UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

CARRERA INGENIERÍA CIVIL

TEMA:

"ANÁLISIS DE LA LAMINACIÓN DE AVENIDAS Y PROPUESTA DE AJUSTE EN ALIVIADEROS DE LA PRESA EL AZÚCAR"

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

AUTORES:

ALLISON ESTEFANIA RAMOS MALDONADO

RONNY VLADIMIR MENÉNDEZ LAINEZ

TUTOR:

ING. GUIDO MOISÈS ORTIZ SAFADI, Mg

LA LIBERTAD, ECUADOR

2025

UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TEMA:

ANÁLISIS DE LA LAMINACIÓN DE AVENIDAS Y PROPUESTA DE AJUSTE EN ALIVIADEROS DE LA PRESA EL AZÚCAR

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

AUTOR:

ALLISON ESTEFANIA RAMOS MALDONADO

RONNY VLADIMIR MENÉNDEZ LAINEZ

TUTOR:

ING. GUIDO MOISÈS ORTIZ SAFADI, MSc.

LA LIBERTAD – ECUADOR

2025

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

Ing. Lucrecia Moreno Alcívar, Ph.D.
DIRECTOR DE CARRERA

Ing. Guido Moisés Ortiz Safadi, MSc.
DOCENTE TUTOR

Ing. Richard Ramírez Palma, MSc.
DOCENTE ESPECIALISTA

Ing. Richard Ramírez Palma, MSc.
DOCENTE UIC

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi madre, Maritza Lainez**,** cuyo amor, esfuerzo y sacrificio han sido una fuente inagotable de inspiración a lo largo de este arduo camino académico. Su fortaleza y confianza en mí me motivaron a avanzar incluso cuando las circunstancias fueron difíciles.

A mi familia, por su apoyo incondicional y por ser el pilar fundamental que me sostuvo en cada etapa de mi formación.

A mi enamorada, Evelyn Puertas**,** por su amor, paciencia y compañía constante. Sus palabras de aliento y su apoyo incondicional fueron esenciales para mantenerme firme y no rendirme.

A mis amigos, quienes con su comprensión, compañía y ánimo hicieron más llevadero este proceso académico y personal.

RONNY MENÉNDEZ

Dedico este trabajo a mis padres, José Ramos y Rosa Maldonado por su apoyo inquebrantable, su amor infinito y los innumerables sacrificios que han hecho para guiarme en este camino. Su confianza en mí ha sido una fuente constante de motivación; sin ellos, este logro no habría sido posible. Gracias por ser mi pilar y por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia.

A mis queridos hermanos, su presencia ha sido mi fuerza para seguir adelante y superar los desafíos. Gracias por estar siempre a mi lado y creer en mí.

A mis queridos amigos, cuya amistad y apoyo han sido fundamentales para mí y para vencer las adversidades.

ALLISON RAMOS

CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO

En calidad de tutor del trabajo de investigación para titulación del tema Análisis de la laminación de avenidas y propuesta de ajuste en aliviaderos de la Presa el Azúcar, elaborado por los estudiantes **RONNY VLADIMIR MENÉNDEZ LAÍNEZ Y ALLISON ESTEFANÍA RAMOS MALDONADO** , egresados de la carrera de Ingenieria Civil, de la Facultad de Ciencias de la Ingenieria, me permito declarar que una vez analizado en el sistema anti plagio COMPILATIO, luego de haber cumplido con los requerimientos exigidos de valoración, la presente tesis, se encuentra con un **7%** de la valoración permitida.

FIRMA DEL TUTOR

Ing. Guido Moisés Ortiz Safadi, Mg

C.I.:0904149481

CERTIFICADO DE ANÁLISIS
magister

1 TESIS LAMINACION DE AVENIDAS. RAMOS

7% Textos sospechosos

- 1% Similitudes
  - 0 % similitudes entre comillas
  - 0 % entre las fuentes mencionadas
- 0% Idiomas no reconocidos
- 6% Textos potencialmente generados por la IA

Nombre del documento: 1 TESIS LAMINACION DE AVENIDAS. RAMOS.pdf
ID del documento: a61a33eb33ad08c429c70520e1d7d7e9e316ad79
Tamaño del documento original: 1,84 MB

Depositante: GUIDO MOISES ORTÍZ SAFADI
Fecha de depósito: 10/11/2025
Tipo de carga: interface
fecha de fin de análisis: 10/11/2025

Número de palabras: 11.498
Número de caracteres: 85.846

Ubicación de las similitudes en el documento:

Fuentes principales detectadas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	doi.org | Non-stationary hydrological regimes due to climate change: the impact o... https://doi.org/10.3390/atmos13050825	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (56 palabras)
2	132.248.9.195 | Modelo hidráulico de flujo bidimensional para estimar el escurrim... http://132.248.9.195/ptd2019/enero/0784652/index.html	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (28 palabras)
3	dergipark.org.tr | CBS Tabanlı Melez Makine Öğrenmesi Uygulamalarının Anl Sel ... https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/2556089	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (25 palabras)

Fuentes con similitudes fortuitas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	Documento de otro usuario #6abefa Viene de de otro grupo	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (14 palabras)
2	dspace.ups.edu.ec http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/24257/1/TTS1152.pdf	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (13 palabras)
3	ribuni.uni.edu.ni | Aplicación de modelos hidrológicos / APPLICATION OF HYDRO... http://ribuni.uni.edu.ni/5949/1/Art.+5+Rev-5.pdf	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (11 palabras)
4	0mas000.com | Estudios Hidrológicos para Cuantificar los Caudales - 0mas000 https://0mas000.com/estudios-hidrologicos-para-cuantificar-los-caudales/	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (11 palabras)
5	repositorio.upse.edu.ec https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/13890/1/UPSE-TIC-2025-0041.pdf	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (11 palabras)

Fuentes mencionadas (sin similitudes detectadas)

Estas fuentes han sido citadas en el documento sin encontrar similitudes.

1 https://doi.org/10.1139/t01
2 https://www.ferc.gov/sites/default/files/2020
3 https://oa.upm.es/56577/1/TFG_ANA_GIL_MERINO.pdf
4 http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/63074
5 https://www.inamhi.gob.ec/geoinformacion-hidrometeorologica/

Guido Moises Ortiz Safadi
Time Stamping Security Data

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, **RONNY VLADIMIR MENÉNDEZ LAÍNEZ Y ALLISON ESTEFANÍA RAMOS MALDONADO**, declaramos bajo juramento que el presente trabajo de titulación denominado **"ANALISIS DE LA LAMINACION DE AVENIDAS Y PROPUESTA DE AJUSTES EN ALIVIADEROS DE LA PRESA EL AZUCAR"**, no tiene antecedentes de haber sido elaborado en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera de Ingeniería Civil por lo cual es un trabajo exclusivamente inédito y perteneciente de nuestra autoría.

Por medio de la presente declaración cedemos los derechos de autoría y propiedad intelectual, correspondientes a este trabajo, a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Atentamente,

Ronny Vladimir Menéndez Laínez

C.I. 0928028554

Allison Estefanía Ramos Maldonado

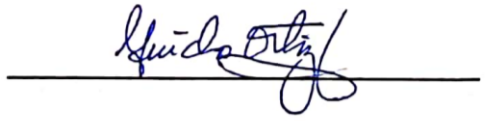
C.I. 1005261464

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

Ing. Guido Molsés Ortiz Safadi, Mg
TUTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN
Universidad Estatal Península de Santa Elena

En mi calidad de Tutor del presente Trabajo de Titulación, modalidad Proyecto de investigación **"ANALISIS DE LA LAMINACION DE AVENIDAS Y PROPUESTA DE AJUSTES EN ALIVIADEROS EN LA PRESA EL AZUCAR"** elaborado por el Sr. **RONNY VLADIMIR MENÉNDEZ LAÍNEZ** y el Srta. **ALLISON ESTEFANÍA RAMOS MALDONADO,** egresados de la Carrera de Ingeniería Civil, Facultad Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil, me permito declarar que luego de haber orientado, estudiado y revisado la presente tesis, la apruebo en todas sus partes.

TUTOR



Ing. Guido Molsés Ortiz Safadi, Mg

Lcda. Betty Ruth Gómez Suárez, Mgtr.
Celular: 0962183538
Correo: bettyruthgomez@educacion.gob.ec

CERTIFICACIÓN GRAMATICAL Y ORTOGRÁFICA

Yo, ***BETTY RUTH GÓMEZ SUÁREZ***, en mi calidad de ***LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA EDUCACIÓN Y MAGÍSTER EN DISEÑO Y EVALUACIÓN DE MODELOS EDUCATIVOS***, por medio de la presente tengo a bien indicar que he leído y corregido el Trabajo de Integración Curricular previo a la obtención del Título de Ingeniero en Civil, denominado ***"ANÁLISIS DE LA LAMINACIÓN DE AVENIDAS Y PROPUESTA DE AJUSTE EN ALIVIADEROS DE LA PRESA EL AZÚCAR"***, de los estudiantes: **RAMOS MALDONADO ALLISON ESTEFANIA y MENÉNDEZ LAINEZ RONNY VLADIMIR.**

Certifico que está redactado con el correcto manejo del lenguaje, claridad en las expresiones, coherencia en los conceptos e interpretaciones, adecuado empleo en la sinonimia. Además de haber sido escrito de acuerdo a las normas de ortografía y sintaxis vigentes.

En cuanto puedo decir en honor a la verdad y autorizo a los interesados hacer uso del presente como estime conveniente.

Santa Elena, 06 de Noviembre del 2025

Lcda. Betty Ruth Gómez Suárez, Mgtr.
CI. 0915036529
LICENCIADO EN CIENCIAS DE LA EDUCACIÓN
MAGÍSTER EN DISEÑO Y EVALUCIÓN DE MODELOS EDUCATIVOS
N° DE REGISTRO DE SENECYT 1050-2014-86052892

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que, de manera directa o indirecta, hicieron posible la realización de este trabajo de titulación.

Agradezco profundamente al Ing. Guido Moisés Ortiz Safadi, Mg.**,** Tutor del Trabajo de Titulación en la Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, por su orientación constante, disponibilidad y acompañamiento académico, cuya guía fue fundamental para el desarrollo técnico y metodológico de esta investigación.

Extiendo también mi reconocimiento a los docentes de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, quienes, a lo largo de mi formación profesional, aportaron sus conocimientos y experiencia, fortaleciendo mis capacidades y criterio profesional.

Finalmente, expreso mi gratitud a mis compañeros y amigos, quienes, con su apoyo moral, colaboración y compañía, hicieron de este proceso una experiencia enriquecedora y significativa a nivel personal y académico.

RONNY VLADIMIR MENÉNDEZ LAÍNEZ

Con todo respeto y cariño, agradezco a todos los docentes de la Universidad por su guía y apoyo constante que me han inspirado a superar cada desafío y a crecer no solo como estudiante, sino también como persona.

Expreso mi sincero agradecimiento al Ing. Guido Moisés Ortiz Safadi Mg., tutor de mi tesis en la Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, por su apoyo su permanente, su paciencia y dedicación durante todo el proceso académico, su asesoría fue clave para el correcto desarrollo técnico y metodológico de este trabajo.

Manifiesto mi profunda gratitud a la Universidad, por brindarme las herramientas, los espacios y las oportunidades necesarias para desarrollar mis habilidades y conocimientos. Esta Institución ha sido el marco que ha dado sentido y rumbo a mi trayectoria profesional y personal.

Deseo dar las gracias de corazón a mi familia por su amor incondicional, apoyo constante y compresión durante todo este proceso. Su confianza y sacrificio han sido la fuerza que me ha impulsado a alcanzar esta meta, y este logro es tanto suyo como mío.

Finalmente, expreso mi gratitud a mis amigos, por estar siempre presentes, por el aliento, las palabras de ánimo, y por compartir los momentos de alegría y dificultad. Su compañía ha hecho más llevadero este camino hacia la culminación de este proyecto.

ALLISON ESTEFANÍA RAMOS MALDONADO

CONTENIDO

DEDICATORIA iii

CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO v

DECLARACIÓN DE AUTORÍA vii

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR viii

CERTIFICACIÓN GRAMATICAL Y ORTOGRÁFICA ix

AGRADECIMIENTOS x

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN 22

1.1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 23

1.2 ANTEDECENTES 24

1.3 HIPÓTESIS 25

1.3.1. Hipótesis General. 25

1.3.2 Hipótesis Especificas 25

1.4 OBJETIVOS 26

1.4.1 Objetivo General 26

1.4.2 Objetivos Específicos 26

1.5 ALCANCE 26

1.6 VARIABLES 27

1.6.1 Variables Dependientes: 27

1.6.2 Variables Independientes 27

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO 28

2.1. HIDROLOGÍA SUPERFICIAL Y AVENIDAS 28

2.1.1 Definición de avenida 28

2.2 LAMINACIÓN DE AVENIDAS 30

2.2.1 Vertederos 30

2.3 HEC- HMS 31

2.3.1 Simulación Hidrológica 31

2.4 MÉTODOS E INSTRUMENTOS 31

2.4.1 Método USBR. 31

2.5.1 Software Utilizados 31

2.6 CURVA DE DESCARGA DEL ALIVIADERO 32

2.6.1 Tipo de Aliviaderos 33

2.7 MODELO HIDROLÓGICO 33

2.8 MÉTODO DEL EMBALSE (RESERVOIR ROUTING) 34

CAPITULO III: METODOLOGÍA 35

3.1 TIPO DE ESTUDIO 35

3.2 ENFOQUE DE INVESTIGACION 35

3.2.1 Enfoque Cuantitativo 35

3.2.2 Población y Muestra. 35

3.2.3 Métodos Técnicos e Instrumentos de Recolección de Datos 35

3.4 METODOLOGÍA DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS. 37

CAPITULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS 38

4.1. CURVAS DE NIVEL Y MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL (DEM) . 38

4.2. APLICACIÓN DEL MODELADO EN HEC-HMS 40

4.3. DELIMITACIÓN DE CUENCA Y SUBCUENCAS 40

4.4. CARACTERÍSTICAS DE LAS SUBCUENCAS 40

4.5. MODELACIÓN DE LA CUENCA. 41

4.5.1 Métodos de Transformación. 41

4.5.2 Métodos de Pérdida 43

4.5.3 Parámetros K y X para Tránsito de Caudales. 44

4.6 MODELO METEOROLÓGICO 45

4.6.1 Elaboración del Polígono de Thiessen con las Estaciones. 45

4.6.2 Polígono de Thiessen. 45

4.7. ANÁLISIS DE LLUVIA 46

4.7.1 Calculo de las Curvas IDF del Área de Estudio. 46

4.7.2 Generación del Hietograma a partir de Curvas IDF. 55

4.8. SELECCIÓN DE LA FRECUENCIA DE DISEÑO. 56

4.9 CARACTERÍSTICAS DEL EMBALSE 57

4.10 SIMULACIÓN HIDROLÓGICA 58

4.10.1 Modelado. 58

4.11 DISEÑO DEL PERFIL TIPO CREAGER 63

4.11.1 Definición de las condiciones hidráulicas de diseño. 63

4.11.2 Determinación de la forma del cimacio sin control 65

4.11.3 Determinación de los parámetros K y n 65

4.11.4 Obtención del punto de tangencia y derivación de la ecuación. 67

4.11.5 Cálculo de las coordenadas del perfil (x, y) 67

4.11.6 Representación gráfica del perfil 68

4.11.7 Determinación de radios de curvatura R_1 y R_2 69

LISTA DE FIGURAS

Ilustración 1 Curvas de nivel del área de estudio. 39

Ilustración 2 Modelo Digital de Elevaciones (DEM) del área de estudio. 39

Ilustración 3 Subcuencas del área de estudio. 40

Ilustración 4 Metodo del polígono de Thiessen realizado en ArcGIS. 45

Ilustración 5 Curva IDF de la cuenca de estudio. 55

Ilustración 6 Modelo Hidrológico. 59

Ilustración 7 Hidrograma de entrada generado por HEC-HMS para un Tr de 1000 años. 61

Ilustración 8 Caudales de salida del vertedero de servicio (45 msnm) de la presa El Azúcar 61

Ilustración 9 Caudales de salida del vertedero de auxiliar (45.5 msnm) de la presa El Azúcar 62

Ilustración 10 Caudales de salida del vertedero de servicio (45 msnm) de la presa El Azúcar 62

Ilustración 11 Caudales de salida del vertedero auxiliar (46.5 msnm) de la presa El Azúcar 63

Ilustración 12 Caudal de Diseño (Qd) del vertedero de servicio 64

Ilustración 13 Caudal de Diseño (Qd) del vertedero auxiliar 65

Ilustración 14 Valores de k para el diseño del perfil de un cimacio. 66

Ilustración 15 Valores de n para el diseño del perfil de un cimacio. 66

Ilustración 16 Representación Gráfica de Cimacio del Vertedero de Servicio. 68

Ilustración 17 Representación Gráfica de Cimacio del Vertedero Auxiliar. 68

Ilustración 18 Valores de $R1HO\ y\ R2HO$ para el diseño de un perfil de un cimacio. 69

Ilustración 19 Perfil del vertedero tipo Creager diseñado con los caudales de salida simulados en HEC-HMS,..... 70

Ilustración 20 Perfil del vertedero tipo Creager diseñado con los caudales de salida simulados en HEC-HMS 71

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Recolección de Datos..... 36

Tabla 2 Parámetros básicos de las subcuencas 41

Tabla 3 Parámetros hidrológicos de las subcuencas: tiempo de concentración y retardo 43

Tabla 4 Número de curva ponderado. 44

Tabla 5 Distribución de áreas de influencia obtenidas por el método del polígono de Thiessen para las estaciones meteorológicas del área de estudio. 46

Tabla 6 Distribución de probabilidades pluviométricas mediante Gumbel de la Estación Colonche..... 48

Tabla 7 Distribución de probabilidades pluviométricas mediante Gumbel de la Estación Julio Moreno. 49

Tabla 8 Distribución de probabilidades pluviométricas mediante Gumbel de la Estación Sube y Baja. 50

Tabla 9 Estación Colonche. 51

Tabla 10 Estación Julio Moreno. 51

Tabla 11 Estación Sube y Baja. 52

Tabla 12 Coeficientes empíricos para el cálculo de curvas IDF (Campos, 1978) 52

Tabla 13 Precipitaciones máximas estimadas para diferentes tiempos de duración para la estación Colonche. 52

Tabla 14 Precipitaciones máximas estimadas para diferentes tiempos de duración para la estación Julio Moreno. 53

Tabla 15 Precipitaciones máximas estimadas para diferentes tiempos de duración para la estación Sube y Baja. 53

Tabla 16 Precipitación máxima diaria por duración de lluvia y frecuencia distribuida por polígonos de Thiessen. 54

Tabla 17 Valores de Intensidad de precipitación según Duración y Frecuencia de repetición. 54

Tabla 18 Hietograma obtenido mediante datos de precipitación para un Tr de 1000 años. 56

Tabla 19 Criterios de diseño generalizados para estructuras de control de agua. 57

Tabla 20 Relación Elevación–Área–Volumen del embalse..... 58

Tabla 21 Caudales de entrada simulados mediante HEC-HMS 60

Tabla 22 Coordenadas del Cimacio del Vertedero de Servicio..... 67

Tabla 23 Coordenadas del Cimacio del Vertedero Auxiliar. 67

“ANÁLISIS DE LA LAMINACIÓN DE AVENIDAS Y PROPUESTA DE AJUSTE EN ALIVIADEROS DE LA PRESA EL AZÚCAR”

Autores: Menéndez Laínez Ronny Vladimir
Ramos Maldonado Allison Estefanía
Tutor: Ortiz Safadi Guido Moisés

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo analizar el proceso de laminación de avenidas en la presa El Azúcar y evaluar si la capacidad hidráulica de sus aliviaderos es adecuada para enfrentar eventos hidrológicos extremos. Para ello, se recopiló información hidrometeorológica, topográfica y estructural del embalse, la cual fue procesada mediante herramientas SIG y el modelo hidrológico HEC-HMS. A través de la modelación se simularon diversos escenarios de lluvia asociados a periodos de retorno establecidos, permitiendo obtener hidrogramas de entrada y salida del embalse, así como el comportamiento del nivel de almacenamiento durante las crecidas.

Los resultados obtenidos evidenciaron que la presa posee la capacidad de atenuar el caudal pico durante los eventos de crecida; sin embargo, los aliviaderos existentes no disponen de la capacidad necesaria para evacuar caudales asociados a avenidas de gran magnitud. Esta limitación podría comprometer tanto la estabilidad estructural de la presa como la seguridad de las comunidades ubicadas aguas abajo. En consecuencia, se vuelve indispensable considerar modificaciones en el diseño del aliviadero, orientadas a incrementar su capacidad de descarga y mejorar la regulación del flujo durante eventos hidrológicos extremos.

***PALABRAS CLAVE**: Laminación de avenidas, Presa El Azúcar, Aliviaderos, HEC-HMS, Seguridad hidráulica.*

“ANALYSIS OF FLOOD LAMINATION AND PROPOSED ADJUSTMENT OF THE SPILLWAYS AT EL AZÚCAR DAM”

Autores: Menéndez Laínez Ronny Vladimir
Ramos Maldonado Allison Estefanía
Tutor: Ortiz Safadi Guido Moisés

ABSTRACT

The present research aimed to analyze the flood routing (lamination) process at the El Azúcar Dam and to evaluate whether the hydraulic capacity of its spillways is sufficient to manage extreme hydrological events. To achieve this, hydrometeorological, topographic, and structural data from the reservoir were collected and processed using GIS tools and the HEC-HMS hydrological model. Through this modeling, various rainfall scenarios associated with selected return periods were simulated, allowing the generation of inflow and outflow hydrographs, as well as the assessment of reservoir storage levels during flood events.

The results showed that, although the dam attenuates peak flows, the current spillway capacity presents limitations when subjected to high-magnitude floods, which could compromise both the hydraulic safety of the structure and the downstream areas. Therefore, the study determined the need to implement structural adjustments to the spillway in order to increase its discharge capacity and improve flood routing efficiency. It is concluded that updating the spillway configuration is essential to ensure the safe and sustainable operation of the reservoir.

KEYWORDS: *Flood routing, El Azúcar Dam, Spillway, HEC-HMS, Hydraulic safety.*

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

En el siglo XXI, uno de los principales desafíos para la sostenibilidad mundial ha sido la gestión del agua. El crecimiento de la población, junto con el avance industrial y agrícola, ha incrementado la demanda de este recurso que, aunque es fundamental para la vida, sino también para el balance social y económico de las comunidades (UNESCO, 2018). Desde este punto de vista, las presas son infraestructuras estratégicas, porque permiten regular caudales, almacenar agua destinada al consumo humano y a la irrigación, además de contribuir a la reducción del riesgo de inundaciones. Sin embargo, en Ecuador, la presa El Azúcar, adquiere una importancia particular al garantizar el abastecimiento hídrico y sostener la actividad agrícola de la zona. Su valor se intensifica frente a la escasez natural de recursos hídricos y a la alta variabilidad climática que caracteriza al territorio, lo que convierte su operación en un elemento clave para la estabilidad social y productiva local (SENAGUA, 2014).

Sin embargo, la seguridad y el desempeño de una presa no dependen únicamente de su capacidad de almacenamiento, sino también de la eficiencia de sus estructuras hidráulicas asociadas, en particular de los aliviaderos, cuya función principal es evacuar los caudales excedentes durante eventos hidrológicos extremos (Foster & Fell, 2001). En este sentido, uno de los procesos relevantes en la operación de un embalse es la laminación de avenidas, entendida como la capacidad de atenuar el caudal pico de una crecida mediante el almacenamiento temporal de agua. Dicho proceso está condicionado por variables como el volumen útil del reservorio, la geometría de la cuenca y la capacidad de descarga de los aliviaderos (Chow, Maidment, & Mays, 1988).

Cabe destacar que gran parte de las infraestructuras hidráulicas del país fueron diseñadas hace más de dos décadas y no han sido sometidas a reevaluaciones técnicas que consideren las condiciones actuales, marcadas por la acelerada urbanización y los impactos del cambio climático (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2022). En este marco, la ausencia de estudios hidráulicos recientes sobre la capacidad de laminación de avenidas en la presa El Azúcar constituye un vacío técnico que puede comprometer tanto la seguridad estructural de la obra como la protección de las poblaciones asentadas aguas abajo

1.1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La seguridad hidráulica de las presas depende en gran medida de la capacidad de sus aliviaderos para evacuar de manera eficiente los caudales generados durante avenidas extremas. Una insuficiencia en esta capacidad puede conducir al sobrepaso del embalse, fenómeno considerado una de las principales causas de falla en presas a nivel mundial (Foster, Fell & Spannagle, 2000). Bajo esta perspectiva, resulta pertinente cuestionarse si los aliviaderos de la presa El Azúcar poseen la capacidad suficiente para garantizar una laminación adecuada de avenidas y, con ello, proteger tanto la infraestructura como a las poblaciones asentadas aguas abajo.

Sin embargo, no se puede evaluar únicamente su seguridad en base a su capacidad de almacenamiento; también es necesario tener en cuenta el rendimiento de sus estructuras hidráulicas de descarga. Entonces, la finalidad de este estudio es analizar la capacidad actual de la presa frente a avenidas extremas, empleando el análisis de datos pluviométricos e hidrológicos. Y a partir de estos datos, comprobar cómo se comportan los caudales para un periodo de retornos de hasta 1000 años. Este enfoque permitirá determinar si la capacidad de laminación de avenidas y el funcionamiento de los aliviaderos son adecuados para garantizar la estabilidad hidráulica de la estructura, o si resulta necesario implementar mejoras en su operación o en el diseño de sus sistemas de descarga.

La laminación de avenidas, proceso que consiste en reducir el caudal máximo de una crecida gracias al almacenamiento temporal del agua en el embalse, representa un elemento esencial en la gestión del riesgo de inundaciones (Novak et al., 2010).

Su efectividad, no obstante, depende tanto del volumen útil disponible como de la capacidad de evacuación de los aliviaderos. En el caso de la presa El Azúcar, estudios previos advierten una subutilización del volumen del embalse y sugieren la conveniencia de modificar el vertedor de emergencia con el fin de mejorar su desempeño frente a crecidas (Rodriguez Santos,2022). Sin embargo, hasta la fecha no se dispone de investigaciones que integren de manera conjunta un análisis actualizado de las avenidas máximas probables, la capacidad real de evacuación de los aliviaderos y la eficiencia del proceso de laminación.

1.2 ANTEDECENTES

Diversas investigaciones han indicado que los métodos convencionales de diseño de las estructuras de descarga necesitan ser revisados ante escenarios climáticos cambiantes. Herbozo et al. (2022) evaluó la presa Sube y Baja en Ecuador y determinaron que la Precipitación Máxima Probable podría aumentar cerca del 20% debido a la variabilidad climática, lo que implicaría un incremento aproximado del 25% en los caudales empleados para el diseño del vertedero. Este resultado evidencia la necesidad de evaluar los criterios hidráulicos aplicados en presas expuestas a escenarios climáticos cambiantes.

En cuanto al estudio de avenidas, Singh (2018) resalta que la incorporación de modelos hidrológicos con herramientas como HEC-HMS permite considerar la variabilidad climática y la incertidumbre asociada a eventos extremos en el tránsito de crecidas. Además, Yigzaw y Hossain (2016) señalan que el uso de escenarios probabilísticos ayuda a comprender mejor la respuesta de los embalses, lo que resulta fundamental para reducir riesgos en sectores ubicados aguas abajo.

En el aspecto normativo, la Federal Energy Regulatory Commission (FERC, 2015) establece que los aliviaderos deben diseñarse para evacuar caudales correspondientes a condiciones extremas, incluyendo aquellos vinculados al PMP. Esto implica contemplar situaciones críticas que aseguren la estabilidad de la presa y la protección de las poblaciones situadas río abajo, más allá de la operación ordinaria.

De igual manera, se han desarrollado investigaciones que subrayan la influencia del cambio climático en el desempeño hidráulico de los embalses. Lompi (2023) plantea una metodología que integra la variabilidad climática en los análisis de seguridad, considerando la alteración de los hidrogramas de entrada y los niveles iniciales de operación. Este enfoque reconoce que los cambios en los patrones de lluvia y escorrentía pueden modificar de forma significativa la capacidad de laminación de una presa.

Finalmente, estudios específicos sobre la presa El Azúcar señalaron la necesidad de mejorar su infraestructura hidráulica. Rodríguez Santos (2022) observó que el embalse no utiliza plenamente su volumen útil y que el vertedero de emergencia requiere modificaciones para reducir el riesgo aguas abajo, proponiendo elevar la cota de descarga a 46,75 msnm. Más adelante, Guacho Quiroz (2024) desarrolló un rediseño hidráulico del vertedero, logrando mejorar el control del flujo y la disipación de energía. Estos aportes coinciden en la importancia de revaluar la capacidad de descarga de los aliviaderos de la

presa El Azúcar, especialmente frente a las condiciones hidrológicas actuales y los posibles escenarios climáticos futuros.

1.3 HIPÓTESIS

1.3.1. Hipótesis General.

La capacidad hidráulica actual de los aliviaderos de la presa El Azúcar podría no ser suficiente para controlar adecuadamente las avenidas, por lo que sería necesario realizar ajustes en su diseño para evitar desbordamientos.

1.3.2 Hipótesis Especificas

Los registros hidrometeorológicos históricos muestran la ocurrencia de avenidas que pueden generar caudales superiores a la capacidad de laminación originalmente considerada en la presa El Azúcar.

Durante eventos hidrológicos extremos, la capacidad de descarga actual de los aliviaderos no sería suficiente para evacuar el caudal generado, reduciendo la eficiencia de la presa en el control de avenidas.

La aplicación de mejoras en el diseño y en la operación de los aliviaderos aumentará su capacidad hidráulica y permitirá disminuir el riesgo de desbordamientos en la zona aguas abajo.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General

Evaluar el comportamiento de la laminación de avenidas en los aliviaderos de la presa El Azúcar, con el fin de determinar si su capacidad hidráulica actual es suficiente o requiere ajustes en el diseño.

1.4.2 Objetivos Específicos

O.E.1 Recopilar y analizar la información hidrometeorológica necesaria para caracterizar el comportamiento de las avenidas en el área de influencia de la presa El Azúcar.

O.E.2 Analizar el diseño actual de los aliviaderos para determinar su capacidad de descarga y posibles limitaciones en su funcionamiento.

O.E.3 Proponer mejoras de diseño y operación de los aliviaderos de la presa El Azúcar para aumentar su eficiencia hidráulica y reducir el riesgo de desbordamiento aguas abajo.

1.5 ALCANCE

El objetivo de este estudio es analizar con detalle el comportamiento del flujo de agua durante los eventos de avenida en los aliviaderos de la presa El Azúcar. Y con base en los resultados se busca evaluar si la capacidad hidráulica actual es suficiente para enfrentar condiciones hidrológicas extremas y, de no ser así, proponer medidas estructurales u operativas que contribuyan a mejorar la seguridad de la infraestructura. Con este propósito se realizó la recopilación, organización y análisis de la información hidrometeorológica disponible. Estos datos servirán para el desarrollo de un modelo hidrológico en HEC–HMS, mediante el cual se estimarán caudales máximos

De esta manera, será posible simular con mayor precisión la respuesta del sistema bajo las condiciones actuales y las que se proyectan a futuro (Chow, Maidment & Mays, 1994). Posteriormente, se realizará una evaluación hidráulica del diseño de los aliviaderos y del

análisis de su funcionamiento mediante la simulación de escenarios críticos. Para ello se aplicarán metodologías de enrutamiento de avenidas y criterios de capacidad de evacuación ampliamente reconocidos en la literatura técnica internacional, considerando tanto las características geométricas de las estructuras como los coeficientes de descarga que determinan su rendimiento (Chow, 1988; Novak et al., 2017).

Entonces, la investigación está limita al área de influencia directa de la presa El Azúcar, localizada en Santa Elena, Ecuador, y abarca exclusivamente la cuenca de aporte inmediato y las estructuras de descarga del embalse. No se incluye el análisis de otros componentes de la presa, tales como obras de toma, desagüe de fondo y su estabilidad salvo en la medida en que incidan sobre la seguridad hidráulica del sistema. Debido a que se busca asegurar que el estudio sea específico, manejable y orientado a la mejora de la eficiencia hidráulica de los aliviaderos, aportando elementos técnicos que contribuyan a la reducción de riesgos asociados a eventos de crecida extrema.

1.6 VARIABLES

1.6.1 Variables Dependientes:

Caudal de salida.

Nivel del embalse durante la avenida.

Eficiencia de laminación.

1.6.2 Variables Independientes

Precipitación.

Caudal de entrada al embalse.

Características geométricas de la presa y los aliviaderos.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. HIDROLOGÍA SUPERFICIAL Y AVENIDAS

La hidrología superficial es la rama de la hidrología que se centra en el estudio del agua que fluye y se almacena en la superficie terrestre, y es fundamental para la ingeniería de recursos hídricos. Su principal objetivo es modelar la transformación de la precipitación en escorrentía dentro de una cuenca hidrográfica. Este análisis permite estimar el hidrograma de entrada a las estructuras hidráulicas.

Según Viessman y Lewis (2003), en su libro, *Introducción a la Hidrología*, definen la hidrología superficial como el estudio del movimiento, la distribución y la calidad del agua presente en la superficie terrestre, incluyendo ríos, lagos, arroyos y escorrentía.

Dingman, S. Lawrence (2015) en su libro *"Hidrología Física"* define la hidrología superficial como el estudio de los procesos que controlan el flujo de agua sobre la superficie de la Tierra, incluyendo la generación de escorrentía y el transporte fluvial.

La aplicación de la hidrología en la práctica profesional del ingeniero para resolver el problema al que se enfrenta de manera recurrente consiste en tener que estimar la magnitud de la mayor avenida esperable en un cauce determinado a partir de las condiciones y datos disponibles en cada caso. Esta estimación es necesaria para dimensionar les las infraestructuras hidráulicas como obras de drenaje puentes o presas que se utiliza en cualquier proyecto de ingeniería (Luis Mediero Orduña, 2021).

2.1.1 Definición de avenida

La avenida se define como un aumento temporal y significativo del caudal de un río o arroyo, que puede ser causado por lluvias intensas, deshielo o la combinación de ambos. Este fenómeno se caracteriza por un rápido incremento en el nivel del agua, que puede llevar a inundaciones en áreas adyacentes. Las avenidas son eventos críticos en la hidrología superficial, ya que pueden afectar la seguridad de las infraestructuras, la calidad del agua y los ecosistemas ribereños (Singh, Vijay P.,1996)

La combinación de modelos hidrológicos (que simulan la transformación de precipitaciones en escorrentía) e hidráulicos (que modelan el flujo y la propagación del agua) es fundamental para recrear escenarios de inundación con alta precisión. Esto genera hidrogramas de diseño, gráficos que representan el caudal máximo a lo largo del

tiempo, que orientan el dimensionamiento de sistemas de regulación, como compuertas y canales

2.1.1.1 Clasificación de avenidas

Las avenidas se clasifican principalmente en tres categorías principales, lo que resulta esencial para el diseño y la gestión eficiente de sistemas de control hídrico. Esta tipología permite adaptar estrategias preventivas y de respuesta a la variabilidad de los eventos, optimizando recursos y reduciendo riesgos. Según la Organización Mundial de la Meteorología (OMM), estas clasificaciones ayudan a predecir impactos de los desastres hidrológicos globales.

Entonces tenemos los siguientes tipos:

1. **Avenidas Periódicas**

Se ocasiona de manera predecible, mayormente asociadas a cambios estacionales,

2. **Avenidas excepcionales**

Se caracterizan como episodios de crecidas poco comunes, de gran magnitud y duración limitada, con un elevado potencial para generar daños severos en instalaciones y comunidades.

3. **Avenidas Mixtas**

Consiste en la combinan de las características de crecidas periódicas y excepcionales, formando patrones imaginables con picos inesperados, lo que las hace complejas de administrar. Esto ocurren en cuencas con variabilidad del clima.

2.1.4 Importancia de su análisis en presa

En *Hidrología Aplicada*, los autores destacan que el análisis de avenidas es crucial para el diseño seguro de presas, ya que permite estimar los caudales máximos que la estructura debe soportar y evacuar, evitando el sobrevertido y posibles daños estructurales. Además, el análisis hidrológico de avenidas es la base para dimensionar aliviaderos y sistemas de control de crecidas (Chow, Maidment y Mays, 1988)

En *Sediment Transport and Morphodynamics*, García, MH (2008), resalta que el análisis de avenidas también es vital para entender la dinámica sedimentaria en presas, lo que afecta la capacidad útil del embalse y la vida útil de la estructura.

2.2 LAMINACIÓN DE AVENIDAS

La laminación de avenidas o control de crecida es un proceso hidráulico esencial para la gestión y el control de crecidas, especialmente en el contexto de presas y embalses. Esta técnica mitiga los efectos negativos de las inundaciones al reducir el caudal pico o máximo generado durante episodios de fuertes lluvias, previniendo daños graves aguas abajo y mejorando la seguridad de la infraestructura y las poblaciones cercanas. La magnitud y la velocidad de una crecida que ingresa a la represa El Azúcar dependen de la compleja interacción de factores físicos y antropogénicos dentro de su cuenca

La laminación de crecidas se refiere a la capacidad de la presa para atenuar el pico de la avenida, es decir, reducir el caudal de salida en comparación con el caudal de entrada, distribuyendo el volumen de agua en un periodo de tiempo más largo. Esto se logra mediante el almacenamiento temporal en el embalse y la descarga controlada a través de los vertedores (M. I. Roberto Mejía Zermeño, 2013).

2.2.1 Vertederos

Un vertedero es una estructura semejante a un muro que posee una abertura con forma definida, por donde el agua puede pasar. Al interrumpir el flujo, el nivel del agua se eleva en la parte superior, lo que permite regular la altura en el embalse o canal, o bien medir el caudal que circula. (Marbello R., 2019)

2.2.1.1 Tipos de vertederos

Los vertederos se clasifican según la función que cumplen en la operación y seguridad de una presa:

1. **Vertedero de Servicio:**

Se activan en condiciones normales de operación para evacuar el agua excedente de forma continua y mantener el nivel del embalse dentro de rangos seguros. Son estructuras robustas, diseñadas para funcionar de manera regular y garantizar la estabilidad del sistema.

2. **Vertederos auxiliares:**

Este tipo de vertedero funciona como apoyo cuando el vertedero de servicio no puede evacuar toda el agua.

2.3 HEC- HMS

Según Máximo Villón Bejar (2015), HEC-HMS es un software de simulación hidrológica utilizado para obtener hidrogramas de salida, es decir, estimar los caudales máximos, a partir de eventos de lluvia en una cuenca o subcuencas.

2.3.1 Simulación Hidrológica

HEC-HMS permite reproducir el funcionamiento hidrológico de una cuenca mediante la definición de sus componentes físicos (subcuencas, canales, embalses, aliviaderos y puntos de control) y la aplicación de métodos que describen los procesos de infiltración, almacenamiento, generación de hidrogramas y propagación del flujo en los cauces. A partir de la información hidrometeorológica disponible, el modelo calcula los hidrogramas de escorrentía, es decir, la variación del caudal en el tiempo para eventos de lluvia específicos.

2.4 MÉTODOS E INSTRUMENTOS

2.4.1 Método USBR.

El Método USBR (United States Bureau of Reclamation) es una fórmula empírica desarrollada por la Oficina de Reclamación de los Estados Unidos para estimar la evapotranspiración de referencia (ET_0), que cuantifica la pérdida de agua del suelo por evaporación y transpiración vegetal en condiciones óptimas de humedad y crecimiento (García López, 2015). Se basa principalmente en datos de temperatura máxima y mínima diaria, lo que lo hace simple y accesible para aplicaciones en agricultura e irrigación, especialmente en regiones con datos meteorológicos limitados (Ramírez Hernández, 2018).

2.5.1 Software Utilizados

2.5.1.1 Definición del software ArcGIS

ArcGIS es una herramienta utilizada en estudios hidráulicos porque permite manejar información topográfica y geográfica con precisión. A partir de Modelos Digitales de Elevación (MDE), es posible definir los límites de una cuenca, trazar su red de drenaje y analizar el recorrido del agua sobre el terreno. Esto facilita la

identificación de zonas con potencial de inundación y la obtención de parámetros como pendientes, áreas de aporte y tiempos de concentración, los cuales son indispensables para el análisis hidrológico y el diseño de obras destinadas al control y manejo del agua.

2.5.1.2 Definición del software QGIS

QGIS emerge como una solución geoespacial versátil y gratuita para el manejo y examen de datos espaciales combinados con atributos hidrológicos, ofreciendo funciones para procesar información topográfica y climática que facilitan la simulación y el modelado de cuencas hidrográficas. Estas funcionalidades ayudan a desentrañar el comportamiento del agua en embalses, incluyendo su circulación y acumulación, lo que resulta esencial para medir la efectividad de estrategias contra inundaciones y el papel de los aliviaderos en el control de flujos extremos

Esto no solo mejora la precisión de los modelos hidrológicos, sino que también permite evaluaciones cuantitativas, como la reducción de riesgos de inundación en un 20-40% en proyectos de embalses, según estudios publicados en revistas como Water Resources Research.

2.6 CURVA DE DESCARGA DEL ALIVIADERO

La curva de descarga del aliviadero analiza y muestra la conexión entre el flujo de salida (Q) y el nivel de agua (elevación o altura, h) en el embalse, se puede representar gráficamente o mostrar en los datos en tablas. Esta herramienta es muy importante por varios aspectos.

Es un dato fundamental para dimensionar adecuadamente la estructura y con la finalidad de que resista y evacue caudales máximos excepcionales, crecidas de diseño y siempre asegurando la integridad de la presa

En el ámbito del monitoreo de seguridad, esta curva nos permite un control continuo y en tiempo real, relacionado mediciones directas del embalse con flujos actuales, lo cual es muy vital para activar alertas oportunas y elaborar acciones determinantes ante eventos hidrológicos graves, como tormentas o inundaciones repentinas.

La curva actúa como un elemento clave en simulaciones avanzadas, tales como las realizadas con HEC-HMS, para recrear adecuadamente la conducta de la presa. Esto simplifica el pronóstico de la evolución del hidrograma, el gráfico que representa el

caudal a lo largo del tiempo y la refinación de planos para reducir riesgos. Un ejemplo es durante un episodio de precipitación intensa, la curva nos permite saber los efectos potenciales y cambiar las operaciones, como abrir compuertas, para impedir los desbordes sin dañar la capacidad de almacenamiento.

2.6.1 Tipo de Aliviaderos

2.6.1.2 Aliviaderos de cresta libre (Control rígido)

Se genera curvas de descarga fija que se mantiene estable durante su funcionamiento diario. El caudal de salida (Q) depende exclusivamente de la altura del agua sobre la cresta (H). Este tipo de aliviadero y el ajuste se concentraría en modificar la geometría física de la cresta (ampliándola o elevándola) para cambiar permanentemente la curva de descarga.

2.6.1.3 Aliviaderos controlados (Control activo)

Los aliviaderos equipados con sistemas de control activo ofrecen la posibilidad de generar curvas de descarga flexibles y dinámicas, adaptándose a condiciones cambiantes. A diferencia de los diseños pasivos, estos permiten modular el flujo de salida de forma intencional mediante el ajuste preciso de compuertas, lo que resulta en una atenuación efectiva de crecidas al reaccionar en tiempo real a fluctuaciones hidrológicas, como aumentos repentinos en el caudal debido a lluvias intensas

2.7 MODELO HIDROLÓGICO

Compuesto por un conjunto de parámetros y ecuaciones, el modelo permite el análisis, la predicción y el pronóstico del comportamiento de variables clave (como el caudal o el nivel del agua), convirtiéndose así en una herramienta fundamental para la gestión de los recursos hídricos, el diseño de infraestructuras y la mitigación de riesgos como las inundaciones. El modelo hidrológico más relevante para el análisis de mitigación de inundaciones y las propuestas de ajuste de aliviaderos es aquel capaz de simular con precisión la respuesta de la cuenca ante eventos de lluvia extrema. Su función es interpretar la transformación de la precipitación en escorrentía y su posterior interacción con el embalse y sus estructuras de control.

2.8 MÉTODO DEL EMBALSE (RESERVOIR ROUTING)

Técnica utilizada para analizar el comportamiento del agua en un embalse durante eventos de avenida. Este método implica el uso de ecuaciones de continuidad y energía para modelar el flujo de agua a través del embalse y su aliviadero. El término "enrutamiento de embalse" (o "enrutamiento de almacenamiento") se utiliza para denotar la propagación de un hidrograma de entrada a través de un embalse. El almacenamiento en embalses superficiales puede ser natural o artificial.

Método de enrutamiento hidrológico que calcula el hidrograma de salida a partir del hidrograma de entrada, considerando la capacidad de almacenamiento del embalse y la curva de almacenamiento vs nivel. Permite simular cómo el embalse atenúa picos y modifica la forma de avenidas, esencial para dimensionar presas y obras asociadas (Fenton, J. D., 1992)

CAPITULO III: METODOLOGÍA

3.1 TIPO DE ESTUDIO

El objetivo central de este estudio es entender mejor cómo funciona la presa El Azúcar y buscar maneras de mejorar sus aliviaderos, basándonos en cómo se comportan durante las crecidas. La investigación es tanto descriptiva como aplicada, ya que no solo observa el desempeño actual, sino que también propone soluciones concretas.

3.2 ENFOQUE DE INVESTIGACION

3.2.1 Enfoque Cuantitativo

El enfoque cuantitativo de la investigación se manifiesta en la utilización de variables mensurables, entre ellas la precipitación de diseño, los caudales máximos de entrada y salida, la capacidad de almacenamiento del embalse y el volumen laminado durante los eventos de crecida. Estas magnitudes se someten a análisis estadístico y se expresan mediante hidrogramas, los cuales permiten valorar el desempeño del embalse frente a distintos escenarios de avenidas.

3.2.2 Población y Muestra.

La población de estudio incluyó todos los elementos que se ven afectados por la eficiencia hidráulica de la presa El Azúcar. Se consideraron tanto la infraestructura y los aliviaderos como la cuenca que aporta al embalse, además las zonas aguas abajo.

La muestra se define como un subconjunto representativo de esta población, centrada en las áreas de influencia directa de la presa. Esto comprende los aliviaderos, los cauces principales, las zonas de inundación potencial, las viviendas, la infraestructura pública y los terrenos destinados a actividades productivas que podrían verse afectados por eventos de avenidas extremas.

3.2.3 Métodos Técnicos e Instrumentos de Recolección de Datos

Como se indicó previamente, en esta sección se describen los métodos, técnicas e instrumentos utilizados para desarrollar el proyecto enfocado en el análisis de la laminación de avenidas y la propuesta de ajuste al aliviadero de la presa El Azúcar,

empleando un enfoque cuantitativo, que permite analizar y modelar diferentes variables hidráulicas y escenarios de avenidas.

De igual manera, se utilizó el Sistema de Información Geográfica (QGIS) para gestionar y obtener parámetros geomorfológicos y fisiográficos de la cuenca. Con esta herramienta se realizó la delimitación y el análisis de las microcuencas que aportan al embalse. La información relativa a la litología y al uso del suelo proviene del portal SIG-TIERRAS, y fue integrada en QGIS para extraer las principales características topográficas, las pendientes y las áreas de aporte necesarias para el modelado hidráulico.

3.3 METODOLOGÍA

La metodología aplicada en el presente estudio se centra en el análisis de la capacidad de laminación de avenidas de la presa El Azúcar, mediante la simulación de eventos hidrológicos extremos utilizando herramientas computacionales especializadas. Para ello se adoptó un diseño de investigación descriptivo y aplicado, sustentado en un enfoque cuantitativo, que permite caracterizar de manera objetiva el comportamiento del embalse frente a crecientes de distinto periodo de retorno.

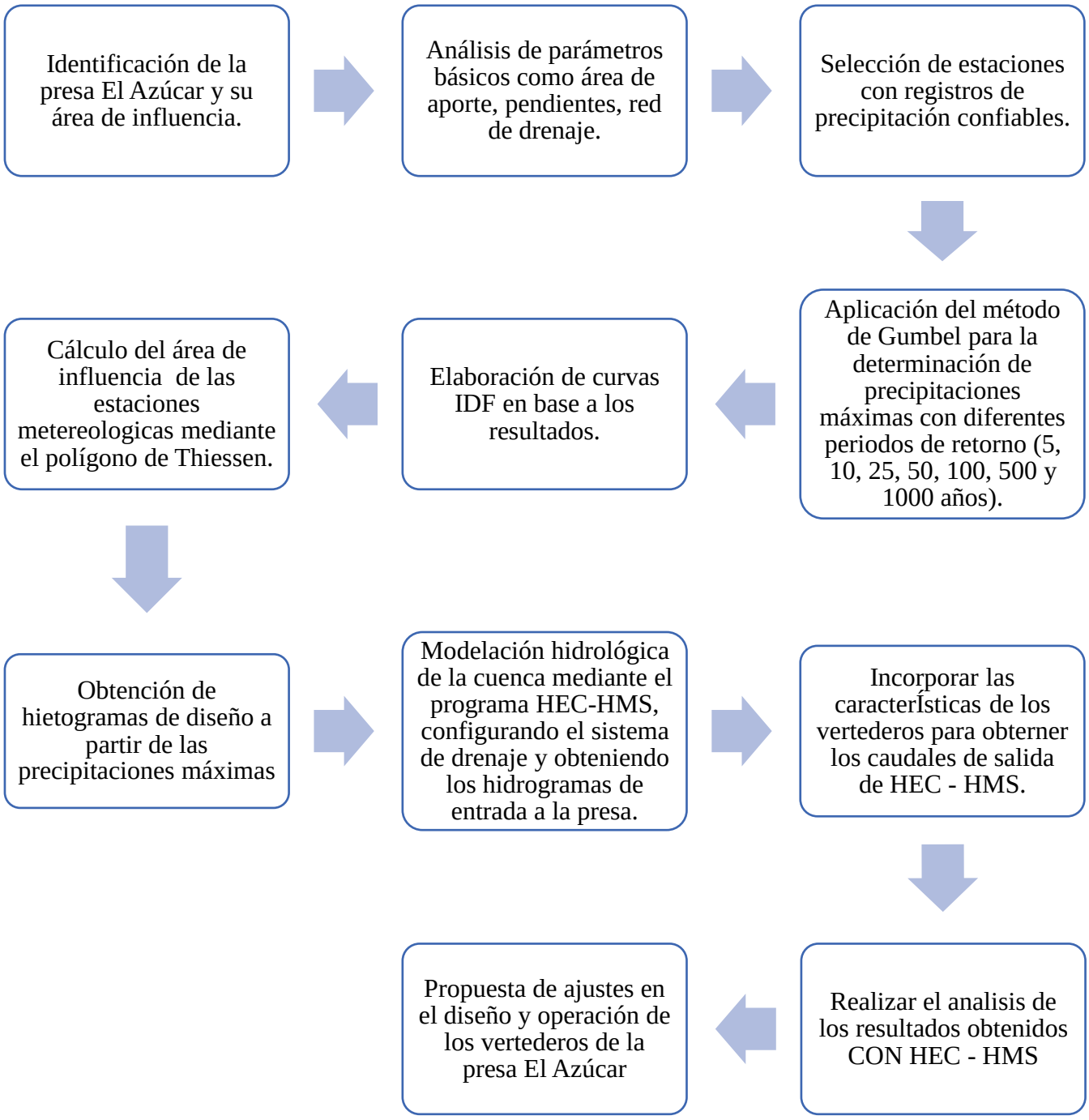
En la siguiente fase, se desarrolló la modelación hidrológica utilizando el software HEC-HMS. Posteriormente, se ajustaron los parámetros específicos de la cuenca, incluyendo pérdidas por infiltración, la conversión de lluvia en escorrentía y el flujo del caudal. De igual manera, se estableció diferentes escenarios de precipitación de diseño para analizar cómo se comportaría el embalse bajo condiciones extremas.

Tabla 1

Recolección de Datos

DETALLE DE INFORMACIÓN	FUENTE	FORMATO
Información Hidrometereológica		
Precipitación máxima en 24 horas	INMAHI	TXT
Estaciones meteorológicas existentes	INMAHI	SHAPE
Información topográfica altimétrica		
Curvas de nivel (1:50000)	IGM	DWG
Modelo digital de elevación	SIG-TIERRAS	MDT

3.4 METODOLOGÍA DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS.



CAPITULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

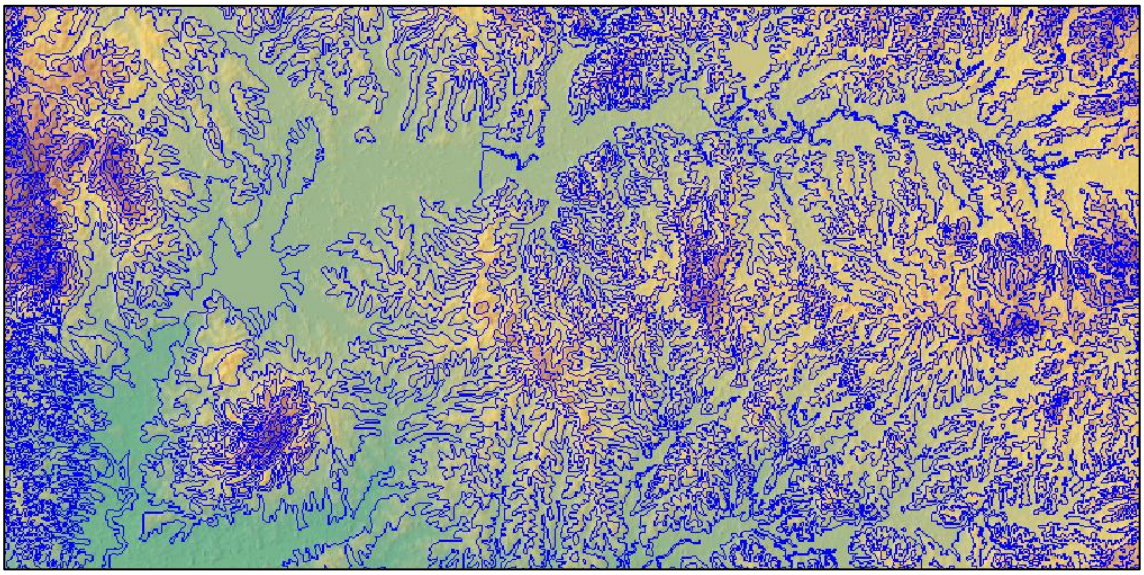
Debido a la necesidad de garantizar la seguridad hidráulica y operativa de la Presa El Azúcar, ubicada en la provincia de Santa Elena, se considera indispensable realizar un análisis de laminación de avenidas con el fin de evaluar la capacidad del embalse para atenuar caudales extremos durante eventos hidrometeorológicos severos. Este estudio utilizará técnicas de modelado hidrológico e hidráulico para simular el comportamiento del embalse ante diferentes escenarios de crecidas, determinando la respuesta del sistema y el funcionamiento del aliviadero. Los resultados permitirán identificar si la infraestructura actual es suficiente para manejar avenidas extraordinarias o si requiere modificaciones para optimizar la seguridad y eficiencia de la operación. Finalmente se determinará si el aliviadero necesita ser modificado para garantizar su correcto funcionamiento.

4.1. CURVAS DE NIVEL Y MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL (DEM)

Las curvas de nivel son líneas que conectan puntos del terreno que tienen la misma altura sobre el nivel del mar. Estas permiten representar en un plano las variaciones de altitud de una zona y visualizar de manera continua la forma y la pendiente del relieve. Se utilizan, sobre todo, en los mapas topográficos, ya que facilitan la interpretación del terreno y su configuración.

Ilustración 1

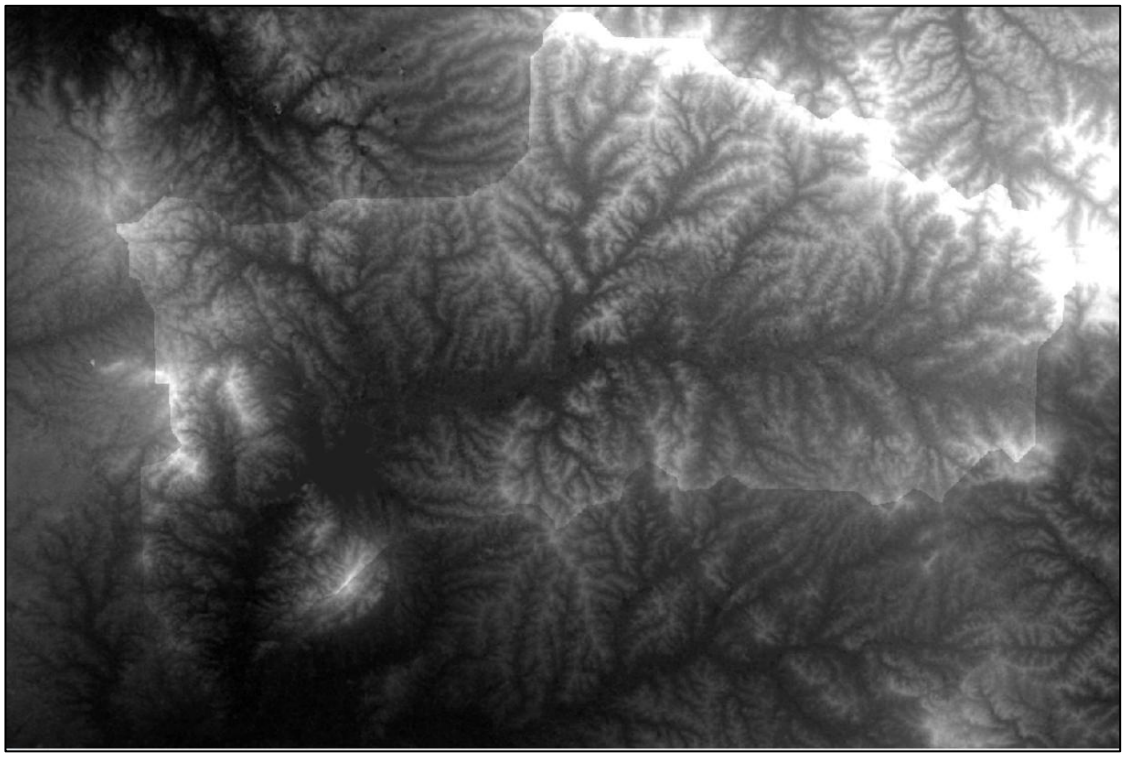
Curvas de nivel del área de estudio.



Nota: Extraído de ArcGIS.

Ilustración 2

Modelo Digital de Elevaciones (DEM) del área de estudio.



Nota: Extraído de ArcGIS.

4.2. APLICACIÓN DEL MODELADO EN HEC-HMS

Para la elaboración del modelo en HEC-HMS se desarrolla en varias etapas.

Etapa 1: Preparación del Modelo Digital de Elevaciones (DEM).

Etapa 2: Caracterización y delimitación de las subcuencas hidrográficas.

Etapa 3: Estimación del Número de Curva (CN).

Etapa 4: Determinación del Tiempo de Concentración (Tc)

Etapa 5: Incorporación de Datos de Precipitación y Meteorología.

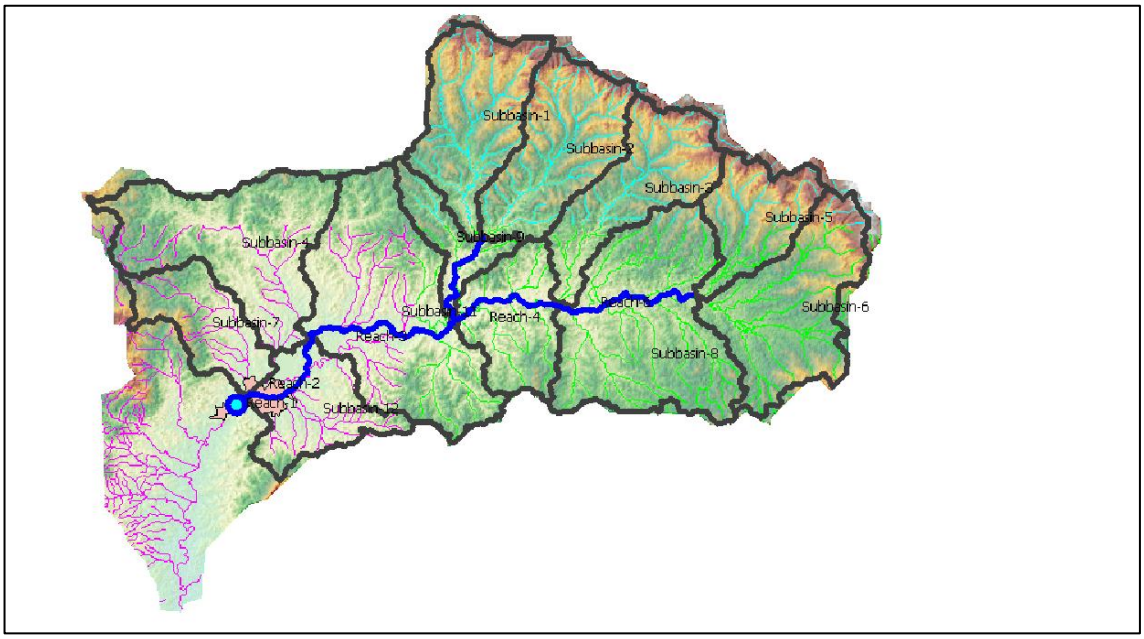
Para la construcción del modelo de cuenca se integran los datos del área de estudio, junto con los métodos adecuados para simular la conversión de lluvia en caudal.

4.3. DELIMITACIÓN DE CUENCA Y SUBCUENCAS

La delimitación de la cuenca del área de estudio y de sus respectivas subcuencas se efectuaron utilizando el software QGIS, lo que permitió identificar la red hidrográfica asociada a cada una de ellas.

Ilustración 3

Subcuencas del área de estudio.



Nota: Extraído y elaborado en HHEC-HMS.

4.4. CARACTERÍSTICAS DE LAS SUBCUENCAS

Para el análisis hidrológico de la cuenca, se determinaron los parámetros característicos de cada subcuenca mediante la simulación realizadas en HEC-HMS. En la tabla

correspondiente se presentan las 12 subcuencas identificadas, junto con sus principales atributos: área de aporte y longitud del cauce principal. Estos valores permiten describir tanto el comportamiento hidráulico como las características geomorfológicas propias de cada subcuenca.

Tabla 2
Parámetros básicos de las subcuencas

SUBCUENCAS	ÁREA (Km^2)	LONGITUD (Km)
1	29,237	12,099
2	29,362	11,216
3	26.434	13.062
4	40,667	16,146
5	18.044	10.290
6	34,353	10,891
7	17,305	10,640
8	49,287	13,255
9	10,398	9,149
10	20,582	9,515
11	52,372	13,302
12	19,723	8,938
TOTAL	347,764	

Nota: Extraído de HEC-HMS.

4.5. MODELACIÓN DE LA CUENCA.

4.5.1 Métodos de Transformación.

Para este estudio se empleó el método Unit Hydrograph SCS (Soil Conservation Service), desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos.

EL método utiliza un hidrograma que se obtiene a partir de una unidad de lluvia excedente distribuida de forma uniforme en toda la cuenca y durante un periodo determinado. Cabe resaltar que la forma final del hidrograma depende de ciertos parámetros empíricos, principalmente el tiempo de concentración y el tiempo de retardo.

Una vez definidos, el software transforma la precipitación efectiva en un hidrograma de caudales, que posteriormente se integra con los demás elementos del modelo para el análisis hidrológico completo (U.S. Army Corps of Engineers, 2021).

4.5.1.1 Tiempo de Concentración.

La fórmula siguiente es una variación de la fórmula de Kirpich o la fórmula NRCS para el cálculo del tiempo de concentración, pero adaptada con parámetros específicos. En esta fórmula:

$$T_c = \frac{L^{0.8}(S+1)^{0.7}}{1140Y^{0.5}}$$

Donde:

Tc es el tiempo de concentración en horas.

L es la longitud del flujo o distancia desde el punto más lejano hasta la salida, en pies (ft).

S es la retención máxima potencial del suelo en pulgadas (in), que está relacionada con el tipo de suelo y su capacidad para retener agua.

Y es la pendiente promedio de la cuenca expresada en porcentaje (%).

4.5.1.2 Tiempo de Retardo (Lag time)

Dentro del método SCS Unit Hydrograph aplicado en HEC-HMS, el tiempo de retardo (lag time) representa el intervalo que transcurre entre el punto medio de la precipitación efectiva y el instante en que se alcanza el caudal máximo en el hidrograma. Este parámetro regula la velocidad con la que la cuenca responde ante un evento de lluvia, modificando la pendiente de ascenso y descenso del hidrograma resultante (U.S. Army Corps of Engineers, 2025).

El lag time se relaciona con el tiempo de concentración de la cuenca, y según la metodología del SCS, suele estimarse como un porcentaje de este último, utilizando la fórmula:

$$T_{lag} = 0.6 * T_C$$

donde Tlag y TC se expresan en horas. En casos donde no se dispone de mediciones hidrométricas, el valor puede calcularse a partir de parámetros físicos de la cuenca como la longitud del cauce principal, la pendiente media y la cobertura del suelo.

En HEC-HMS, el lag time se introduce como dato de entrada en el componente de transformación para el SCS Unit Hydrograph, y es utilizado por el modelo para generar el tiempo al pico (Tp) y la forma final del hidrograma, siguiendo la ecuación:

$$T_p = T_{lag} + \frac{D}{2}$$

donde D representa la duración de la lluvia efectiva. Ajustar correctamente el lag time es esencial para que la simulación reproduzca de forma adecuada la respuesta hidrológica real de la cuenca (U.S. Army Corps of Engineers, 2025).

Tabla 3

Parámetros hidrológicos de las subcuencas: tiempo de concentración y retardo

Subcuenca	CN	l(Km)	Y	S	l(ft)	%	Tc	lag(hr)	lag(min)
1	78	12,099	0,169	1,364	38822,89	16,894	1,83	1,0969	65,812
2	78	11,216	0,174	1,364	35991,54	17,414	1,69	1,0169	61,012
3	78	13,062	0,152	1,364	41913,52	15,165	2,05	1,2309	73,853
4	78	16,146	0,131	1,364	51809,22	13,134	2,61	1,5670	94,022
5	78	10,290	0,173	1,364	33020,31	17,329	1,59	0,9515	57,088
6	78	10,891	0,136	1,364	34948,09	13,621	1,87	1,1230	67,381
7	78	10,640	0,119	1,364	34142,80	11,883	1,97	1,1801	70,808
8	78	13,255	0,115	1,364	42533,85	11,454	2,39	1,4331	85,983
9	78	9,149	0,154	1,364	29357,36	15,352	1,53	0,9201	55,207
10	78	9,515	0,133	1,364	30533,65	13,302	1,70	1,0200	61,202
11	78	13,302	0,128	1,364	42684,28	12,803	2,27	1,3593	81,557
12	78	8,938	0,087	1,364	28681,38	8,733	2,00	1,1974	71,846

Nota: Resultados obtenidos a partir del procesamiento de datos en Excel.

4.5.2 Métodos de Pérdida

Dentro de los métodos de pérdida que ofrece el pograma HEC-HMS para estimar la infiltración en una subcuenca, uno de los más empleados es el método del Número de Curva (CN) desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS) de los Estados Unidos.

4.5.2.1 Numero de Curva (CN)

El Número de Curva (CN), desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS) de Estados Unidos actual Natural Resources Conservation Service (NRCS) constituye uno de los métodos más utilizados para la estimación del escurrimiento directo en estudios hidrológicos. Este enfoque se fundamenta en la relación entre las características hidrológicas del suelo, la cobertura del terreno y las condiciones de humedad antecedente, lo que lo convierte en una herramienta práctica y versátil para modelar la respuesta de una cuenca frente a eventos de precipitación (Mishra & Singh, 2003).

El método CN ha sido aplicado ampliamente debido a su simplicidad y aplicabilidad en zonas con información hidrológica limitada. Su formulación permite transformar de manera directa la precipitación en escorrentía potencial, considerando parámetros como el tipo hidrológico de suelo y el uso del suelo, los cuales son organizados en tablas estandarizadas que facilitan su implementación (Chow, Maidment & Mays, 1988).

Tabla 4

Número de curva ponderado.

Polígono	Área (Km^2)	CN
1	30,86283	75
2	55,62013	77
3	120,24874	79
4	176,04019	76
5	5,38902	78
6	11,90448	80
7	1,36769	79
8	12,49423	80
9	0,37900	78
Total	414,30634	78

Nota: Elaborado con base en datos de Jaafar, H. H., Ahmad, F. A. & El Beyrouthy, N. (2019). *GCN250: new global gridded curve numbers for hydrologic modeling and design*. *Scientific Data*, 6, 145; procesados en ArcGIS.

4.5.3 Parámetros K y X para Tránsito de Caudales.

Cuando tomamos en cuenta el tránsito de caudales a lo largo del cauce, debemos utilizar el Método de Muskingum. Este método toma en cuenta los parámetros K y X, donde K es el tiempo que tarda la onda de creciente en atravesar el tramo considerado.

Por otra parte, el parámetro X, está sujeto al método de almacenamiento por modelado y se le puede considerar una constante que oscila entre 0 y 0.5.

4.6 MODELO METEOROLÓGICO

4.6.1 Elaboración del Polígono de Thiessen con las Estaciones.

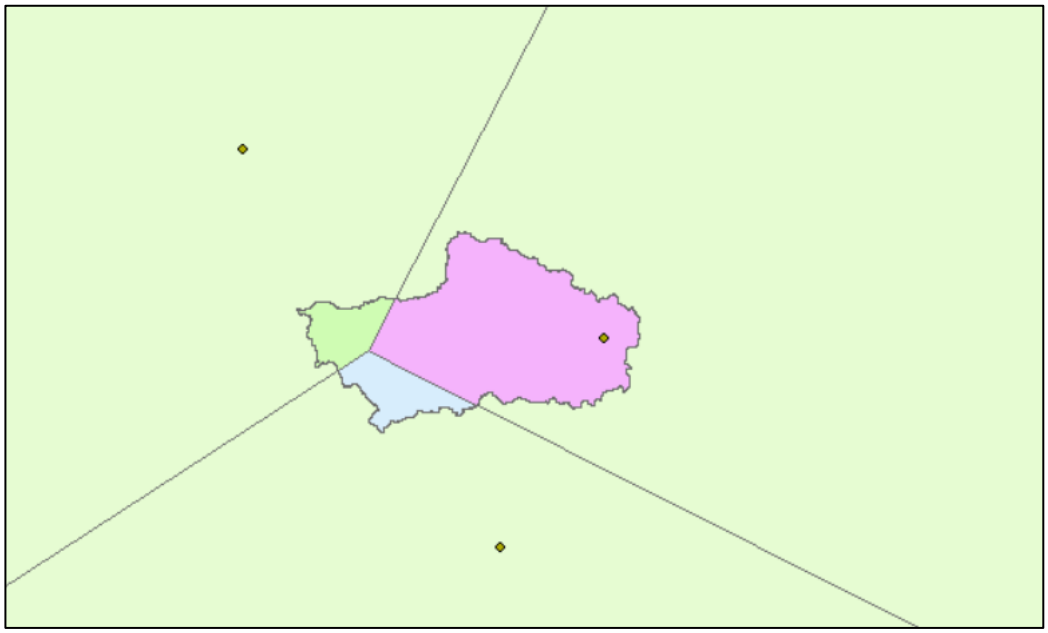
Con el fin de determinar la precipitación media de la cuenca se aplicó el método de los polígonos de Thiessen, el cual permite asignar áreas de influencia a cada estación meteorológica en función de su ubicación espacial.

4.6.2 Polígono de Thiessen.

El método de los polígonos de Thiessen se utiliza para delimitar el área de influencia de cada estación meteorológica dentro de una región de estudio. A partir de este procedimiento, se asume que los datos registrados en una estación son representativos del sector que le corresponde, lo que permite obtener valores más precisos de variables como la precipitación promedio. En este trabajo, las estaciones consideradas son de tipo convencional, lo que garantiza un registro histórico confiable y continuo. Este método resulta especialmente útil en estudios hidrológicos y climáticos, ya que permite ponderar la información según el espacio geográfico que cubre cada estación, reduciendo errores en la estimación de parámetros regionales (Chow, Maidment & Mays, 1988).

Ilustración 4

Metodo del polígono de Thiessen realizado en ArcGIS.



Nota: Extraído de ArcGIS.

A continuación, se detallan los resultados obtenidos mediante el método del polígono de Thiessen, el cual permitió calcular las áreas de influencia de las estaciones meteorológicas consideradas en el estudio, necesarias para la estimación del promedio de precipitación en la cuenca.

Tabla 5

Distribución de áreas de influencia obtenidas por el método del polígono de Thiessen para las estaciones meteorológicas del área de estudio.

Área de las estaciones meteorológicas			Área Total cuenca (km2)
M1152	M0780	M0472	
36	43	270,718	349,718

Nota: Datos procesados y extraídos de ArcGIS.

4.7. ANÁLISIS DE LLUVIA

El modelo de lluvia–escurrimiento seleccionado requiere conocer ciertas características de las tormentas, entre las que destacan la duración, la distribución temporal y la intensidad. Dichos parámetros se obtienen a través de las curvas de Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF), las cuales permiten representar la probabilidad de ocurrencia de lluvias extremas en un área determinada. A partir de estas curvas es posible construir el hietograma de diseño, herramienta fundamental para los estudios hidrológicos y de drenaje. Para la generación de las curvas IDF y los correspondientes hietogramas de diferentes frecuencias de retorno, se aplicó el "Método para calcular las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia de lluvias en un área geográfica a partir de datos pluviométricos", desarrollado por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI, 2010), el cual constituye una referencia técnica ampliamente utilizada en el país.

4.7.1 Calculo de las Curvas IDF del Área de Estudio.

En la práctica, las curvas IDF se elaboran a partir de los valores máximos de lluvia registrados en 24 horas, que idealmente deberían provenir de estaciones con medición continua. Sin embargo, como en esta zona no se dispone de ese tipo de registros, se utilizaron los datos de precipitación máxima diaria obtenidos en pluviómetros. Estos datos corresponden al periodo de observación comprendido entre las 7:00 de la mañana de un día y las 7:00 del siguiente. Este horario no siempre coincide con el día más lluvioso del año, lo que puede hacer que los valores de lluvia extrema resulten ligeramente menores a los reales.

Para corregir esta limitación, se aplicó un factor de incremento del 20 % sobre los valores de precipitación máxima diaria anual de cada estación, siguiendo criterios establecidos por estudios previos del CEDEGE y el INERHI, en los que se concluyó que la precipitación máxima en 24 horas suele ser aproximadamente un 20% mayor que la registrada en un día calendario. De esta manera, se obtuvieron valores ajustados que sirvieron como base para la generación de las curvas IDF representativas de la cuenca.

Este procedimiento fue aplicado en el estudio de vulnerabilidad de la comuna El Azúcar frente a eventos extremos, como parte del análisis hidrológico requerido para modelar escenarios de inundación asociados a la presa El Azúcar (Carrasco Iza & Campuzano Hidalgo, 2024)

Para la construcción de las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) de la cuenca en estudio, se partió de los valores de precipitación máxima en 24 horas corregidos mediante el factor del 20 % previamente descrito. Sin embargo, con el fin de obtener lluvias de diferentes duraciones necesarias para el desarrollo de las curvas se emplearon los coeficientes de Campos (1978), los cuales expresan la lluvia de menor duración como una fracción de la precipitación acumulada en 24 horas. Dichos coeficientes permiten transformar la precipitación de 24 horas en intervalos más cortos (1 h, 2 h, 6 h, 12 h, etc.), facilitando así el ajuste de las curvas IDF incluso cuando no se dispone de registros pluviográficos de alta resolución.

Con este procedimiento se determinó el aporte relativo de las estaciones Colonche, Julio Moreno y Sube y Baja, asegurando que los valores de precipitación empleados en el análisis fueran representativos del área de drenaje en su conjunto.

Tabla 6

Distribución de probabilidades pluviométricas mediante Gumbel de la Estación Colonche

N.º	Precipitación (mm)	
	xi	***(xi - x) ^2***
1	214,56	20645,83
2	129,00	3378,70
3	108,72	1432,36
4	108,48	1414,26
5	107,16	1316,72
6	106,56	1273,53
7	99,96	846,03
8	96,84	674,26
9	93,61	516,95
10	92,64	473,78
11	91,44	422,98
12	90,00	365,83
13	87,00	260,07
14	86,76	252,38
15	85,68	219,23
16	84,84	195,07
17	83,16	150,96
18	80,76	97,74
19	79,20	69,33
20	74,76	15,11
21	73,08	4,87
22	72,36	2,21
23	67,88	8,96
24	62,64	67,79
25	60,12	115,64
26	55,20	245,66
27	50,18	428,22
28	49,20	469,74
29	48,91	482,39
30	48,12	517,72
31	47,95	525,48
32	41,88	840,62
33	38,76	1031,27
34	37,92	1085,93
35	31,20	1573,98
36	26,64	1956,59
37	24,48	2152,35
38	21,96	2392,52
39	17,16	2885,13
40	16,20	2989,18
41	12,84	3367,88
41	**2905,8**	**57165,3**

Nota: Cálculos y resultados obtenidos mediante el procesamiento de datos en Excel.

Tabla 7

Distribución de probabilidades pluviométricas mediante Gumbel de la Estación Julio Moreno.

N.º	Precipitación (mm)	
	xi	***(xi - x) ^2***
1	177,96	8620,40
2	171,00	7376,42
3	161,16	5783,01
4	155,40	4940,14
5	154,92	4872,89
6	116,88	1009,08
7	115,92	949,02
8	112,65	758,24
9	107,52	502,03
10	101,73	276,09
11	101,11	255,88
12	100,23	228,50
13	96,24	123,79
14	96,00	118,51
15	95,43	106,42
16	94,20	82,56
17	92,40	53,09
18	86,40	1,65
19	84,36	0,57
20	83,28	3,36
21	76,44	75,24
22	74,40	114,79
23	73,80	128,00
24	72,96	147,72
25	68,67	270,40
26	66,24	356,22
27	64,44	427,41
28	64,12	440,74
29	61,85	541,21
30	61,23	570,44
31	60,48	606,83
32	57,60	757,01
33	57,60	757,01
34	52,80	1044,19
35	49,60	1261,24
36	45,41	1576,40
37	44,76	1628,44
38	36,00	2412,18
39	33,84	2629,01
40	32,40	2778,76
41	30,24	3011,15
41	**3489,7**	**57596,0**

Nota: Cálculos y resultados obtenidos mediante el procesamiento de datos en Excel.

Tabla 8

Distribución de probabilidades pluviométricas mediante Gumbel de la Estación Sube y Baja.

N.º	Precipitación (mm)	
	xi	***(xi - x) ^2***
1	168,00	9395,42
2	168,00	9395,42
3	140,16	4773,43
4	135,60	4164,12
5	110,40	1546,85
6	96,84	664,09
7	93,90	521,21
8	85,46	207,07
9	84,00	167,18
10	83,33	150,31
11	82,53	131,33
12	81,57	110,25
13	80,40	87,05
14	79,57	72,25
15	78,13	49,84
16	77,01	35,28
17	73,08	4,04
18	72,72	2,72
19	72,24	1,37
20	69,81	1,59
21	69,18	3,57
22	66,36	22,18
23	62,40	75,17
24	60,96	102,21
25	60,48	112,15
26	60,36	114,70
27	60,36	114,70
28	60,00	122,54
29	53,64	303,80
30	50,40	427,25
31	49,48	466,13
32	48,00	532,22
33	47,40	560,27
34	46,20	618,52
35	36,20	1215,92
36	33,00	1449,32
37	32,35	1499,24
38	30,11	1677,72
39	25,44	2082,10
40	21,60	2447,28
41	7,20	4079,38
41	**2913,9**	**49507,2**

Nota: Cálculos y resultados obtenidos mediante el procesamiento de datos en Excel.

Posteriormente, se realizó el cálculo de las precipitaciones Diarias Máximas Probables para distintas frecuencias de cada una de las estaciones.

Tabla 9

Estación Colonche.

Periodo de Retorno	***Variable Reducida***	***Precip.***	***Prob. de ocurrencia***	***Corrección de intervalo fijo***
Años	***YT***	***XT'(mm)***	***F(xT)***	***XT (mm)***
5	1,4999	98,0717	0,8000	110,8210
10	2,2504	120,1909	0,9000	135,8158
25	3,1985	148,1387	0,9600	167,3967
50	3,9019	168,8719	0,9800	190,8252
100	4,6001	189,4520	0,9900	214,0808
500	6,2136	237,0096	0,9980	267,8208
1000	6,9073	257,4552	0,9990	290,9244

Nota: Cálculos y resultados obtenidos mediante el procesamiento de datos en Excel.

Tabla 10

Estación Julio Moreno.

Periodo de Retorno	***Variable Reducida***	***Precip.***	***Prob. de ocurrencia***	***Corrección de intervalo fijo***
Años	***YT***	***XT'(mm)***	***F(xT)***	***XT (mm)***
5	1,4999	112,4145	0,8000	127,0283
10	2,2504	134,6169	0,9000	152,1171
25	3,1985	162,6697	0,9600	183,8168
50	3,9019	183,4809	0,9800	207,3334
100	4,6001	204,1385	0,9900	230,6765
500	6,2136	251,8749	0,9980	284,6186
1000	6,9073	272,3974	0,9990	307,8091

Nota: Cálculos y resultados obtenidos mediante el procesamiento de datos en Excel.

Tabla 11

Estación Sube y Baja.

Periodo de Retorno	*Variable Reducida*	*Precip.*	*Prob. de ocurrencia*	*Corrección de intervalo fijo*
Años	***YT***	***XT'(mm)***	***F(xT)***	***XT (mm)***
5	1,4999	96,3810	0,8000	108,9105
10	2,2504	116,9654	0,9000	132,1709
25	3,1985	142,9739	0,9600	161,5605
50	3,9019	162,2685	0,9800	183,3634
100	4,6001	181,4206	0,9900	205,0053
500	6,2136	225,6782	0,9980	255,0163
1000	6,9073	244,7051	0,9990	276,5168

Nota: Cálculos y resultados obtenidos mediante el procesamiento de datos en Excel

Tabla 12

Coeficientes empíricos para el cálculo de curvas IDF (Campos, 1978)

Duraciones, en horas									
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**8**	**12**	**18**	**24**
0,30	0,39	0,46	0,52	0,57	0,61	0,68	0,80	0,91	1,00

Los resultados se obtuvieron aplicando los coeficientes propuestos por Campos (1978) a la precipitación máxima de 24 horas, previamente ponderada mediante el método de Thiessen. De esta manera, se obtuvo una única intensidad de lluvia representativa para la cuenca, cuyos valores derivados se presentan en las tablas que se muestran a continuación.

Tabla 13

Precipitaciones máximas estimadas para diferentes tiempos de duración para la estación Colonche.

Tiempo de Duración	**Precipitación máxima Pd (mm) por tiempos de duración**						
	5 años	**10 años**	**25 años**	**50 años**	**100 años**	**500 años**	**1000 años**
24 hr	110,8210	135,8158	167,3967	190,8252	214,0808	267,8208	290,9244
18 hr	100,8471	123,5923	152,3310	173,6510	194,8135	243,7170	264,7412
12 hr	88,6568	92,3547	133,9174	152,6602	171,2646	214,2567	232,7395
8 hr	75,3583	92,3547	113,8298	129,7612	145,5749	182,1182	197,8286
6 hr	67,6008	82,8476	102,1120	116,4034	130,5893	163,3707	177,4639
5 hr	63,1680	77,4150	95,4161	108,7704	122,0261	152,6579	165,8269
4 hr	57,6269	70,6242	87,0463	99,2291	111,3220	139,2668	151,2807
3 hr	50,9777	62,4752	77,0025	87,7796	98,4772	123,1976	133,8252
2 hr	43,2202	52,9681	65,2847	74,4218	83,4915	104,4501	113,4605
1 hr	33,2463	40,7447	50,2190	57,2476	64,2242	80,3463	87,2773

Nota: Cálculos y resultados obtenidos mediante el procesamiento de datos en Excel.

Tabla 14

Precipitaciones máximas estimadas para diferentes tiempos de duración para la estación Julio Moreno.

Tiempo de Duración	Precipitación máxima Pd (mm) por tiempos de duración						
	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	500 años	1000 años
24 hr	127,0283	152,1171	183,8168	207,3334	230,6765	284,6186	307,8091
18 hr	115,5958	138,4265	167,2733	188,6734	209,9156	259,0029	280,1062
12 hr	101,6227	121,6937	147,0534	165,8668	184,5412	227,6949	246,2473
8 hr	86,3793	103,4396	124,9954	140,9867	156,8600	193,5406	209,3102
6 hr	77,4873	92,7914	112,1282	126,4734	140,7126	173,6173	187,7635
5 hr	72,4061	86,7067	104,7756	118,1801	131,4856	162,2326	175,4512
4 hr	66,0547	79,1009	95,5847	107,8134	119,9518	148,0017	160,0607
3 hr	58,4330	69,9739	84,5557	95,3734	106,1112	130,9246	141,5922
2 hr	49,5410	59,3257	71,6885	80,8600	89,9638	111,0013	120,0455
1 hr	38,1085	45,6351	55,1450	62,2000	69,2029	85,3856	92,3427

Nota: Cálculos y resultados obtenidos mediante el procesamiento de datos en Excel.

Tabla 15

Precipitaciones máximas estimadas para diferentes tiempos de duración para la estación Sube y Baja.

Tiempo de Duración	Precipitación máxima Pd (mm) por tiempos de duración						
	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	500 años	1000 años
24 hr	108,9105	132,1709	161,5605	183,3634	205,0053	255,0163	276,5168
18 hr	99,1086	120,2756	147,0201	166,8607	186,5548	232,0649	251,6303
12 hr	87,1284	105,7367	129,2484	146,6907	164,0042	204,0131	221,2134
8 hr	74,0592	89,8762	109,8611	124,6871	139,4036	173,4111	188,0314
6 hr	66,4354	80,6243	98,5519	111,8517	125,0532	155,5600	168,6752
5 hr	62,0790	75,3374	92,0895	104,5171	116,8530	145,3593	157,6146
4 hr	56,6335	68,7289	84,0115	95,3490	106,6027	132,6085	143,7887
3 hr	50,0988	60,7986	74,3178	84,3472	94,3024	117,3075	127,1977
2 hr	42,4751	51,5467	63,0086	71,5117	79,9520	99,4564	107,8415
1 hr	32,6732	39,6513	48,4682	55,0090	61,5016	76,5049	82,9550

Nota: Cálculos y resultados obtenidos mediante el procesamiento de datos en Excel.

Tabla 16

Precipitación máxima diaria por duración de lluvia y frecuencia distribuida por polígonos de Thiessen.

Tiempo de duración	Precipitación máxima Pd (mm)						
	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	500 años	1000 años
24 hr	123,1705	148,0595	179,5068	202,8362	231,1415	279,5059	302,5118
18 hr	112,0851	134,7341	163,3512	184,5809	205,6539	254,3504	275,2857
12 hr	98,5364	116,4437	143,6054	162,2689	180,7947	223,6048	242,0094
8 hr	83,7559	100,6804	122,0646	137,9286	153,6755	190,0640	205,7080
6 hr	75,1340	90,3163	109,4991	123,7301	137,8559	170,4986	184,5322
5 hr	70,2072	84,3939	102,3189	115,6166	128,8162	159,3184	172,4317
4 hr	64,0487	76,9909	93,3435	105,4748	117,5165	145,3431	157,3061
3 hr	56,6584	68,1074	82,5731	93,3046	103,9569	128,5727	139,1554
2 hr	48,0365	57,7432	70,0076	79,1061	88,1374	109,0073	117,9796
1 hr	36,9511	44,4178	53,8520	60,8509	67,7980	83,8518	90,7535

Nota: Cálculos y resultados obtenidos mediante el procesamiento de datos en Excel.

Tabla 17

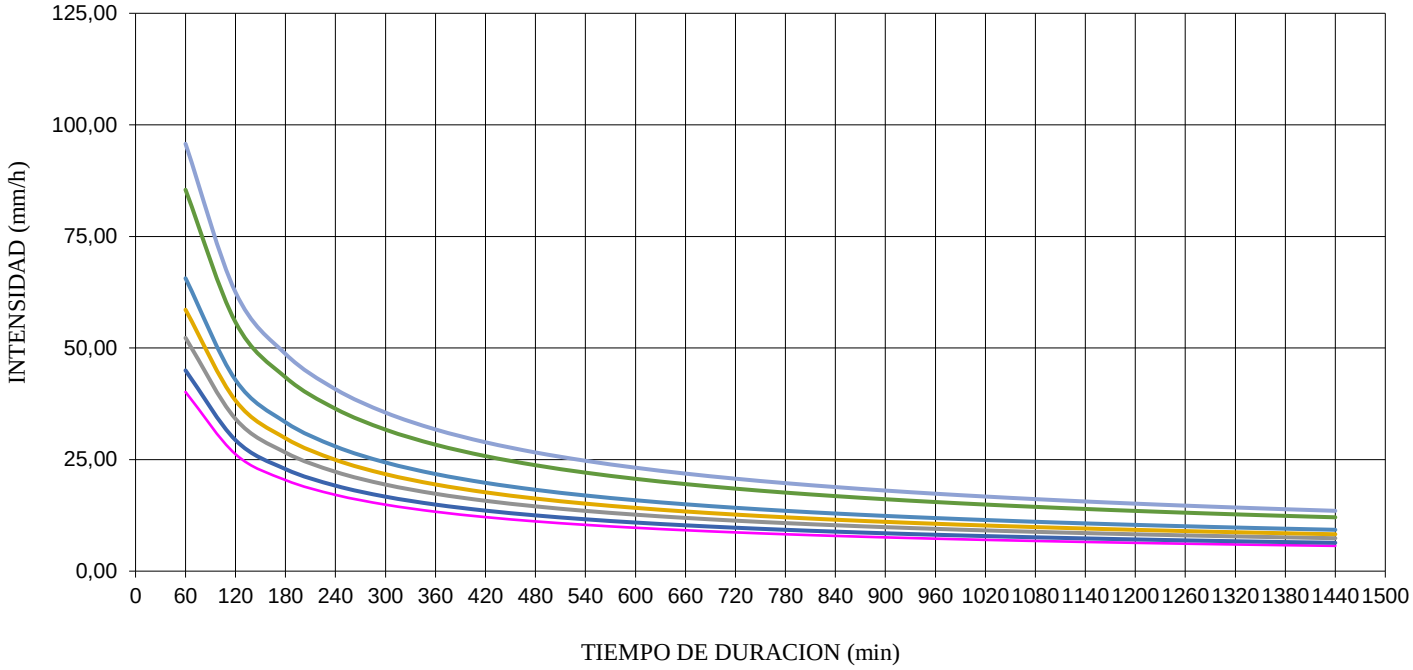
Valores de Intensidad de precipitación según Duración y Frecuencia de repetición.

Duración (minutos)	Periodo de retorno (años)						
	5	10	25	50	100	500	1000
60	40,15	44,98	52,28	58,57	65,63	85,46	95,75
120	26,19	29,35	34,11	38,22	42,82	55,76	62,47
180	20,40	22,86	26,57	29,77	33,35	43,43	48,66
240	17,09	19,15	22,25	24,93	27,94	36,38	40,76
300	14,89	16,69	19,40	21,73	24,35	31,71	35,52
360	13,31	14,92	17,33	19,42	21,76	28,34	31,75
420	12,11	13,56	15,76	17,66	19,79	25,77	28,87
480	11,15	12,49	14,52	16,27	18,23	23,74	26,59
540	10,37	11,62	13,50	15,13	16,95	22,07	24,73
600	9,72	10,89	12,65	14,18	15,89	20,69	23,18
660	9,16	10,27	11,93	13,37	14,98	19,51	21,86
720	8,69	9,73	11,31	12,67	14,20	18,49	20,72
780	8,27	9,26	10,77	12,06	13,52	17,60	19,72
840	7,90	8,85	10,29	11,52	12,91	16,81	18,84
900	7,57	8,48	9,86	11,04	12,37	16,11	18,05
960	7,27	8,15	9,47	10,61	11,89	15,49	17,35
1020	7,01	7,85	9,13	10,22	11,46	14,92	16,71
1080	6,77	7,58	8,81	9,87	11,06	14,40	16,14
1140	6,54	7,33	8,52	9,55	10,70	13,93	15,61
1200	6,34	7,10	8,26	9,25	10,36	13,50	15,12
1260	6,15	6,89	8,01	8,98	10,06	13,10	14,67
1320	5,98	6,70	7,79	8,72	9,77	12,73	14,26
1380	5,82	6,52	7,58	8,49	9,51	12,38	13,87
1440	5,67	6,35	7,38	8,27	9,26	12,06	13,52

Nota: Cálculos y resultados obtenidos mediante el procesamiento de datos en Excel.

Ilustración 5

Curva IDF de la cuenca de estudio.

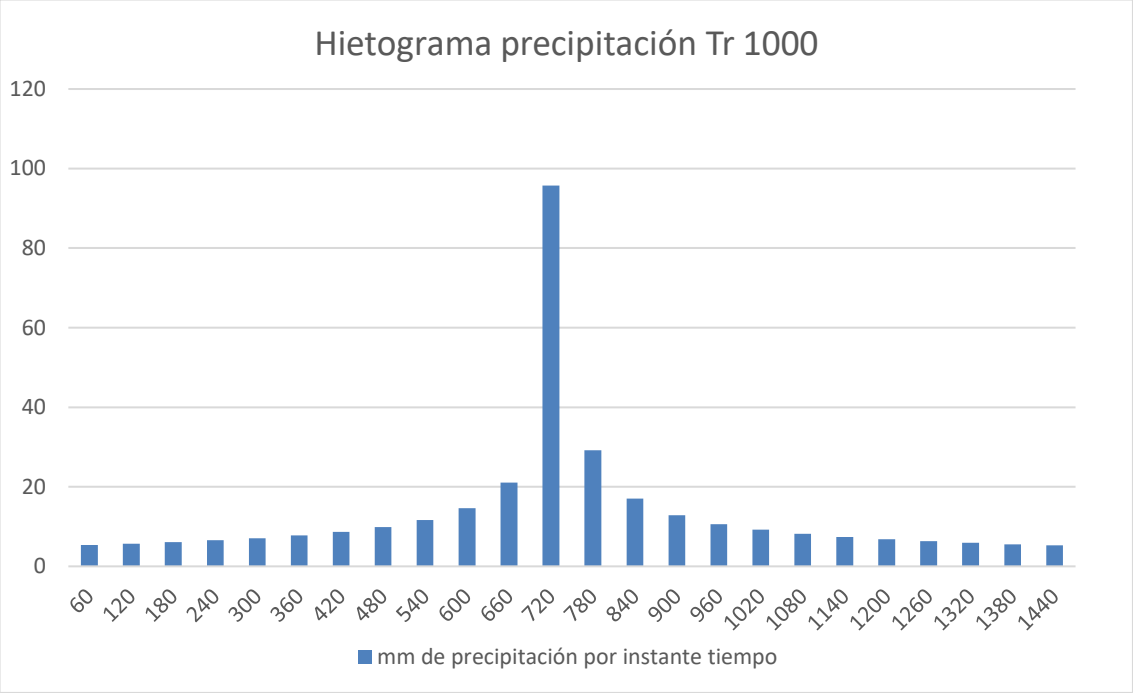


4.7.2 Generación del Hietograma a partir de Curvas IDF.

En la hidrología aplicada, la construcción de hietogramas de diseño se fundamenta en las curvas de Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF), a partir de las cuales es posible simular la distribución temporal de la precipitación. Existen diversos métodos que permiten generar dichos hietogramas, entre los más conocidos se encuentran: el método de bloques alternos, el hietograma triangular, la lluvia uniforme y el método de la intensidad instantánea, entre otros (Chow, Maidment & Mays, 1988).

Tabla 18

Hietograma obtenido mediante datos de precipitación para un Tr de 1000 años.



Nota: Elaborada a partir del método de bloques alternos, en Excel.

4.8. SELECCIÓN DE LA FRECUENCIA DE DISEÑO.

En el trabajo Applied hydrology de Ven Te Chow (1988) se presenta una tabla en la que se clasifican los tipos de estructuras hidráulicas junto con los periodos de retorno adecuados para su diseño. A partir de estos lineamientos, se seleccionó el periodo de retorno de 1000 años, con el propósito de asegurar que la infraestructura sea capaz de resistir eventos hidrológicos muy poco frecuentes, pero con alto potencial destructivo. Esta decisión se orienta en la gestión de fenómenos climáticos, como el fenómeno de El Niño, que pueden generar precipitaciones e inundaciones y posteriormente causar desbordamientos.

Tabla 19

Criterios de diseño generalizados para estructuras de control de agua.

Tipo de estructura	Periodo de retorno (años)	ELV
Alcantarillas de carreteras		
Volúmenes de tráfico bajos	5–10	–
Volúmenes de tráfico intermedios	10–25	–
Volúmenes de tráfico altos	50–100	–
Puentes de carreteras		
Sistema secundario	10–50	–
Sistema primario	50–100	–
Drenaje agrícola		
Culverts	5–50	–
Surcos	5–50	–
Drenaje urbano		
Alcantarillas en ciudades pequeñas	2–25	–
Alcantarillas en ciudades grandes	25–50	–
Aeropuertos		
Volúmenes bajos	5–10	–
Volúmenes intermedios	10–25	–
Volúmenes altos	50–100	–
Diques		
En fincas	2–50	–
Alrededor de ciudades	50–200	–
Presas con poca probabilidad de pérdidas de vidas (baja amenaza)		
Presas pequeñas	50–100	–
Presas intermedias	100+	–
Presas grandes	–	50–100%
Presas con probabilidad de pérdidas de vidas (amenaza significativa)		
Presas pequeñas	100+	50%
Presas intermedias	–	50–100%
Presas grandes	–	100%
Presas con probabilidad de altas pérdidas de vidas (alta amenaza)		
Presas pequeñas	–	50–100%
Presas intermedias '	–	100%
Presas grandes	–	100%

Nota: Extraído de Ven Te Chow (1988). Applied Hydrology. McGraw-Hill, pág. 430.

4.9 CARACTERÍSTICAS DEL EMBALSE

El embalse representa el volumen de agua acumulado detrás de la presa, cuyo comportamiento hidráulico depende de la relación entre la elevación del nivel del agua, el área inundada y el volumen almacenado. Estos parámetros permiten conocer la capacidad de regulación del embalse y su respuesta ante los caudales que ingresan y se descargan hacia el río aguas abajo.

Tabla 20

Relación Elevación–Área–Volumen del embalse.

Cota (m)	Área (km2)	Volumen (hm3)
26	0	0
30	0,2	0,4
35	0,45	1,2
40	3,9	9,2
41	5,7	14,4
42	7,6	20,4
43	9,4	29
44	11,2	38,8
45	12,9	48,4
46	14,8	58,4
47	16,6	68,4
48	18,4	78,4
49	20,2	88,4
49,75	21,56	94,4

Nota: *La presente tabla fue tomada de Carrasco Iza y Campuzano Hidalgo (2020), quienes la reportan a partir del trabajo desarrollado por Núñez (2016) sobre la optimización del funcionamiento conjunto del vertedero de servicio y el vertedero auxiliar de la Presa El Azúcar.*

4.10 SIMULACIÓN HIDROLÓGICA

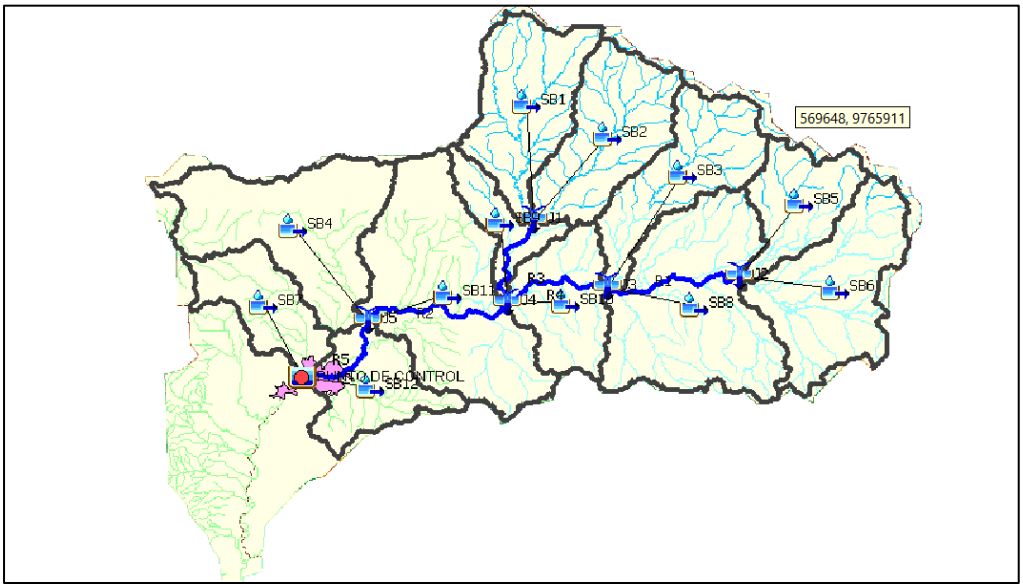
4.10.1 Modelado.

La información utilizada para la construcción del modelo de la cuenca fue previamente detallada en los apartados anteriores, necesarios para su representación en HEC-HMS. Posteriormente, se procedió al ingreso de los parámetros correspondientes a los tramos de corriente, los cuales permiten simular el proceso de propagación del caudal en el sistema de drenaje. Para este estudio se aplicó el Método de Tránsito de Muskingum, el cual facilita la representación del almacenamiento y la atenuación del caudal a lo largo de los cauces, constituyendo un paso fundamental para el análisis de la laminación de avenidas en la presa El Azúcar.

4.10.1.1 Preparación para la simulación en HEC-HMS

El modelo hidrológico requirió la recopilación de información hidrometeorológica, topográfica y de parámetros hidrológicos previamente determinados.

***Ilustración** 6*
Modelo Hidrológico.



Nota: Extraído de Hec-Hms

4.10.1.2 Datos Meteorológico

El modelo meteorológico se elaboró utilizando los registros de precipitación asociados a un periodo de retorno de 1000 años. Para posteriormente, estimar la lluvia de diseño, donde se recurrió a las curvas IDF, aplicando el método de bloques alternos con el fin de construir el hietograma que representará el comportamiento de la cuenca.

4.10.1.3 Especificaciones de Control

Se estableció la duración total del evento, el tiempo de lluvia y los intervalos de cálculo. Con estos parámetros, se ejecutó la modelación hidrológica, lo que permitió analizar cómo se comporta el escurrimiento generado por la precipitación y cómo este flujo es controlado por la presa El Azúcar.

4.10.1.4 Caudal de Diseño

A continuación, se muestra los resultados obtenidos de caudales obtenidos mediante la simulación hidrológica en HEC HMS.

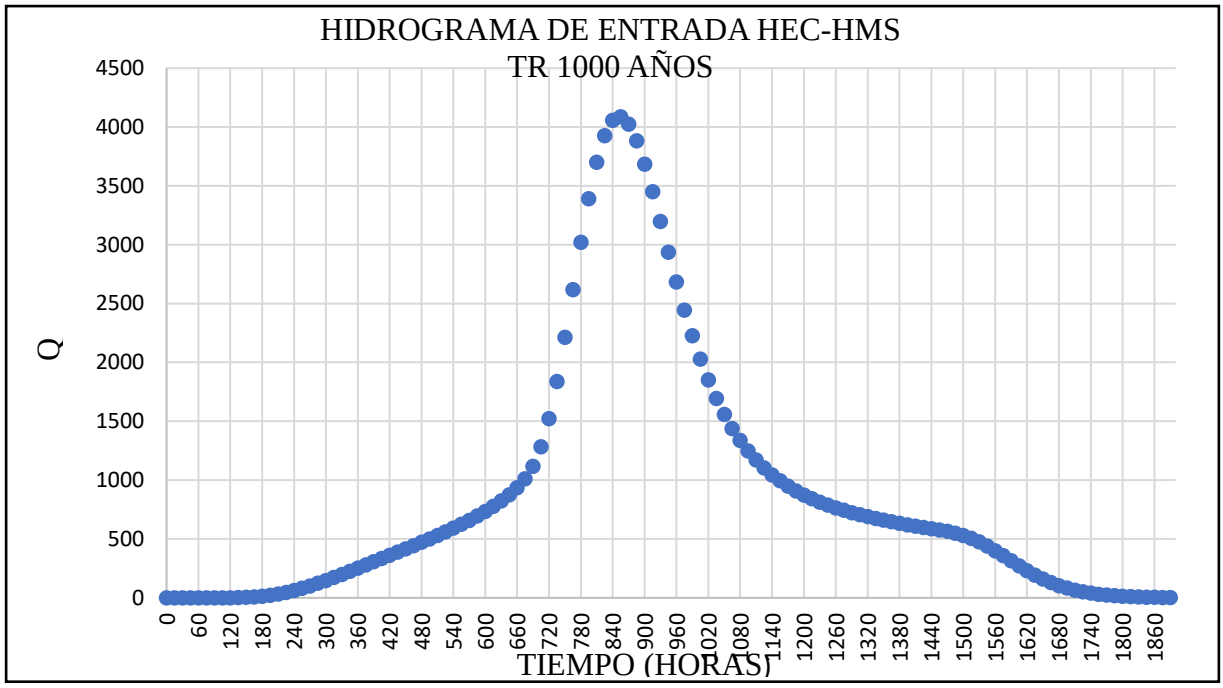
Tabla 21

Caudales de entrada simulados mediante HEC-HMS

Tiempo (min)	Q (m^3/s)	Tiempo (min)	Q (m^3/s)	Tiempo (min)	Q (m^3/s)
0	0,0	690	1118,1	1380	633,1
15	0,0	705	1283,3	1395	620,9
30	0,0	720	1523,0	1410	609,4
45	0,0	735	1837,0	1425	598,4
60	0,0	750	2212,7	1440	588,0
75	0,0	765	2617,8	1455	577,4
90	0,0	780	3021,5	1470	565,4
105	0,2	795	3390,9	1485	550,2
120	0,7	810	3701,0	1500	530,3
135	1,9	825	3927,4	1515	505,3
150	4,3	840	4056,1	1530	474,8
165	8,2	855	4086,8	1545	439,3
180	14,1	870	4023,4	1560	399,7
195	22,3	885	3882,7	1575	357,7
210	33,1	900	3685,0	1590	314,3
225	46,5	915	3451,0	1605	271,4
240	62,5	930	3196,6	1620	230,5
255	80,9	945	2937,2	1635	192,9
270	101,4	960	2684,2	1650	159,1
285	123,8	975	2445,7	1665	129,6
300	147,7	990	2225,9	1680	104,3
315	172,8	1005	2027,3	1695	83,0
330	198,6	1020	1850,4	1710	65,5
345	225,1	1035	1694,7	1725	51,2
360	252,0	1050	1558,4	1740	39,8
375	279,1	1065	1439,7	1755	30,6
390	306,3	1080	1336,8	1770	23,4
405	333,7	1095	1247,9	1785	17,8
420	361,1	1110	1170,7	1800	13,5
435	388,5	1125	1103,6	1815	10,1
450	416,1	1140	1045,1	1830	7,5
465	444,0	1155	994,0	1845	5,6
480	472,3	1170	949,0	1860	4,1
495	500,9	1185	909,2	1875	3,0
510	530,3	1200	873,9	1890	2,2
525	560,7	1215	842,3	1905	1,6
540	592,1	1230	814,0	1920	1,1
555	624,7	1245	788,4	1935	0,8
570	659,2	1260	765,2	1950	0,5
585	695,9	1275	744,0	1965	0,4
600	735,2	1290	724,5	1980	0,2
615	777,6	1305	706,5	1995	0,2
630	824,3	1320	689,8	2010	0,1
645	876,7	1335	674,2	2025	0,1
660	935,7	1350	659,7	2040	0,0
675	1010,7	1365	646,0	2055	0,0

Ilustración 7

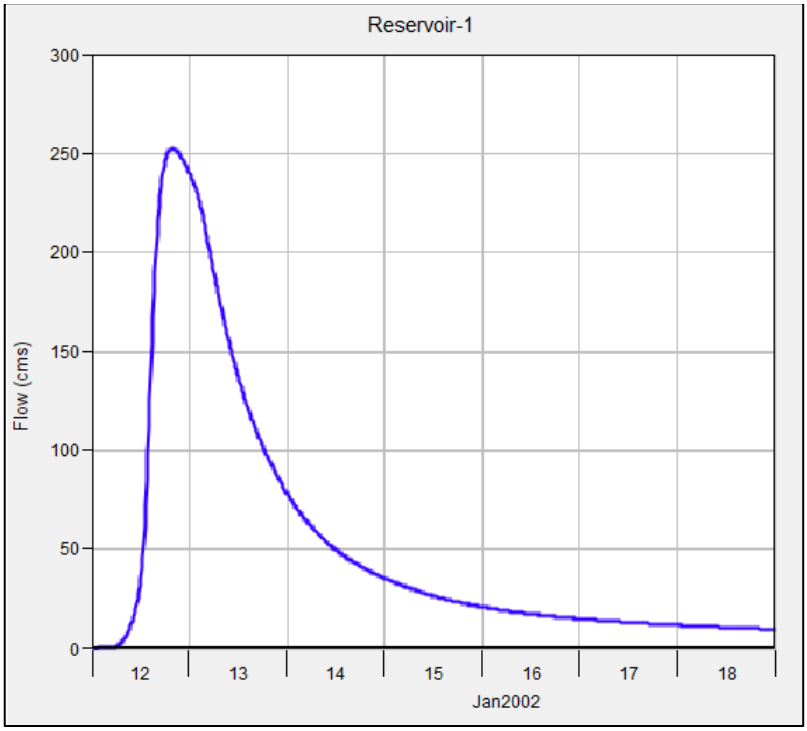
Hidrograma de entrada generado por HEC-HMS para un Tr de 1000 años.



Nota: Extraído de Excel

Ilustración 8

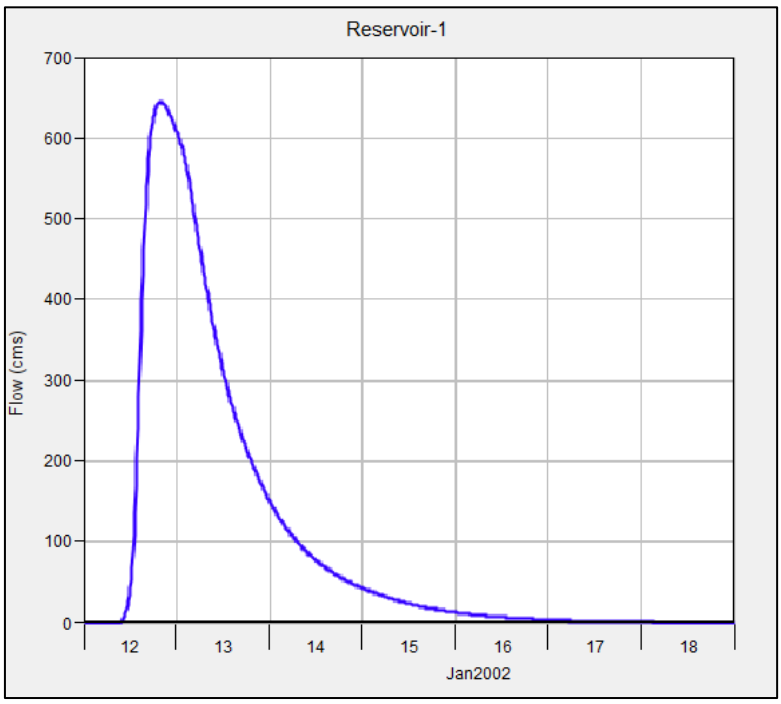
Caudales de salida del vertedero de servicio (45 msnm) de la presa El Azúcar



Nota: Extraído de Hec-Hms

Ilustración 9

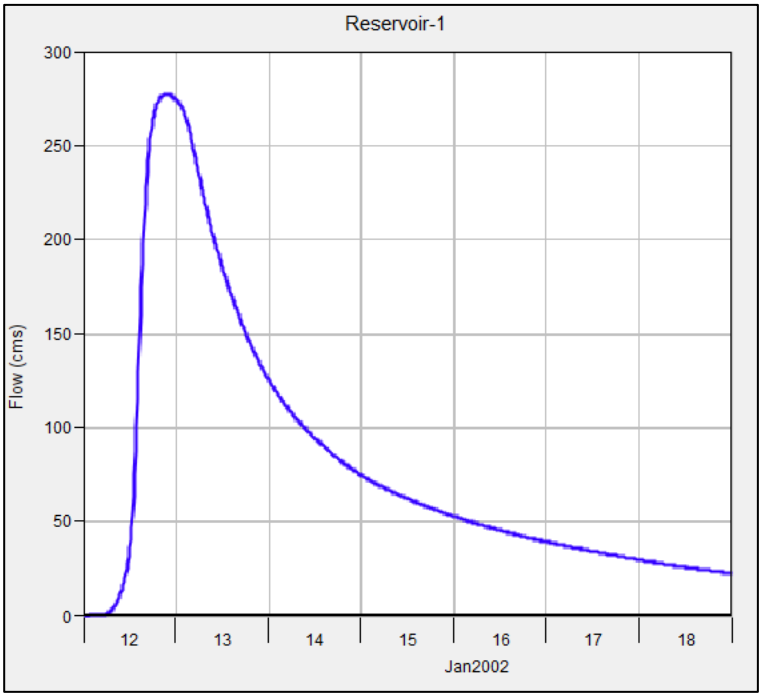
Caudales de salida del vertedero de auxiliar (45.5 msnm) de la presa El Azúcar



Nota: Extraído de Hec-Hms

Ilustración 10

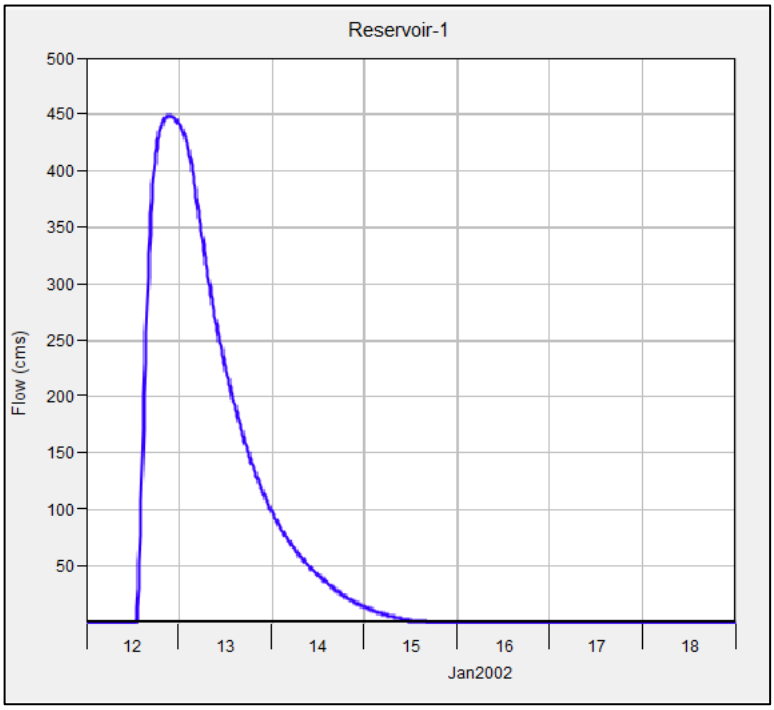
Caudales de salida del vertedero de servicio (45 msnm) de la presa El Azúcar



Nota: Extraído de Hec-Hms

Ilustración 11

Caudales de salida del vertedero auxiliar (46.5 msnm) de la presa El Azúcar



Nota: Extraído de Hec-Hms

4.11 DISEÑO DEL PERFIL TIPO CREAGER

4.11.1 Definición de las condiciones hidráulicas de diseño.

4.11.1.1 Caudal de diseño (Qd) obtenido del modelo hidráulico

En este estudio, el caudal se determinó mediante el modelo hidrológico desarrollado en HEC-HMS, el cual generó el hidrograma de entrada al embalse, y posteriormente, mediante el ruteo del flujo a través del reservorio y los vertederos, se obtuvo el hidrograma de salida. Este último representa el caudal de diseño (Qd), valor fundamental que se emplea en las ecuaciones del método USBR para el dimensionamiento hidráulico del vertedero tipo Creager.

4.10.1.2 Caudal de diseño (Qd) obtenido del modelo hidráulico

La carga de diseño (Ho) constituye uno de los parámetros fundamentales en el dimensionamiento hidráulico del vertedero tipo Creager, ya que define la energía total disponible sobre la cresta para generar la descarga correspondiente al caudal de diseño.

Este valor está compuesto por la altura de agua sobre la cresta (ho) y la carga de velocidad (ha), de acuerdo con la relación:

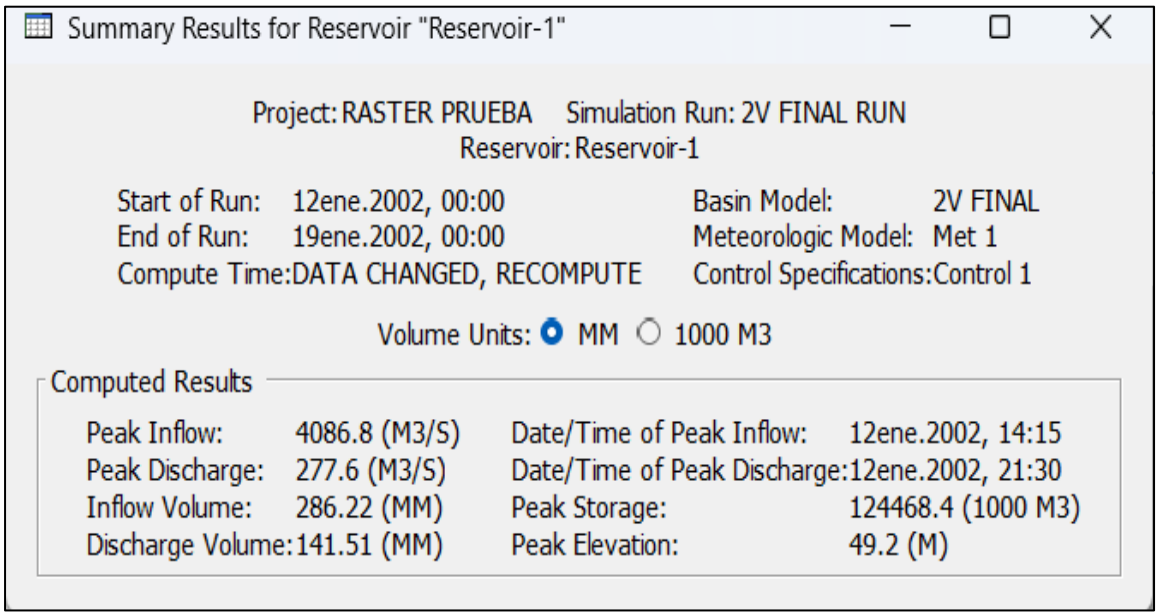
$$H_o = h_o + h_a$$

$$h_a = \frac{q^2}{2g\left(P + h_o\right)^2}$$

En términos prácticos, la carga de diseño se determina a partir del nivel máximo del embalse alcanzado durante el evento de diseño, obtenido del modelo hidráulico implementado en HEC-HMS. Esta carga es la que se emplea en la ecuación general de descarga del método USBR, permitiendo calcular la longitud efectiva de cresta (L) y verificar que el vertedero sea capaz de evacuar el caudal de diseño sin que el nivel del embalse sobrepase la cota máxima de seguridad.

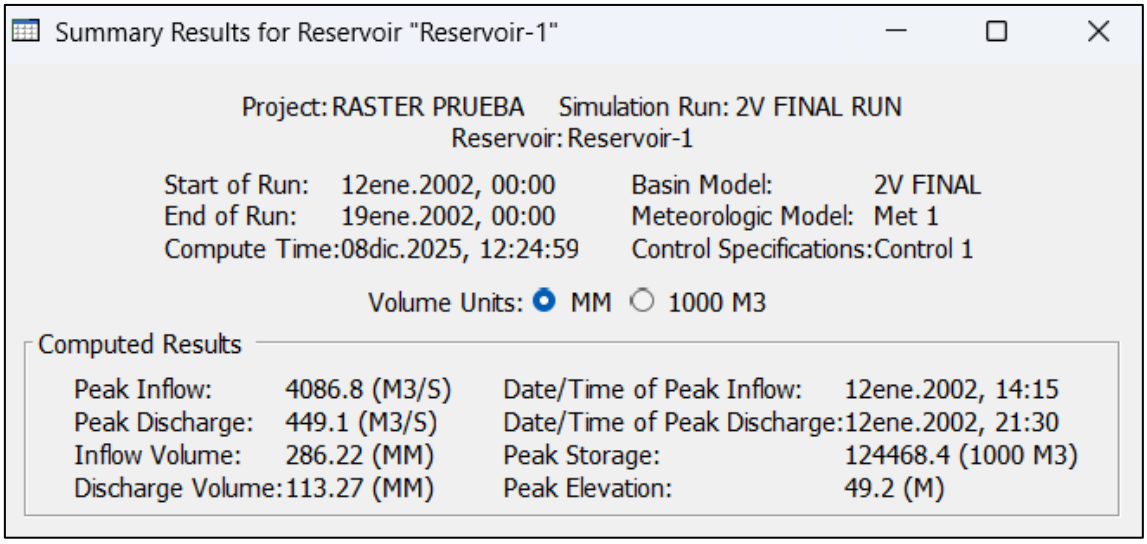
Ilustración 12

Caudal de Diseño (Qd) del vertedero de servicio



Nota: Extraído de Hec-Hms

Ilustración 13



Caudal de Diseño (Qd) del vertedero auxiliar

Nota: Extraído de Hec-Hms

4.11.2 Determinación de la forma del cimacio sin control

El cimacio sin control corresponde al tipo de vertedero cuya cresta descarga libremente, sin la presencia de compuertas u otros dispositivos de regulación. En este caso, el flujo pasa sobre la cresta únicamente bajo la acción de la carga hidráulica disponible, lo que permite definir su perfil geométrico de acuerdo con el método establecido por el Bureau of Reclamation (USBR).

Para ello, se utilizan las relaciones empíricas derivadas del comportamiento del flujo sobre un vertedero de pared delgada, ajustadas mediante los parámetros K y n en la ecuación general del perfil:

$$\frac{y}{H_o} = -k\left(\frac{x}{H_o}\right)^n$$

donde X, Y representan las coordenadas horizontales y verticales del perfil, respectivamente.

Los valores de K y n dependen de la carga de diseño (Ho) y de las condiciones hidráulicas específicas del vertedero, pudiendo obtenerse a partir de las gráficas o tablas del USBR.

4.11.3 Determinación de los parámetros K y n

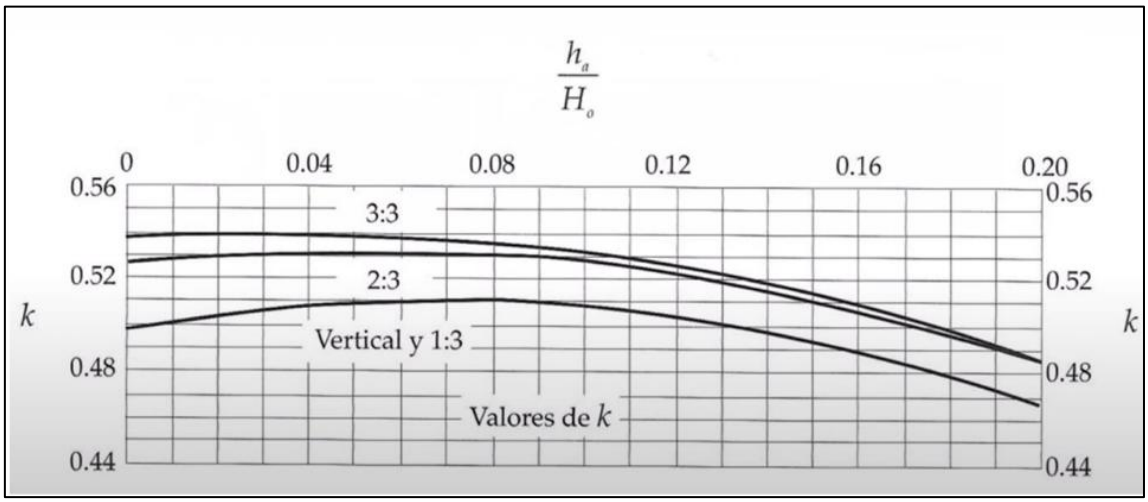
Los parámetros k y n son coeficientes hidráulicos fundamentales en la determinación del caudal de descarga. El coeficiente k representa el factor de proporcionalidad que depende de la forma geométrica del vertedero, mientras que el

coeficiente n indica cómo la altura o carga hidráulica influye en la cantidad de agua que se descarga, reflejando el efecto de la energía del flujo sobre el movimiento del agua.

Las tablas y gráficas de los parámetros k y n se presentan a continuación, las cuales fueron utilizadas en el presente estudio para la estimación del caudal de descarga del vertedero analizado.

Ilustración 14

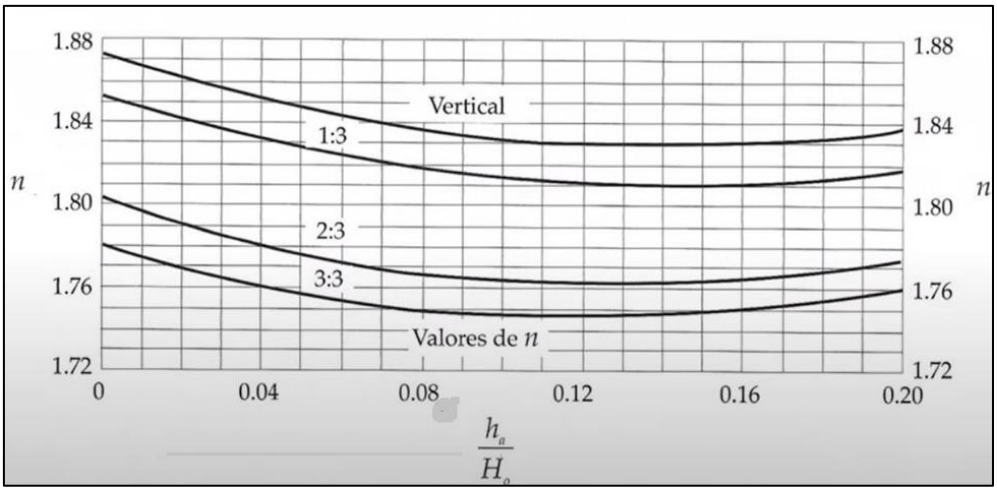
Valores de k para el diseño del perfil de un cimacio.



Nota: Tomado del United States Bureau of Reclamation (USBR). Design of Small Dams. 3rd ed., U.S. Department of the Interior, 1987.

Ilustración 15

Valores de n para el diseño del perfil de un cimacio.



Nota: Tomado del United States Bureau of Reclamation (USBR). Design of Small Dams. 3rd ed., U.S. Department of the Interior, 1987.

4.11.4 Obtención del punto de tangencia y derivación de la ecuación.

Para determinarlo, se parte de la ecuación general del perfil del cimacio, expresada como:

$$Y = -K\left(\frac{X}{H_O}\right)^n * (H_O)$$

La derivación de esta ecuación respecto a x permite obtener la pendiente instantánea del perfil:

$$\frac{d_y}{d_x} = S$$

El punto de tangencia se localiza en la coordenada x_t donde la pendiente del cimacio coincide con la pendiente de la rápida (S). De este modo, igualando ambas expresiones se determina el valor de x_t, y posteriormente la coordenada vertical y_t correspondiente.

4.11.5 Cálculo de las coordenadas del perfil (x, y)

Tabla 22

Coordenadas del Cimacio del Vertedero de Servicio.

PERFIL TIPO CREAGER										
Estación(m)	0	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,24
X	9752231	9752231,3	9752231,5	9752231,8	9752232	9752232,3	9752232,5	9752232,8	9752233	9752233,24
Y	45	44,99	44,96	44,93	44,87	44,81	44,73	44,65	44,55	44,45

Nota: Datos extraídos y procesados en Excel.

Tabla 23

Coordenadas del Cimacio del Vertedero Auxiliar.

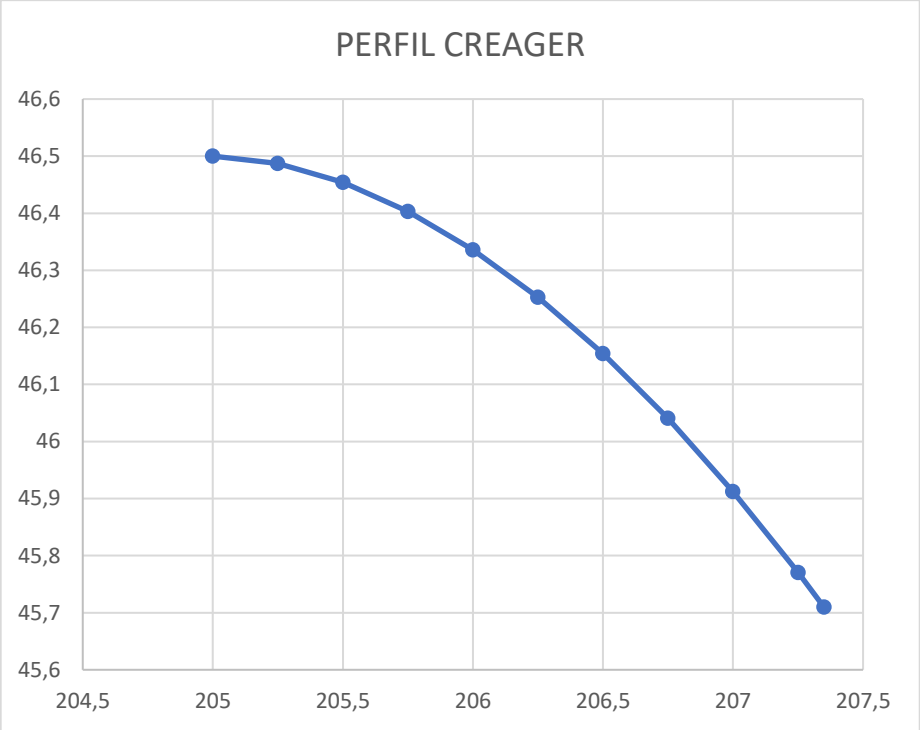
PERFIL TIPO CREAGER											
Estación(m)	0	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,35
X	9752256	9752256,3	9752256,5	9752256,8	97552257	9755257,3	9755257,5	9755257,8	9755258	9755258,3	9755258,35
Y	46,5	46,49	46,45	46,40	46,34	46,25	46,15	46,04	45,91	45,77	45,71

Nota: Datos extraídos y procesados en Excel.

4.11.6 Representación gráfica del perfil

Ilustración 16

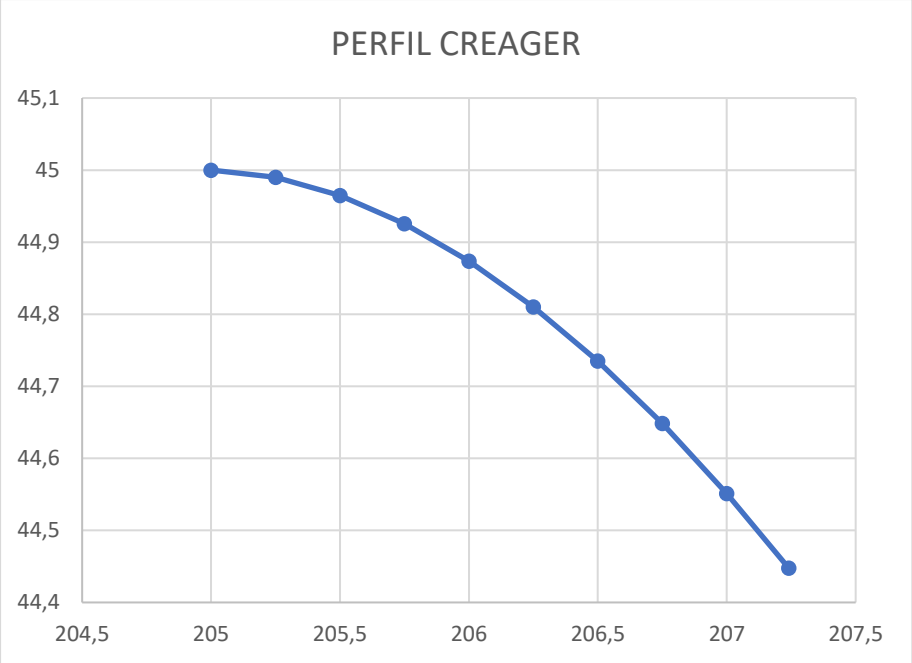
Representación Gráfica de Cimacio del Vertedero de Servicio.



Nota: Extraído de Excel

Ilustración 17

Representación Gráfica de Cimacio del Vertedero Auxiliar.



Nota: Extraído de Excel.

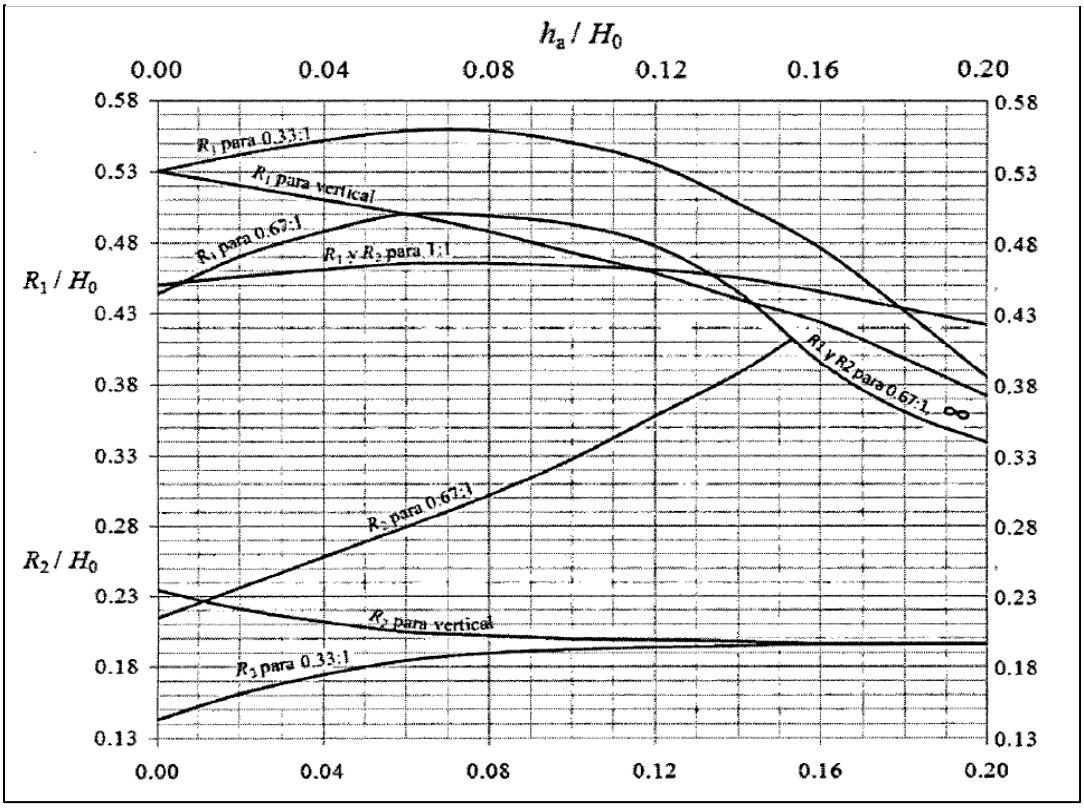
4.11.7 Determinación de radios de curvatura R_1 y R_2

La determinación de los radios de curvatura R_1 y R_2 constituye una etapa fundamental en el desarrollo geométrico del perfil tipo Creager, ya que estos parámetros definen las curvas de transición que permiten completar la forma del cimacio y garantizar la continuidad del flujo entre la cresta del vertedero y la rápida.

Para el presente diseño, los valores de los radios se obtuvieron a partir de las tablas adimensionales del USBR, que relacionan las proporciones R_1/H_O y R_2/H_O con la carga de diseño (Ho). Estas relaciones permiten determinar los radios reales mediante las expresiones:

Ilustración 18

Valores de $\frac{R_1}{H_O}$ y $\frac{R_2}{H_O}$ para el diseño de un perfil de un cimacio.



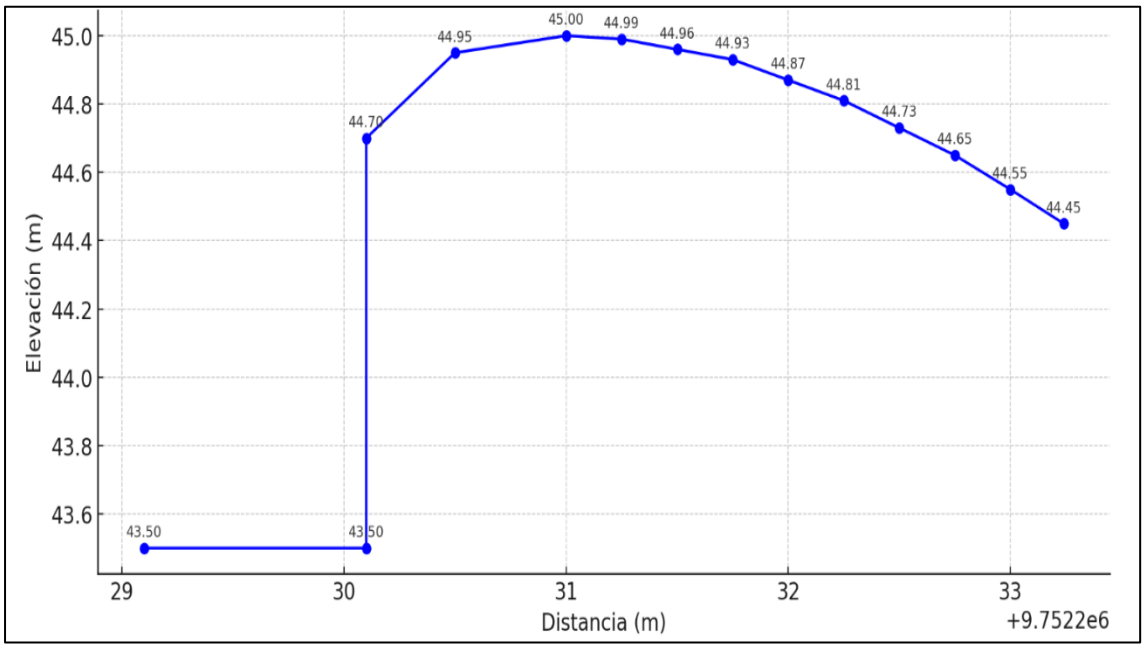
Nota*: Tomado del United States Bureau of Reclamation (USBR). Design of Small Dams. 3rd ed., U.S. Department of the Interior, 1987.*

Una vez obtenidos los valores de R1 y R2, se procedió a la representación geométrica del perfil en el software AutoCAD, trazando los arcos correspondientes que

conforman las curvas inferiores del vertedero. Estas curvas fueron unidas de manera tangente al perfil del cimacio definido previamente, de modo que el perfil final presentara transiciones suaves y continuidad hidráulica.

Ilustración 19

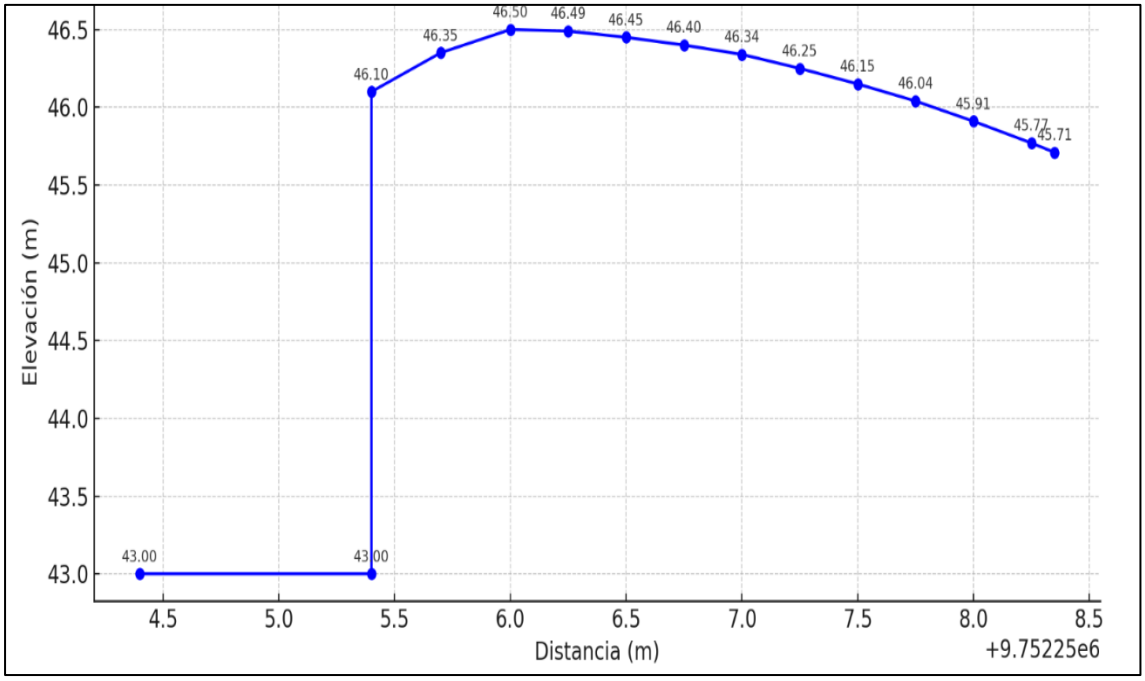
Perfil del vertedero tipo Creager diseñado con los caudales de salida simulados en HEC-HMS,



Nota: *El perfil mostrado corresponde a los puntos obtenidos del levantamiento geométrico y cálculo del vertedero tipo Creager del vertedero de servicio. Se observa la elevación máxima en la cresta 45 msnm, seguida del desarrollo descendente del intradós.*

Ilustración 20

Perfil del vertedero tipo Creager diseñado con los caudales de salida simulados en HEC-HMS



Nota: *El perfil mostrado corresponde a los puntos obtenidos del levantamiento geométrico y cálculo del vertedero tipo Creager del vertedero auxiliar. Se observa la elevación máxima en la cresta 46.50 msnm, seguida del desarrollo descendente del intradós.*

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

El análisis de laminación de avenidas permitió evaluar la capacidad hidráulica de los aliviaderos de la Presa El Azúcar frente al evento extremo considerado en el periodo de retorno de 1000 años. Las simulaciones realizadas en HEC-HMS, utilizando las precipitaciones máximas estimadas para dicho escenario (entre 276 y 291 mm/24 horas), evidenciaron que el embalse atenúa de forma significativa los caudales pico gracias a su volumen de almacenamiento. Esta reducción del caudal entrante permite que los aliviaderos reciban un flujo más controlado y puedan evacuarlo dentro de su capacidad operativa, manteniendo los niveles del embalse en condiciones seguras y evitando desbordamientos.

La propuesta de elevar la cota del vertedero auxiliar de 45,0 msnm a 46,5 msnm, junto con el rediseño del cimacio, permitió mejorar la curva de descarga y asegurar que los caudales simulados, incluidos los máximos asociados al TR = 1000 años, puedan evacuarse sin generar desbordamientos. Con ello se incrementó la eficiencia del proceso de laminación y la seguridad del embalse.

El análisis hidrometeorológico proporcionó datos consistentes para la caracterización de avenidas, permitiendo estimar hidrogramas confiables y caudales representativos. Asimismo, la evaluación hidráulica del diseño original evidenció sus limitaciones, lo cual justificó las mejoras planteadas.

Finalmente, aunque el comportamiento del embalse mejora notablemente con las modificaciones propuestas, persiste la necesidad de analizar el desempeño hidráulico aguas abajo, especialmente en el tanque amortiguador del aliviadero de emergencia N.º 1, con el fin de garantizar una adecuada disipación de energía y prevenir procesos erosivos.

5.2 RECOMENDACIONES

1. Elevar la cota del vertedero auxiliar a 46,5 msnm y ajustar el cimacio, de modo que ambos vertederos trabajen de forma conjunta y estable.
2. Realizar seguimientos periódicos al comportamiento hidráulico de los aliviaderos, incluyendo la verificación de niveles y caudales, con el fin de validar la efectividad de los ajustes implementados.
3. Revisar las condiciones aguas abajo del aliviadero de emergencia y, si es necesario, mejorar el tanque amortiguador para evitar erosión o daños.
4. Realizar aperturas periódicas de la válvula Howell-Bunger que constituye el Aliviadero de Emergencia N°2.
5. Considerar futuras ampliaciones o modificaciones adicionales en caso de que se presenten avenidas superiores a las simuladas, garantizando la seguridad hidráulica de la presa y reduciendo riesgos asociados a crecidas extremas.
6. Actualizar la información hidrometeorológica, de manera que los estudios futuros reflejen las condiciones reales y se puedan realizar ajustes oportunos en el diseño de los aliviaderos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Béjar, M. V. (2015). *Hec-Hms: Ejemplos*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). Applied hydrology. McGraw-Hill.

Foster, M., & Fell, R. (2001). The statistics of embankment dam failures and accidents. Canadian Geotechnical Journal, 38(5), 1000–1024. https://doi.org/10.1139/t01-031

FERC. (2015). Selecting and accommodating spillways. In Chapter 2: Engineering guidelines for the evaluation of hydropower projects (pp. 2-1–2-26). Federal Energy Regulatory Commission. https://www.ferc.gov/sites/default/files/2020-04/chap2.pdf

Gil Merino, A. (2019). Proyecto constructivo presa de tierra en el … (Trabajo de fin de grado). Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de https://oa.upm.es/56577/1/TFG_ANA_GIL_MERINO.pdf

Guacho Quiroz, M. (2024). Rediseño hidráulico del vertedor emergente de la presa El Azúcar, provincia de Santa Elena [Tesis de grado, Universidad de Guayaquil]. Repositorio Institucional UG: http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/63074

Herbozo, J. E., Muñoz, L. E., Guerra, M. J., Minaya, V., Haro, P., Carrillo, V., … Campozano, L. (2022). Non-Stationary Hydrological Regimes Due to Climate Change: The Impact of Future Precipitation in the Spillway Design of a Reservoir, Case Study: Sube y Baja Dam, in Ecuador. https://doi.org/10.3390/atmos13050828

Institulo Espacial Ecuatoriano. (2012). Institulo Espacial Ecuatoriano. Obtenido de https://www.inamhi.gob.ec/geoinformacion-hidrometeorologica/

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2010). Método para calcular las curvas intensidad–duración–frecuencia de lluvias en un área geográfica a partir de datos pluviométricos. INAMHI.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). Climate change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/

International Commission on Large Dams. (2011). Dam safety management: Operational phase of the dam life cycle (Bulletin 154). ICOLD. https://www.icold-cigb.org/GB/publications/bulletins.asp

Jaafar, H. H., Ahmad, F. A., & El Beyrouthy, N. (2019). GCN250, new global gridded curve numbers for hydrologic modeling and design. Scientific Data, 6(1), 145. https://doi.org/10.1038/s41597-019-0155-x

Lompi, M. (2023). Climate change and hydrological dam safety. Hydrological Sciences Journal, 68(5), 943–957. https://doi.org/10.1080/02626667.2023.2192873

Loachamín Lárraga, O. I., & Reinoso Acurio, S. L. (2020). Estudio de prefactibilidad para la generación hidroeléctrica en el río toachi, en la parroquia Sigchos, cantón Sigchos, provincia de Cotopaxi-ecuador, [Trabajo de Titulación, Universidad Politécnica Salesiana]. http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/24257

Marbello, R. (2019). Vertederos y Calibración de vertederos y medida. Medellín: Babel Libros.

Mishra, S. K., & Singh, V. P. (2003). Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) methodology. Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-015-0148-3

Novak, P., Moffat, A. I. B., Nalluri, C., & Narayanan, R. (2017). Hydraulic Structures (4.ª ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781315274898

Rodriguez Santos, J. E. (2022). Evaluación de la presa multipropósito El Azúcar provincia de Santa Elena [Tesis de maestría, Universidad de Guayaquil]. Repositorio Institucional UG: http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/63074

Secretaría Nacional del Agua. (2014). Plan Nacional de Recursos Hídricos del Ecuador. SENAGUA.https://www.agua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/05/PNRH-2014.pdf

Singh, V. P. (2018). Hydrologic modeling: progress and future directions. Geoscience Letters, 5(1), 1–20. https://doi.org/10.1186/s40562-018-0104-6

U.S. Army Corps of Engineers. (2021). SCS Unit Hydrograph Model. En HEC-HMS Technical Reference Manual. Recuperado de: https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmstrm/transform/scs-unit-hydrograph-model

United States Bureau of Reclamation (USBR). (1973). Design of Small Dams (2nd ed.). U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Washington, D.C.

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. (2018). Nature-based solutions for water: The United Nations world water development report 2018. UNESCO. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261424

Valero, D., Bung, D., Crookston, B., & Matos, J. (2016). Numerical investigation of USBR type III stilling basin performance downstream of smooth and stepped spillways. En B. Crookston & B. Tullis (Eds.), Hydraulic Structures and Water System Management. (6th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, Portland, OR 27-30 June, pp. 652-663). doi:10.15142/T340628160853

Yigzaw, W., & Hossain, F. (2016). Sensitivity of probable maximum flood in a changing environment. Journal of Hydrologic Engineering, 21(2), 04015022. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001287

ANEXOS

ANEXO 1. EMBALSE EL AZÚCAR.

ANEXO 4. VERTEDERO DE EMERGENCIA.

ANEXO 3. VÁLVULA HOWELL-BUNGER.

ANEXO 4. TORRE DE TOMA.

ANEXO 5. VISTA TÉCNICA A LA PRESA EL AZÚCAR.