.fac.Nal.Agr.Medellín, Vol 61, N°1, noviembre 2017

PEREA, C.; LAMUS, J. “Estudio de la precipitación en el área metropolitana de Bucaramanga” [Tesis de pregrado]; Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2005.

PUERTAS, O.; CARVAJAL, Y. y QUINTERO, M. “Estudio de tendencias de la precipitación mensual en la cuenca alta-media del río Cauca, Colombia”, Revista Dyna, N° 169, pp 112- 120, 2011.

SOKOLOV, A.A.; CHAPMAN, T.G. Unesco, “Métodos de cálculo del balance hídrico”, Primera Edición, Servicio de Edición del Centro de Estudios Hidrográficos de España, 1982, Introducción, p. 12.

VÉLEZ, J.I. y RÍOS, L. “Corrientes naturales intervenciones y condiciones ecológicas”, Seminario internacional sobre eventos extremos mínimos en regímenes de caudales: diagnóstico, modelamiento y análisis, Medellín, Colombia, 23 al 25 de junio, 2004.

ANEXOS

ANEXO A. Precipitación total mensual estación Brasil (amb) y estación UIS (IDEAM)

Porcentaje de datos faltantes mensual estación BRASIL: 22 %

PRECIPITACIÓN MENSUAL DE LA ESTACIÓN BRASIL (amb) PARA EL PERIODO 1982 A 2003												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1982	D.F	D.F	D.F	D.F	D.F	112	87	37	76	156	53	94
1983	60	41	92	187	101	122	136	110	54	201	120	104
1984	95	60	36	92	184	96	84	135	220	165	243	7
1985	203	55	187	83	146	153	211	171	165	207	91	66
1986	156	92	123	181	129	133	130	98	178	338	113	34
1987	14	51	89	137	179	99	64	102,7	142	220	147	77
1988	65	207	48	166	114	278	90	203	156	261	302	210
1989	3	16	199	61	268	71	89	89	178	150	53	130
1990	82	41	204	286	140	78	96	163	64	150	185	90
1991	95	D.F	D.F	74	D.F	85	133	135	156	129	158	69
1992	46	63	32	116	169	57	106	105	79	49	134	96
1993	65	93	163	159	144	117	74	60	125	200	116	0
1994	365	D.F	309	D.F	D.F	326	20	D.F	53	D.F	134	454

PRECIPITACIÓN MENSUAL DE LA ESTACIÓN BRASIL (amb) PARA EL PERIODO 1982 A 2003

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1995	D.F	D.F	D.F	D.F	260	233	D.F	110	D.F	89	69	63
1996	55	D.F	104	91	106	119	50	99	79	92	49	37
1997	44	18	30	67	56	51	48	11	64	37	65	27
1998	6	39	30	42	79	40	39	37	49	68	22	33
1999	22	47	D.F	D.F	D.F	D.F	D.F	D.F	D.F	D.F	D.F	D.F
2000	D.F	D.F	D.F	D.F	D.F	D.F	D.F	D.F	D.F	D.F	D.F	D.F
2001	D.F	D.F	D.F	D.F	D.F	D.F	D.F	D.F	D.F	D.F	D.F	D.F
2002	D.F	D.F	D.F	267,5	112,6	172,2	85,6	45,1	135,7	122,8	111,2	37,2
2003	1,2	197,1	95,6	119,4	98,1	87,9	121,6	131,3	221,9	224,1	82	D.F
PROMEDIO	81,01	63,76	108,85	125,23	126,98	127,9	92,46	96,95	121,98	150,47	118,27	85,69

Porcentaje de datos faltantes mensual estación UIS: 8,7 %

PRECIPITACIÓN MENSUAL DE LA ESTACIÓN UIS (IDEAM) PARA EL PERIODO 1982 A 2003

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1982	18,5	160,7	138,6	197,4	81,6	60,6	92,1	85,5	114,9	165,5	57,1	56
1983	100,2	25	116,7	114,9	95,4	85,6	211,3	145,8	44,3	156,1	63,8	88,8
1984	236,5	97,9	48,4	50,6	176,9	71,5	86,4	77,9	152,2	99,6	139,6	15,1
1985	247,9	60,1	135,7	176,1	58,6	108,2	140,4	57,1	105,5	184,9	87,4	103,1

PRECIPITACIÓN MENSUAL DE LA ESTACIÓN UIS (IDEAM) PARA EL PERIODO 1982 A 2003

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1986	64,7	71,4	172,1	208,9	146	77,8	77,9	114,3	160	170,4	83,5	52,2
1987	52,3	50,1	156,1	99,3	183	60,1	131,3	39,7	174,3	164,2	92,5	48,5
1988	90,7	189,7	98	75,1	132,8	144,1	102,4	190,8	144,2	168,2	246	93,3
1989	8	27,1	274,9	186,4	166,5	124,4	60,1	110,9	149,5	83,1	61	144,3
1990	39,9	105,7	143,6	149,7	113,4	54,3	82,4	107,8	65,8	113,5	172,3	201,9
1991	72	6,4	90,4	107,6	150,1	58,8	105,4	91,4	63,8	105,7	181,6	46,4
1992	139,3	119,1	40,2	50	118,5	71,7	145,6	56	81,3	28,5	118,1	38,5
1993	43,6	139,9	74,3	185,1	213,6	D.F	D.F	D.F	D.F	D.F	D.F	D.F
1994	D.F	D.F	D.F	D.F	D.F	D.F	99	61	92,8	109,9	161,1	34,3
1995	12,5	153,2	171,1	94,8	97,3	89,3	129,6	79	42,6	186,6	25,4	27,1
1996	25,3	76,4	230,1	106,7	62,6	185,1	128,9	68,4	109,7	108,9	81,6	68,5
1997	149,3	44,2	101,7	165,2	108,5	41	89,3	26,6	144,2	33	72,3	110,1
1998	70,7	168,8	82,4	60,8	229,6	95,6	166,8	29,2	52,2	D.F	45,6	81,8
1999	90,1	140,6	75,8	89	143,4	59,7	133,1	95,2	274,8	74,5	164,4	60,5
2000	197,1	143,5	202,2	42,6	90,4	82,7	105,4	55,6	177,5	59	89	14
2001	38,2	20,3	93,7	41	288,7	122,2	61,1	72,9	150,8	117	167,3	38,8
2002	39,6	51,2	113,3	213,6	116,9	119,2	74,4	31,6	74,2	76,3	61,8	18
2003	81,7	121,2	117,6	D.F	D.F	D.F	D.F	D.F	D.F	D.F	D.F	D.F
PROMEDIO	82,51	94,74	125,59	128,41	126,16	90,13	100,94	81,09	107,23	125,43	114,43	68,72

ANEXO B. Porcentaje mensual de datos faltantes de las variables hidrológicas diarias: precipitación (Estación UIS- IDEMA), evaporación (Estación UIS- IDEAM) y caudal del río Tona (Estación Puente Tona - amb) para el periodo de 1990 a 2000

PORCENTAJE MENSUAL DE DATOS FALTANTES DE LA PRECIPITACIÓN DIARIA DE LA ESTACIÓN UIS (IDEAM)												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1990	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1991	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1992	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1993	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	50,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1994	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1995	0,00	0,00	0,00	23,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1996	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1997	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1998	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	67,74	0,00	0,00
1999	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1990	16,13	32,14	16,13	13,33	16,13	26,67	3,23	19,35	20,00	3,23	16,67	16,13
1991	19,35	28,57	22,58	36,67	29,03	16,67	25,81	12,90	23,33	16,13	33,33	9,68
1992	12,90	17,86	22,58	6,67	12,90	20,00	19,35	16,13	13,33	29,03	20,00	19,35
1993	22,58	17,86	16,13	13,33	29,03	73,33	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1994	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	3,23	29,03	36,67	22,58	23,33	12,90
1995	22,58	35,71	38,71	60,00	61,29	50,00	38,71	32,26	20,00	41,94	20,00	6,45
1996	12,90	28,57	29,03	36,67	29,03	26,67	9,68	25,81	20,00	35,48	10,00	22,58

PORCENTAJE MENSUAL DE DATOS FALTANTES DE LA PRECIPITACIÓN DIARIA DE LA ESTACIÓN UIS (IDEAM)

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1997	25,81	21,43	41,94	33,33	29,03	10,00	22,58	32,26	30,00	19,35	20,00	22,58
1998	25,81	35,71	16,13	16,67	48,39	20,00	16,13	12,90	16,67	70,97	13,33	25,81
1999	9,68	42,86	19,35	30,00	29,03	23,33	25,81	32,26	36,67	25,81	26,67	19,35
2000	32,26	21,43	35,48	13,33	100,00	20,00	38,71	19,35	30,00	19,35	33,33	25,81
1990	0,00	0,00	0,00	6,67	100,00	26,67	0,00	0,00	0,00	9,68	0,00	100,00
1991	0,00	0,00	0,00	0,00	32,26	100,00	35,48	0,00	0,00	32,26	3,33	100,00
1992	100,00	39,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1993	3,23	0,00	0,00	0,00	0,00	3,33	3,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1994	0,00	0,00	0,00	3,33	0,00	3,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1995	0,00	3,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,68
1996	6,45	3,57	0,00	0,00	3,23	0,00	3,23	12,90	0,00	0,00	0,00	0,00
1997	0,00	0,00	3,23	0,00	3,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1998	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1999	45,16	7,14	0,00	0,00	0,00	70,00	25,81	0,00	26,67	9,68	0,00	0,00
2000	35,48	0,00	0,00	10,00	6,45	0,00	0,00	0,00	0,00	48,39	43,33	0,00

ANEXO C. Ejemplo Llenado de datos faltantes de Evaporación (mm) diaria de la estación UIS-IDEAM para el Año 2000.

DÍAS	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1	3,82	3,40	4,40	3,43	3,98	5,60	2,60	3,00	2,50	4,80	3,23	2,00
2	6,60	2,20	3,80	9,40	3,98	4,33	4,20	3,69	2,30	2,40	3,23	2,60
3	4,00	2,50	1,70	6,20	3,98	4,00	2,40	8,50	2,10	3,64	3,23	4,40
4	3,82	5,30	4,40	3,43	3,98	4,33	4,99	2,30	2,50	7,40	3,23	3,19
5	5,10	6,40	2,90	8,40	3,98	9,80	4,99	4,50	4,00	3,00	3,23	4,10
6	3,82	4,70	5,80	2,10	3,98	3,90	4,99	2,80	3,10	3,50	3,23	2,10
7	3,82	4,00	4,30	2,30	3,98	3,70	4,99	2,00	5,10	2,60	3,23	3,20
8	3,82	5,10	2,70	4,50	3,98	3,90	4,99	3,20	5,90	3,50	3,23	2,40
9	4,90	2,30	5,20	3,20	3,98	4,00	4,99	3,69	4,00	3,30	1,50	3,19
10	1,80	4,10	5,26	2,70	3,98	5,30	4,99	2,80	2,90	3,64	3,50	1,60
11	1,50	4,60	5,26	4,20	3,98	4,60	5,90	2,30	4,45	2,70	1,70	3,20
12	3,60	1,70	5,26	3,43	3,98	4,10	3,40	2,30	6,90	1,40	5,00	2,80
13	4,50	3,40	5,90	8,10	3,98	1,50	3,50	3,10	4,45	2,00	4,70	3,60
14	5,50	2,00	4,00	1,60	3,98	4,00	4,10	3,69	9,70	3,60	4,30	3,19
15	4,10	1,80	4,60	3,20	3,98	4,10	5,40	3,69	4,45	2,10	5,00	6,30
16	3,40	4,20	5,26	1,40	3,98	3,50	4,99	7,90	2,60	1,80	3,00	3,19
17	2,90	5,20	5,26	2,90	3,98	3,20	8,80	3,69	4,70	3,64	4,60	3,19
18	2,40	3,76	8,70	3,60	3,98	2,30	5,30	1,40	1,70	1,00	3,30	3,19
19	5,40	8,50	4,30	1,20	3,98	1,50	3,20	2,40	4,45	1,80	4,40	2,60

DÍAS	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
20	2,00	3,76	4,30	2,20	3,98	3,20	4,30	2,90	8,60	3,64	3,70	2,30
21	1,80	3,76	5,26	3,43	3,98	4,20	2,80	5,00	4,45	3,64	2,10	3,40
22	2,50	5,10	10,00	2,50	3,98	4,33	4,99	3,69	4,45	3,60	3,20	2,60
23	3,20	3,00	5,26	2,80	3,98	8,90	5,50	8,90	4,45	3,50	2,90	4,10
24	3,00	2,10	5,26	2,10	3,98	4,33	4,99	4,20	6,50	3,70	1,40	1,40
25	3,82	1,50	5,26	1,60	3,98	9,50	10,10	3,80	4,45	3,70	4,70	3,19
26	3,82	3,76	5,26	2,10	3,98	2,70	4,10	3,70	6,30	5,20	1,50	2,20
27	3,82	3,80	11,00	1,60	3,98	4,33	2,40	4,80	5,60	4,60	3,23	4,40
28	2,40	3,30	5,70	2,50	3,98	4,33	4,90	1,80	4,40	3,64	2,60	3,90
29	3,82	3,76	5,26	4,10	3,98	3,40	4,99	1,70	2,10	7,80	3,23	4,30
30	9,60		7,00	2,80	3,98	3,10	4,99	4,00	4,45	6,30	1,40	3,90
31	3,82		4,40		3,98		12,00	3,00		5,70		3,19
Total Mensual	118,39	108,99	162,91	103,04	123,42	130,00	154,84	114,45	133,57	112,84	96,75	98,93
Promedio												
Mensual	3,82	3,76	5,26	3,43	3,98	4,33	4,99	3,69	4,45	3,64	3,23	3,19
										Promedio Anual		3,98

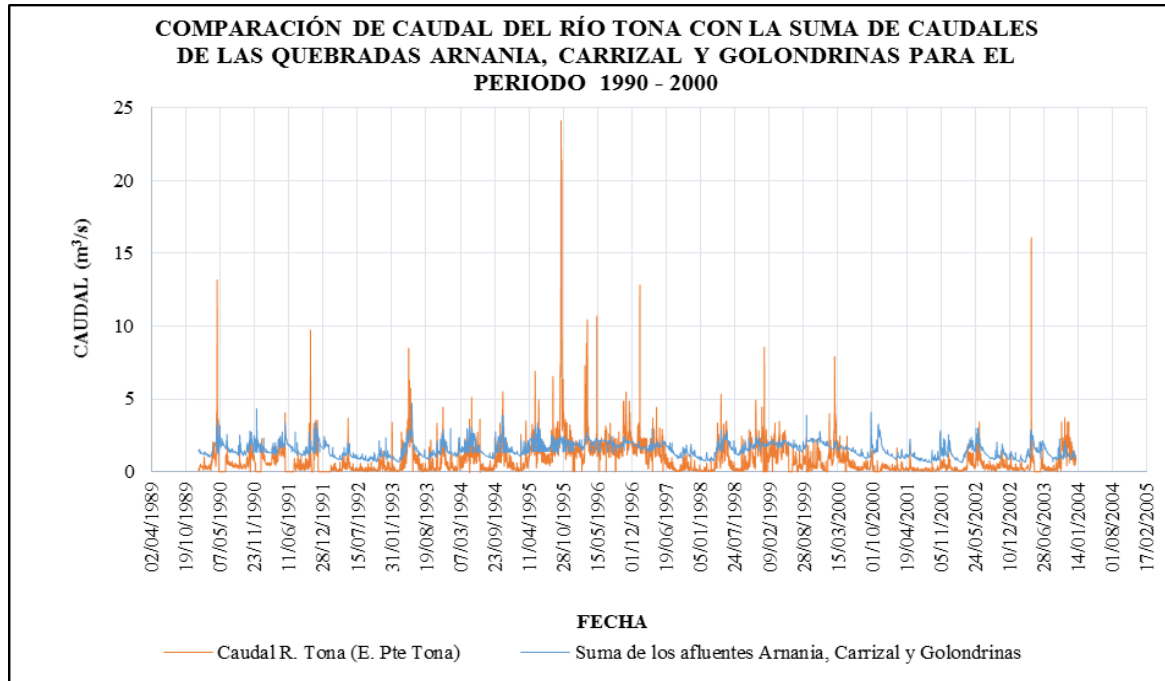
**Los datos faltantes de evaporación diaria de la estación UIS (IDEAM) fueron llenados de dos formas, para los meses donde se tenía información de algunos días se llenó con la evaporación media mensual y en los meses donde no se tenían ningún dato se llenó con la evaporación media anual como se muestra en la tabla, éstos valores se encuentran con color gris.*

ANEXO D. Registro histórico fenómenos El Niño y La Niña

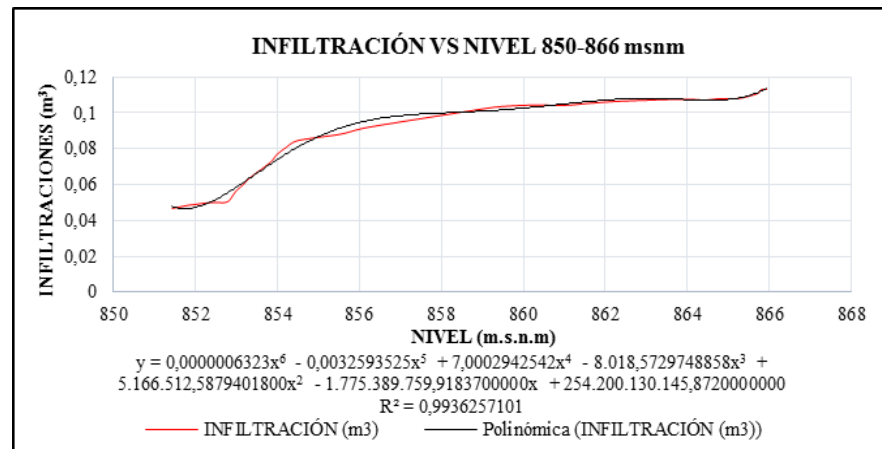
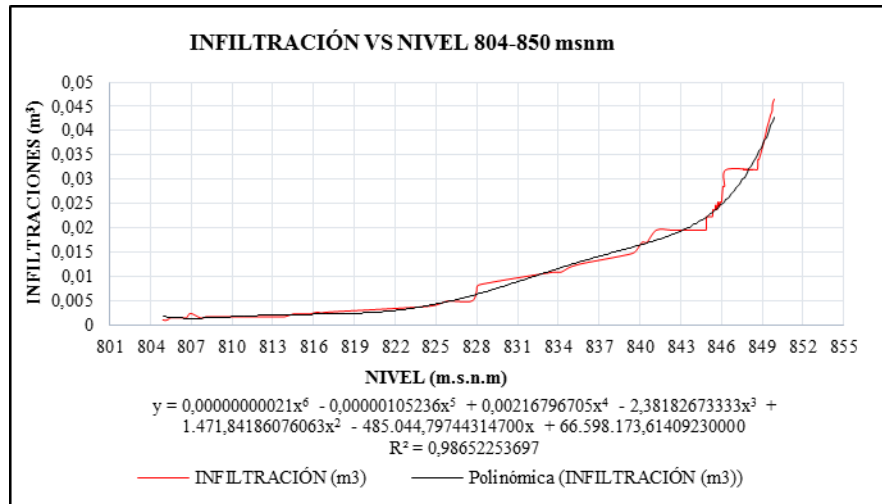
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1984	Niña	Niña								Niña	Niña	Niña
1985	Niña	Niña	Niña	Niña	Niña	Niña	Niña	Niña	Niña			
1986								Niño	Niño	Niño	Niño	Niño
1987	Niño	Niño										
1988					Niña	Niña	Niña	Niña	Niña	Niña	Niña	Niña
1989	Niña	Niña	Niña	Niña	Niña							
1990												
1991					Niño	Niño	Niño	Niño	Niño	Niño	Niño	Niño
1992	Niño	Niño	Niño	Niño	Niño	Niño						
1993												
1994									Niño	Niño	Niño	Niño
1995	Niño	Niño	Niño						Niña	Niña	Niña	Niña
1996	Niña	Niña	Niña									
1997					Niño	Niño	Niño	Niño	Niño	Niño	Niño	Niño
1998	Niño	Niño	Niño	Niño								
1999							Niña	Niña	Niña	Niña	Niña	Niña
2000	Niña	Niña	Niña									
2001												
2002					Niño	Niño	Niño	Niño	Niño	Niño	Niño	Niño
2003	Niño	Niño										
2004							Niño	Niño	Niño	Niño	Niño	Niño

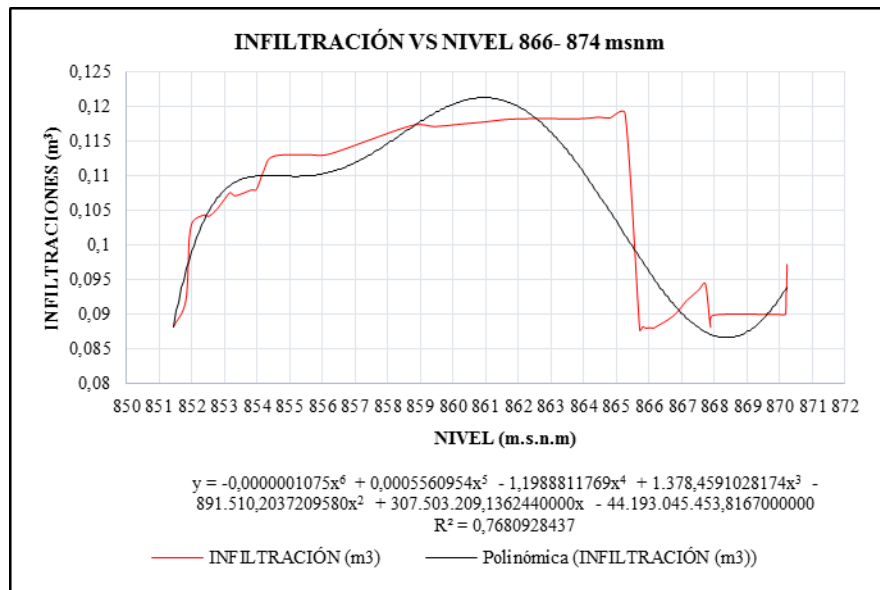
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2005	Niño	Niño									Niña	Niña
2006	Niña	Niña	Niña						Niño	Niño	Niño	Niño
2007	Niño	Niño						Niña	Niña	Niña	Niña	Niña
2008	Niña	Niña	Niña	Niña	Niña	Niña						
2009							Niño	Niño	Niño	Niño	Niño	Niño
2010	Niño	Niño	Niño	Niño			Niña	Niña	Niña	Niña	Niña	Niña
2011	Niña	Niña	Niña	Niña					Niña	Niña	Niña	Niña
2012	Niña	Niña	Niña									
2013												
2014											Niño	Niño
2015	Niño	Niño	Niño	Niño	Niño	Niño	Niño	Niño	Niño	Niño	Niño	Niño
2016	Niño	Niño	Niño	Niño	Niño							

ANEXO E. Comparación de los caudales del río Tona (estación puente Tona - amb) con los caudales de la suma de los caudales de las estaciones Arnania, Carrizal y Golondrinas del amb.



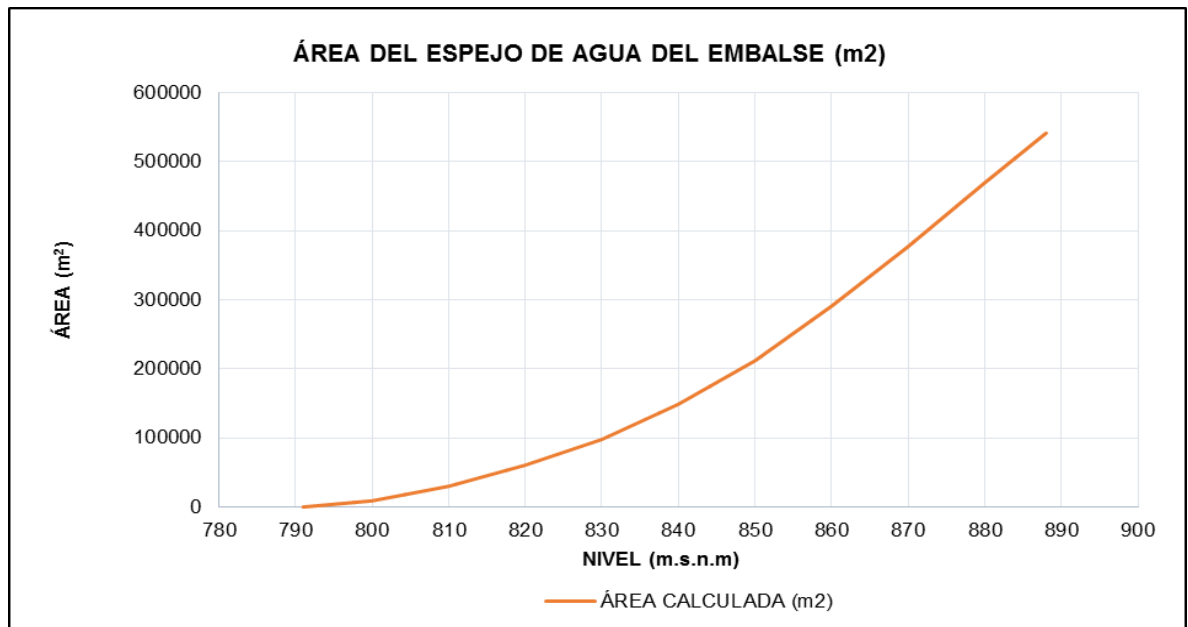
ANEXO F. Curvas de infiltración vs Nivel msnm





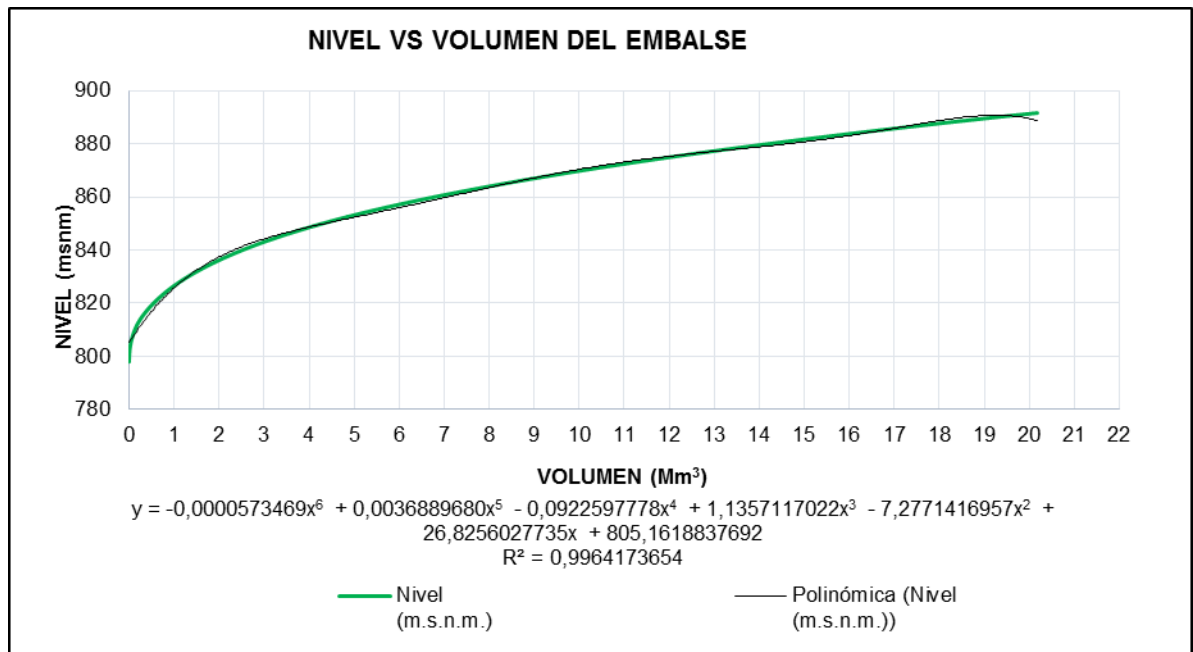
**Las curvas de infiltración a través de la presa fueron hechas con la información suministrada por el acueducto metropolitano de Bucaramanga (amb). El amb para cuantificar las infiltraciones a través de la presa tiene cuatro vertederos: vertedero de excesos, vertedero aforador túnel de desvío, vertedero aforador principal (aguas abajo de la presa) y vertedero túnel de aducción, donde se tienen estaciones automáticas para la medición de caudales. La infiltración a través de la presa es la suma de las infiltraciones registrada por los vertederos y con ésta se realizaron las curvas de infiltración.*

ANEXO G. Curva de Área del espejo del agua vs Nivel del embalse



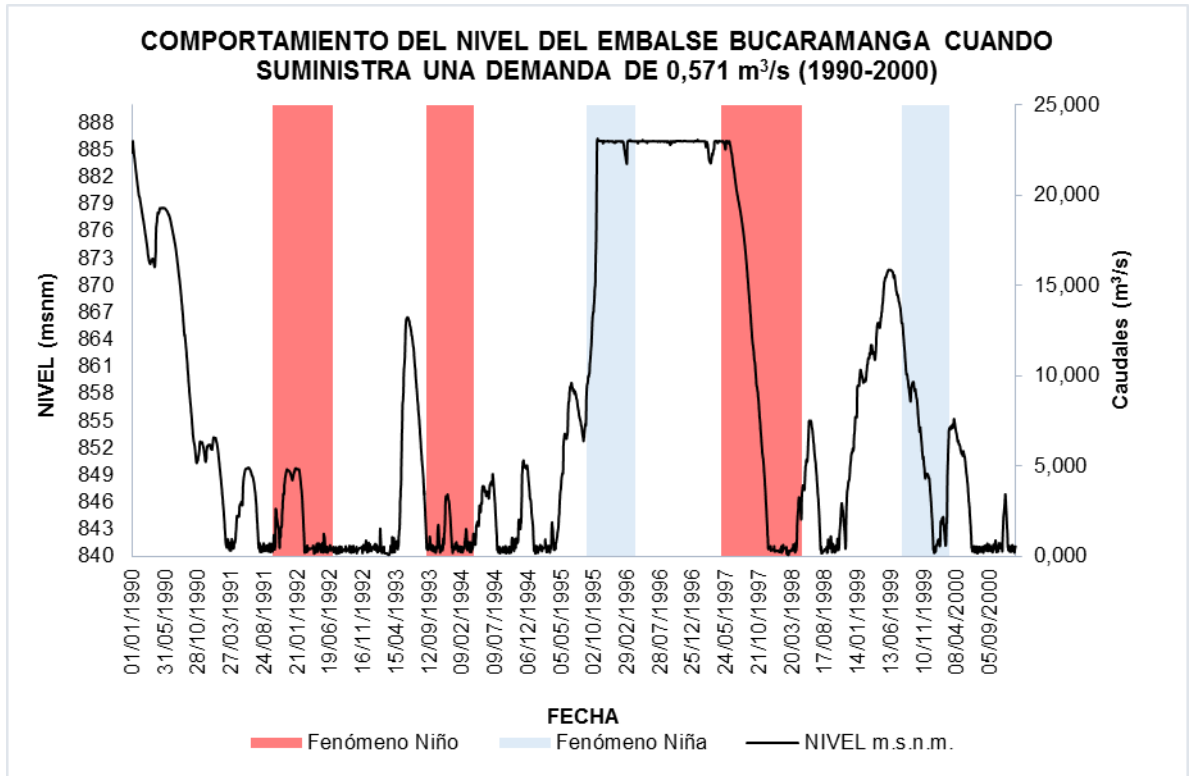
Fuente. Adaptado de [6]

ANEXO H. Curva de Nivel msnm vs Volumen del embalse

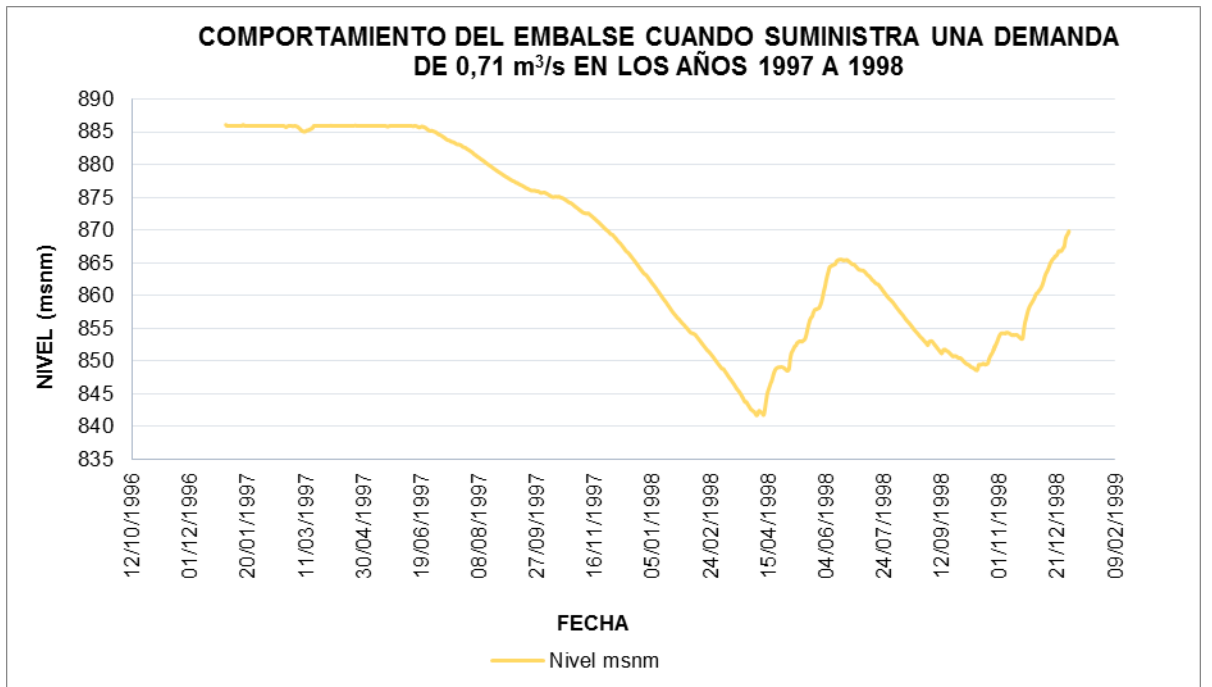
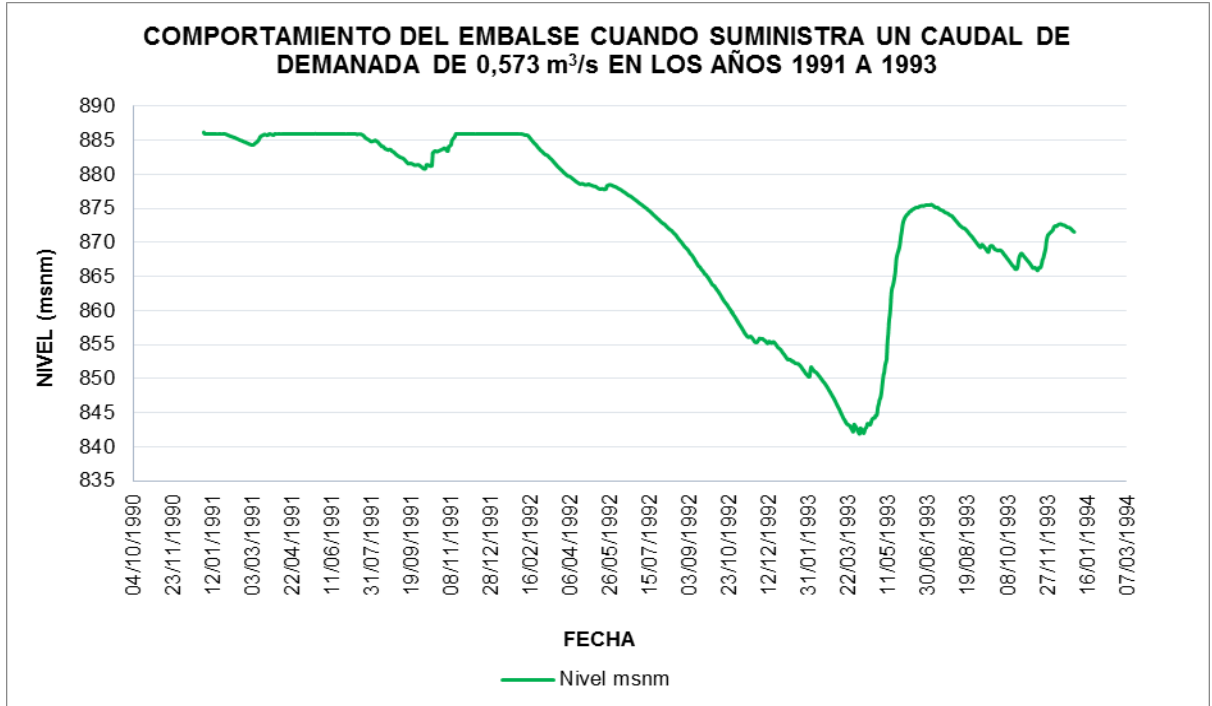


Fuente. Adaptado de [6]

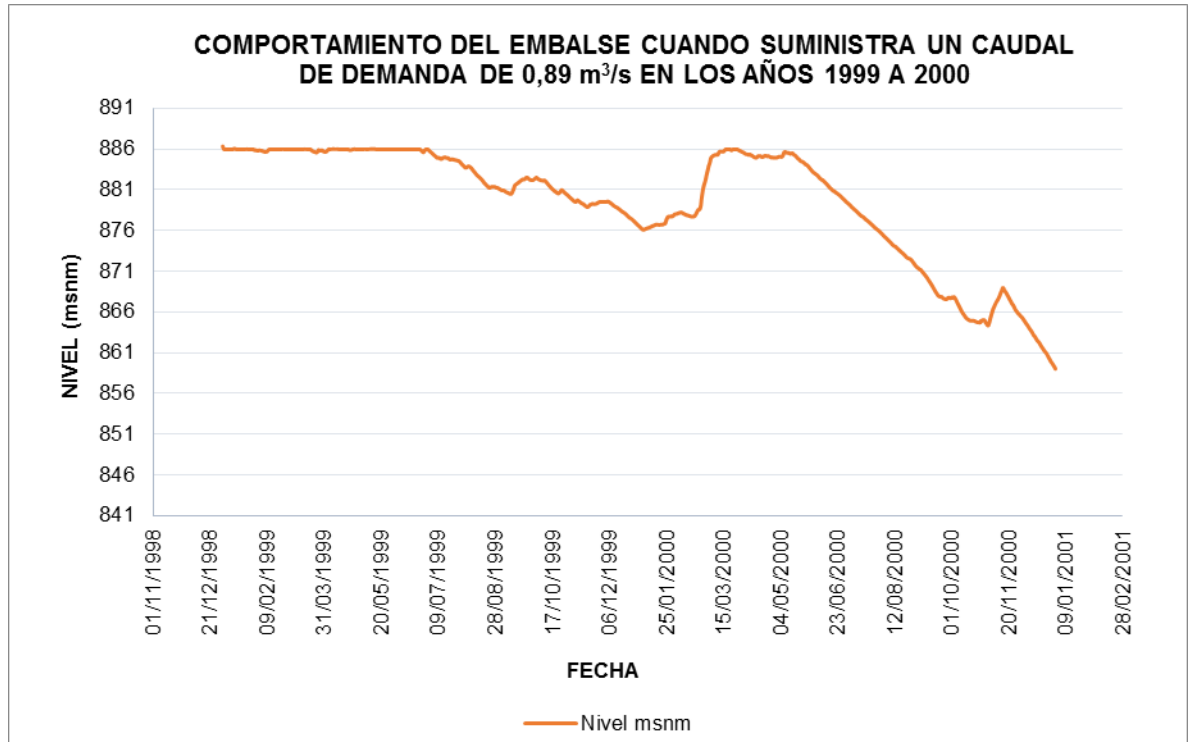
**ANEXO J. Comportamiento del embalse para el periodo de 1990 a 2000
cuando suministra una demanda de 1,2 m³/s**



**ANEXO K. Comportamiento del embalse frente a fenómeno del niño
confiabilidad del 100% para el periodo de 1991 a 1993, 1997 a 1998**



**ANEXO L. Comportamiento del embalse frente al fenómeno de la Niña
confiabilidad del 100% para el periodo de 1999 a 2000**



ANEXO M. Variación de la demanda que puede suministrar el embalse cuando opera y no opera la PTAP Bosconia.

PERIODO	FENÓMENO	OPERANDO SOLO PTAP ⁷ LOS ANGELINOS		OPERANDO PTAP LOS ANGELINOS Y BOSCONIA		DÍAS DE OPERACIÓN A LA PLANTA BOSCONA	
		CONFIABILIDAD (%)	DEMANDA (m ³ /s)	CONFIABILIDAD (%)	DEMANDA (m ³ /s)		DÍAS DE NO OPERACIÓN
1990-2000	ENSO y Normal	100	0,571	92,26	2,57	311	981
		99	0,638	90,84	2,64	368	883
		98	0,714	88,33	2,71	469	785
		97	0,763	86,73	2,76	533	724
		96	0,804	85,27	2,8	592	678
		95	0,828	84,47	2,83	624	651
		90	0,931	80,89	2,93	768	547
		85	1,023	77,1	3,02	920	478
		80	1,118	73,54	2,12	1063	413
		76,3	1,2	70,58	3,2	1182	365
1991-1993	F. Niño	100	0,573	82,76	2,57	189	177
		99	0,59	82,3	2,59	428	173
		98	0,61	81,93	2,6	198	170
		97	0,63	80,93	2,63	209	164
		96	0,65	80,2	2,65	428	159
		95	0,67	74,73	2,78	277	129
		90	0,78	70,26	2,91	326	102
		85	0,91	66,88	3	363	89
		80	0,999	63,96	3,07	428	82
		75,205	1,07	60,95	3,15	428	74
70	1,15	59,22	3,2	447	69		
67,52	1,2	-	-	-	-		
1997-1998	F. Niño	100	0,71	77,12	2,71	167	162

⁷ PTAP: Planta de tratamiento de agua potable.

		OPERANDO SOLO PTAP ⁷ LOS ANGELINOS		OPERANDO PTAP LOS ANGELINOS Y BOSCONIA			
PERIODO	FENÓMENO	CONFIABILIDA D (%)	DEMANDA (m ³ /s)	CONFIABILIDA D (%)	DEMANDA (m ³ /s)	DÍAS DE NO OPERAC IÓN	DÍAS DE OPERACI ÓN A LA PLANTA BOSCONA
		99	0,731	75,89	2,73	176	161
		98	0,75	75,34	2,75	180	157
		97	0,774	74,11	2,77	189	154
		96	0,795	73,56	2,8	193	151
		95	0,812	72,74	2,81	199	149
		90	0,887	70,41	2,89	216	137
		85	0,975	67,95	2,98	234	124
		80	1,099	64,66	3,1	258	110
		75,205	1,2	61,78	3,2	279	102
		70	1,35	-	-	-	-
		67,52	1,399	-	-	-	-
1999-2000	F. Niña	100	0,89	90,55	2,89	69	131
		85,64	1,2	76,3	3,2	173	93

ANEXO N. Descarga de fondo del embalse Bucaramanga cuando opera y no a la planta los Angelinos

AÑO 1990						
DÍA	No operando planta los Angelinos			Operando planta los Angelinos		
	NIVEL msnm	CAUDAL DESCARGA (m ³ /s)	DELTA COTA (m)	NIVEL msnm	CAUDAL DESCARGA (m ³ /s)	DELTA COTA (m)
0	885,8	11		885,8	9,77	
1	883,24	11	2,56	883,52	9,77	2,28
2	880,96	11	2,28	881,44	9,71	2,08
3	879,09	11	1,87	879,72	9,60	1,72
4	877,46	11	1,63	878,24	9,51	1,48
5	875,81	10,9	1,65	876,87	9,43	1,37
6	873,9	10,79	1,91	875,4	9,35	1,47
7	871,59	10,67	2,31	873,73	9,28	1,67
8	868,9	10,52	2,69	871,75	9,19	1,98
9	865,91	10,35	2,99	869,53	9,08	2,22
10	862,75	10,16	3,16	867,05	8,96	2,48
11	859,52	9,96	3,23	864,33	8,83	2,72
12	856,49	9,75	3,03	861,64	8,69	2,69
13	853,63	9,56	2,86	858,96	8,54	2,68
14	850,84	9,38	2,79	856,33	8,40	2,63
15	847,97	9,2	2,87	853,84	8,26	2,49
16	844,56	9,01	3,41	851,41	8,13	2,43
17	840,1	8,7968008	4,46	848,97	8,00	2,44
18				846,29	7,87	2,68
19				843,03	8,91	3,26
20				838,77	8,69	4,26

FENÓMENO DEL NIÑO 1992

DÍA	<i>No operando planta los Angelinos</i>			<i>Operando planta los Angelinos</i>		
	NIVEL msnm	CAUDAL DESCARGA (m ³ /s)	DELTA COTA (m)	NIVEL msnm	CAUDAL DESCARGA (m ³ /s)	DELTA COTA (m)
0	885,8	11		885,8	9,77	
1	883,33	11		883,62	9,77	
2	881,06	11	2,27	881,55	9,71	2,07
3	879,2	11	1,86	879,83	9,60	1,72
4	877,58	11	1,62	878,37	9,51	1,46
5	875,96	10,91	1,62	877	9,43	1,37
6	874,13	10,8	1,83	875,59	9,36	1,41
7	871,9	10,69	2,23	873,96	9,29	1,63
8	869,23	10,54	2,67	872,01	9,20	1,95
9	866,25	10,37	2,98	869,8	9,10	2,21
10	862,99	10,18	3,26	867,25	8,98	2,55
11	859,69	9,98	3,3	864,49	8,84	2,76
12	856,52	9,76	3,17	861,64	8,69	2,85
13	853,59	9,56	2,93	858,9	8,54	2,74
14	850,71	9,37	2,88	856,19	8,40	2,71
15	847,7	9,19	3,01	853,6	8,25	2,59
16	844,12	9	3,58	851,1	8,11	2,5
17	839,33	8,7686716	4,79	848,56	7,98	2,54
18				845,7	7,85	2,86
19				842,17	8,87	3,53
20				837,79	8,64	4,38

FENÓMENO DE LA NIÑA 1999						
DÍA	No operando planta los Angelinos			Operando planta los Angelinos		
	NIVEL msnm	CAUDAL DESCARGA (m ³ /s)	DELTA COTA (m)	NIVEL msnm	CAUDAL DESCARGA (m ³ /s)	DELTA COTA (m)
0	885,8	11		885,8	9,77	
1	883,54	11		883,83	9,77	
2	881,47	11	2,07	881,97	9,73	1,86
3	879,75	11	1,72	880,41	9,63	1,56
4	878,11	11	1,64	878,9	9,54	1,51
5	876,58	10,94	1,53	877,58	9,46	1,32
6	874,93	10,84	1,65	876,28	9,39	1,3
7	872,95	10,74	1,98	874,83	9,32	1,45
8	870,69	10,61	2,26	873,24	9,25	1,59
9	868	10,47	2,69	871,3	9,16	1,94
10	865,25	10,3	2,75	869,29	9,06	2,01
11	862,09	10,12	3,16	866,8	8,95	2,49
12	858,85	9,92	3,24	864,06	8,82	2,74
13	855,74	9,71	3,11	861,23	8,67	2,83
14	852,79	9,51	2,95	858,43	8,52	2,8
15	849,98	9,32	2,81	855,8	8,37	2,63
16	846,9	9,14	3,08	853,25	8,23	2,55
17	843,17	8,946397	3,73	850,81	8,10	2,44
18	838,26	8,7079381		848,38	7,97	2,43
19				845,54	9,04	2,84
20				842,23	8,86	3,31
				837,67	8,65	

ANEXO O. Explicación de la programación del modelo en Excel del balance hídrico del embalse Bucaramanga

El modelo diseñado en el software Excel permite ingresar las variables hidrológicas que intervienen en el balance hídrico del embalse Bucaramanga. En el modelo de balance hídrico se implementaron las curvas Infiltración vs Nivel, Nivel vs Volumen, Área vs Nivel, la curva de correlación de gastos del vertedero de excesos, y la curva de calibración de la descarga de fondo del embalse.

Se aplicaron los planteamientos mencionado en el numeral 3.4 al periodo de 1990 a 2000, que contempla todos los fenómenos ENSO, a los años 1991 a 1993 y 1997 a 1998 en los que se presentó fenómeno de El Niño, y a los años 1999-2000 donde se presentó fenómeno de La Niña. En el CD adjunto se encuentra el modelo del balance hídrico en el software Excel, con los planteamientos estudiados.

En la programación de Excel para el modelo de balance hídrico, las hojas 1 a 10 contienen la misma información. En la figura 1 se encuentra el nombre cada una con una breve descripción de su contenido.

Figura 1. Descripción de las hojas 1 a 10 de la programación en Excel del modelo de balance hídrico del embalse Bucaramanga.

Nº Hoja	Nombre	Estación	Fuente	Descripción
1	Caudal Río Tona(E. Tona-AMB)	Tona	amb	Serie de datos completa de caudales del río Tona 1990-2000
2	Precipitación (E. UIS IDEAM)	UIS	IDEAM	Serie de datos completa de Precipitación 1990-2000
3	Evaporación (UIS-IDEAM)	UIS	IDEAM	Serie de datos completa de evaporación 1990-2000
4	Ecuación cota-infiltración			Curva de infiltración(m ³ /s) VS cota (m.s.n.m)

Nº Hoja	Nombre	Estación	Fuente	Descripción
5	Cota - Área		amb	Curva de área (m) VS cota (m.s.n.m)
6	Ec. Volumen-Cota		amb	Curva de Cota (m.s.n.m) VS área (m ²)
7	Ec. Cota Volumen		amb	Curva de Volumen (m ³) VS Cota (m.sn.m)
8	Curva de Calibración- Descarga		amb	Cota VS Caudal Asumido (m ³ /s)
9	Ec. Vertedero de Exceso		amb	Altura sobre el vertedero (m) VS Caudal (m ³ /s)
10	Modelo 1990-2000			Balance Hídrico del embalse Bucaramanga 1990-2000

A continuación, se explica cómo se realizó la programación de la hoja número 10 del modelo del balance hídrico para el periodo de 1990 a 2000:

- **Celda E5:** Cota máxima de operación del embalse = 885,8 (msnm)
- **Celda E6:** Área superficial máxima = 521302 (m²)
- **Celda E7:** Volumen máximo = 17031103,06 (m³)
- **Celda E9:** Cota mínima de operación del embalse = 841 (msnm)
- **Celda E10:** Área superficial mínima = 155060,4 (m²)
- **Celda E11:** Volumen máximo = 2878644,997 (m³)
- **Celda K6:** Demanda planta Angelinos (opcional) = se ingresa el caudal en m³/s
- **Celda K7:** Demanda planta Bosconia (opcional) = se ingresa el caudal en m³/s
- **Celda K9:** infiltración que se produce cuando el embalse tiene el volumen máximo, se ingresa en (m³/s)
- **Celda K10:** Caudal ecológico (m³/s)
- **Celda K11:** Cota de recuperación (m). Este valor es opcional; sirve para evitar que el embalse llegue a la cota mínima. Si no se quiere tener en cuenta se introduce el valor de la cota mínima de operación.

- **Celda K12:** Volumen de recuperación. Es el volumen del embalse en la cota de recuperación.
- **Columna B:** FECHA= ingresamos la fecha del periodo que se quiere analizar.
- **Columna C:** CAUDAL (m^3/s) = Busca el caudal correspondiente en la Hoja 1 (CAUDAL RÍO TONA (E. TONA -AMB)) de las fechas consideradas.
- **Columna D:** PRECIPITACIÓN ($mm/día$) = Busca la precipitación correspondiente en la Hoja 2 (PRECIPITACIÓN (E. UIS IDEAM)) de las fechas consideradas.
- **Columna F:** EVAPORACIÓN ($mm/día$) = Busca la evaporación correspondiente en la Hoja 3 EVAPORACIÓN (UIS-IDEAM)) de las fechas consideradas.
- **Columna H:** INFILTRACIÓN (m^3/s) = Busca la infiltración que le corresponde a la cota del día anterior en la Hoja 4 (Ecuación Cota-infiltración). Se debe tener en cuenta que la celda H18 es la infiltración a volumen máximo de la celda K9.
- **Columna J:** CAUDAL VÁLVULA (m^3/s) = Es el caudal ecológico que envía el amb. Compara la infiltración con el caudal ecológico y si la infiltración es mayor a este el valor es cero y si no, el valor es la resta entre el caudal ecológico y la infiltración.
- **Columna L:** CAUDAL (m^3) = se calcula el volumen diario que entra de caudal de la columna C.
- **Columna M:** PRECIPITACIÓN (m^3) = Calcula el volumen diario que entra por precipitación de la columna D.
- **Columna O:** EVAPORACIÓN (m^3) = Calcula el volumen diario que sale por evaporación de la columna F.
- **Columna Q:** INFILTRACIÓN (m^3) = Calcula el volumen diario que sale por infiltraciones de la columna H.
- **Columna S:** CAUDAL DE VÁLVULA (m^3) = Calcula el volumen diario del caudal de válvula de la columna J.
- **Columna U:** DEMANDA (m^3) = Calcula el volumen diario producido por la demanda, la cual es la suma de las celdas K5 y K6.

- **Columna W:** VOLUMEN TOTAL SIN EXCESOS (Mm^3) = Volumen inicial (máximo) + Volumen de Caudal (m^3) + Volumen de Precipitación (m^3) – Volumen Evaporación (m^3) – Volumen de Infiltración (m^3) – Volumen de válvula (m^3) – Demanda (m^3) / 1000000.
- **Columna Y:** Altura de Exc. (m) = Altura sobre el labio del vertedero de excesos calculada con la curva de correlación de gastos. Compara el volumen total sin excesos (columna W) con el volumen máximo (celda E7), y si el volumen es mayor al máximo calcula la altura de excesos y si no, el valor es cero.
- **Columna Z:** Volumen excesos (Mm^3). Es el volumen que se produce sobre la cresta del vertedero de excesos. Busca el área que le corresponde a la suma de: la cota máxima y la altura de excesos, la multiplica por la altura de excesos y la divide en 1'000.000
- **Columna AA:** Volumen Total Embalse (Mm^3). Para el cálculo del volumen se tiene en cuenta que para las cotas menores a la cota mínima (841 msnm) no se sustrae demanda, para las que se encuentran entre la mínima y la de recuperación (opcional) compara el volumen de entradas con la demanda, donde se sustrae demanda si la entrada es mayor, y para las mayores a la cota de recuperación siempre resta la demanda.
- **Columna AC:** Cota (msnm). La cota se calcula con la ecuación de la hoja 6 (Ec. Volumen-Cota) ingresando el volumen total del embalse (columna AA).
- **Columna AD:** Área (m^2). Es el área del espejo del agua del nivel correspondiente en donde con la cota busca el área la hoja 5 (Cota – Área).
- **Columna AE:** Estado. Es el estado de operación del embalse. Compara la cota (columna AC) con la cota mínima de operación (celda E9), si es menor el embalse se encuentra “NO OPERANDO” y si no se encuentra “OPERANDO”.
- **Celda S6:** NO OPERA. Cuenta las veces que el embalse no está operando.
- **Celda S7:** OPERANDO. Cuenta las veces que el embalse está operando.
- **Celda S8:** TOTAL. Cuenta cuantos días se están analizando.

- **Celda S9:** PROBABILIDAD DE NO OPERACIÓN= Es la probabilidad con la que el embalse no opera = $\frac{NO\ OPERA}{TOTAL} * 100 = \frac{Celda\ S6}{Celda\ S8} * 100$
- **Celda S10:** PROBABILIDAD DE OPERACIÓN= Es la probabilidad con la que el embalse opera = $\frac{OPERA}{TOTAL} * 100 = \frac{Celda\ S7}{Celda\ S8} * 100$

La gráfica que se muestra en la parte derecha del modelo describe el comportamiento del embalse para el periodo se está analizando cómo se mostró en el Anexo J. A continuación se presenta un ejemplo de un mes de la interfaz manejada:

MODELO 1990 - 2000

COTA MÁXIMA	885,8	msnm
ÁREA SUPERFICIAL MÁXIMA	521302,85	m ²
VOLUMEN MÁXIMO	17031103,06	m ³

DEMANDA PLANTA LOS ANGELINOS	1,2	m ³ /s
DEMANDA PLANTA BOSCONIA		m ³ /s

COTA MÍNIMA	841	msnm
ÁREA SUPERFICIAL MÍNIMA	155060,4	m ²
VOLUMEN MÍNIMO	2,878,645	m ³

INFILTRACIÓN A VOLUMEN MÁXIMO	0,12	m ³ /s
CAUDAL ECOLÓGICO	0,066	m ³ /s
COTA DE RECUPERACIÓN	841	msnm
VOLUMEN DE RECUPERACIÓN	2662846,21	m ³

FECHA	CAUDAL (m³/s)	PRECIPITACIÓN (mm/día)	EVAPORACIÓN (mm/día)	INFILTRACIÓN (m³/s)	CAUDAL VÁLVULA (m³/s)	CAUDAL (m³)	PRECIPITACIÓ N (m³)	EVAPORAC IÓN (m³)	INFILTRACIÓN (m³)
01/01/1990	0,23	0	2,2	0,12	0	19962,58	0	1146,87	10368
02/01/1990	0,18	1	5,2	0,12	0	15254,48	521,3	2702,84	10368
03/01/1990	0,09	0,5	3,6	0,12	0	8002,92	260,65	1861,51	10368
04/01/1990	0,06	0	4,3	0,12	0	5372,23	0	2211,51	10368
05/01/1990	0,09	0	1,2	0,12	0	8002,92	0	613,72	10368
06/01/1990	0,09	0	4,12	0,12	0	8002,92	0	2154,55	10368
07/01/1990	0,19	0,5	4,12	0,12	0	16360,95	260,65	2142,34	10368
08/01/1990	0,28	0	6,4	0,12	0	24000,38	0	3308,77	10368
09/01/1990	0,41	2,2	3,9	0,12	0	35206,9	1146,87	2006,83	10368

FECHA	CAUDAL (m ³ /s)	PRECIPITACIÓN (mm/día)	EVAPORACIÓN (mm/día)	INFILTRACIÓN (m ³ /s)	CAUDAL VÁLVULA (m ³ /s)	CAUDAL (m ³)	PRECIPITACIÓN N (m ³)	EVAPORACIÓN IÓN (m ³)	INFILTRACIÓN (m ³)
10/01/1990	0,43	1	3,1	0,12	0	37020,06	521,3	1588,78	10368
11/01/1990	0,29	0	4	0,12	0	25446,02	0	2041,78	10368
12/01/1990	0,39	29,7	6,6	0,12	0	33447,89	15482,69	3354,13	10368
13/01/1990	0,54	0	4,12	0,12	0	46916,64	0	2087,96	10368
14/01/1990	0,39	0,7	4,12	0,12	0	33447,89	364,91	2080,93	10368
15/01/1990	0,45	0	4,1	0,12	0	38887,91	0	2060,82	10368
16/01/1990	0,31	0	3	0,12	0	26942,49	0	1502,26	10368
17/01/1990	0,37	0	5,3	0,12	0	31742,49	0	2643,06	10368
18/01/1990	0,37	0	3,3	0,12	0	31742,49	0	1638,87	10368
19/01/1990	0,37	0	4,1	0,12	0	31742,49	0	2028,44	10368
20/01/1990	0,35	0	4,12	0,12	0	30090,16	0	2031,72	10368
21/01/1990	0,39	0	4,6	0,12	0	33447,89	0	2258,06	10368
22/01/1990	0,35	0	3,4	0,12	0	30090,16	0	1662,6	10368
23/01/1990	0,29	0	6	0,12	0	25446,02	0	2922,69	10368
24/01/1990	0,29	0	3,3	0,12	0	25446,02	0	1601,26	10368
25/01/1990	0,33	0,7	5,4	0,12	0	28490,35	364,91	2610,07	10368
26/01/1990	0,41	3,3	3,2	0,12	0	35206,9	1720,3	1540,96	10368
27/01/1990	0,28	0	3,1	0,12	0	24000,38	0	1487,8	10368
28/01/1990	0,28	0	5	0,12	0	24000,38	0	2390,71	10368

FECHA	CAUDAL (m ³ /s)	PRECIPITACIÓN (mm/día)	EVAPORACIÓN (mm/día)	INFILTRACIÓN (m ³ /s)	CAUDAL VÁLVULA (m ³ /s)	CAUDAL (m ³)	PRECIPITACIÓN N (m ³)	EVAPORACIÓN IÓN (m ³)	INFILTRACIÓN (m ³)
29/01/1990	0,1	0	4,7	0,12	0	8760,08	0	2238,83	10368
30/01/1990	0,23	0,3	3,7	0,12	0	19962,58	156,39	1755,18	10368
31/01/1990	0,28	0	4,5	0,12	0	24000,38	0	2126,6	10368

FECHA	CAUDAL DE VÁLVULA (m ³)	DEMANDA (m ³)	VOLUMEN TOTAL SIN EXCESOS (Mm ³)	Altura Exc, (m)	Volumen Excesos (Mm ³)	VOLUMEN TOTAL EMBALSE (Mm ³)	COTA m,s,n,m,	ÁREA (m ²)	ESTADO
01/01/1990	0	103680	16,94	0	0	16,94	885,63	519777,4	OPERANDO
02/01/1990	0	103680	16,83	0	0	16,83	885,33	517085,42	OPERANDO
03/01/1990	0	103680	16,73	0	0	16,73	885,02	514303,71	OPERANDO
04/01/1990	0	103680	16,77	0	0	16,62	884,7	511432,27	OPERANDO
05/01/1990	0	103680	19,39	0,02	0,01	17,04	885,94	522559,1	OPERANDO
06/01/1990	0	103680	16,93	0	0	16,93	885,61	519597,93	OPERANDO
07/01/1990	0	103680	16,83	0	0	16,83	885,32	516995,69	OPERANDO
08/01/1990	0	103680	16,74	0	0	16,74	885,05	514572,91	OPERANDO
09/01/1990	0	103680	16,66	0	0	16,66	884,82	512509,06	OPERANDO
10/01/1990	0	103680	16,58	0	0	16,58	884,59	510445,22	OPERANDO
11/01/1990	0	103680	16,49	0	0	16,49	884,34	508201,9	OPERANDO
12/01/1990	0	103680	16,42	0	0	16,42	884,14	506407,25	OPERANDO
13/01/1990	0	103680	16,35	0	0	16,35	883,95	504702,34	OPERANDO

FECHA	CAUDAL DE VÁLVULA (m³)	DEMANDA (m³)	VOLUMEN TOTAL SIN EXCESOS (Mm³)	Altura Exc, (m)	Volumen Excesos (Mm³)	VOLUMEN TOTAL EMBALSE (Mm³)	COTA m,s,n,m,	ÁREA (m²)	ESTADO
14/01/1990	0	103680	16,27	0	0	16,27	883,72	502638,49	OPERANDO
15/01/1990	0	103680	16,19	0	0	16,19	883,51	500754,11	OPERANDO
16/01/1990	0	103680	16,1	0	0	16,1	883,28	498690,26	OPERANDO
17/01/1990	0	103680	16,02	0	0	16,02	883,05	496626,41	OPERANDO
18/01/1990	0	103680	15,94	0	0	15,94	882,84	494742,03	OPERANDO
19/01/1990	0	103680	15,85	0	0	15,85	882,62	492767,91	OPERANDO
20/01/1990	0	103680	15,76	0	0	15,76	882,41	490883,53	OPERANDO
21/01/1990	0	103680	15,68	0	0	15,68	882,2	488999,15	OPERANDO
22/01/1990	0	103680	15,6	0	0	15,6	881,99	487114,77	OPERANDO
23/01/1990	0	103680	15,5	0	0	15,5	881,78	485230,38	OPERANDO
24/01/1990	0	103680	15,41	0	0	15,41	881,57	483346	OPERANDO
25/01/1990	0	103680	15,33	0	0	15,33	881,37	481551,35	OPERANDO
26/01/1990	0	103680	15,25	0	0	15,25	881,19	479936,17	OPERANDO
27/01/1990	0	103680	15,16	0	0	15,16	880,99	478141,52	OPERANDO
28/01/1990	0	103680	15,06	0	0	15,06	880,79	476346,87	OPERANDO
29/01/1990	0	103680	14,96	0	0	14,96	880,57	474372,75	OPERANDO
30/01/1990	0	103680	14,86	0	0	14,86	880,37	472578,1	OPERANDO
31/01/1990	0	103680	14,77	0	0	14,77	880,19	470962,92	OPERANDO