



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA INGENIERÍA CIVIL

TEMA:

“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL EMBALSE
CHONGÓN FRENTE AL INCREMENTO DE CRECIENTES:
VARIACIONES HIDROLÓGICAS Y CAPACIDAD OPERATIVA”

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

AUTORES:

DOMINGUEZ RICARDO MANUEL EDUARDO
GUERRERO CASTRO KELLY ROCIO

TUTOR:

ING. GUIDO M. 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 DEL COMPORTAMIENTO DEL EMBALSE
CHONGÓN FRENTE AL INCREMENTO DE CRECIENTES:
VARIACIONES HIDROLÓGICAS Y CAPACIDAD
OPERATIVA**

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

AUTORES:

**DOMINGUEZ RICARDO MANUEL EDUARDO
GUERRERO CASTRO KELLY ROCIO**

TUTOR:

ING. GUIDO M. ORTIZ SAFADI, Mg.

LA LIBERTAD – ECUADOR

2025

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



ING. LUCRECIA C. MORENO
ALCIVAR, PhD.
DIRECTORA DE CARRERA DE
INGENIERÍA CIVIL



ING. GUIDO M. ORTIZ SAFADI,
MSc.
DOCENTE TUTOR



ING. NÉSTOR ORRALA VERA
MSc.
DOCENTE ESPECIALISTA



ING. RICHARD I. RAMIREZ
PALMA, MSc.
DOCENTE UIC

DEDICATORIA

Dedico este logro a mi familia y amigos por su apoyo incondicional y por creer en mi

A mi esposa por su paciencia, comprensión y motivación constante, su amor y apoyo han sido fundamentales en mi vida y carrera académica

A mi hijo por ser mi motivación e inspiración para seguir adelante

A mi compañera de tesis, por su colaboración esfuerzo y compromiso

Y a mí, por no rendirme en momentos difíciles, por seguir adelante con determinación y por demostrarme que puedo alcanzar una meta si trabajo con el corazón

DOMINGUEZ RICARDO MANUEL EDUARDO

DEDICATORIA

Esta tesis se la dedico a mi Dios quien me supo guiar en todo momento.

A mis padres que me apoyaron durante toda esta etapa universitaria.

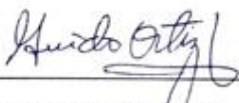
A mi esposo e hijos quien cada día me motivan a seguir adelante y están en cada logro, brindándome su amor incondicional.

También a mi hermana y mis sobrinos que me han alentado a seguir adelante en cada momento de adversidad.

GUERRERO CASTRO KELLY ROCIO

CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO

En calidad de tutor del trabajo de investigación para titulación del tema “ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL EMBALSE CHONGÓN FRENTE AL INCREMENTO DE CRECIENTES VARIACIONES HIDROLÓGICAS Y CAPACIDAD OPERATIVA. Elaborado por el estudiante **DOMINGUEZ RICARDO MANUEL EDUARDO** y **GUERRERO CASTRO KELLY ROCIO**, egresados de la carrera de Ingeniería Civil, de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, 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.



DOCENTE TUTOR

ING. GUIDO M. ORTIZ SAFADI, Mg.

C.I.: 0904149481

gortiz@upse.edu.ec



TESIS PRESA CHONGON GUERRERO DOMINGUEZ

7%
Textos
sospechosos



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

Nombre del documento: TESIS PRESA CHONGON GUERRERO DOMINGUEZ.pdf
 ID del documento: 1e9c370211d14e4b954a57481e79a0f150db5800
 Tamaño del documento original: 1017,67 kB

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: 26.291
 Número de caracteres: 172.111

Ubicación de las similitudes en el documento:



Fuentes con similitudes fortuitas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	Documento de otro usuario #0ce18a Viene de de otro grupo	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (10 palabras)
2	www.redalyc.org MODELACIÓN DE TRÁNSITO DE CRECIENTES EN EL RÍO ABUR... https://www.redalyc.org/pdf/1492/149250081011.pdf	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (10 palabras)



Guido Moises Ortiz Safadi



DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, **Kelly Rocio Guerrero Castro**, con cédula de ciudadanía No. **2400317869**, Y **Manuel Eduardo Domínguez Ricardo** con cédula de ciudadanía No. **2400455255**, declaro bajo juramento que el presente trabajo de titulación denominado **ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL EMBALSE CHONGÓN FRENTE AL INCREMENTO DE CRECIENTES: VARIACIONES HIDROLÓGICAS Y CAPACIDAD OPERATIVA**, no tiene antecedentes de haber sido elaborado en la facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera de Ingeniería Civil, lo cual es un trabajo exclusivamente inédito y perteneciente de mi autoría.

Por medio de la presente declaración cedo los derechos de autoría y propiedad intelectual, correspondiente 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,



Firma del estudiante

Kelly Rocio Guerrero Castro
C.I. 2400317869



Firma del estudiante

Manuel Eduardo Domínguez Ricardo
C.I. 2400455255

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

ING. GUIDO M. ORTIZ SAFADI, Mg.

TUTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Universidad Estatal Península de Santa Elena

En mi calidad de Tutor del presente **trabajo “ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL EMBALSE CHONGÓN FRENTE AL INCREMENTO DE CRECIENTES VARIACIONES HIDROLÓGICAS Y CAPACIDAD OPERATIVA.** Previó a la obtención del Título de Ingeniero Civil elaborado por **DOMINGUEZ RICARDO MANUEL EDUARDO y GUERRERO CASTRO KELLY ROCIO**, egresados de la carrera de Ingeniería Civil, Facultad Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, me permito declarar que luego de haber orientado, estudiado y revisado, la apruebo en todas sus partes.



DOCENTE TUTOR

ING. GUIDO M. ORTIZ SAFADI, Mg.

C.I.: 0904149481

gortiz@upse.edu.ec

CERTIFICADO DE GRAMATOLOGÍA

VALIDACIÓN GRAMATICAL Y ORTOGRÁFICA

CERTIFICO

Que, he revisado el trabajo de Integración Curricular de título: Análisis del comportamiento del embalse Chongón frente al incremento de crecientes: Variaciones hidrológicas y capacidad operativa, elaborado por los estudiantes de la Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Estatal Península de Santa Elena: Dominguez Ricardo Manuel Eduardo y Guerrero Castro Kelly Rocio, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil.

Que, he realizado las observaciones pertinentes en los ámbitos de la gramática, ortografía y puntuación del documento, mismas que han sido acogidas proactivamente por los mencionados, corroborando que han sido introducidos los ajustes correspondientes en el trabajo.

Por lo expuesto, autorizo a los peticionarios, hacer uso de este certificado como a bien convengan.

Atentamente,



Lic. Alexi Javier Herrera Reyes
Magister en Diseño y Evaluación de Modelos Educativos
CC. 0924489255
Registro SENESCYT: 1050-14-86052904
Teléfono: 0962989420

La Libertad, a los 6 días del mes de noviembre de 2025.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios, por su guía y sabiduría que me han permitido alcanzar este logro académico

A mi familia por su apoyo constante, sacrificio y amor incondicional han sido mi mayor motivación

Al Ing. Guido Ortiz por su valiosa guía experiencia y dedicación. Su apoyo y orientación han sido fundamentales en el desarrollo de esta investigación

A la Universidad Estatal Península De Santa Elena, le agradezco por brindarme la oportunidad de crecer y desarrollarme académicamente y proporcionarme los recursos necesarios para alcanzar este logro

Domínguez Ricardo Manuel Eduardo

AGRADECIMIENTOS

Quiero empezar agradeciendo a Dios por permitirme estar con salud y vida durante todo este periodo universitario.

A mi esposo Álvaro Chicaiza e hijos Jeikol Chicaiza y Teo Chicaiza quienes han sido mi mayor motivación. Gracias por su comprensión, amor incondicional y por acompañarme con paciencia en cada etapa de este proceso.

A mis padres Marisol Castro y Sandro Guerrero por ser el pilar de mi vida, que siempre me motivan a seguir adelante y están al pendiente de mis logros

A mis hermanas Cristina Alcívar y Danna Guerrero, y a mis sobrinos quienes han confiado en mí y me han brindado su cariño y confianza.

A mi tutor Ing. Guido Ortiz por su guía y apoyo durante la realización de este trabajo.

A la Universidad Estatal Península De Santa Elena, por brindarme el espacio y la formación necesaria para crecer profesional y personal.

A todos mis amigos que conocí a lo largo de esta hermosa carrera que me apoyaron y estuvieron alentándome con sus palabras.

Guerrero Castro Kelly Rocio

TABLA DE CONTENIDO

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	ii
DEDICATORIA	iii
DEDICATORIA	iv
CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO	v
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	vii
CERTIFICACIÓN DEL TUTOR.....	viii
CERTIFICADO DE GRAMATOLOGÍA	ix
AGRADECIMIENTOS	x
AGRADECIMIENTOS	xi
TABLA DE CONTENIDO	xii
LISTA DE FIGURAS	xviii
LISTA DE TABLAS	xx
LISTA DE ECUACIONES	xxiii
RESUMEN.....	xxiv
ABSTRACT.....	xxv
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	26
1.1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	28
1.2. ANTECEDENTES.....	30
1.3. HIPÓTESIS.....	34
1.3.1. Hipótesis General.....	34
1.3.2. Hipótesis Específicas.....	34
1.4. OBJETIVOS	35
1.4.1. Objetivo General.....	35
1.4.2. Objetivos Específicos.....	35

1.5.	ALCANCE	36
1.6.	VARIABLES.....	37
1.6.1.	Variables Independientes.....	37
1.6.2.	Variables Dependientes.	37
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO		38
2.1	EMBALSES Y GESTIÓN HIDROLÓGICA	38
2.1.1.	Definición y clasificación de embalses	38
2.1.2.	Funciones y usos de los embalses multipropósito.....	40
2.1.3.	Balance hídrico en embalses	42
2.1.4.	Procesos hidrológicos relevantes en cuencas tributarias.....	44
2.1.5.	Efectos del cambio climático sobre la hidrología de embalses.....	48
2.2	VARIACIONES HIDROLÓGICAS EN CUENCAS TROPICALES ..	51
2.2.1.	Régimen de lluvias en la Costa del Ecuador.....	51
2.2.2.	Escorrentía superficial y subterránea en ambientes tropicales.....	53
2.2.3.	Impacto del uso del suelo y deforestación en la cuenca Chongón.....	56
2.2.4.	Eventos extremos: El Niño, La Niña y anomalías hidrológicas.....	57
2.2.5.	Modelación hidrológica de crecientes en cuencas interconectadas	58
2.3	CRITERIOS HIDRÁULICOS APLICADOS A EMBALSES	60
2.3.1.	Dinámica del almacenamiento y variaciones del volumen útil.....	60
2.3.2.	Aliviaderos: diseño, capacidad y seguridad hidráulica	61
2.3.3.	Diques laterales y estructuras complementarias	63
2.3.4.	Sedimentación y reducción de la capacidad hidráulica.....	65
2.3.5.	Vegetación acuática invasora y sus efectos en la hidráulica del embalse	67
2.3.6.	Propagación de ondas de crecida y operación de descargas	68
2.4	CAPACIDAD OPERATIVA DE LOS EMBALSES	70
2.4.1.	Indicadores de desempeño y eficiencia en la gestión de embalses	70
2.4.2.	Manejo de niveles de almacenamiento frente a crecientes	71

2.4.3.	Interconexión del sistema Chongón con embalse San Vicente y canales de riego	72
2.4.4.	Restricciones operativas: bombeo, trasvases y demanda de agua	73
2.4.5.	Protocolos de operación en escenarios de riesgo hidrológico	73
2.5	SEGURIDAD Y GESTIÓN DEL RIESGO EN EMBALSES	74
2.5.1.	Normativas y lineamientos internacionales	75
2.5.2.	Marco normativo y regulatorio en el Ecuador	75
2.5.3.	Evaluación de riesgos por crecientes y desbordamientos	76
2.5.4.	Planes de emergencia y sistemas de alerta temprana	76
2.5.5.	Experiencias internacionales en gestión de embalses frente a eventos extremos	76
2.6	HERRAMIENTAS TECNOLÓGICAS PARA EL ANÁLISIS DE EMBALSES	77
2.6.1.	Sistemas de información geográfica y teledetección	77
2.6.2.	Modelos hidrológicos aplicados a embalses	77
2.6.3.	Modelos hidráulicos	78
2.6.4.	Monitoreo en tiempo real: sensores hidrometeorológicos y batimetría	78
2.6.5.	Simulación de escenarios de cambio climático e incremento de caudales	79
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA		80
3.1.	TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN	80
3.1.1.	Tipo.	80
3.1.2.	Nivel.	80
3.2.	MÉTODO, ENFOQUE Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	81
3.2.1.	Método.	81
3.2.2.	Enfoque.	81
3.2.3.	Diseño.	82
3.3.	POBLACIÓN, MUESTRA Y MUESTREO	82
3.3.1.	Población.	83

3.3.2.	Muestra.....	83
3.3.3.	Muestreo.....	84
3.4.	UBICACIÓN Y SECTOR DE ESTUDIO	84
3.4.1.	Localización geográfica del embalse Chongón.....	84
3.4.2.	Sistema interconectado con Trasvase Daule-Santa Elena, embalse San Vicente y canales de riego.....	86
3.5.	METODOLOGÍA DEL O.E.1.: CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y MORFOLÓGICA DEL EMBALSE CHONGÓN Y SU CUENCA	86
3.5.1.	Análisis de precipitaciones y laminación de avenidas	86
3.5.2.	Series históricas de caudales	89
3.5.3.	Delimitación de cuencas tributarias y subcuencas	90
3.5.4.	Cobertura vegetal y cambios de uso del suelo	92
3.6.	METODOLOGÍA DEL O.E.2.: EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA VEGETACIÓN ACUÁTICA INVASORA EN LA CAPACIDAD HIDRÁULICA DEL EMBALSE.....	95
3.6.1.	Identificación y cuantificación de vegetación flotante (<i>Eichhornia crassipes</i>)	95
3.6.2.	Impacto en la sección hidráulica del aliviadero	97
3.6.3.	Integración de variables ecológicas en modelos hidráulicos	100
3.7.	METODOLOGÍA DEL O.E.3.: MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE CRECIENTES BAJO ESCENARIOS NO ESTACIONARIOS	103
3.7.1.	Selección de modelos hidrológicos.....	103
3.7.2.	Simulación hidráulica del embalse y aliviadero.....	104
3.7.3.	Determinación del tiempo de concentración y caudales de diseño.....	106
3.7.4.	Escenarios climáticos extremos (El Niño, La Niña, cambio climático)	108
3.7.5.	Evaluación de propagación de ondas de crecida.....	110
3.7.6.	Operación de descargas y control de niveles	113

3.8.	CAPACIDAD OPERATIVA Y GESTIÓN DEL EMBALSE CHONGÓN.....	116
3.8.1.	Indicadores de desempeño	116
3.8.2.	Manejo de niveles frente a crecientes y sequías.....	118
3.8.3.	Interconexión operativa con embalse San Vicente y canales de riego	119
3.8.4.	Restricciones operativas: bombeo, trasvases, demanda de agua.....	121
3.8.5.	Protocolos de operación en escenarios de riesgo hidrológico.....	123
3.9.	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	127
	CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	130
4.1.	RESULTADOS DEL O.E.1.: CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y MORFOLÓGICA DEL EMBALSE CHONGÓN Y SU CUENCA	130
4.1.1.	Régimen de precipitaciones y eventos de avenida.....	130
4.1.2.	Curva cota-área-volumen del embalse.....	135
4.1.3.	Series históricas de caudales y aportes del trasvase Daule-Santa Elena 140	
4.1.4.	Delimitación de cuencas y subcuencas tributarias	143
4.1.5.	Cobertura vegetal y cambios de uso del suelo	146
4.1.6.	Integración de resultados hidrológicos y morfológicos	147
4.2.	RESULTADOS DEL O.E.2.: EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA VEGETACIÓN ACUÁTICA INVASORA EN LA CAPACIDAD HIDRÁULICA DEL EMBALSE CHONGÓN.....	150
4.2.1.	Identificación y cuantificación de vegetación flotante (Eichhornia crassipes)150	
4.2.2.	Distribución espacial y dinámica temporal de la vegetación flotante.	153
4.2.3.	Efecto de la vegetación flotante sobre la sección hidráulica del aliviadero 156	
4.2.4.	Sensibilidad del sistema hidráulico ante variaciones de rugosidad vegetal 159	
4.2.5.	Integración de variables ecológicas e hidráulicas	162

4.3.	RESULTADOS DEL O.E.3.: MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE CRECIENTES BAJO ESCENARIOS NO ESTACIONARIOS	166
4.3.1.	Calibración y validación del modelo hidrológico HEC-HMS	166
4.3.2.	Simulación de caudales de diseño por periodos de retorno	167
4.3.3.	Comportamiento hidráulico del embalse ante crecientes.....	169
4.3.4.	Escenarios climáticos ENSO y cambio climático.....	171
4.3.5.	Propagación de ondas de crecida	173
4.3.6.	Operación de descargas y control de niveles	174
4.4.	RESULTADOS LA CAPACIDAD OPERATIVA Y GESTIÓN DEL EMBALSE CHONGÓN	175
4.4.1.	Indicadores de desempeño	175
4.4.2.	Manejo de niveles frente a crecientes y sequías.....	177
4.4.3.	Interconexión operativa con el embalse San Vicente y canales de riego 177	
4.4.4.	Protocolos de operación y control de riesgos.....	178
	CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	180
5.1	CONCLUSIONES	180
5.2	RECOMENDACIONES	182
	BIBLIOGRAFÍA	183
	ANEXOS	188

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de clasificación de embalses según criterios técnicos y funcionales	40
Figura 2. Representación de un embalse multipropósito del río Yanuncay en Cuenca.....	42
Figura 3. Diagrama esquemático del balance hídrico de un embalse	44
Figura 4. Ubicación de estaciones de monitoreo hidrológico en la cuenca del río Kromme (Sudáfrica).....	48
Figura 5. Esquema de funcionamiento de una central hidroeléctrica.	53
Figura 6. Representación esquemática de la escorrentía superficial y subterránea	55
Figura 7. Volumen muerto en presas.....	61
Figura 8. Esquema del funcionamiento hidráulico de un aliviadero de bloques en forma de cuña.....	63
Figura 9. Esquema de diques laterales y estructuras complementarias en un embalse.....	65
Figura 10. Zonas de deposición en el embalse.....	67
Figura 11. Esquema de propagación de una onda de crecida en un embalse.....	70
Figura 12. Zonas operativas de almacenamiento del embalse de Laverné (España)	72
Figura 13. Esquema de protocolos de operación frente a crecidas	74
Figura 14. Ubicación del embalse Chongón y sus áreas de estudio	86
Figura 15. Vista de Cordillera Chongón-Colonche donde se visualiza la subcuenca del río Chongón	92
Figura 16. Mapa de cobertura vegetal / uso del suelo del biocorredor Chongón–Colonche	94
Figura 17. Variación mensual de la precipitación promedio en la cuenca Chongón–Daule (mm/mes)	132
Figura 18. Hidrograma de avenida máxima probable – Embalse Chongón	135
Figura 19. Curva cota – área del embalse	138
Figura 20. Curva cota–volumen acumulado del embalse Chongón.....	139

Figura 21. Distribución estacional de caudales afluentes al embalse Chongón.	142
Figura 22. Mapa de delimitación de cuencas y subcuencas del sistema Chongón.	144
Figura 23. Mapa de distribución de vegetación flotante en el embalse Chongón.	152
Figura 24. Distribución espacial de vegetación flotante por zonas del embalse Chongón	154
Figura 25. Esquema hidráulico del aliviadero modelado.....	157
Figura 26. Relación entre coeficiente de rugosidad (n) y capacidad de descarga del aliviadero.....	162
Figura 27. Relación entre caudal pico y periodo de retorno (Curva de frecuencia).	168
Figura 28. Curvas de nivel–descarga (H–Q) del sistema de evacuación.	175

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de embalses según criterios técnicos y funcionales.....	39
Tabla 2. Principales funciones de los embalses multipropósito	41
Tabla 3. Componentes del balance hídrico aplicado al embalse Chongón	43
Tabla 4. Comparación de procesos hidrológicos y su influencia en la generación de crecientes	46
Tabla 5. Proyecciones de cambio climático: resumen de impactos sobre embalses seleccionados.....	50
Tabla 6. Factores que condicionan la dinámica de crecientes en embalses	52
Tabla 7. Diferencias entre escorrentía superficial y subterránea en ambientes tropicales	55
Tabla 8. Cambios en el uso del suelo en la cuenca Chongón (2000–2020)	56
Tabla 9. Impactos hidrológicos de eventos ENSO en Ecuador y efectos sobre embalses	58
Tabla 10. Modelos hidrológicos aplicables a crecientes en cuencas interconectadas	59
Tabla 11. Componentes de almacenamiento en un embalse	60
Tabla 12. Tipologías de aliviaderos y principales características.....	62
Tabla 13. Funciones y vulnerabilidades de los diques laterales en embalses tropicales	64
Tabla 14. Factores determinantes en la sedimentación de embalses tropicales ...	66
Tabla 15. Impactos de la vegetación acuática invasora en embalses tropicales...	68
Tabla 16. Variables que influyen en la propagación de ondas de crecida	69
Tabla 17. Indicadores de desempeño aplicables a la gestión de embalses	71
Tabla 18. Restricciones principales del sistema Chongón	73
Tabla 19. Distribución de cobertura vegetal y uso del suelo en el Bosque Protector Chongón–Colonche	93
Tabla 20. Procedimiento metodológico para la detección de vegetación flotante en el embalse Chongón	96
Tabla 21. Procedimiento metodológico para la simulación del impacto vegetal en el aliviadero.....	99

Tabla 22. Integración de variables ecológicas en el análisis hidráulico del embalse Chongón	102
Tabla 23. Parámetros geométricos e hidráulicos de simulación del embalse Chongón.....	105
Tabla 24. Caudales de diseño estimados para la cuenca del río Chongón y el trasvase Daule–Santa Elena.	108
Tabla 25. Factores de modificación hidrológica aplicados a los escenarios climáticos extremos.....	110
Tabla 26. Parámetros hidráulicos considerados para la simulación de ondas de crecida.	112
Tabla 27. Parámetros hidráulicos y operativos del embalse Chongón utilizados en la modelación.	115
Tabla 28. Indicadores operativos e hidráulicos aplicados al embalse Chongón.	117
Tabla 29. Parámetros operativos del sistema interconectado Chongón–San Vicente–Playas.	121
Tabla 30. Resumen de restricciones operativas consideradas en la modelación del sistema Chongón.	122
Tabla 31. Umbrales operativos y niveles de alerta para la presa Chongón.	124
Tabla 32 Operacionalización de Variables Independientes	127
Tabla 33 Operacionalización de Variables Dependientes.....	128
Tabla 34. Precipitación media mensual en la cuenca Chongón–Daule.....	131
Tabla 35. Precipitaciones máximas registradas por periodo de retorno	132
Tabla 36. Avenida máxima probable – Embalse Chongón.....	133
Tabla 37. Curva de embalse – Presa Chongón	136
Tabla 38. Volumen acumulado en función de la cota del embalse Chongón	138
Tabla 39. Resumen estadístico de los caudales afluentes al embalse Chongón (1990–2023).....	140
Tabla 40. Promedios mensuales de caudal afluente al embalse Chongón (1990–2023)	141
Tabla 41. Aportes anuales acumulados del trasvase Daule–Santa Elena al embalse Chongón	142
Tabla 42. Parámetros geomorfológicos de las subcuencas tributarias	145
Tabla 43. Distribución de cobertura vegetal y uso del suelo en el Bosque Protector Chongón–Colonche.	146

Tabla 44. Parámetros integrados de comportamiento hidrológico y morfológico del sistema Chongón.	149
Tabla 45. Superficie de vegetación flotante (<i>Eichhornia crassipes</i>) en el embalse Chongón (2023–2025).	151
Tabla 46. Áreas predominantes de acumulación de <i>Eichhornia crassipes</i> en el embalse Chongón.	153
Tabla 47. Dinámica temporal de cobertura vegetal por zona del embalse Chongón (2023–2025).	155
Tabla 48. Parámetros hidráulicos del aliviadero bajo distintos escenarios de obstrucción vegetal.	157
Tabla 49. Respuesta temporal del embalse durante creciente simulada (2025).	158
Tabla 50. Sensibilidad del nivel y caudal del aliviadero ante variaciones del coeficiente de rugosidad.	160
Tabla 51. Incremento relativo de energía específica en la zona del vertedero. ...	161
Tabla 52. Variables ecológicas e hidráulicas del embalse Chongón.	163
Tabla 53. Efectos combinados de la vegetación acuática en el régimen hidráulico del embalse Chongón.	165
Tabla 54. Parámetros de calibración del modelo HEC-HMS.	166
Tabla 55. Indicadores estadísticos de validación del modelo HEC-HMS.	167
Tabla 56. Resultados de caudales máximos de diseño simulados.	167
Tabla 57. Comparación entre caudales simulados y caudal de diseño del aliviadero.	168
Tabla 58. Aportes simultáneos de caudal al embalse Chongón.	169
Tabla 59. Balance hidrológico del embalse Chongón ante crecientes simultáneas.	170
Tabla 60. Parámetros de almacenamiento y descarga del embalse Chongón.	171
Tabla 61. Comparación entre volumen de entrada y volumen vertido.	172
Tabla 62. Resultados hidrodinámicos de propagación de ondas de crecida.	173
Tabla 63. Resultados operativos de simulación de descargas.	174
Tabla 64. Indicadores hidráulicos y operativos del embalse Chongón.	176
Tabla 65. Niveles de operación y respuesta frente a escenarios simulados.	177
Tabla 66. Resultados del balance hídrico interconectado Chongón–San Vicente.	178
Tabla 67. Evaluación de niveles de alerta y tiempos de respuesta operativa.	178

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ecuación del balance hídrico.....	42
Ecuación 2. Análisis de precipitaciones máximas e IDF	87
Ecuación 3. Método SCS-CN para la escorrentía directa (mm).	87
Ecuación 4. Cálculo de S	88
Ecuación 5. Cálculo del caudal pico	88
Ecuación 6. Cálculo del tiempo pico.....	88
Ecuación 7. Cálculo de la convolución discreta entre la lluvia efectiva y el hidrograma unitario	89
Ecuación 8. Cálculo de Laminación de la avenida en el embalse.....	89
Ecuación 9. Cálculo del caudal de salida	89
Ecuación 10. Cálculo del tiempo de concentración por el método de Kirpich (1940).....	106
Ecuación 11. Cálculo del tiempo de concentración por la ecuación empírica de Giandotti (1934).....	107
Ecuación 12. Caudal pico por el método racional.....	107
Ecuación 13. Factor de incremento de caudales (Fi)	109
Ecuación 14. Coeficiente de laminación (CL)	112
Ecuación 15. Ecuación general del gasto de caudal.....	114
Ecuación 16. Coeficiente de eficiencia operativa (Eo)	115
Ecuación 17. Seguridad hidráulica (Sh).....	117
Ecuación 18. Eficiencia de trasvase (Et).....	117
Ecuación 19. Variación de almacenamiento en el embalse Chongón	120

“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL EMBALSE CHONGÓN FRENTE AL INCREMENTO DE CRECIENTES: VARIACIONES HIDROLÓGICAS Y CAPACIDAD OPERATIVA”

Autores: Dominguez Ricardo Manuel Eduardo
Guerrero Castro Kelly Rocio

Tutor: Ing. Guido M. Ortiz Safadi, Mg.

RESUMEN

La presente investigación analiza el comportamiento del embalse Chongón frente al incremento de crecientes generadas por precipitaciones intensas, considerando la variabilidad hidrológica no estacionaria y la influencia de la vegetación flotante invasora. El objetivo fue evaluar su capacidad operativa e identificar los factores que inciden en la regulación de caudales. Se recopilaron y procesaron datos hidrometeorológicos, morfológicos y ecológicos mediante SIG, HEC-HMS y HEC-RAS, integrando series históricas de caudales, niveles y cobertura vegetal del periodo 2000 al 2025. Los resultados evidenciaron una reducción del volumen útil por sedimentación, disminuyendo de 83 a 75 hm³ dentro de un volumen total de 280 hm³ a la cota 51 m s.n.m. Asimismo, se registró una pérdida de cobertura forestal en la cuenca alta, incrementando la escorrentía superficial. La vegetación flotante *Eichhornia crassipes* presentó un crecimiento sostenido entre 2023 y 2025, concentrándose cerca del vertedero. El modelado hidráulico mostró que el aumento de la rugosidad vegetal reduce la capacidad de descarga del aliviadero, elevando niveles críticos bajo crecidas y aportes del trasvase Daule–Santa Elena. Se concluye que la capacidad reguladora del embalse está parcialmente comprometida, recomendándose monitoreo hidrológico y control ecológico.

Palabras clave: Embalse Chongón, vegetación flotante, modelación hidráulica, crecidas, capacidad de regulación.

“ANALYSIS OF THE CHONGÓN RESERVOIR'S BEHAVIOR IN THE FACE OF INCREASING FLOODS: HYDROLOGICAL VARIATIONS AND OPERATIONAL CAPACITY.”

Authors: Dominguez Ricardo Manuel Eduardo
Guerrero Castro Kelly Rocio

Tutor: Ing. Guido M. Ortiz Safadi, Mg.

ABSTRACT

This research analyzes the behavior of the Chongón reservoir under increasing flood events generated by intense precipitation, considering non-stationary hydrological variability and the influence of invasive floating vegetation. The objective was to evaluate its operational capacity and identify the factors affecting flow regulation. Hydrometeorological, morphological, and ecological data were collected and processed using GIS, HEC-HMS, and HEC-RAS tools, integrating historical series of flows, water levels, and vegetation cover for the period 2000 to 2025. The results showed a reduction in useful storage capacity due to sedimentation, decreasing from 83 to 75 hm³ within a total volume of 280 hm³ at elevation 51 m a.s.l. In addition, a loss of forest cover was identified in the upper basin, increasing surface runoff. Floating vegetation (*Eichhornia crassipes*) exhibited sustained growth between 2023 and 2025, concentrating near the spillway. Hydraulic modeling indicated that increased vegetation roughness reduces spillway discharge capacity, raising critical water levels during flood events and inflows from the Daule–Santa Elena transfer. It is concluded that the reservoir’s regulating capacity is partially compromised, and continuous hydrological monitoring and ecological control are recommended.

Keywords: Chongón Reservoir, floating vegetation, hydraulic modeling, floods, regulation capacity.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

El embalse Chongón, situado aproximadamente a 27 kilómetros al oeste de Guayaquil, forma parte esencial de la infraestructura hidráulica del litoral ecuatoriano. Construido sobre el río del mismo nombre, este cuerpo de agua se encuentra enclavado en la cordillera Chongón-Colonche y posee una capacidad de almacenamiento de aproximadamente 280 hectómetros cúbicos, con una presa principal de 40 metros de altura y varios diques laterales. Su diseño incluye también un aliviadero de servicio y dos aliviaderos de emergencia tipo fusible, fundamentales para regular el trasvase de agua hacia otras zonas del sistema hidráulico regional (Lyapichev, 2016).

Una característica estratégica del embalse Chongón es que no depende exclusivamente de su cuenca tributaria inmediata, sino que se alimenta además de los caudales transferidos desde el río Daule a través del sistema Trasvase Daule–Santa Elena. Esta interconexión asegura la disponibilidad de recursos hídricos para el embalse, complementando su aporte natural y fortaleciendo su papel como regulador hídrico regional (Nieto, 2015).

Este embalse constituye el componente central de un complejo de abastecimiento hídrico que incluye trasvases estratégicos hacia el embalse San Vicente y canales como Chongón–Playas y Chongón–Sube y Baja, cuya capacidad de transporte es 9.20 metros cúbicos por segundo (Nieto, 2015). Gracias a esta infraestructura, se abastece de agua cruda a múltiples poblaciones de la provincia de Santa Elena, beneficiando tanto a más de 400000 habitantes como a 22000 hectáreas de cultivos agrícolas en la región costera. (Secretaría General de Comunicación de la Presidencia, 2018).

Más allá de su importancia en el abastecimiento humano y agrícola, el embalse Chongón desempeña también un rol recreativo y económico. En su entorno se ha desarrollado el Parque Lago, un espacio donde se promueven actividades recreativas, deportivas y pesqueras. El Instituto Nacional de Pesca ha estimado que la captura anual en este embalse alcanza las 141.9 toneladas, lo cual es potencia como ecosistema productivo complementario (Pacheco & Cabanilla, 2012).

No obstante, la situación ecológica del embalse ha presentado desafíos importantes, especialmente debido a la proliferación de vegetación acuática invasora como el jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*). Este fenómeno ha alterado significativamente los patrones de evapotranspiración y el equilibrio ecológico del cuerpo de agua, reduciendo los niveles de oxígeno disuelto y afectando la biodiversidad local (López Barreto, 2020). Investigaciones recientes han demostrado que la presencia de esta planta puede modificar de forma considerable los parámetros hidráulicos y climáticos del embalse, impactando incluso en el comportamiento del agua frente a eventos extremos (Cárdenas-Cuadrado et al., 2025).

En este contexto, el aumento progresivo de lluvias intensas, asociado al cambio climático, se ha convertido en un factor de riesgo para la seguridad operativa del embalse. El régimen hidrológico de la zona ha dejado de ser estacionario, es decir, las condiciones climáticas del pasado ya no son representativas de las condiciones futuras, lo cual implica la necesidad de revisar y actualizar los parámetros de diseño de obras como los aliviaderos (Khazaei, 2025). En el caso específico del Ecuador, se ha documentado que las lluvias extremas podrían incrementar hasta en un 25 % los caudales que debe evacuar una infraestructura, lo cual representa una exigencia crítica para la operación del sistema hidráulico (Herbozo et al., 2022).

Frente a esta realidad, diversos estudios han enfatizado la importancia de incorporar en los modelos de simulación hidrológica e hidráulica factores como el crecimiento de la vegetación, la dinámica de humedales interiores, y la posibilidad de crecientes repentinas de alta magnitud (Pinos & Timbe, 2020). Estas variables resultan esenciales para una gestión adaptativa del embalse, especialmente cuando se trata de delimitar su capacidad real de retención, evaluar riesgos de rebose y definir acciones preventivas ante eventos climáticos extremos.

Por tanto, el estudio se enfoca en evaluar el comportamiento del embalse Chongón frente al incremento de crecientes, considerando no solo los datos históricos de precipitación y escorrentía, sino también las proyecciones climáticas bajo escenarios no estacionarios. El objetivo es establecer una visión técnica actualizada de su capacidad hidráulica, a través de modelos que integren la presencia de vegetación flotante, la dinámica del aliviadero y las condiciones morfológicas actuales del vaso del embalse. Esto permitirá no solo prevenir potenciales fallas

estructurales, sino también garantizar la continuidad de los servicios de abastecimiento y riego que dependen directamente de este reservorio estratégico del litoral ecuatoriano.

El presente trabajo se estructura de la siguiente manera: En el Capítulo I, se aborda el marco introductorio, que incluye la descripción del problema, la hipótesis y los objetivos. El Capítulo II desarrolla el marco teórico, presentando conceptos clave. En el Capítulo III se describe la metodología empleada para el análisis del comportamiento del embalse Chongón frente al incremento de crecientes. Los resultados obtenidos se presentan y analizan en el Capítulo IV, mientras que las conclusiones y recomendaciones se incluyen en el Capítulo V.

1.1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

En ingeniería hidráulica, el análisis del comportamiento de los embalses frente a crecientes constituye una tarea crítica, especialmente en regiones tropicales donde la variabilidad climática y la ocurrencia de eventos extremos se han intensificado. El embalse Chongón, principal infraestructura de regulación hídrica en el litoral ecuatoriano, fue diseñado bajo supuestos estacionarios de caudales máximos, basados en registros históricos que asumían estabilidad en los patrones de precipitación y escorrentía. Sin embargo, la evidencia reciente muestra que tales supuestos resultan insuficientes frente a condiciones hidrológicas no estacionarias, en las que los caudales de avenida pueden superar los valores previstos en el diseño (Khazaei, 2025).

Es importante destacar que el embalse Chongón recibe aportes tanto de su cuenca tributaria directa como del río Daule a través del sistema de Trasvase Daule–Santa Elena, lo cual amplía la complejidad de su balance hídrico y condiciona la magnitud de los volúmenes que deben ser regulados.

La problemática no se limita al aumento en la magnitud de las lluvias, sino también al cambio en la respuesta hidrológica de las cuencas tributarias. La urbanización acelerada, la deforestación y la expansión de áreas impermeables en la cuenca del río Chongón han incrementado la escorrentía superficial, reduciendo el tiempo de concentración y generando crecientes más repentinos y de mayor pico (Steward

Nieto, 2015). Este comportamiento pone en riesgo la capacidad de regulación del embalse. A ello se suma la proliferación de vegetación flotante invasora, principalmente jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), que reduce la sección hidráulica efectiva, modifica la velocidad de flujo y compromete la eficiencia del aliviadero (López Barreto, 2020); (Cárdenas-Cuadrado et al., 2025)

El modelo conceptual del embalse se ve aún más comprometido cuando se toma en cuenta la no linealidad de los procesos hidrológicos y la presencia de múltiples incertidumbres. Estas se pueden clasificar en naturales, estructurales, paramétricas y operacionales. Las naturales provienen de la inherente aleatoriedad de las precipitaciones y avenidas; las estructurales, de las simplificaciones e idealizaciones del modelo hidráulico; las paramétricas, de la calidad y representatividad de los datos utilizados; y las operacionales, de la gestión humana en la operación del sistema (Rojas Sigala & González Pérez, 2015). En contextos como el del embalse Chongón, todas estas fuentes de incertidumbre se manifiestan simultáneamente, haciendo imperativo un enfoque integral en la modelación.

En efecto, la presencia de una infraestructura de bombeo, canales de trasvase y diques auxiliares añade complejidad al sistema, ya que el comportamiento del embalse no depende únicamente del caudal de entrada, sino también de la gestión interconectada de estos componentes. El aliviadero de vertedero libre, que en su momento fue dimensionado para un caudal pico específico, puede resultar insuficiente frente a las nuevas condiciones hidrológicas. La revisión de estos valores límite es esencial, ya que un error en su estimación podría derivar en desbordamientos, afectación de cultivos, e incluso daños estructurales aguas abajo (Herbozo et al., 2022).

Otro elemento de preocupación lo constituye la sedimentación progresiva del vaso del embalse. Estudios recientes han evidenciado que esta reduce el volumen útil de almacenamiento y puede alterar los tiempos de respuesta hidráulica ante tormentas intensas. Al no contarse con un monitoreo permanente del volumen sedimentado, se incrementa la incertidumbre sobre la capacidad real del embalse para mitigar avenidas (Lyapichev, 2016).

De ahí que el presente estudio se formule como una respuesta técnica y científica a la pregunta general:

¿Qué comportamiento presenta el embalse Chongón frente a las crecientes generadas por eventos de precipitación intensa bajo condiciones hidrológicas no estacionarias y presencia de vegetación flotante invasora?

De esta interrogante general se derivan tres problemas específicos que guían la investigación:

P.E.1. ¿Cuáles son las condiciones hidrometeorológicas y morfológicas actuales del embalse Chongón y su cuenca tributaria que afectan su capacidad de regulación?

P.E.2. ¿Qué efecto tiene la vegetación flotante sobre la capacidad hidráulica del aliviadero y los patrones de flujo interno del embalse?

P.E.3. ¿Qué escenarios de creciente podrían superar la capacidad del sistema y qué medidas correctivas podrían adoptarse para prevenir su desbordamiento?

Comprender estas dinámicas resulta crucial no solo para la seguridad hidráulica de la infraestructura, sino también para garantizar el abastecimiento sostenible de agua a comunidades y zonas agrícolas que dependen directamente de este sistema. La evolución del riesgo hídrico obliga a replantear las bases de diseño y operación de nuestros embalses, incorporando enfoques resilientes y adaptativos frente al cambio climático.

1.2. ANTECEDENTES

A nivel mundial, el estudio realizado por Xiong et al. (2019), titulado “Evaluación de los impactos de los embalses en la frecuencia de inundaciones aguas abajo mediante el acoplamiento del efecto de la precipitación multivariable relacionada con la programación con un indicador de los efectos de los embalses”, se centró en evaluar cómo las operaciones de embalses afectan la frecuencia de inundaciones en ríos de Europa. La problemática identificada fue la alteración de los regímenes de flujo aguas abajo debido a la regulación de caudales por parte de los embalses, lo que podría aumentar o disminuir la frecuencia de inundaciones en las zonas ribereñas.

El objetivo principal del estudio fue desarrollar un índice compuesto de lluvia y embalse (RRCI) para cuantificar con precisión el impacto de los embalses en la

frecuencia de inundaciones aguas abajo. La metodología empleada incluyó el análisis de series temporales de caudales máximos diarios y la aplicación de modelos de frecuencia de inundaciones no estacionarios, utilizando inferencia bayesiana para estimar los parámetros del modelo.

Los resultados mostraron que, aunque la mayoría de las inundaciones fueron atenuadas por los embalses, aún ocurrieron eventos de gran magnitud debido a factores como precipitaciones extremas y estrategias operativas de los embalses. Las conclusiones destacaron la necesidad de considerar tanto la capacidad de almacenamiento de los embalses como las precipitaciones antecedentes en la gestión del riesgo de inundaciones aguas abajo.

También podemos citar al estudio realizado por Brigandi et al. (2023), titulado “Análisis de los efectos de los escenarios operativos de embalses sobre el riesgo de daños por inundaciones aguas abajo utilizando un enfoque de modelado integrado de Monte Carlo”, se enfocó en analizar cómo diferentes escenarios operativos de embalses afectan el riesgo de inundaciones y los daños asociados en zonas aguas abajo. La problemática identificada fue la falta de herramientas que integren la incertidumbre en las precipitaciones y las operaciones de los embalses para evaluar de manera precisa el riesgo de inundaciones.

El objetivo principal del estudio fue desarrollar una metodología que combinara simulaciones estocásticas de precipitaciones con modelos hidráulicos bidimensionales para evaluar el riesgo de inundaciones y los daños en áreas aguas abajo de embalses. La metodología empleada incluyó la generación de eventos de precipitación sintéticos mediante un enfoque de Monte Carlo, la derivación de hidrogramas de entrada al embalse y la simulación de inundaciones utilizando un modelo hidráulico 2D.

Los resultados demostraron que los escenarios operativos del embalse, como los niveles de almacenamiento y las estrategias de liberación de agua, tienen un impacto significativo en la extensión y magnitud de las inundaciones aguas abajo. Las conclusiones subrayaron la importancia de considerar diferentes escenarios operativos en la planificación y gestión de embalses para mitigar los riesgos de inundaciones y los daños asociados.

A nivel regional, El estudio realizado por Vélez (2009), titulado “Propuesta metodológica para la evaluación y cuantificación de la alteración del régimen de caudales de corrientes alteradas antrópicamente: caso Urrá I”, se llevó a cabo en Colombia con el objetivo de evaluar cómo la presencia de infraestructuras hidráulicas, como el embalse Urrá I, modifican el régimen natural de caudales de un sistema fluvial. La investigación identificó como problemática principal la falta de una metodología sistemática en el país para cuantificar la alteración hidrológica causada por actividades antrópicas, lo cual limita la gestión ambiental y operativa de estos cuerpos de agua.

La propuesta partió de analizar series de tiempo de caudales antes y después de la construcción del embalse, utilizando indicadores hidrológicos como el IHA (*Indicators of Hydrologic Alteration*) para caracterizar los cambios temporales en magnitud, duración, frecuencia y momento de ocurrencia de eventos hidrológicos extremos. La metodología consistió en un análisis comparativo entre las condiciones naturales y alteradas del régimen hidrológico, aplicando un conjunto de índices estadísticos para calcular el grado de alteración de las series de caudal diario del río Sinú.

Los resultados mostraron una alteración significativa en los pulsos de inundación y en la duración de los caudales mínimos, reduciendo la variabilidad natural del sistema en más del 40 %. Esta reducción compromete la conectividad ecosistémica y la operatividad sustentable del embalse. La investigación concluyó que es urgente implementar herramientas integradas de evaluación de alteraciones hidrológicas en embalses existentes, a fin de optimizar su funcionamiento sin comprometer el equilibrio ecológico. Esta propuesta metodológica se constituye en una referencia fundamental para estudios de comportamiento hidrológico bajo influencia antrópica.

Por otro lado, el estudio realizado por Pinilla-Agudelo, Rodríguez-Sandoval y Camacho-Botero (2014), titulado “Propuesta metodológica preliminar para la estimación del caudal ambiental en proyectos licenciados por el MADS, Colombia”, fue desarrollado con el propósito de diseñar una metodología orientada a la estimación del caudal ambiental en el contexto de los estudios de impacto ambiental exigidos por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) de Colombia.

El trabajo partió de la problemática relacionada con la ausencia de una guía metodológica clara para determinar el caudal que debe mantenerse en los ríos intervenidos por actividades como la construcción de embalses o derivaciones para garantizar la sostenibilidad de los ecosistemas acuáticos. La investigación propuso un enfoque que integra elementos hidrológicos, ecológicos y normativos, mediante un proceso participativo y multicriterio, el cual permite generar criterios técnicos adaptables a distintas cuencas.

La metodología se sustentó en una revisión detallada de los métodos hidrológicos tradicionales como el Tennant, Q10/Q95 y caudales percentílicos complementados con criterios ecológicos y de conectividad fluvial. En una fase práctica, la propuesta fue aplicada en cuencas piloto con características topográficas y climáticas variadas, encontrando que el método percentílico Q90 ofrecía un punto de partida técnico adecuado en cuencas con bajo monitoreo hidrológico. Los resultados destacaron que una metodología combinada permite estimar caudales ambientales más consistentes con los requerimientos ecológicos y sociales de los territorios, mejorando la toma de decisiones para licencias ambientales. Los autores concluyeron que la adopción de una metodología nacional adaptativa contribuiría a una gestión integrada del recurso hídrico en proyectos con alto impacto hidrológico, como presas y embalses.

A nivel local, Cedeño y Suárez (2019), desarrollaron la tesis titulada “Estudio y diseño del dique reservorio de mayor cota de embalse en el río Manglaralto, parroquia Manglaralto, provincia de Santa Elena”, enfocada en resolver el déficit hídrico en comunidades rurales. La problemática se centra en la vulnerabilidad del abastecimiento de agua ante eventos climáticos extremos en una zona costera semiárida, lo que obliga a implementar infraestructuras hidráulicas robustas para regular crecientes. El principal objetivo fue diseñar un dique capaz de contener crecientes con un periodo de retorno de 25 años, garantizando almacenamiento y seguridad de la población.

La metodología incluyó estudios topográficos mediante GPS diferencial, análisis de suelos (límites de Atterberg, permeabilidad, corte directo), y modelación hidrológica para estimar hidrogramas de diseño. Se empleó un análisis de frecuencia de crecidas y diseño geométrico estructural del dique. Los resultados mostraron una selección de materiales de sitio adecuados y un diseño que soporta

caudales extraordinarios previstos, además de definir una sección óptima del reservorio. Como conclusión, se recomendó la construcción del dique diseñado, con propuestas de monitoreo continuo y mantenimiento para garantizar la resiliencia del sistema hídrico ante crecientes en la zona de influencia.

También en el contexto nacional, Campo y Boada (2019), presentaron la investigación titulada “Implementación de modelo hidrológico para mejora de la operación de la Central Hidroeléctrica Baba”, el estudio tiene como finalidad optimizar la regulación del embalse asociado a la Central Hidroeléctrica Baba y maximizar el aprovechamiento del recurso hídrico para la generación de energía, se implementó por primera vez un modelo hidrológico como herramienta de apoyo a la toma de decisiones en su gestión. Se seleccionó el modelo TETIS y estableció una metodología para su aplicación, orientada a pronosticar los caudales de la cuenca que alimenta el embalse.

La propuesta es replicable en otras cuencas del Ecuador, dado que se fundamenta en información topográfica y en datos de uso y tipo de suelo disponibles a escala nacional. El modelo, diseñado para optimizar la producción energética de la central Baba, se desarrolló con resolución temporal horaria y resolución espacial de 200 metros, equilibrando precisión y tiempos de procesamiento. La calibración alcanzó un coeficiente de eficiencia de 0,9014, mientras que la validación registró valores de 0,5538 y 0,6692, lo que respalda la fiabilidad de la herramienta.

1.3. HIPÓTESIS

1.3.1. Hipótesis General.

El comportamiento operativo del embalse Chongón frente a eventos de creciente generados por precipitaciones intensas se ve significativamente afectado por variaciones hidrológicas no estacionarias y por la presencia de vegetación flotante invasora, disminuyendo su capacidad de regulación y aumentando el riesgo de desbordamiento.

1.3.2. Hipótesis Específicas.

H.E.1.: Las condiciones hidrometeorológicas y morfológicas actuales del embalse Chongón influyen directamente en su capacidad de regulación, reduciendo su eficiencia para contener crecientes.

H.E.2.: La presencia de vegetación flotante invasora afecta negativamente la capacidad hidráulica del aliviadero, alterando los patrones internos de flujo del embalse.

H.E.3.: Bajo condiciones hidrológicas críticas no estacionarias, los caudales de creciente simulados pueden superar la capacidad máxima del embalse, lo que hace necesario implementar medidas correctivas estructurales y operativas.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General.

Analizar el comportamiento del embalse Chongón frente a eventos de creciente originados por precipitaciones intensas, considerando las variaciones hidrológicas no estacionarias y la presencia de vegetación flotante invasora, con el fin de evaluar su capacidad operativa y proponer medidas correctivas ante escenarios críticos.

1.4.2. Objetivos Específicos.

O.E.1.: Caracterizar las condiciones hidrometeorológicas, morfológicas y operativas actuales del embalse Chongón y su cuenca tributaria, mediante el análisis de series de precipitación y niveles de agua, para identificar los factores que afectan su capacidad de regulación.

O.E.2.: Evaluar el impacto de la vegetación flotante invasora sobre la capacidad hidráulica del aliviadero y la dinámica interna del flujo en el embalse, a través de modelación numérica y observaciones de campo.

O.E.3.: Simular escenarios de crecientes bajo condiciones críticas no estacionarias mediante modelos hidrológicos e hidráulicos, con el propósito de identificar umbrales de colapso y proponer medidas estructurales y operativas para la mitigación del riesgo de desbordamiento.

1.5. ALCANCE

La presente investigación se desarrollará en el área geográfica correspondiente al embalse Chongón, localizado en la provincia del Guayas, específicamente en su zona de influencia directa e inmediata: la cuenca tributaria aguas arriba, la zona de almacenamiento principal del embalse y su sistema de vertido. El estudio delimita su alcance espacial a estas áreas debido a la relevancia hidrológica que representan en la dinámica de almacenamiento, evacuación y control de crecientes, así como por la disponibilidad de datos confiables y la viabilidad operativa para el trabajo de campo y el análisis técnico.

Desde una perspectiva temática, el alcance del proyecto abarca principalmente el análisis de las condiciones hidrometeorológicas actuales, la evolución morfológica del embalse, la identificación de las crecientes más representativas bajo escenarios no estacionarios, y la interacción de estos eventos con factores limitantes como la proliferación de vegetación flotante invasora, principalmente *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua), que ha alterado la funcionalidad hidráulica del embalse en eventos anteriores.

En el ámbito técnico, se considerarán exclusivamente variables asociadas a la hidrología superficial, tales como precipitación, caudales de entrada, escorrentía generada en la cuenca y almacenamiento; y variables hidráulicas internas del sistema, como capacidad del aliviadero, eficiencia del vertido, y patrones de flujo influenciados por obstrucciones vegetales. No se contempla dentro del alcance del estudio el análisis estructural del muro de contención ni intervenciones electromecánicas del sistema de compuertas, ya que esto corresponde a una evaluación estructural avanzada fuera de los límites establecidos en el presente trabajo.

Este estudio se enmarca en las disciplinas de la hidrología aplicada y la hidráulica fluvial. La hidrología tendrá como función principal evaluar la ocurrencia y comportamiento de las precipitaciones, los procesos de escorrentía y almacenamiento en el embalse; mientras que la hidráulica se enfocará en la evaluación del sistema de vertido, modelación del flujo interno y determinación de capacidades de descarga frente a distintos escenarios. La interacción de estas

disciplinas permitirá diagnosticar la operatividad del embalse en condiciones críticas.

Finalmente, este trabajo tiene un alcance académico y técnico orientado a contribuir con futuras investigaciones hidrológicas, planes de gestión de embalses y evaluaciones de vulnerabilidad hídrica en sistemas de regulación en el litoral ecuatoriano. Además, los resultados del estudio pueden servir como insumo para la planificación de medidas de mitigación estructurales y operativas por parte de entidades públicas encargadas de la gestión del recurso hídrico, tales como SENAGUA y el GAD Provincial del Guayas.

1.6. VARIABLES

1.6.1. Variables Independientes.

- ✓ Condiciones hidrológicas y ambientales del embalse Chongón.

1.6.2. Variables Dependientes.

- ✓ Capacidad operativa del embalse Chongón.
- ✓ Riesgo de desbordamiento o colapso hidráulico.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 EMBALSES Y GESTIÓN HIDROLÓGICA

2.1.1. Definición y clasificación de embalses

Los embalses son cuerpos de agua acumulados de manera artificial o natural, formados principalmente por la construcción de presas u otras estructuras de contención, cuya función es almacenar y regular recursos hídricos para diferentes usos (Abdallah & Kapelan, 2017). A nivel hidrológico, constituyen sistemas de regulación que permiten suavizar la variabilidad climática, atenuar crecientes, garantizar el suministro en estiajes y brindar múltiples servicios ecosistémicos y socioeconómicos (Wurbs, 1993).

Visto de forma técnica, un embalse no solo se entiende como un volumen almacenado dentro de un área específica, sino como parte de un sistema hidráulico complejo que incluye obras de captación, conducción, descargar e incluso trasvases, como el Trasvase Chongón – San Vicente (Tinoco et al., 2016). En Ecuador, estos sistemas cumplen estratégicas funciones como el abastecimiento de agua potable, riego agrícola, regulación de los caudales que se generan y la reducción de ciertos riesgos que se puedan presentar en eventos extremos hidrometeorológicos.

2.1.1.1 Funciones principales de los embalses

- Abastecimiento de agua y riego agrícola: permiten garantizar seguridad hídrica en épocas de sequía.
- Generación hidroeléctrica: aprovechan la energía potencial del agua embalsada mediante turbinas.
- Control de inundaciones: retienen caudales de crecidas y los liberan gradualmente, reduciendo riesgos aguas abajo.
- Regulación ambiental y recreativa: favorecen la conservación de hábitats acuáticos, pesca y turismo.
- Trasvases y gestión multipropósito: permiten transferir agua entre cuencas o hacia sistemas de riego, abastecimiento urbano e industrial.

2.1.1.2 Clasificación de embalses

Los embalses pueden clasificarse en función de diferentes criterios técnicos y operativos (Granados et al., 2021)

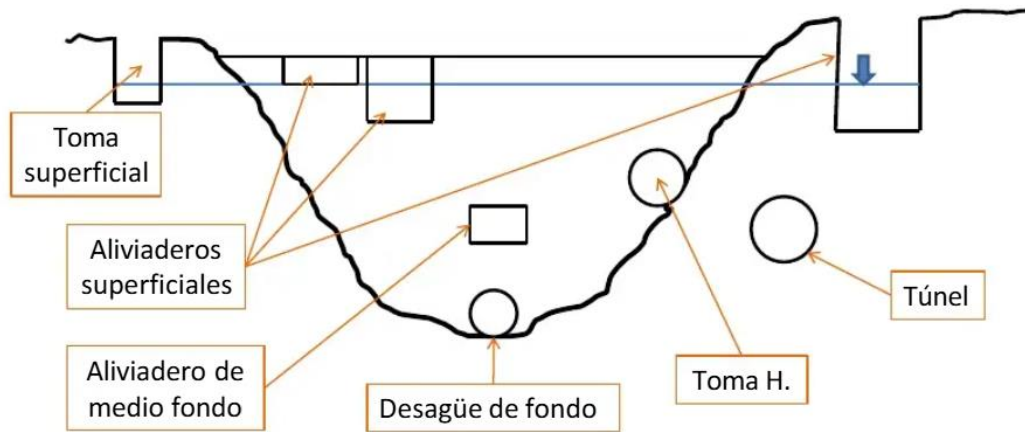
Tabla 1.
Tipos de embalses según criterios técnicos y funcionales

Criterio	Categorías	Características principales	Ejemplo en Sudamérica
Origen	Naturales Artificiales	Formados por procesos geológicos o por construcción de presas	Lago San Pablo (Ecuador, natural) Chongón (Ecuador, artificial)
Uso principal	Abastecimiento Riego Hidroeléctrico Control de inundaciones Multipropósito	Diferencian según objetivo de diseño	Embalse Daule-Peripa (Ecuador, multipropósito)
Capacidad	Pequeños (<10 hm ³) Medianos (10–200 hm ³) Grandes (>200 hm ³)	Se determina por el volumen de almacenamiento	Chongón (~280 hm ³) se clasifica como grande
Ubicación	On-stream (sobre cauce) Off-stream (fuera de cauce)	Los primeros interceptan ríos; los segundos dependen de trasvases	Chongón combina on-stream con trasvases
Modo operativo	Regulados De paso (run-of-river) Estacionales	Definidos por su dinámica de control de caudales	Macul (Ecuador, regulado)
Horizonte temporal	Permanentes Estacionales	Asociados a almacenamiento anual o interanual	Presas costeras en zonas monzónicas (ejemplo: India)

Nota. Elaborado con base en Wurbs (1993); Tinoco et al. (2016) y Granados et al. (2021)

Figura 1.

Esquema de clasificación de embalses según criterios técnicos y funcionales



Nota. Sandoval (2015).

2.1.2. Funciones y usos de los embalses multipropósito

Los embalses multipropósito constituyen infraestructuras hidráulicas diseñadas para satisfacer de manera simultánea diversas demandas sociales, económicas y ambientales. Su carácter integral permite maximizar los beneficios del recurso hídrico, al mismo tiempo que se minimizan los riesgos asociados a eventos hidrológicos extremos, como sequías o inundaciones (Comunidad Andina, 2004); (Loucks & van Beek, 2017)

De acuerdo con la literatura especializada, las funciones más relevantes incluyen:

2.1.2.1. Abastecimiento de agua

Los embalses garantizan el suministro continuo de agua potable a poblaciones urbanas y rurales, así como para el uso industrial. Este uso es prioritario en regiones donde la variabilidad climática compromete la disponibilidad del recurso (Tundisi & Tundisi, 2012).

2.1.2.2. Riego agrícola

La regulación del caudal permite almacenar agua en temporada de lluvias y distribuirla en periodos secos, aumentando la productividad agrícola y reduciendo la vulnerabilidad de los cultivos (FAO, 2021).

2.1.2.3. *Generación hidroeléctrica*

El agua embalsada constituye un reservorio de energía potencial que, a través de turbinas hidráulicas, se transforma en energía eléctrica limpia y renovable. Según la Agencia Internacional de Energía, los embalses generan más del 60% de la electricidad renovable a nivel mundial.

2.1.2.4. *Control de inundaciones*

Los embalses permiten laminar caudales extraordinarios durante eventos extremos, reduciendo el riesgo de inundaciones en las áreas aguas abajo. Esta función es esencial en cuencas expuestas a precipitaciones intensas o fenómenos como El Niño (Milly et al., 2008).

2.1.2.5. *Conservación ambiental y recreación*

Además de su uso económico, los embalses son espacios de conservación de ecosistemas acuáticos, pesca artesanal o industrial, actividades recreativas y turismo, aportando al desarrollo local sostenible (ICOLD, 2019).

Tabla 2.
Principales funciones de los embalses multipropósito

Función	Beneficio principal	Ejemplo global
Abastecimiento de agua	Agua potable e industrial	Presa Hoover (EE. UU.)
Riego agrícola	Seguridad alimentaria	Embalse Asuán (Egipto)
Generación hidroeléctrica	Energía limpia y renovable	Tres Gargantas (China)
Control de inundaciones	Reducción de riesgos aguas abajo	Itaipú (Brasil-Paraguay)
Conservación y recreación	Turismo, pesca y biodiversidad	Embalse Guri (Venezuela)

Nota. *Elaboración propia con base en FAO (2021), IEA (2021) e ICOLD (2019).*

Figura 2.

Representación de un embalse multipropósito del río Yanuncay en Cuenca



Nota. *Primicias* (2022)

2.1.3. Balance hídrico en embalses

El balance hídrico de un embalse es un instrumento fundamental para entender su comportamiento hidrológico, ya que permite cuantificar entradas y salidas de agua, cambios de almacenamiento, pérdidas y usos. En el contexto de crecientes y variaciones hidrológicas, este balance ayuda a determinar cuánta agua puede retenerse, cuánto volumen se pierde por evaporación o filtraciones, y qué capacidad operativa real se dispone antes de que el aliviadero deba liberar agua.

2.1.3.1. Componentes del balance hídrico

El modelo básico de balance para un embalse puede resumirse como:

Ecuación 1.

Ecuación del balance hídrico

$$\Delta S = P + Q_{in} + T_{in} - E - Q_{out} - T_{out} - L$$

Donde:

ΔS = cambio de almacenamiento del embalse

P = precipitaciones directas sobre la superficie del embalse

Q_{in} = caudales de entrada (escorrentía de la cuenca tributaria)

T_{in} = trasvases o bombeos hacia el embalse

E = evaporación de la superficie del embalse

Q_{out} = descarga por aliviadero, vertidos controlados o liberaciones para usos hidráulicos

T_{out} = trasvases o bombeos salientes

L = pérdidas por infiltración, filtración lateral o pérdidas estructurales

2.1.3.2. Estimaciones y métodos aplicados

En el embalse Three Gorges (China), un modelo hidrodinámico combinado con el balance hídrico permitió mejorar la estimación de ingresos y almacenamiento, reduciendo el error en modelos tradicionales de ~25.9 % a ~8.5 % en temporadas de inundaciones cuando se considera la “zona de tierra frente a la presa” como parte del cuerpo de cálculo.

En el estudio realizado por Zhu et al. (2022) titulado: “Simulaciones del balance hídrico de escorrentía y almacenamiento en embalses” del USGS para el embalse Kajakai, se expresó mensualmente los cambios de volumen de almacenamiento en función de caudales de entrada, salida y la evaporación neta de la superficie.

Tabla 3.

Componentes del balance hídrico aplicado al embalse Chongón

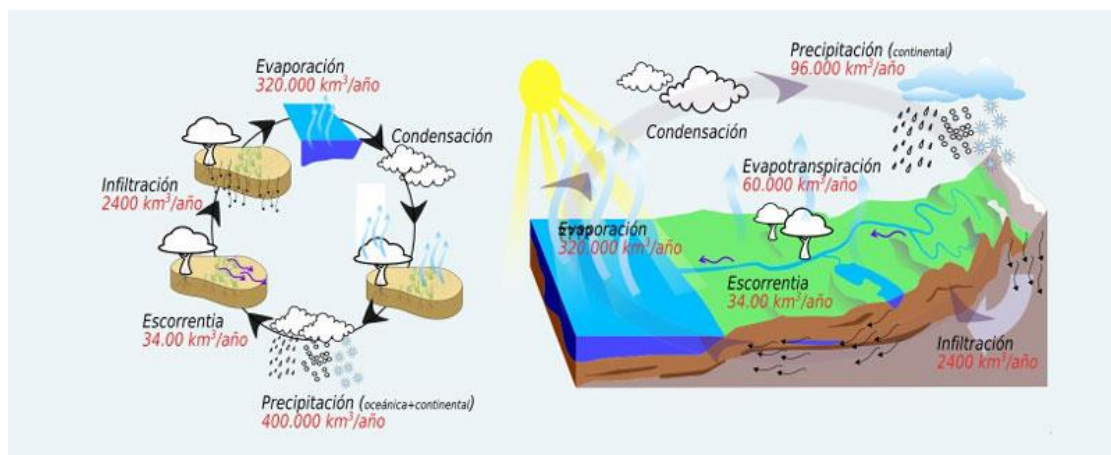
Componente	Fuente de datos típica	Importancia para comportamiento frente a crecientes
Precipitación directa	Estaciones meteorológicas cercanas, radar	Aporta volumen extra; puede reducir capacidad si intensa durante crecientes
Escorrentía tributaria	Aforo de ríos, curvas L-A-E (volumen-cota-área)	Entrada principal en eventos de lluvias intensas

Trasvases / bombeo	Operaciones de infraestructura	Permiten aumentar almacenamiento o descargar según necesidad
Evaporación	Estimaciones climatológicas, pan evaporation, métodos de energía	Pérdida constante que reduce volumen útil disponible
Aliviadero / descargas	Registros operativos, diseño hidráulico	Controlan nivel máximo; clave para liberar riesgos
Pérdidas estructurales / infiltración	Estudios geotécnicos, observaciones de fugas	Afectan eficiencia; en grandes embalses pueden tener impacto notable

Nota. *Elaboración propia con base en Zhu et al. (2022)*

Figura 3.

Diagrama esquemático del balance hídrico de un embalse



Nota. *Instituto del Agua (2021)*

2.1.4. Procesos hidrológicos relevantes en cuencas tributarias

Los procesos hidrológicos en cuencas tributarias son determinantes para entender cómo se generan los caudales que alimentan un embalse como Chongón, especialmente durante eventos de precipitaciones intensas. Estos mecanismos influyen sobre la respuesta hidrológica, la magnitud y velocidad de los crecientes, y la capacidad del embalse para retener y regular los flujos aguas arriba (Moriasi et al., 2007).

2.1.4.1. Procesos clave

1. Precipitación y distribución espacial-temporal

La intensidad, duración, frecuencia y patrón espacial de la lluvia (distribución de las tormentas) determinan cuánta agua se deposita en la cuenca en un evento. En cuencas tropicales costeras, la variabilidad de precipitación puede ser muy alta, lo que hace crítico el monitoreo y la modelación precisa (Lv et al., 2019)

2. Almacenamiento en suelo y humedad antecedente

La capacidad del suelo para absorber agua (infiltración), su grado de saturación previo al evento lluvioso, controla cuánto de la lluvia se convertirá en escorrentía inmediata. Suelos con baja infiltración o ya saturados generan escorrentía más rápida. Modelos hidrológicos modernos incorporan este componente para mejorar precisión en predicción de crecientes (Lv et al., 2019).

3. Escorrentía superficial

Ocurre cuando la precipitación excede la capacidad de infiltración del suelo y otros almacenamientos superficiales. La escorrentía superficial es la fuente principal de entradas rápidas al embalse durante eventos de lluvias intensas. Factores que la controlan incluyen pendiente, cobertura del suelo, uso del suelo y geomorfología (Lv et al., 2019).

4. Contribución de agua subterránea y flujo interestratos (base flow, flujo hiporreico)

Cuencas con acuíferos conectados o zonas hiporreicas pueden sostener caudales base, prolongar las colas de hidrogramas y moderar la rápida caída del caudal después de lluvias. En sistemas tributarios, esta contribución puede influir en la recuperación del nivel del embalse tras eventos secos (Lv et al., 2019).

5. Pérdidas por evapotranspiración y evaporación superficial

En regiones tropicales y costeras, la evapotranspiración puede representar una parte significativa del balance hídrico, especialmente en periodos secos

o cuando los reservorios tienen grandes superficies expuestas. Estas pérdidas reducen el volumen utilizable (Lv et al., 2019).

6. Intercepción y retención en la cubierta vegetal, microcuencas y humedales interiores

La vegetación intercepta parte de la lluvia, retardando su llegada al suelo; humedales, depresiones naturales o pequeños cuerpos de agua retienen agua temporalmente, mitigando la velocidad del escurrimiento. En cuencas perturbadas (deforestación, cambio uso suelo), esta capacidad de retención se puede reducir mucho (Lv et al., 2019).

7. Sedimentación y acumulación de sedimentos en cauces y canales tributarios

El transporte de sedimentos en periodos de lluvias intensas puede alterar las características morfológicas de cauces, reducir capacidad hidráulica de arroyos, y eventualmente contribuir al llenado del vaso del embalse. También afecta escorrentía, porque el área de almacenamiento del suelo puede perder capacidad si se tapa con sedimentos (Lv et al., 2019).

8. Tiempo de concentración y rutas hidráulicas

Es el tiempo que tarda el agua de la parte más lejana de la cuenca en llegar al punto de salida o embalse. Depende de la topografía, pendiente, cobertura vegetal, red de drenaje. Cuanto menor el tiempo de concentración, más rápida será la respuesta a lluvias intensas. En análisis de crecientes, conocer este tiempo es clave para simular hidrogramas y dimensionar el aliviadero (Lv et al., 2019).

Tabla 4.

Comparación de procesos hidrológicos y su influencia en la generación de crecientes

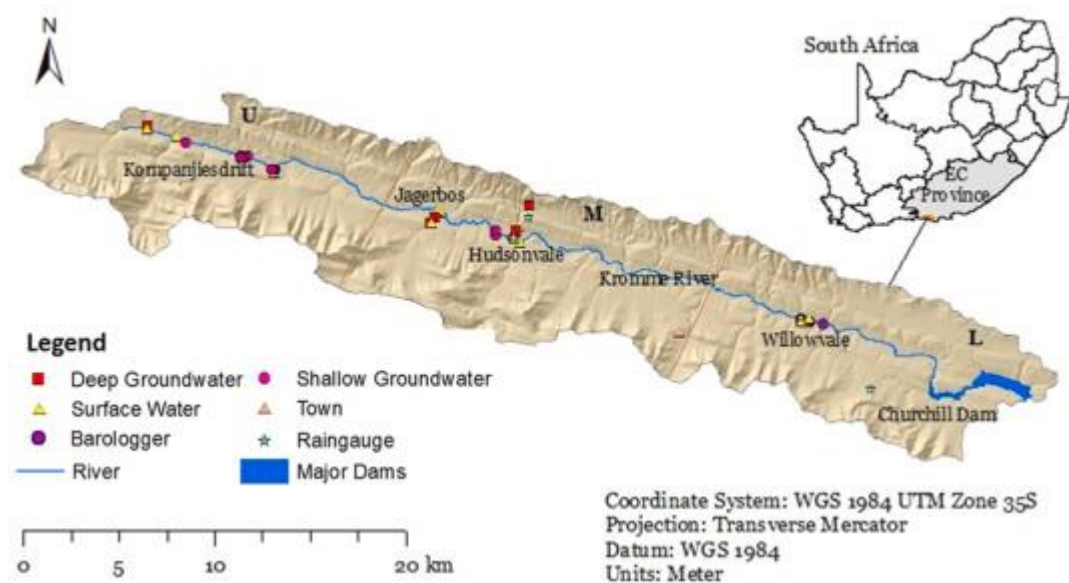
Proceso hidrológico	Alta influencia en crecientes	Dependiente de qué variables	Posible medida / indicador
----------------------------	--------------------------------------	-------------------------------------	-----------------------------------

Precipitación intensa	Muy alta	Intensidad, duración, patrón espacial	Estaciones pluviométricas, radar
Humedad antecedente del suelo	Alta	Tipo de suelo, uso del suelo, precedente de lluvias	Índice humedad, sensores de suelo
Escorrentía superficial	Muy alta	Cobertura vegetal, pendiente, suelo impermeable	Hidrogramas, curvas lluvia-escorrentía
Aporte base / flujo de base subterráneo	Moderada – importante en colas de crecida	Geología, acuíferos, zonas húmedas	Ensayos de caudal, estimaciones de flujo hiporreico
Evapotranspiración y evaporación	Moderada – reduce volumen disponible	Clima, área de espejo de agua, vegetación	Datos climáticos, balance hídrico
Intercepción / retención natural	Media – lentifica respuesta	Vegetación, humedales, topografía	Cobertura vegetal, mapas, estudios locales
Sedimentación en cauces	Indirecta – afecta capacidad y morfología	Erosión, pendiente, uso suelo	Muestreo de sedimentos, análisis morfológico
Tiempo de concentración	Muy alta – define rapidez de respuesta	Topografía, longitud del cauce, pendientes	Cálculos topográficos, modelación numérica

Nota. *Elaboración propia con base en Hulsman et al. (2021)*

Figura 4.

Ubicación de estaciones de monitoreo hidrológico en la cuenca del río Kromme (Sudáfrica)



Nota. Mapa de la cuenca del Kromme que muestra los puntos de monitoreo establecidos para la precipitación, los niveles de agua de los arroyos y los niveles de agua subterránea. Fuente: Jumbi et al. (2025)

2.1.5. Efectos del cambio climático sobre la hidrología de embalses

El cambio climático está alterando de forma significativa los componentes del ciclo hidrológico, lo que repercute directamente sobre el comportamiento de embalses. Las variaciones en precipitación, temperatura, evaporación y patrones de eventos extremos (sequías y lluvias intensas) modifican los caudales entrantes, los niveles de almacenamiento y la capacidad operativa de los reservorios.

2.1.5.1. Principales impactos observados y proyectados

1. Variabilidad y tendencia de la precipitación

Estudios muestran que en muchas regiones lluvias intensas serán más frecuentes, pero también aumentarán los periodos de sequía ante cambios en los patrones climáticos regionales (Kahaduwa & Rajapakse, 2022).

En la cuenca del Three Gorges (China), entre 1980-2018 se detectan fluctuaciones interanuales claras en precipitación, con eventos extremos más marcados, lo que se traduce en variaciones en el escurrimiento (tanto

aumentos como disminuciones dependiendo de la subcuenca) bajo diferentes escenarios climáticos.

2. Aumento de temperatura y evaporación

En el noreste de Brasil, bajo escenarios RCP 4.5 y 8.5, se proyecta que las tasas de evaporación aumenten sustancialmente, especialmente en temporadas secas, reduciendo la confiabilidad del suministro almacenado en embalses. Bajo uno de los escenarios, la capacidad del reservorio para suministrar agua con alta confiabilidad podría disminuir en hasta un 80 %.

El calentamiento también provoca cambios en la evapotranspiración de las cuencas y superficies de embalse, lo que disminuye almacenamiento efectivo y puede afectar los caudales base y la recuperación tras sequías.

3. Reducción de los caudales entrantes y confiabilidad operativa

El estudio “Reservoir Reliability as Affected by Climate Change and Strategies for Adaptation” aplicado al embalse Descoberto (Brasil) encontró que, bajo escenarios climáticos futuros, los caudales de entrada disminuyen y la confiabilidad del embalse para satisfacer su demanda proyectada podría caer entre 15% y 50% (Chaves et al., 2023).

Asimismo, el artículo de Amaya Kahaduwa & Rajapakse (2022) revisa múltiples cuencas y concluye que los embalses en muchas regiones podrían no ser capaces de sostener sus funciones si no se adaptan operacionalmente a esos cambios.

4. Mayor frecuencia de eventos extremos

Aumento en la frecuencia de lluvias intensas conduce a crecidas más abruptas; los embalses deben estar preparados para retener volúmenes mayores o manejar descargas más frecuentes. Kahaduwa & Rajapakse advierten que los embalses deberán incorporar márgenes de seguridad más altos.

Sequías más largas y severas pueden provocar niveles muy bajos en los embalses, que comprometan usos múltiples (riego, abastecimiento, generación de energía) y reduzcan la capacidad de respuesta ante lluvias

posteriores. El estudio brasilero lo demuestra en la reducción de confiabilidad.

5. Cambios en el régimen de escorrentía y flujo base

Las intensas precipitaciones combinadas con el aumento de temperatura pueden disminuir el flujo de los ríos, lo que afecta de forma directa a la infiltración y la retención de humedad en el suelo. Esto lo que provoca es un tiempo más largo de recuperación y aumento de probabilidad de respuesta rápida conocida como creciente ante las intensas lluvias. Estudios de cuencas andinas proyectan porcentajes de incrementos de caudales variados, pero a su vez se presenta una mayor respuesta hidrológica (Sun et al., 2023).

En la cuenca del Mahanadi (India), bajo escenarios del CMIP6, se proyectan aumentos notables en la escorrentía e inundaciones durante la temporada de monzones, lo que obliga a revisar las reglas operativas de embalses tributarios conectados.

Tabla 5.
Proyecciones de cambio climático: resumen de impactos sobre embalses seleccionados

Embalse – Región	Escenarios Climáticos	Impacto sobre entrada de agua – caudales	Impacto sobre confiabilidad – capacidad operativa
Descoberto en Brasil	Proyecciones luego del 2020 bajo escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5	Disminución de la precipitación y caudales entrada	Confiabilidad cae entre 15 % y 50 % frente a demanda proyectada.
Nordeste de Brasil	Eta-CanESM2 y Eta-MIROC5, escenarios RCP 4.5 y 8.5	Evaporación estacional mucho mayor y también entradas reducidas en estación seca	Capacidad para suministrar agua confiablemente baja de hasta 80 % con reducción bajo escenarios pesimistas.

Región de las Tres Gargantas en China	Análisis histórico entre el año 1980 y el año 2018	Fluctuaciones interanuales de lluvias y temperaturas, así como cambios en la distribución espacial del escurrimiento	Variaciones importantes en demanda de almacenamiento y la necesidad de ajustar operación.
Cuencas andinas pequeñas	RCPs 2.6, 4.5 y 8.5	Incrementos marginales de flujo en algunos escenarios, lo que provoca mayor variabilidad	Gestión del riesgo aumentada y la relevancia de infraestructura para manejar extremos.

Nota. *Elaboración propia con base en Rodrigues et al. (2024)*

2.2 VARIACIONES HIDROLÓGICAS EN CUENCAS TROPICALES

2.2.1. Régimen de lluvias en la Costa del Ecuador

La dinámica de crecientes en embalses constituye un proceso hidrológico-hidráulico complejo que resulta de la interacción entre el caudal afluente, el volumen de almacenamiento disponible, la capacidad del aliviadero y las reglas de operación. Una creciente es definida como un aumento rápido y temporal del caudal en un río o quebrada debido a precipitaciones intensas, fusión acelerada de nieve o fenómenos extremos de tormenta (Beven, 2020). En embalses, estas crecientes pueden generar presiones críticas sobre las estructuras hidráulicas, incrementando el riesgo de desbordamiento, erosión de márgenes y reducción de la vida útil por arrastre de sedimentos.

La respuesta de un embalse frente a una creciente depende de tres factores principales:

- Magnitud y duración del caudal afluente. La intensidad de la tormenta y las condiciones previas de humedad en la cuenca

determinan el volumen de agua que ingresa al reservorio (Zhou et al., 2022).

- Volumen útil disponible. Los embalses que presentan altos niveles previos tienen una menor capacidad para amortiguar los caudales picos, por tanto, esto aumenta la probabilidad de vertidos no controlados.
- Reglas operativas y capacidad de desagüe. La descarga que es controlada mediante las compuertas y aliviaderos ayuda a mitigar riesgos en eventos extremos (Wang et al., 2023).

En un modelado hidrológico, la creciente se analiza mediante la curva del hidrograma de entrada la cual describe la variación temporal del caudal y el hidrograma de salida es aquel que presenta la atenuación producida por el embalse. Esta atenuación es fundamental para proteger zonas aguas abajo, ya que los embalses multipropósito actúan como reguladores que transforman crecientes bruscos en caudales graduales (Chaves et al., 2023).

En el contexto del embalse Chongón, las crecientes se ven influenciadas por el incremento de lluvias intensas en la región costera ecuatoriana, asociadas al Fenómeno de El Niño, que puede aumentar los caudales en más de un 25 % respecto a las condiciones históricas (GAD Guayas, 2021). La operación del Chongón requiere de una programación anticipada de volúmenes de resguardo para evitar sobrecargas hidráulicas en el aliviadero y prevenir inundaciones en Guayaquil y zonas agrícolas de la cuenca baja.

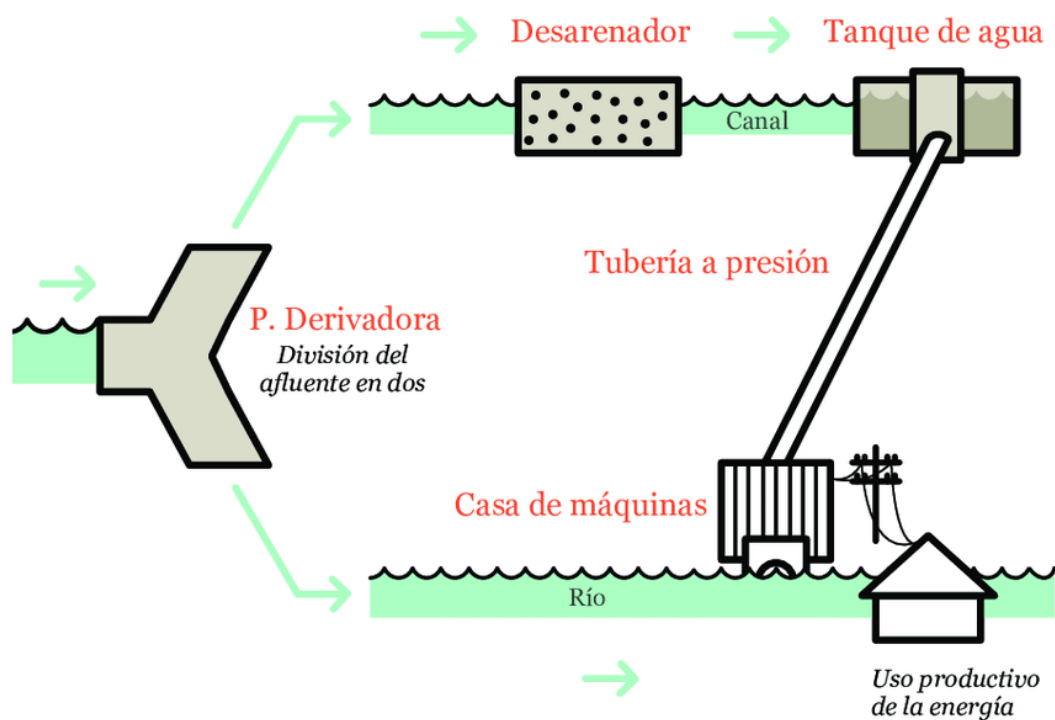
Tabla 6.
Factores que condicionan la dinámica de crecientes en embalses

Factor	Descripción	Implicación en la operación del embalse
Precipitación extrema	Lluvias intensas y concentradas aumentan el caudal afluente	Riesgo de sobrecarga y vertido no controlado
Estado de humedad del suelo	Saturación previa incrementa escorrentía directa	Crecientes más rápidas y voluminosas

Volumen útil disponible	Diferencia entre nivel actual y capacidad máxima	Determina la capacidad de amortiguamiento
Capacidad de desagüe	Flujo máximo evacuado por compuertas y aliviaderos	Limita la regulación en eventos extremos
Reglas de operación	Estrategias de descarga anticipada y reserva de volumen	Reduce riesgo de inundación aguas abajo

Nota. Adaptado de Zhou et al. (2023)

Figura 5.
Esquema de funcionamiento de una central hidroeléctrica.



Nota. Esquema de una central sin embalse o al hilo de agua. Fuente: (Sun et al., 2023)

2.2.2. Escorrentía superficial y subterránea en ambientes tropicales

La escorrentía en ambientes tropicales constituye uno de los procesos más relevantes en la hidrología de embalses, debido a la alta variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones, la presencia de suelos heterogéneos y la influencia de la cobertura vegetal. Se distinguen dos formas principales: escorrentía superficial

y escorrentía subterránea, ambas determinantes en el régimen de aportes a los embalses tropicales como Chongón.

2.2.2.1. Escorrentía superficial

La escorrentía superficial es el flujo directo generado cuando la intensidad de la precipitación excede la capacidad de infiltración del suelo (Horton, 1933). En regiones tropicales, las lluvias convectivas de alta intensidad, típicas de eventos extremos como El Niño, producen picos de caudal significativos que pueden ocasionar inundaciones repentinas (Perri et al., 2018). La deforestación y el reemplazo de coberturas vegetales naturales por pastizales o cultivos reducen la infiltración, aumentando el volumen de escorrentía directa y, en consecuencia, la magnitud de las crecientes (Bruijnzeel, 2004).

2.2.2.2. Escorrentía subterránea

La escorrentía subterránea corresponde al aporte diferido de agua que se infiltra y se desplaza a través de acuíferos poco profundos o flujos laterales subsuperficiales hasta alcanzar el cauce principal. En climas tropicales húmedos, este proceso puede representar un aporte base considerable para los embalses, asegurando caudales mínimos durante la estación seca (Bonell, 1998). Sin embargo, la compactación del suelo por actividades agropecuarias y la expansión urbana reducen la recarga, alterando el balance entre escorrentía rápida y lenta (Soulsby et al., 2021).

2.2.2.3. Interacción y relevancia para embalses tropicales

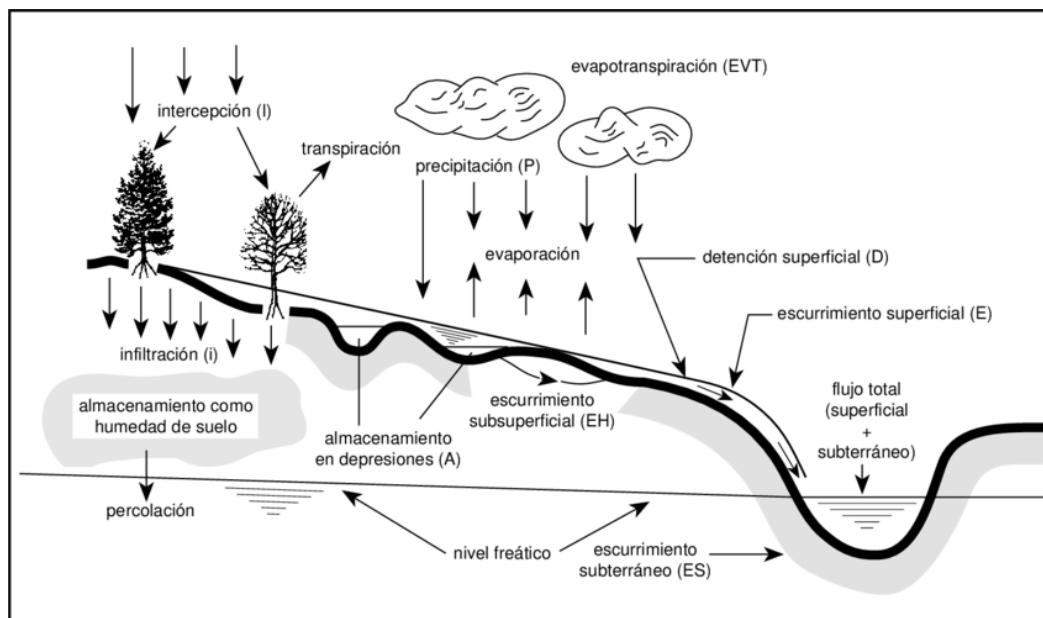
En cuencas tributarias de embalses, la proporción entre escorrentía superficial y subterránea condiciona la estabilidad del almacenamiento. En Chongón el incremento de áreas urbanizadas en Guayaquil y Samborondón ha potenciado de manera directa la escorrentía superficial lo que ayuda a reducir la capacidad de regulación natural de los suelos, esto a su vez genera mayores volúmenes de ingreso en eventos extremos y menor sostenimiento de caudales en épocas secas (GAD Guayas, 2021). Por lo tanto, la gestión integral de la cuenca debe considerar los flujos rápidos y los diferidos para definir reglas de operación del embalse.

Tabla 7.
Diferencias entre escorrentía superficial y subterránea en ambientes tropicales

Tipo de escorrentía	Características principales	Implicación en embalses tropicales
Superficial	Generada por exceso de precipitación sobre la infiltración	Genera crecientes rápidas, riesgo de desbordes
Subterránea	Aporte diferido, flujo subsuperficial y de base	Mantiene caudales en época seca, asegura operación mínima
Influencia de cobertura	Dependiente del uso del suelo y cobertura vegetal	La deforestación favorece escorrentía superficial
Temporalidad	Respuesta inmediata a tormentas	Respuesta retardada, sostenida en semanas/meses

Nota. Adaptado de Bonell (1998); Bruijnzeel (2004).

Figura 6.
Representación esquemática de la escorrentía superficial y subterránea



Nota. Procesos de generación de escorrentía superficial y subsuperficial en cuencas tropicales. Fuente: (Perri et al., 2018)

2.2.3. Impacto del uso del suelo y deforestación en la cuenca

Chongón

El uso del suelo constituye un factor crítico en la regulación de los procesos hidrológicos que afectan a los embalses. En el caso de la cuenca Chongón se observa que la presión antrópica derivada de la expansión urbana de Guayaquil y la actividad agrícola extensiva ha provocado sin duda una pérdida progresiva de cobertura vegetal natural. La deforestación y el reemplazo de bosques secos tropicales por pastizales y cultivos de ciclo corto alteran significativamente el ciclo hidrológico lo que aumenta de forma considerable la escorrentía superficial reduciendo la infiltración y también disminuyendo la recarga hídrica subterránea (Bonell & Bruijnzeel, 2005; García et al., 2021).

La eliminación de la cobertura boscosa reduce la evapotranspiración y la capacidad del suelo para retener agua, esto provoca que los caudales pico durante eventos de lluvia intensa y la carga de sedimentos ingresen al embalse. Este fenómeno ha sido documentado en múltiples sistemas tropicales donde la deforestación se relaciona con un aumento de hasta el 40 % en la escorrentía directa (Bruijnzeel, 2004). Para el embalse Chongón, el efecto que se acaba de describir se traduce en una mayor variabilidad interanual del volumen almacenado y en una acelerada pérdida de capacidad útil por sedimentación.

En los últimos 20 años, la cuenca Chongón ha experimentado una reducción estimada de su cobertura forestal en un rango del 25–30 %, concentrada principalmente en zonas de ladera donde la deforestación aumenta la erosión y los deslizamientos superficiales (MAATE, 2022). La expansión urbana irregular y la construcción de infraestructuras viales han agravado este problema, intensificando la vulnerabilidad del embalse frente a crecientes.

Tabla 8.

Cambios en el uso del suelo en la cuenca Chongón (2000–2020)

Categoría de uso del suelo	2000	2010	2020	Variación
	(%)	(%)	(%)	(%)
Bosque seco tropical	45	38	32	-13

Agricultura y pastizales	30	35	40	+10
Áreas urbanizadas	15	18	22	+7
Cuerpos de agua y humedales	10	9	6	-4

Nota. *Adaptado de MAATE (2022) y Cobos et al. (2020).*

2.2.4. Eventos extremos: El Niño, La Niña y anomalías hidrológicas

Los eventos climáticos extremos vinculados a la Oscilación del Sur-El Niño (ENSO) representan uno de los principales controladores de la variabilidad hidrológica en las cuencas tropicales de la costa ecuatoriana. El embalse Chongón al estar situado en la región litoral del país es particularmente sensible a estos fenómenos que modifican los patrones de precipitación también los caudales y sobre todo los niveles de almacenamiento.

Durante episodios naturales como El Niño, la intensificación de las precipitaciones puede superar en más del 50 % la media histórica lo que va generando crecientes extraordinarias y sobrecarga en los sistemas de vertido de forma directa (Poveda et al., 2011). Este aumento en los caudales incrementa la probabilidad de desbordamientos y acelera procesos de sedimentación dentro del vaso del embalse. Por el contrario, los eventos La Niña se caracterizan por déficit de lluvias y prolongadas sequías que reducen significativamente los aportes hídricos a la cuenca, comprometiendo el abastecimiento urbano y agrícola (Cai et al., 2020).

Las anomalías hidrológicas asociadas a ENSO muestran efectos no lineales en la región: mientras que un evento El Niño intenso (1982–1983 y 1997–1998) ocasionó pérdidas económicas millonarias por inundaciones y afectaciones a la infraestructura hidráulica, los episodios de La Niña han producido descensos críticos en los niveles del embalse, limitando la disponibilidad para riego y consumo humano (Pérez et al., 2019).

Tabla 9.
Impactos hidrológicos de eventos ENSO en Ecuador y efectos sobre embalses

Evento ENSO	Impacto en precipitación	Impacto hidrológico en embalses	Consecuencias operativas
El Niño 1982– 1983	+60 % lluvias en la Costa	Crecientes extraordinarios	Riesgo de desbordamiento y pérdida de infraestructura
El Niño 1997– 1998	+50 % lluvias	Sedimentación acelerada, erosión	Descenso en vida útil de embalses
La Niña 2010– 2011	-35 % lluvias	Reducción de aportes hídricos	Racionamiento de agua y restricción agrícola
La Niña 2020– 2021	-28 % lluvias	Disminución de recarga en Chongón	Niveles críticos de almacenamiento

Nota. *Adaptado de Poveda et al. (2020), MAATE (2022).*

2.2.5. Modelación hidrológica de crecientes en cuencas interconectadas

La modelación hidrológica constituye una herramienta fundamental para anticipar el comportamiento de crecientes en cuencas interconectadas, como es el caso del sistema Chongón–San Vicente–Playas. Este tipo de cuencas presentan mayor complejidad debido a la interacción entre flujos naturales, embalses de regulación, trasvases y obras de derivación. Por lo tanto, el análisis debe integrar tanto la dinámica hidrometeorológica como las características hidráulicas y operativas de la infraestructura.

Los modelos hidrológicos distribuidos y semidistribuidos permiten simular el proceso de conversión de la lluvia en escorrentía, estimando caudales de entrada y salida del embalse. Herramientas como HEC-HMS, SWAT y MIKE SHE han

demostrado gran eficacia en la representación de crecientes bajo condiciones climáticas variables (Arnold et al., 2012); (Beal et al., 2018). En el caso de sistemas interconectados, es indispensable incorporar esquemas de operación conjunta, considerando tanto los volúmenes regulados en cada embalse como los caudales transferidos por trasvases o derivaciones (Loucks & van Beek, 2017b).

Los estudios recientes muestran que la modelación hidrológica en cuencas tropicales interconectadas requiere integrar forzantes climáticos de gran escala como ENSO, el cambio en el uso del suelo y la variabilidad intraestacional de lluvias (Mishra & Singh, 2011). Esto permite evaluar escenarios de crecientes extremas y diseñar reglas de operación más resilientes frente al riesgo de desbordamiento.

Tabla 10.

Modelos hidrológicos aplicables a crecientes en cuencas interconectadas

Modelo	Tipo	Fortalezas principales	Limitaciones
HEC-HMS	Determinístico semidistribuido	Fácil integración con HEC-RAS para análisis hidráulico; ampliamente usado en gestión de presas	Requiere buena calibración de parámetros
SWAT	Distribuido	Excelente para simular cambios de uso del suelo y procesos hidrológicos a escala de cuenca	Alto costo computacional
MIKE SHE	Distribuido	Integra procesos superficiales y subterráneos; útil en cuencas tropicales	Complejidad en datos y tiempo de simulación
WEAP	Basado en asignación de recursos	Flexible para simular escenarios de operación conjunta	Menor precisión hidrológica

Nota. Adaptado de Arnold et al. (2012), Liu et al. (2018), Loucks & Van Beek (2017).

2.3 CRITERIOS HIDRÁULICOS APLICADOS A EMBALSES

2.3.1. Dinámica del almacenamiento y variaciones del volumen útil

La dinámica del almacenamiento en un embalse está determinada por la relación entre los aportes hídricos (precipitación directa, escorrentía tributaria y trasvases) y las pérdidas (evaporación, infiltración, extracciones para usos consuntivos y descargas controladas). Este balance define el volumen útil, entendido como la porción del almacenamiento que puede ser gestionada para fines operativos sin comprometer la seguridad estructural ni la capacidad de laminación de crecidas (Loucks & Van Beek, 2017).

El volumen total de un embalse se divide en:

- Volumen muerto: ubicado por debajo de las obras de toma, destinado a acumular sedimentos y garantizar reserva mínima.
- Volumen útil: franja entre el nivel mínimo operativo y el nivel máximo normal de operación.
- Volumen de resguardo o control de avenidas: espacio adicional reservado para la regulación de crecientes extremas (Chow et al., 1988).

En sistemas tropicales como Chongón, la variabilidad estacional e interanual de lluvias, asociada a fenómenos ENSO, produce fluctuaciones significativas del nivel embalsado. Estas variaciones impactan directamente la confiabilidad en el suministro de agua potable, riego y generación hidroeléctrica (Tilmant & Marques, 2014).

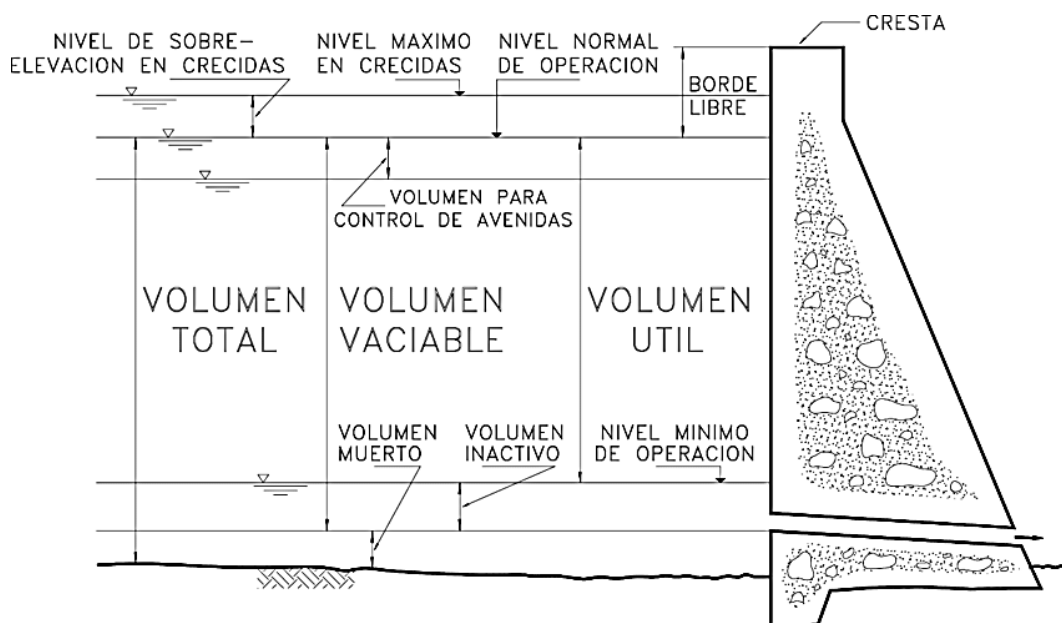
Tabla 11.
Componentes de almacenamiento en un embalse

Componente	Definición	Relevancia en la operación
------------	------------	----------------------------

Volumen muerto	Almacenamiento no aprovechable, destinado a sedimentos y reserva mínima	Previene colmatación y pérdida de funcionalidad
Volumen útil	Agua disponible entre niveles operativo mínimo y máximo	Base para suministro, riego y generación
Volumen de resguardo	Espacio destinado al control de avenidas	Mitigación de inundaciones y seguridad de la presa

Nota. Adaptado de Chow, Maidment & Mays (1988).

Figura 7.
Volumen muerto en presas



Nota. Adaptado de Chow, Maidment & Mays (1988).

2.3.2. Aliviaderos: diseño, capacidad y seguridad hidráulica

El aliviadero constituye uno de los elementos críticos en la seguridad hidráulica de un embalse, ya que permite evacuar los caudales excedentes generados durante eventos de crecida, evitando el rebase del dique. Su diseño debe asegurar que el gasto máximo esperado, correspondiente a la avenida de proyecto, sea evacuado de manera controlada y sin comprometer la integridad de la presa (Novak et al., 2010).

El dimensionamiento del aliviadero depende de tres factores fundamentales:

- Caudal de diseño: corresponde al flujo extremo calculado para un período de retorno específico (100 – 10.000 años) o mediante el caudal de avenida máxima probable (PMP/PMF).
- Geometría del vertedero: Aquí se define la eficiencia de evacuación del caudal siendo comunes los vertederos de cresta libre, también los de labio fijo, compuertas radiales y aliviaderos de túnel.
- Condiciones hidráulicas: Estas condiciones incluyen el régimen de flujo subcrítico o supercrítico y las velocidades máximas admisibles, así como la disipación de energía para evitar erosiones aguas abajo (Chow, 1988).

En términos de seguridad lo que se ve es que la falla de un aliviadero puede ocasionar consecuencias catastróficas. Por esta razón, la International Commission on Large Dams (ICOLD, 2011) recomienda que los aliviaderos principales estén acompañados de sistemas auxiliares (vertedero de emergencia o túneles de desvío), asegurando redundancia.

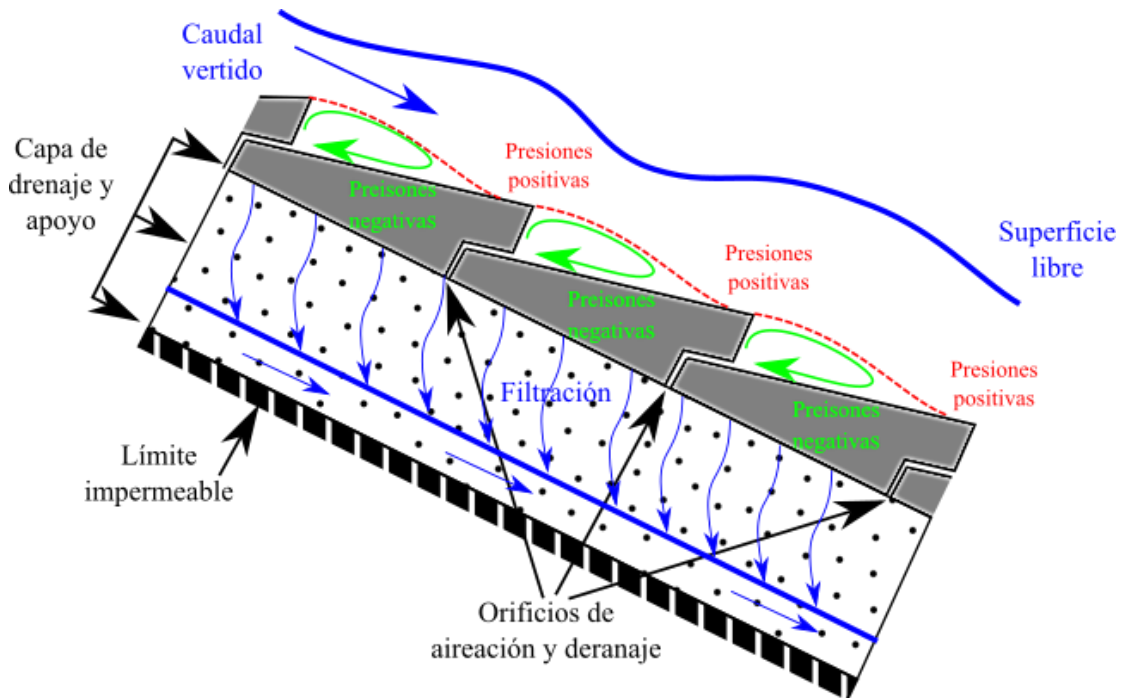
Tabla 12.
Tipologías de aliviaderos y principales características

Tipo de aliviadero	Características principales	Aplicación
Cresta libre	Simple, bajo costo, sin compuertas	Pequeños y medianos embalses
Labio fijo	Geometría optimizada, alta descarga por unidad de longitud	Grandes embalses con avenidas recurrentes
Compuertas radiales/verticales	Control flexible del gasto, permite operación escalonada	Embalses multipropósito
De túnel o galería	Excavados en roca, alta seguridad estructural	Presas en valles estrechos o caudales extremos
Vertedero fusible	Elemento colapsable ante crecidas excepcionales	Seguridad complementaria

Nota. Adaptado de Novak et al. (2010), ICOLD (2011).

Figura 8.

Esquema del funcionamiento hidráulico de un aliviadero de bloques en forma de cuña.



Nota. Adaptado de Novak et al. (2010).

2.3.3. Diques laterales y estructuras complementarias

Los diques laterales constituyen elementos fundamentales en la seguridad hidráulica de un embalse, ya que actúan como estructuras de contención en zonas bajas del perímetro donde la topografía no permite el cierre natural del vaso. Su función principal es la de evitar desbordamientos no controlados y garantizar la estabilidad de la lámina de agua durante eventos de creciente. Estos diques que se construyen suelen ser de materiales compactados como lo es la arcilla, los limos o incluso los enrocados y están diseñados considerando cargas hidrostáticas, infiltración y procesos erosivos.

En el embalse Chongón, los diques laterales cumplen un papel crítico debido a la morfología irregular de la cuenca y al elevado régimen de precipitaciones en eventos extremos, por tanto, su presencia permite mantener el volumen útil de almacenamiento y al mismo tiempo proteger áreas vulnerables de inundación aguas abajo.

Las estructuras complementarias asociadas a los estos diques incluyen sistemas de drenaje interno, también filtros para controlar presiones intersticiales, incluso bermas de estabilización y recubrimientos de protección contra oleaje. Asimismo, la instrumentación geotécnica es importante y algunos de estos son los piezómetros, inclinómetros y drenes de control, resultando esencial para el monitoreo en tiempo real de la estabilidad de los diques.

De acuerdo con la ICOLD (2021) y la Comisión Europea (2020), las fallas en diques laterales representan entre el 20–25 % de los incidentes de seguridad en presas a nivel global, lo que evidencia la necesidad de incluir planes de inspección periódica, reforzamientos estructurales y gestión de riesgos asociados.

Tabla 13.
Funciones y vulnerabilidades de los diques laterales en embalses tropicales

Función principal	Vulnerabilidades asociadas	Medidas de mitigación
Contención del agua en puntos bajos	Erosión interna (piping), filtraciones no controladas	Sistemas de drenaje, filtros, instrumentación
Protección contra desbordamientos	Oleaje e incremento del nivel hidrostático	Bermas, coronamiento reforzado
Estabilidad estructural	Licuefacción en suelos saturados	Compactación, uso de materiales granulares
Seguridad hidráulica	Fallas por eventos extremos (El Niño/La Niña)	Incremento de altura libre, planes de emergencia

Nota. *Elaboración propia con base en ICOLD (2021), FEMA (2020) y CEDEX (2022).*

Figura 9.

Esquema de diques laterales y estructuras complementarias en un embalse



Nota. CEDEX (2022).

2.3.4. Sedimentación y reducción de la capacidad hidráulica

La sedimentación constituye uno de los principales problemas que afectan la eficiencia operativa de los embalses, pues reduce progresivamente el volumen útil de almacenamiento y limita la capacidad hidráulica disponible para la laminación de crecientes, abastecimiento de agua y generación de caudales de regulación. En cuencas tropicales como la de Chongón caracterizadas por altas tasas de erosión debido a la deforestación y sobre todo a los cambios en el uso del suelo y las precipitaciones intensas, el proceso que se requiere se intensifica de manera significativa.

El material sólido transportado por los ríos tributarios se deposita en el vaso del embalse lo que genera una colmatación progresiva que puede alcanzar valores críticos en menos de 50 años si no se implementan medidas de gestión sedimentaria. De acuerdo con estudios realizados por la ICOLD (2021) y la FAO (2020), la pérdida de capacidad de almacenamiento promedio de embalses a nivel mundial se estima en un 0,8 % anual, aunque en regiones tropicales puede superar el 1,5 a un 2 % anual.

En el caso del embalse Chongón la presencia de suelos arcillosos y la creciente urbanización de la cuenca generan un aumento en la carga sólida, lo que

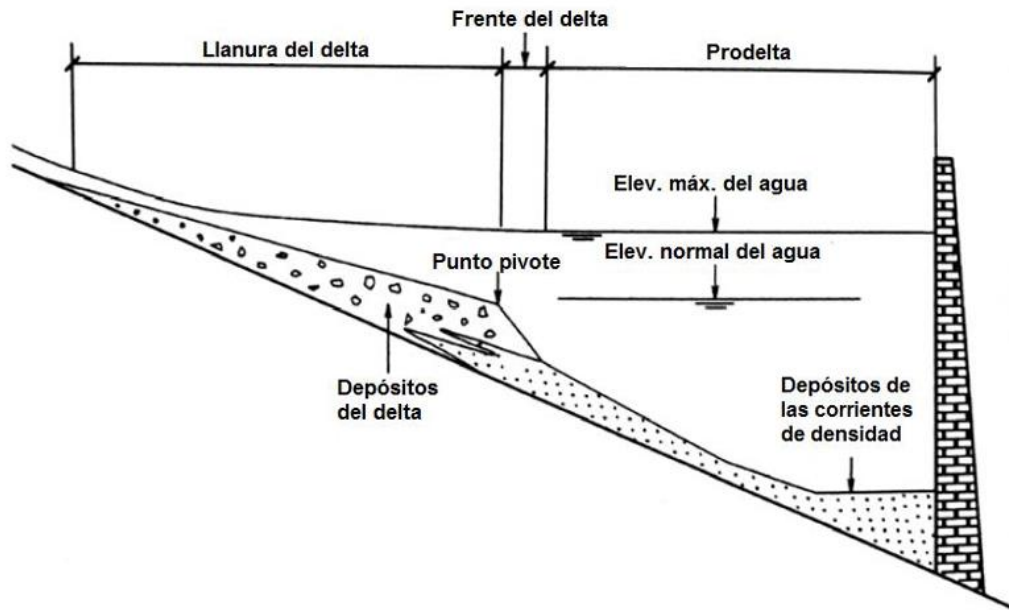
pone en riesgo la sostenibilidad del sistema de abastecimiento y riego. La falta de dragado sistemático y de programas de conservación de suelos en las microcuencas acelera la pérdida de capacidad útil, comprometiendo la seguridad hidráulica en eventos extremos.

Tabla 14.
Factores determinantes en la sedimentación de embalses tropicales

Factor	Descripción	Impacto en Chongón	Medidas de mitigación
Erosión hídrica	Lluvias intensas movilizan partículas del suelo	Elevada, por deforestación y pendientes medias	Reforestación, terrazas agrícolas
Urbanización	Incremento de superficies impermeables	Aumento de escorrentía y sólidos en suspensión	Control de escorrentía urbana
Uso agrícola intensivo	Remoción de cobertura vegetal	Elevada exportación de sedimentos finos	Agricultura de conservación
Ausencia de dragado	No existe retiro sistemático de sedimentos	Colmatación progresiva del vaso	Dragado mecánico, sifonado
Variabilidad climática	Fenómenos El Niño/La Niña	Crecientes súbitas con alta carga sólida	Plan de gestión de sedimentos y vertidos

Nota. *Elaboración propia con base en ICOLD (2021), FAO (2020) y USBR (2019).*

Figura 10.
Zonas de deposición en el embalse



Nota. UNAM (2016).

2.3.5. Vegetación acuática invasora y sus efectos en la hidráulica del embalse

La proliferación de vegetación acuática invasora, principalmente *Eichhornia crassipes* (conocida como jacinto de agua o lirio acuático), constituye un problema de primer orden en la operación de embalses tropicales. Estas plantas presentan un alto crecimiento vegetativo que incluso llegan a alcanzar tasas de duplicación de biomasa cada 7 a 10 días en condiciones de elevada radiación solar, nutrientes disponibles y aguas con baja turbulencia (Villamagna & Murphy, 2010).

En embalses como Chongón la presencia de esta especie afecta directamente la hidráulica interna del cuerpo de agua, ya que genera taponamientos en los canales de derivación y así dificulta el tránsito en las tomas y reduce la eficiencia del vertido en aliviaderos. Asimismo, la vegetación flotante incrementa la resistencia hidráulica superficial disminuyendo la velocidad del flujo y favoreciendo la acumulación de sedimentos y materia orgánica.

Desde una opinión ambiental, las masas densas de *Eichhornia* reducen la penetración de la luz solar, disminuyen la fotosíntesis de macrófitas sumergidas y provocan la desoxigenación de las capas superficiales, lo que genera mortandad de

peces y afecta la pesca artesanal. En términos económicos, el mantenimiento de las estructuras hidráulicas aumenta significativamente debido a la necesidad de dragado manual, recolección mecánica o uso de barreras flotantes (Kumar Gupta & Yadav, 2020).

Tabla 15.
Impactos de la vegetación acuática invasora en embalses tropicales

Impacto	Descripción	Consecuencia hidráulica	Consecuencia ambiental
Obstrucción de tomas y canales	Acumulación en rejillas y estructuras de derivación	Reducción del caudal derivado	Riesgo de cortes en el abastecimiento de agua
Incremento de rugosidad hidráulica	Cobertura vegetal superficial >70%	Disminución de la velocidad del flujo	Retención de nutrientes y contaminantes
Aumento de sedimentación	Captura de sólidos suspendidos por raíces	Colmatación acelerada del vaso	Alteración de hábitats acuáticos
Eutrofización	Descomposición de biomasa vegetal	Liberación de fósforo y nitrógeno	Proliferación de algas y anoxia
Costos de operación	Requiere dragado, control químico o biológico	Mayor gasto en mantenimiento	Pérdida de sostenibilidad a largo plazo

Nota. *Elaboración propia con base en Villamagna & Murphy (2010), ICOLD (2021) y Gutiérrez et al. (2020).*

2.3.6. Propagación de ondas de crecida y operación de descargas

La propagación de ondas de crecida en un embalse es un proceso hidrodinámico complejo que describe cómo una perturbación generada por un

caudal extremo se transmite a lo largo del vaso y se refleja en el sistema de salida. La forma y velocidad de esta onda dependen de factores como la geometría del embalse, el volumen inicial almacenado, la pendiente del cauce, las condiciones de frontera y la operación de estructuras de descarga (Chow et al., 2010).

En el caso de embalses multipropósito como Chongón, las ondas de crecida pueden provenir de precipitaciones intensas en cuencas tributarias o de fenómenos extremos asociados a El Niño. Su propagación debe modelarse mediante ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento (ecuaciones de Saint–Venant), resolviendo parámetros como el tiempo de viaje de onda, la atenuación de pico y la distribución de caudales de salida (Ponce, 2014).

La operación de descargas (aliviaderos, compuertas de fondo o descargas laterales) busca mitigar el impacto de la onda, evitando el sobrepaso de la presa. Una estrategia adecuada requiere:

- Curvas de operación que definan volúmenes de regulación y niveles críticos.
- Modelación hidrodinámica en tiempo real para ajustar la apertura de compuertas según el inflow.
- Coordinación con embalses interconectados para amortiguar la propagación aguas abajo.

Tabla 16.
Variables que influyen en la propagación de ondas de crecida

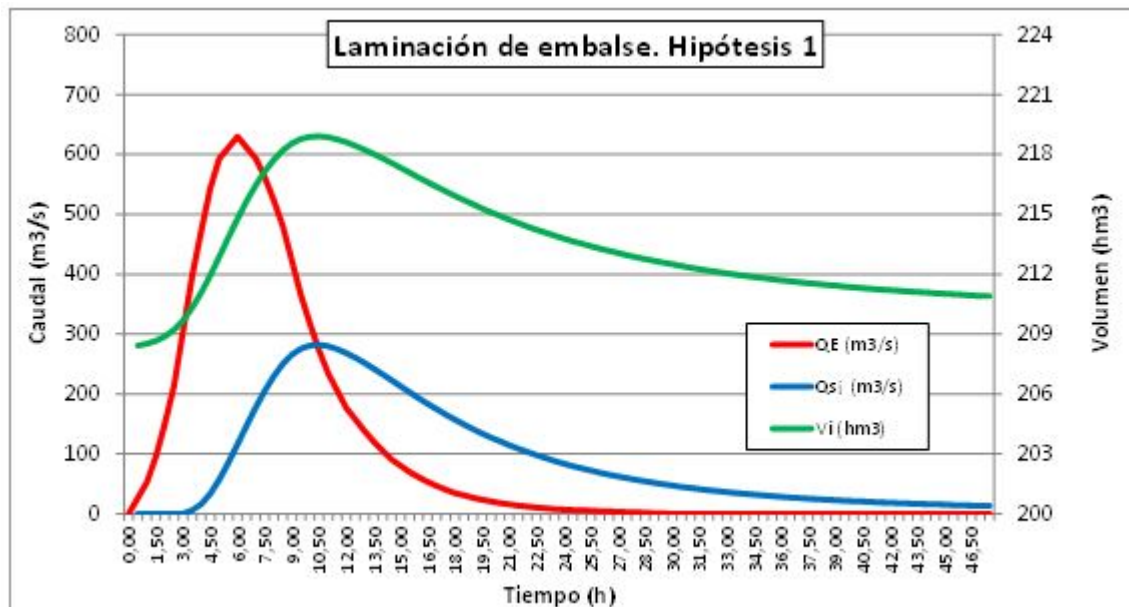
Variable	Descripción	Efecto en la onda de crecida
Geometría del embalse	Forma, longitud y ancho del vaso	Determina atenuación y tiempo de viaje
Volumen inicial almacenado	Nivel previo al evento	Afecta capacidad de amortiguación
Coefficiente de rugosidad	Resistencia hidráulica interna	Modifica velocidad y disipación de energía
Descargas controladas	Apertura de compuertas o vertidos	Reducción del caudal pico

Condiciones de frontera	Caudales entrantes y salidas aguas abajo	Definen el impacto en el sistema receptor
-------------------------	--	---

Nota. Adaptado de Chow et al. (2010) y Ponce (2014).

Figura 11.

Esquema de propagación de una onda de crecida en un embalse



Nota. U.S. Army Corps of Engineers (2015).

2.4 CAPACIDAD OPERATIVA DE LOS EMBALSES

La capacidad operativa de un embalse se define como el conjunto de atributos técnicos, hidráulicos y administrativos que permiten gestionar de manera eficiente el almacenamiento, regulación y distribución del recurso hídrico frente a condiciones de variabilidad y cambio climático. Su análisis integra indicadores de desempeño, estrategias de manejo de niveles, interconexiones hidráulicas, restricciones de operación y protocolos frente a escenarios de riesgo.

2.4.1. Indicadores de desempeño y eficiencia en la gestión de embalses

Los indicadores de desempeño constituyen herramientas clave para evaluar la eficiencia en la gestión de embalses. Entre los más relevantes destacan:

- **Fiabilidad:** capacidad de cumplir con la demanda prevista (abastecimiento, riego, caudal ecológico) en un periodo determinado.
- **Resiliencia:** velocidad de recuperación del embalse tras un evento extremo (sequía o crecida).
- **Vulnerabilidad:** magnitud del déficit hídrico o riesgo de desbordamiento cuando se incumple la operación.
- **Eficiencia de laminación de crecidas:** porcentaje de atenuación del caudal pico en eventos de avenida.
- **Índice de sostenibilidad:** combina fiabilidad, resiliencia y vulnerabilidad (Hashimoto et al., 1982; Loucks & Van Beek, 2017).

Tabla 17.

Indicadores de desempeño aplicables a la gestión de embalses

Indicador	Fórmula / Definición	Aplicación en Chongón
Fiabilidad (R)	$R = \frac{N_s}{N_t}$ donde N_s = número de éxitos y N_t = número total de periodos	Cumplimiento en abastecimiento urbano y agrícola
Resiliencia (Re)	Proporción de periodos de recuperación tras falla	Capacidad de recuperación post-El Niño
Vulnerabilidad (V)	Magnitud promedio de déficit en fallas	Estimación de déficit de riego en sequías
Eficiencia de laminación (EL)	$EL = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{Q_{in}} * 100$	Atenuación de crecientes en río Chongón

Nota. *Adaptado de Hashimoto et al. (1982); Loucks & Van Beek (2017).*

2.4.2. Manejo de niveles de almacenamiento frente a crecientes

El manejo de niveles en embalses es un aspecto crítico para garantizar la seguridad hidráulica. Se define a partir de curvas de operación que establecen zonas de:

- Almacenamiento muerto: volumen no utilizable, destinado a sedimentos.
- Volumen útil: rango operativo para riego y abastecimiento.
- Volumen de regulación de crecidas: reserva de almacenamiento para atenuar eventos extremos.
- Nivel máximo extraordinario: cota límite de seguridad estructural (ICOLD, 2021).

Figura 12.

Zonas operativas de almacenamiento del embalse de Laverné (España)



Nota. *Comunidad General de Regantes del Canal de Bardenas (2015).*

2.4.3. Interconexión del sistema Chongón con embalse San Vicente y canales de riego

El embalse Chongón se integra a un sistema interconectado que incluye el embalse San Vicente y los canales Chongón–Playas y Chongón–Sube y Baja. Esta interconexión permite:

- Regulares caudales entre embalses para optimizar riego agrícola (~7.700 ha).

- Derivar excedentes en crecidas hacia San Vicente, reduciendo riesgos en Chongón.
- Abastecer a más de 85.000 habitantes de zonas periurbanas y rurales de Guayas.
- Sostener usos recreativos y pesqueros (~141,9 t/año).

2.4.4. Restricciones operativas: bombeo, trasvases y demanda de agua

El sistema Chongón está condicionado por restricciones técnicas y de demanda:

- Bombeo: la estación de bombeo consume altos volúmenes energéticos, limitando la frecuencia de trasvases.
- Trasvases: la capacidad de derivación hacia San Vicente y canales de riego depende del estado de compuertas y sedimentación en estructuras laterales.
- Demanda creciente: la expansión agrícola y urbana aumenta la presión sobre los volúmenes disponibles, comprometiendo el suministro en periodos secos (INEC, 2022).

Tabla 18.
Restricciones principales del sistema Chongón

Restricción	Descripción	Consecuencia operativa
Energética	Alto costo de bombeo	Reducción de frecuencia de trasvases
Hidráulica	Sedimentación en canales y compuertas	Disminución de capacidad de conducción
Demanda	Crecimiento poblacional y agrícola	Aumento de déficit hídrico en estiaje

Nota. *Elaboración propia con datos de INEC (2022) y FAO (2020).*

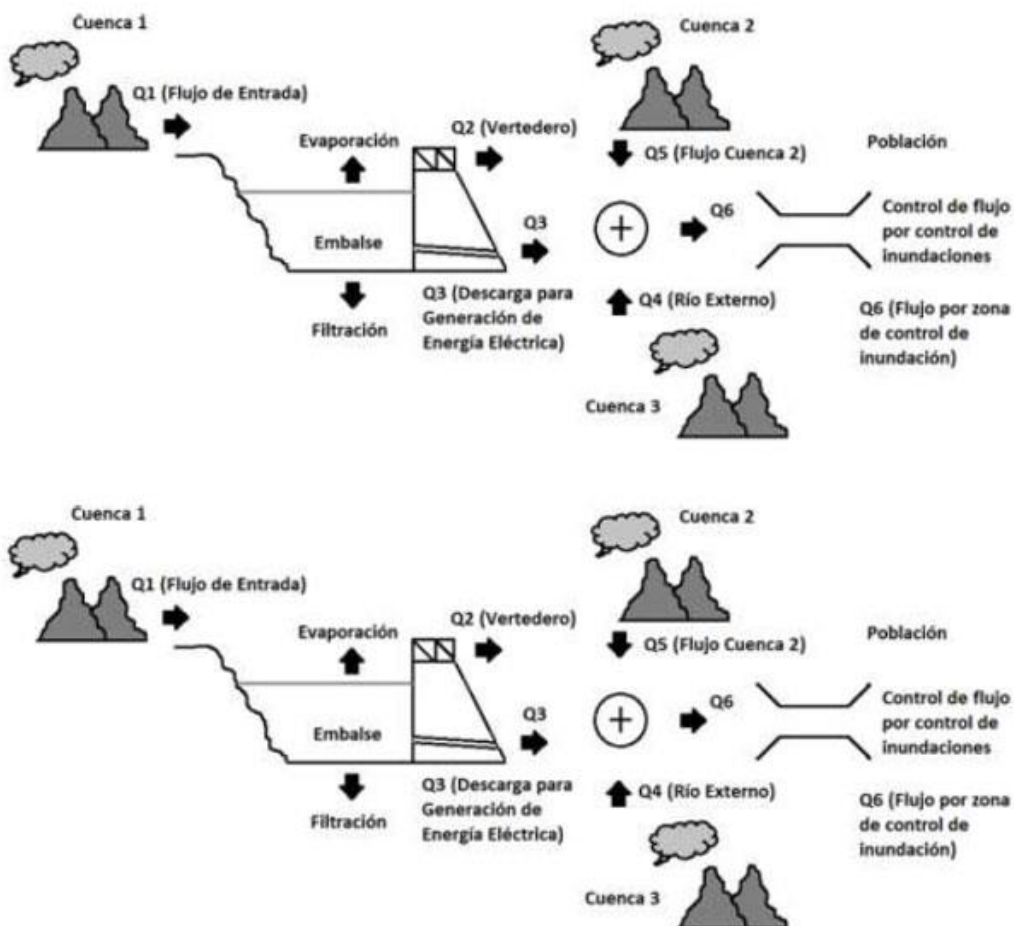
2.4.5. Protocolos de operación en escenarios de riesgo hidrológico

En contextos de eventos extremos como El Niño o lluvias torrenciales, la operación de embalses debe regirse por protocolos de seguridad que incluyen:

- Planes de vaciado preventivo: reducción de niveles antes de picos de crecida.
- Sistemas de alerta temprana basados en pronósticos climáticos y sensores de caudal.
- Operación coordinada con autoridades locales para minimizar impactos aguas abajo.
- Modelación en tiempo real con herramientas como HEC-ResSim o MIKE-Hydro Basin.

Figura 13.

Esquema de protocolos de operación frente a crecidas



Nota. ICOLD (2021).

2.5 SEGURIDAD Y GESTIÓN DEL RIESGO EN EMBALSES

La seguridad de embalses constituye un componente crítico de la gestión integrada del recurso hídrico, pues la falla estructural o la operación deficiente de estas infraestructuras puede ocasionar impactos catastróficos en términos de pérdidas humanas, económicas y ambientales. En este contexto, la gestión del riesgo en embalses combina la aplicación de normativas internacionales y nacionales, evaluaciones de amenaza y vulnerabilidad, implementación de planes de emergencia y el aprendizaje derivado de experiencias globales.

2.5.1. Normativas y lineamientos internacionales

Los organismos internacionales han establecido lineamientos técnicos que sirven como referencia para garantizar la seguridad estructural e hidráulica de los embalses:

- ICOLD (International Commission on Large Dams): propone guías para la seguridad de presas, monitoreo estructural, operación en eventos extremos y planes de emergencia (ICOLD, 2011).
- FEMA (Federal Emergency Management Agency, EE. UU.): publica manuales sobre seguridad de presas y protocolos de reducción de riesgo por inundaciones, enfatizando la importancia de los Emergency Action Plans (EAPs) (FEMA, 2015).
- Banco Mundial: incluye la seguridad de presas como requisito en proyectos de financiamiento, a través de sus políticas de salvaguardas ambientales (World Bank, 2017).

2.5.2. Marco normativo y regulatorio en el Ecuador

En Ecuador, la seguridad y operación de embalses se encuentra bajo la rectoría de varias instituciones:

- SENAGUA (Secretaría Nacional del Agua, hoy parte del Ministerio de Energía y Agua): regula el diseño, construcción y operación de embalses bajo principios de seguridad hidráulica y abastecimiento sostenible (SENAGUA, 2018).
- MAATE (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica): establece parámetros de calidad ambiental, caudales ecológicos y planes de adaptación frente al cambio climático.

- Normativas técnicas nacionales: exigen que los embalses incluyan estudios de impacto ambiental, planes de manejo de riesgos y estrategias de contingencia.

2.5.3. Evaluación de riesgos por crecientes y desbordamientos

La evaluación del riesgo en embalses se basa en tres componentes principales:

- Amenaza hidrológica: caracterización de caudales máximos esperados (PMF – Probable Maximum Flood).
- Vulnerabilidad estructural: análisis de estabilidad del muro, capacidad del aliviadero y resistencia de diques laterales.
- Exposición social y económica: identificación de poblaciones y actividades económicas aguas abajo.

El uso de modelos hidrológicos e hidráulicos (HEC-HMS, HEC-RAS, MIKE 11) permite simular escenarios de crecidas extremas y calcular zonas de inundación.

2.5.4. Planes de emergencia y sistemas de alerta temprana

Los Planes de Acción en Emergencias (PAE) constituyen instrumentos de gestión obligatorios para la operación segura de embalses. Estos incluyen:

- Protocolos de alerta temprana (sirenas, radio, telefonía celular).
- Coordinación con organismos de protección civil.
- Mapas de inundación actualizados.
- Simulacros comunitarios periódicos.

La integración de sistemas de sensores hidrometeorológicos en tiempo real y plataformas de comunicación reduce significativamente la vulnerabilidad frente a crecidas.

2.5.5. Experiencias internacionales en gestión de embalses frente a eventos extremos

Casos de referencia mundial demuestran la importancia de una adecuada gestión del riesgo:

- Presa Oroville (EE.UU., 2017): falla parcial del vertedero, que obligó a evacuar a más de 180.000 personas (FEMA, 2018).
- Presa Brumadinho (Brasil, 2019): ruptura de un dique de relaves mineros con consecuencias catastróficas (ICOLD, 2020).
- Embalses en China: implementación de operaciones conjuntas entre presas interconectadas ha permitido mitigar crecidas históricas del río Yangtsé (Zhang et al., 2021).

2.6 HERRAMIENTAS TECNOLÓGICAS PARA EL ANÁLISIS DE EMBALSES

El avance tecnológico en hidrología e ingeniería hidráulica ha transformado el análisis, operación y gestión de embalses. Actualmente se dispone de un amplio conjunto de herramientas que permiten caracterizar las condiciones hidrológicas de la cuenca, simular la propagación de caudales, evaluar la seguridad estructural y optimizar la operación frente a escenarios extremos. Estas tecnologías son esenciales para embalses multipropósito como Chongón, que requieren equilibrar almacenamiento, riego, abastecimiento y control de crecientes.

2.6.1. Sistemas de información geográfica y teledetección

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permiten la integración y análisis espacial de variables hidrológicas, topográficas y climáticas. La teledetección satelital (Landsat, Sentinel, MODIS) facilita el monitoreo de parámetros como cobertura de suelo, evapotranspiración, humedad del suelo y extensión de la superficie del embalse.

Estos insumos son fundamentales para la delimitación de cuencas, estimación de esorrentía y actualización de modelos hidrológicos.

2.6.2. Modelos hidrológicos aplicados a embalses

- HEC-HMS (Hydrologic Modeling System): desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers, permite simular procesos de lluvia–escorrentía, hidrográficas de diseño y escenarios de crecientes.
- SWAT (Soil and Water Assessment Tool): modelo distribuido que evalúa balances hídricos, erosión, transporte de sedimentos y nutrientes a escala de cuenca.

Ambos modelos se utilizan en conjunto para analizar la respuesta hidrológica de las cuencas tributarias al embalse Chongón, incorporando variaciones climáticas y de uso del suelo.

2.6.3. Modelos hidráulicos

Los modelos hidráulicos permiten evaluar el comportamiento del flujo dentro del embalse y en sus estructuras asociadas:

- HEC-RAS: simula flujo unidimensional y bidimensional, útil en análisis de propagación de crecientes y rotura de presas.
- MIKE (DHI): ofrece módulos 1D/2D para modelar hidrodinámica compleja, transporte de sedimentos y calidad del agua.
- Iber: herramienta libre que combina simulaciones hidráulicas y morfodinámicas en 2D, aplicada a estudios de inundación en embalses y ríos.

2.6.4. Monitoreo en tiempo real: sensores hidrometeorológicos y batimetría

El monitoreo en tiempo real constituye una herramienta clave para la seguridad y operación de embalses. Se incluyen:

- Sensores de nivel, caudal y precipitación: permiten generar alertas tempranas frente a crecientes.
- Estaciones meteorológicas automáticas: integradas con sistemas SIG y plataformas en la nube.
- Batimetría con sonar multihaz y drones acuáticos: utilizada para medir la acumulación de sedimentos y actualizar el volumen útil del embalse.

2.6.5. Simulación de escenarios de cambio climático e incremento de caudales

Los modelos climáticos regionales (RCM) acoplados a modelos hidrológicos permiten evaluar el impacto de escenarios de cambio climático (RCP 4.5, RCP 8.5) sobre las crecidas en cuencas tributarias.

Estas simulaciones posibilitan identificar incrementos en la magnitud y frecuencia de caudales extremos, y definir estrategias de adaptación en la operación del embalse, por ejemplo, manejo preventivo de niveles.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN

3.1.1. Tipo.

De acuerdo con Vizcaíno (2023), la investigación aplicada se caracteriza por emplear conocimientos científicos y metodológicos con el fin de resolver problemas específicos que afectan a una infraestructura, sistema o comunidad. En este sentido, el presente trabajo corresponde a una investigación aplicada, pues analiza el comportamiento del embalse Chongón frente a crecientes, integrando criterios hidrológicos, hidráulicos y operativos para identificar riesgos y plantear soluciones técnicas que mejoren la seguridad y eficiencia del sistema.

El embalse Chongón constituye una infraestructura estratégica para el litoral ecuatoriano, ya que se alimenta tanto de su cuenca propia como de los aportes del río Daule a través del Trasvase Daule–Santa Elena. Este doble régimen de aporte hídrico requiere un análisis detallado para comprender las dinámicas de almacenamiento, regulación y evacuación en escenarios de crecientes. Por ello, la investigación se centra en aplicar metodologías hidrológicas e hidráulicas con un enfoque técnico, orientadas a la gestión sostenible del recurso y la reducción de riesgos de desbordamiento.

3.1.2. Nivel.

El presente estudio se enmarca en un nivel de investigación explicativo, orientado a identificar y analizar las relaciones causa–efecto entre las variables hidrológicas, hidráulicas y operativas que determinan el comportamiento del embalse Chongón. Este nivel es pertinente porque el estudio no se limita a describir las condiciones actuales del sistema, sino que busca comprender los mecanismos que gobiernan su respuesta ante variaciones en aportes, niveles, descargas y escenarios de creciente.

Desde esta perspectiva, la investigación aborda cómo y por qué las fluctuaciones hidrometeorológicas, naturales y derivadas de escenarios ENSO o cambio climático, modifican el almacenamiento, la laminación de caudales y la eficiencia operativa del embalse. Para ello se emplea modelación hidrodinámica y

simulación de escenarios no estacionarios, permitiendo analizar el comportamiento del sistema bajo condiciones variables y estimar su desempeño futuro.

El enfoque explicativo permite evaluar las interacciones entre los componentes del sistema (aportes, volúmenes, niveles, descargas y capacidad de evacuación), identificando umbrales críticos, sensibilidad a eventos extremos y efectos acumulativos. Asimismo, facilita generar predicciones operativas y lineamientos de gestión adaptativa con fundamento técnico, asegurando la protección aguas abajo, la sostenibilidad del recurso y la estabilidad hidráulica de la infraestructura.

3.2. MÉTODO, ENFOQUE Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

3.2.1. Método.

El método aplicado corresponde al método analítico–cuantitativo no experimental, dado que no se manipulan directamente las variables del sistema ni se realizan intervenciones en el embalse Chongón. De acuerdo con Faneite (2023), el método analítico permite descomponer un sistema complejo para identificar relaciones causales a partir del estudio de sus componentes y de la respuesta del sistema bajo condiciones dadas, sin alterar su comportamiento real.

En este estudio, todas las variables se analizan a partir de datos secundarios (series históricas de precipitación, niveles, caudales y registros operativos de la EPA) y mediante la simulación matemática con modelos hidrológicos (HEC-HMS) e hidráulicos (HEC-RAS). Las variables independientes están representadas por las precipitaciones extremas y los aportes hídricos naturales y trasvasados; mientras que las variables dependientes incluyen los niveles de almacenamiento, la capacidad operativa y la seguridad hidráulica del embalse.

El método permite examinar cómo varía el comportamiento del sistema ante distintos escenarios hidrológicos sin necesidad de experimentación directa, obteniendo resultados reproducibles y técnicamente verificables.

3.2.2. Enfoque.

El enfoque de esta investigación es cuantitativo, ya que se basa en la recopilación, procesamiento y análisis de información numérica proveniente de registros hidrometeorológicos y operativos. En concordancia con Vizcaíno (2023), el enfoque cuantitativo permite medir la magnitud de los aportes hídricos, caracterizar las variaciones del sistema y evaluar la respuesta del embalse frente a eventos extremos.

Este enfoque se fortalece mediante el uso de herramientas estadísticas, análisis de series temporales y la aplicación de modelos matemáticos y numéricos que permiten simular escenarios de creciente, evaluar riesgos y fundamentar recomendaciones operativas con evidencia objetiva.

3.2.3. Diseño.

El diseño es no experimental, de tipo descriptivo–explicativo, dado que se trabaja exclusivamente con datos secundarios sin manipulación de variables en condiciones controladas. En lugar de experimentar, el estudio se apoya en la simulación de escenarios hidrológicos e hidráulicos mediante modelos previamente validados.

El diseño se estructura en cuatro fases metodológicas:

- Caracterización hidrológica: análisis de series históricas de precipitación, caudales y niveles.
- Diagnóstico hidráulico: evaluación del comportamiento del embalse bajo condiciones actuales.
- Simulación de escenarios: modelación hidrológica e hidrodinámica para crecientes de distintos períodos de retorno.
- Evaluación operativa: análisis del desempeño del sistema, identificación de límites de funcionamiento y generación de lineamientos de gestión.

Este diseño permite obtener resultados sólidos, replicables y técnicamente consistentes, que respaldan la toma de decisiones para la gestión integral del embalse Chongón.

3.3. POBLACIÓN, MUESTRA Y MUESTREO

3.3.1. Población.

De acuerdo con Arias y Covinos (2021), la población se entiende como el conjunto de elementos o fenómenos que comparten características comunes y conforman el universo total de análisis. En el presente trabajo, la población corresponde a los componentes hidrológicos que determinan el funcionamiento del embalse Chongón, entendidos como:

- Los aportes hídricos procedentes del río Daule mediante el Trasvase Daule–Santa Elena, principal fuente externa de caudal hacia el embalse.
- La cuenca propia del embalse Chongón, que aporta escorrentía superficial y subterránea derivada de las precipitaciones locales, las condiciones de infiltración y el uso del suelo.
- Los parámetros hidrológicos e hidráulicos asociados al sistema: series históricas de precipitación, caudales de entrada y salida, niveles de almacenamiento, descargas por el aliviadero y reacción hidráulica del sistema ante eventos extremos.

Esta definición permite abarcar todos los elementos que intervienen en el comportamiento hidrológico y operativo del embalse Chongón bajo condiciones no estacionarias.

3.3.2. Muestra.

Según Arias y Covinos (2021), la muestra es un subconjunto representativo de la población que permite obtener conclusiones válidas sobre el sistema general. En este estudio, la muestra está constituida por los componentes hidrológicos e hidrométricos que representan de forma directa la variabilidad espacial y temporal de los aportes al embalse. En particular, la muestra incluye:

- Las subcuencas tributarias que aportan escorrentía directa al embalse Chongón
- Los registros hidrometeorológicos históricos de las estaciones pluviométricas e hidrológicas ubicadas en el área de influencia del embalse y del río Daule

- Los escenarios hidrológicos de creciente seleccionados para análisis (10, 25, 50 y 100 años), que permiten evaluar la respuesta del sistema ante eventos críticos.

La selección de esta muestra garantiza la representatividad de las condiciones hidrológicas que influyen en el comportamiento del embalse, permitiendo caracterizar adecuadamente tanto la variabilidad espacial de los aportes como la magnitud de los eventos extremos.

3.3.3. Muestreo.

Para Hernández y Mendoza (2018), el muestreo es el proceso de selección de una porción adecuada de la población con el fin de garantizar que los resultados sean válidos, confiables y extrapolables. En el presente trabajo se aplica un muestreo no probabilístico intencional, enfocado en los elementos clave que determinan el comportamiento del embalse.

El proceso de muestreo se desarrolla mediante la selección de estaciones hidrometeorológicas de mayor representatividad en el área de influencia, delimitación de subcuencas tributarias mediante herramientas de sistemas de información geográfica (SIG) y modelos digitales de elevación (MDE), identificación de eventos críticos de precipitación y caudales a través de series históricas y registros extremos y extracción de escenarios representativos para modelación hidrológica e hidráulica, considerando factores adicionales como vegetación invasora, sedimentación y variaciones en la operación del trasvase.

Este procedimiento asegura que las muestras de datos analizados respondan a las condiciones reales de operación del embalse Chongón y permitan construir escenarios técnicos robustos para la evaluación de su capacidad operativa.

3.4. UBICACIÓN Y SECTOR DE ESTUDIO

3.4.1. Localización geográfica del embalse Chongón

El embalse Chongón se localiza en la provincia del Guayas, cantón Guayaquil, en las inmediaciones de la parroquia Chongón, aproximadamente a 27 km al oeste del área urbana de Guayaquil, Ecuador. Su emplazamiento estratégico permite la regulación de caudales provenientes tanto de su cuenca hidrográfica natural (río Chongón) como de los aportes derivados del río Daule a través del

sistema Trasvase Daule–Santa Elena, constituyéndose en una de las infraestructuras hidráulicas más relevantes de la región litoral.

Las coordenadas geográficas del eje de la presa, bajo el sistema DATUM WGS 84, corresponden aproximadamente a:

- Este (E): 597564,00 m
- Norte (N): 9754755,00 m

El área total de la cuenca hidrográfica del embalse Chongón es de 273 km², mientras que el espejo de agua del embalse, medido a la cota de operación normal de 54.50 m s.n.m., cubre una superficie aproximada de 2500 hectáreas (25 km²).

El volumen máximo de almacenamiento registrado en condiciones normales de operación es de 280 hm³, con una cota de vertedero de servicio a los 51 m s.n.m. y dos vertederos de emergencia situados a la cota 54 m s.n.m.

La presa principal posee una longitud total de 1350 m y está conformada por materiales sueltos con núcleo impermeable de arcilla, diseñada para cumplir funciones de regulación y laminación de avenidas.

La cota de la solera del túnel de desagüe se ubica a los 20 m s.n.m., facilitando la descarga de sedimentos y el control del nivel operativo.

En términos altimétricos, la zona circundante al embalse presenta una altitud promedio de 55–60 metros sobre el nivel del mar, con una altitud mínima cercana a 34 m en la zona baja del vaso y una máxima de 157 m en las estribaciones montañosas de la cuenca. Este rango altitudinal configura una topografía suavemente ondulada con predominio de laderas erosionadas y suelos de textura franco-arcillosa.

El clima de la región es tropical megatérmico húmedo, caracterizado por una temperatura media anual de 26 °C, una precipitación promedio anual entre 900 y 1300 mm, concentrada principalmente entre los meses de enero y abril, y una estación seca marcada de junio a noviembre (INAMHI, 2024). Estas condiciones determinan un régimen hidrológico de marcada estacionalidad y fuerte dependencia del fenómeno El Niño–Oscilación del Sur (ENOS).

Figura 14.

Ubicación del embalse Chongón y sus áreas de estudio



Nota. *Obtenido de Google Earth, 2025*

3.4.2. Sistema interconectado con Trasvase Daule-Santa Elena, embalse San Vicente y canales de riego

Chongón no solo recibe agua de su cuenca propia, sino también del río Daule por medio del Sistema Trasvase Daule–Santa Elena. Este sistema forma un apoyo vital para mantener los niveles de operación del embalse, especialmente en periodos de baja precipitación.

Además, el sistema incluye los canales Chongón–Playas y Chongón–Sube y Baja, y trasvases hacia el embalse San Vicente. Estas interconexiones permiten redistribuir recursos hídricos según la demanda, apoyo a riego, abastecimiento humano y regulaciones de crecientes.

3.5. METODOLOGÍA DEL O.E.1.: CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y MORFOLÓGICA DEL EMBALSE CHONGÓN Y SU CUENCA

3.5.1. Análisis de precipitaciones y laminación de avenidas

Para la estimación de avenidas en la cuenca del embalse Chongón se aplicó un procedimiento hidrológico secuencial basado en el análisis estadístico de precipitaciones, la generación de hietogramas de diseño, la determinación de escorrentía efectiva y la transformación lluvia–escorrentía mediante métodos unitarios. Los datos provienen de estaciones pluviométricas e hidrométricas de INAMHI ubicadas en el área de influencia del embalse y del sistema Daule–Chongón.

a) Análisis de precipitaciones máximas e IDF

Se procesaron las series históricas de lluvia máxima diaria, horaria y subhoraria. Para cada duración se ajustó la distribución estadística correspondiente y se obtuvo la intensidad para un periodo de retorno T mediante la ecuación general de curvas IDF:

Ecuación 2.

Análisis de precipitaciones máximas e IDF

$$I(T, D) = aT^b D^c$$

donde:

I = intensidad (mm/h),

D = duración (min u h),

a, b, c = parámetros ajustados para la estación.

Con estas intensidades se definieron las precipitaciones de diseño $P(T, D)$
 $= I \cdot D$

b) Construcción del hietograma de diseño

El hietograma se generó aplicando el método de distribución temporal SCS (patrón tipo II), organizando los incrementos de lluvia de acuerdo con la duración crítica definida por el tiempo de concentración de la cuenca.

c) Pérdidas por infiltración

La escorrentía efectiva se calculó mediante el método SCS-CN, utilizando la ecuación:

Ecuación 3.

Método SCS-CN para la escorrentía directa (mm).

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

Con

Ecuación 4.
Cálculo de S

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

donde:

P = precipitación acumulada (mm),

CN = curva numérica según uso de suelo y condición hidrológica,

Q = escorrentía directa (mm).

d) Transformación lluvia–escorrentía

El hidrograma de avenida se obtuvo mediante el Hidrograma Unitario SCS, cuya forma depende del tiempo de concentración y del caudal pico unitario. El caudal pico se calculó con:

Ecuación 5.
Cálculo del caudal pico

$$Q_p = \frac{0.208A}{T_p}$$

donde:

Q_p = caudal pico unitario (m³/s por mm),

A = área de cuenca (km²),

T_p = tiempo al pico (h), definido como:

Ecuación 6.
Cálculo del tiempo pico

$$T_p = T_L + \frac{D}{2}$$

siendo:

T_L = tiempo de retraso (lag time),

D = duración del bloque de lluvia efectiva.

El hidrograma total de la avenida se obtuvo mediante la convolución discreta entre la lluvia efectiva y el hidrograma unitario:

Ecuación 7.

Cálculo de la convolución discreta entre la lluvia efectiva y el hidrograma unitario

$$Q(t_i) = \sum_{j=1}^n P_{ef}(t_j)UH(t_i - t_j)$$

e) Laminación de la avenida en el embalse

El hidrograma de entrada obtenido se enrutó dentro del embalse aplicando la ecuación de balance de volúmenes en intervalos discretos de tiempo:

Ecuación 8.

Cálculo de Laminación de la avenida en el embalse

$$S_{t+\Delta t} = S_t + (Q_{int} - Q_{out,t})\Delta t$$

El almacenamiento S y el nivel del embalse se determinaron a partir de la curva oficial cota-área-volumen.

El caudal de salida se calculó mediante la ecuación del vertedero de labio fijo:

Ecuación 9.

Cálculo del caudal de salida

$$Q_{out} = C_d L H^{\frac{3}{2}}$$

donde:

L = longitud del vertedero,

H = carga sobre el borde del vertedero,

C_d = coeficiente de descarga.

La variación del nivel se obtuvo iterando Q_{out} y el almacenamiento hasta completar el paso temporal de la avenida.

3.5.2. Series históricas de caudales

Para el análisis hidrológico del embalse Chongón se recopilaron y procesaron series históricas de caudales provenientes de dos fuentes principales: el río Chongón, como aporte natural de la cuenca local, y el trasvase Daule–Santa Elena, que garantiza un suministro adicional desde el río Daule. Esta doble alimentación resultó fundamental para caracterizar adecuadamente los volúmenes de ingreso al embalse y su comportamiento operativo en periodos de crecientes.

Los registros del río Chongón fueron obtenidos a partir de estaciones hidrométricas instaladas aguas arriba de la presa, donde se analizaron las series mensuales y anuales de caudales medios, máximos y mínimos. La información fue obtenida de proceso de depuración que incluyó la verificación de consistencia interna, la detección de valores atípicos y la interpolación de datos faltantes. Posteriormente, se aplicaron pruebas estadísticas de homogeneidad con el objetivo de asegurar la confiabilidad de las series temporales.

En paralelo, se procesaron los registros del trasvase Daule–Santa Elena, considerando los caudales derivados a través del Canal Túnel Cerro Azul–Chongón. Estos datos fueron proporcionados por la Empresa Pública del Agua (EPA) e incluyeron valores horarios y diarios de bombeo y derivación. La serie histórica permitió identificar la magnitud de los aportes complementarios al embalse y su influencia en el balance hídrico anual.

Con ambas fuentes de información se construyeron hidrogramas históricos y de diseño, que representaron la variabilidad de los caudales en distintos escenarios hidrológicos. Asimismo, se elaboraron curvas de duración de caudales (FDC, por sus siglas en inglés), lo que permitió determinar la disponibilidad hídrica en términos de excedencias y caudales ecológicos.

Finalmente, los caudales del río Chongón y los aportes del trasvase se integraron en un balance hídrico consolidado, insumo que sirvió para la calibración de los modelos hidrológicos (HEC-HMS) y para evaluar la capacidad del embalse de laminar crecientes de diferente magnitud. Esta información también permitió estimar la dependencia operativa del sistema respecto al trasvase, confirmando su papel estratégico en el abastecimiento de agua y en la gestión de riesgos hidrológicos.

3.5.3. Delimitación de cuencas tributarias y subcuencas

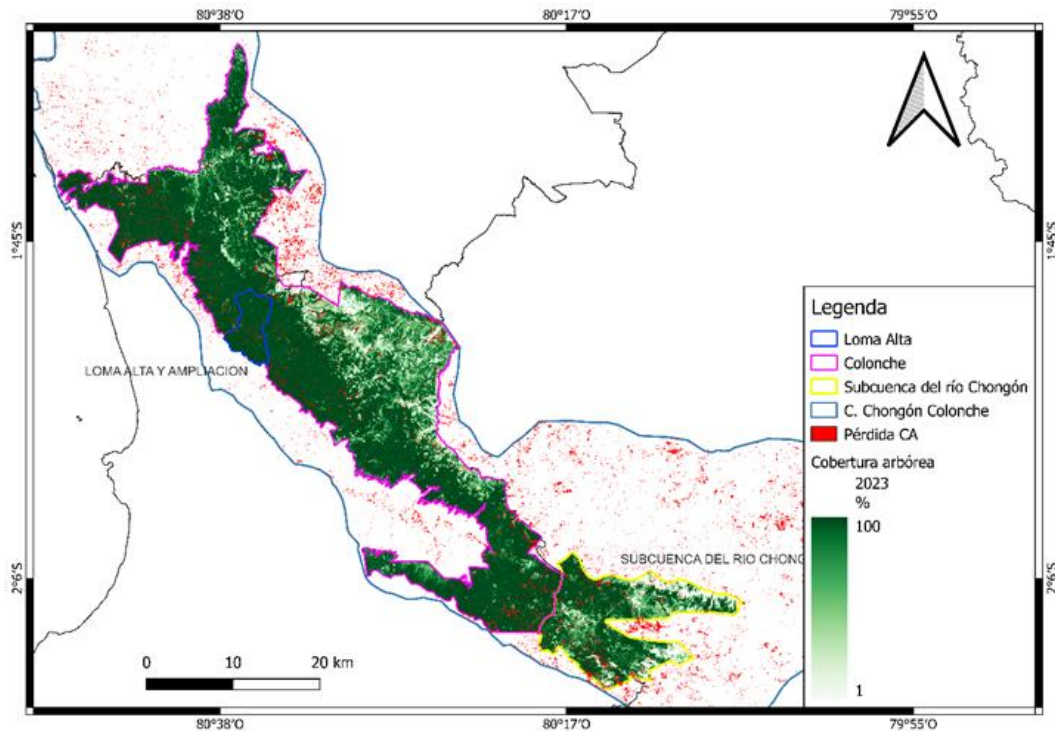
Para determinar con precisión las áreas que aportan escorrentía al embalse Chongón (tanto de la cuenca local como de los sectores vinculados al trasvase), se siguió este procedimiento metodológico:

- Obtención de modelo digital de elevación (DEM) con resolución apropiada para la zona de interés, cubriendo tanto la cuenca Chongón como los corredores del trasvase Daule–Santa Elena.
- Procesamiento SIG con herramientas de hidrología para generar mapas de drenaje, direccionalidad del flujo y líneas de divisorias de aguas.
- Delimitación de la cuenca principal que alimenta el embalse Chongón, considerando los flujos naturales.
- Identificación de subcuencas tributarias principales, especialmente aquellas que contribuyen con mayores caudales o que están más vulnerables por cambios de uso (deforestación, urbanización).
- Verificación de conexiones con el trasvase: en el modelo se integró el canal túnel Cerro Azul – Chongón como un órgano adicional de aporte, para identificar subzonas que dependan del trasvase.
- Cálculo de parámetros geomorfológicos de cada subcuenca: área, pendiente media, longitud de cauce, densidad de drenaje datos que después se usarán en la modelación hidrológica.

Con estas delimitaciones, se generaron mapas de cuencas y subcuencas que se emplearon como base espacial para la modelación de escorrentía hacia el embalse.

Figura 15.

Vista de Cordillera Chongón-Colonche donde se visualiza la subcuenca del río Chongón



Nota. La imagen muestra la zona del macizo Chongón-Colonche con áreas de reforestación, que puede ayudar como contexto geográfico.

3.5.4. Cobertura vegetal y cambios de uso del suelo

Para entender cómo la vegetación y el uso del suelo influyen en la hidrología de la cuenca del embalse Chongón, se realizó un análisis espacial y temporal de la cobertura vegetal, junto con la identificación de los cambios más relevantes en el uso del suelo. Este estudio metodológico permitió estimar coeficientes de cobertura vegetal, evaluar su evolución histórica y relacionarla con los procesos hidrológicos del embalse.

1. Recolección de mapas de cobertura y uso del suelo

Se emplearon mapas de cobertura vegetal del Biocorredor Chongón-Colonche disponibles en entidades estatales. También se consultaron estudios locales que cuantifican la pérdida de cobertura arbórea entre 2000 y 2022 en la cordillera Chongón-Colonche.

2. Clasificación de coberturas y uso del suelo

Las clases consideradas incluyeron: bosque nativo, bosque húmedo de garúa, bosque seco, matorral, vegetación herbácea, áreas agrícolas y zonas antropogénicas (cultivos, pastizales). En el estudio de “Estudio Chongón y Colonche dentro de Santa Elena” se identificó que dentro del área del Bosque Protector Chongón–Colonche, 57244.83 ha correspondían a vegetación natural, frente a 3762.68 ha con actividades antropogénicas (6,21 %)

3. Análisis temporal

Utilizando datos del conjunto de Hansen et al. (2013), respecto a la cobertura arbórea, se cuantificaron las pérdidas de bosque entre 2000 y 2022: se estimó que la cobertura forestal pasó de 300374 ha en 2000 a 289846 ha en 2022, con una pérdida neta de aproximadamente 10528 ha en ese intervalo.

4. Cálculo de coeficientes de cobertura (Cv)

Para cada uso del suelo o tipo de vegetación, se asignaron coeficientes de cobertura (fracción de área que permanece con vegetación efectiva) basados en literatura regional y estudios hidrológicos locales (bosque nativo 0.7 – 0.9; matorral 0,3 – 0.6; cultivos 0.1 – 0.4). Estos coeficientes se utilizaron luego en modelos hidrológicos para estimar escorrentía efectiva.

5. Cruce con datos de cambio de uso del suelo

Se superpusieron capas temporales de uso del suelo para detectar zonas donde bosque ha sido convertido en cultivo o pastizal, especialmente en la subcuenca de Chongón. Se identificaron tendencias de expansión agrícola, degradación y fragmentación del bosque (Barros-Díaz et al., 2024).

Tabla 19.
Distribución de cobertura vegetal y uso del suelo en el Bosque Protector Chongón–Colonche

Clase de cobertura / uso	Área (ha)	% del total	Observación
Vegetación natural (bosque, matorral, garúa)	57244,83	93,78 %	Predomina dentro del bosque protegido
Cultivos, pastizales, zonas antropogénicas	3762,68	6,21 %	Transformación antrópica documentada

Nota. *Elaboración propia (2025)*

3.6. METODOLOGÍA DEL O.E.2.: EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA VEGETACIÓN ACUÁTICA INVASORA EN LA CAPACIDAD HIDRÁULICA DEL EMBALSE

3.6.1. Identificación y cuantificación de vegetación flotante (*Eichhornia crassipes*)

La identificación y cuantificación de la vegetación acuática invasora en el embalse Chongón se efectuó a partir del análisis de imágenes satelitales y fotografías aéreas obtenidas mediante la plataforma Google Earth Pro. El objetivo metodológico de este procedimiento fue establecer un sistema de detección y estimación de la cobertura superficial de *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua), empleando técnicas de teledetección y análisis espectral.

a) Fuentes y criterios de información

Se emplearon imágenes multitemporales del sensor Sentinel-2 MSI correspondientes a los años 2023, 2024 y 2025, seleccionadas para los meses representativos de la estación lluviosa y seca. Estas imágenes fueron obtenidas del portal Copernicus Open Access Hub, y procesadas en el software QGIS, con el fin de generar una base de datos geoespacial del espejo de agua y sus coberturas flotantes.

La información visual de Google Earth Pro se utilizó como referencia auxiliar para la validación visual de las zonas con presencia de vegetación, apoyando la delimitación de polígonos y la comparación entre fechas.

b) Procesamiento digital y delimitación

El procedimiento metodológico contempló las siguientes etapas:

- Corrección atmosférica y recorte del área de estudio: se aplicó una corrección radiométrica básica y se delimitó el polígono del embalse Chongón con base en sus coordenadas UTM y límites hidrológicos definidos por la Empresa Pública del Agua (EPA EP).

- Identificación de zonas acuáticas: se utilizó el índice NDWI (Normalized Difference Water Index) para discriminar las áreas de agua libre del entorno terrestre.
- Detección de vegetación flotante: mediante el índice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) se identificaron los sectores con cobertura vegetal flotante, considerando umbrales espectrales de $NDVI > 0,35$ y $NDWI < 0,1$, según los criterios de Hu et al. (2019) y Bianchini et al. (2023).
- Digitalización de polígonos y cálculo de área: las zonas clasificadas como vegetación flotante fueron digitalizadas y cuantificadas en unidades de hectáreas, generando capas temáticas por periodo analizado.
- Comparación multitemporal: se realizaron contrastes entre las fechas seleccionadas para analizar la variación temporal de la cobertura, sin interpretar los valores numéricos de extensión (que se reportarán en el capítulo de resultados).

c) Integración metodológica en el análisis hidráulico

Las capas de vegetación flotante obtenidas del procesamiento satelital fueron incorporadas al entorno del modelo hidráulico del embalse, para su posterior uso en la simulación de flujo. En este proceso, las zonas invadidas se representaron como áreas con mayor rugosidad y reducción de sección hidráulica, a fin de evaluar en fases posteriores su influencia en la capacidad de descarga del sistema.

Tabla 20.

Procedimiento metodológico para la detección de vegetación flotante en el embalse Chongón

Etapa	Herramienta / Fuente	Descripción metodológica
Adquisición de imágenes	Google Earth Pro	Recolección de imágenes satelitales multitemporales del área del embalse Chongón.
Preprocesamiento	QGIS	Corrección atmosférica, recorte del área y normalización espectral.

Cálculo de índices	NDWI y NDVI	Identificación de cuerpos de agua y vegetación flotante mediante umbrales espectrales.
Clasificación y digitalización	QGIS / Sentinel Hub	Generación de polígonos de cobertura flotante.
Integración al modelo hidráulico	-	Asignación de rugosidades diferenciales y definición de áreas con restricción de flujo.

Nota. *Elaboración propia (2025)*

3.6.2. Impacto en la sección hidráulica del aliviadero

El análisis del impacto de la vegetación acuática invasora en la sección hidráulica del aliviadero del embalse Chongón se desarrolló mediante una metodología de modelación numérica y revisión técnica, orientada a determinar la variación del comportamiento del flujo y la capacidad de evacuación bajo diferentes escenarios de obstrucción parcial.

El proceso metodológico integró información geométrica, hidráulica y ambiental, considerando la presencia de *Eichhornia crassipes* en las inmediaciones del vertedero y el canal de descarga.

a) Levantamiento y configuración geométrica del aliviadero

La geometría base del aliviadero se obtuvo a partir de planos técnicos y memorias de diseño proporcionadas por la Empresa Pública del Agua (EPA EP, 2020) y complementada con la interpretación de imágenes satelitales de Google Earth Pro, a fin de identificar la extensión del vertedero libre, canal de descarga y zonas de disipación de energía.

Con esta información se generó un modelo tridimensional en el entorno del software HEC-RAS, empleando un modelo bidimensional (2D) de flujo en régimen no permanente.

La malla digital del terreno (DTM) utilizada tuvo una resolución espacial de 10 metros, obtenida del portal Earth Explorer (USGS) y ajustada al sistema de coordenadas UTM 17S. En este entorno, se definió el polígono del embalse, el

vertedero principal y el canal de salida, delimitando los contornos de frontera hidráulica.

b) Escenarios de simulación hidráulica

Para evaluar la influencia de la vegetación flotante sobre el comportamiento hidráulico del aliviadero, se establecieron tres escenarios de simulación conceptual:

- Escenario base: flujo libre sin presencia de vegetación (condición de referencia).
- Escenario moderado: obstrucción parcial (30 %) del ancho efectivo del vertedero por acumulación de vegetación flotante en la zona aguas arriba.
- Escenario crítico: obstrucción severa (60 %) con acumulación concentrada de *Eichhornia crassipes* en la entrada del aliviadero.

En cada caso, se aplicaron condiciones de borde de caudal máximo probable (AMP) estimadas a partir del modelo hidrológico HEC-HMS, garantizando la coherencia entre la hidrología y la hidráulica del sistema.

c) Parámetros hidráulicos considerados

En la simulación se evaluaron los parámetros hidráulicos más representativos del desempeño del aliviadero:

- Altura de carga (h) y nivel de agua aguas arriba (H_1);
- Velocidad de aproximación (v) y perfil de flujo sobre el vertedero;
- Coeficiente de descarga (C_d);
- Caudal vertido (Q);
- Líneas de energía y presión en la estructura.

Estos parámetros fueron analizados conforme a los lineamientos del U.S. Army Corps of Engineers (USACE, 2016) y del Hydraulic Design Criteria (HDC 712), adaptados a las condiciones del embalse Chongón.

d) Representación de vegetación flotante en el modelo

La vegetación flotante fue representada como un factor de rugosidad adicional (n) dentro de la sección de entrada del vertedero, siguiendo los criterios

de Chow (1959) y López Barreto (2020), mediante una aproximación empírica que considera el incremento de resistencia al flujo por masa vegetal densa.

En el entorno de HEC-RAS, esta condición se implementó ajustando el parámetro de coeficiente de Manning ($n = 0,045-0,085$) en las celdas de borde correspondientes al espejo de agua con vegetación flotante.

Además, se incorporaron zonas de bloqueo parcial mediante polígonos de obstrucción (*blocked obstructions*), simulando la acumulación vegetal sobre la línea de flujo principal del vertedero.

e) Validación metodológica y control de calidad

La configuración hidráulica fue validada mediante la comparación de los resultados de descarga teórica con la curva de gasto del aliviadero registrada por la EPA EP (2020), verificando la coherencia de los coeficientes de descarga.

El modelo se ejecutó con intervalos de tiempo de 5 segundos para garantizar estabilidad numérica y se aplicaron pruebas de sensibilidad para determinar la influencia del factor de rugosidad vegetal en la reducción del gasto.

Tabla 21.

Procedimiento metodológico para la simulación del impacto vegetal en el aliviadero

Etapa	Herramienta / Fuente	Descripción metodológica
Definición geométrica	Planos técnicos EPA (2020), Google Earth Pro	Reconstrucción de la sección del vertedero y canal de descarga.
Generación de modelo 2D	HEC-RAS	Creación del modelo hidráulico bidimensional con condiciones de borde variables.
Escenarios de simulación	HEC-RAS / HEC-HMS	Definición de condiciones base, moderada y crítica con variación de obstrucción vegetal.

Parámetros analizados	USACE (2016), HDC 712	Determinación de caudales, niveles de carga, velocidades y coeficientes hidráulicos.
Validación metodológica	EPA EP (2020)	Comparación de resultados teóricos con curva de gasto oficial del aliviadero.

Nota. *Elaboración propia (2025)*

3.6.3. Integración de variables ecológicas en modelos hidráulicos

La integración de variables ecológicas en el análisis hidráulico del embalse Chongón se planteó como un componente metodológico orientado a relacionar los procesos hidrológicos con las condiciones ambientales que influyen en la dinámica del cuerpo de agua. Esta integración permitió establecer una aproximación conceptual al comportamiento del sistema bajo la influencia de la vegetación acuática invasora (*Eichhornia crassipes*), sin recurrir a modelaciones numéricas complejas.

Para el desarrollo de esta etapa se consideró la información obtenida a partir de la interpretación de imágenes satelitales de Google Earth Pro (periodo 2020–2025), complementada con datos climáticos e hidrológicos secundarios proporcionados por el INAMHI y la Empresa Pública del Agua (EPA, 2020). Estos insumos permitieron definir las condiciones ecológicas y físicas del embalse, así como los factores de influencia en la capacidad hidráulica y en la calidad del agua.

a) Variables ecológicas consideradas

Las variables ecológicas incorporadas fueron aquellas que presentan relación directa con los procesos hidráulicos y de almacenamiento del embalse:

Cobertura vegetal flotante (% del espejo de agua): se estimó a partir de la interpretación de imágenes satelitales, diferenciando tonalidades de color verde intenso sobre la superficie del embalse.

- Biomasa estimada de vegetación (ton/ha): se calculó a partir de valores de referencia de densidad promedio de *Eichhornia crassipes*

reportados por la FAO (2022), que oscilan entre 150 y 250 toneladas húmedas por hectárea.

- **Transparencia del agua (m):** se vinculó indirectamente con la concentración de sólidos suspendidos y la reducción de oxígeno disuelto en zonas de vegetación densa.
- **Temperatura superficial (°C):** se utilizó como variable de control ambiental, estimada mediante registros históricos del INAMHI.
- **Oxígeno disuelto (mg/L):** considerado como indicador de calidad de agua y asociado al proceso de descomposición de materia orgánica vegetal.

b) Enfoque metodológico de integración

Para vincular las variables ecológicas con los parámetros hidráulicos del embalse, se adoptó un enfoque conceptual–correlativo, en el cual las observaciones ecológicas fueron integradas a los componentes básicos del régimen de flujo y del balance hídrico.

El procedimiento consistió en:

- **Identificación de áreas afectadas:** delimitación espacial de sectores con presencia recurrente de vegetación flotante mediante interpretación multitemporal.
- **Relación con parámetros hidráulicos:** asociación de la cobertura vegetal con zonas de baja velocidad del flujo o con áreas próximas al aliviadero, utilizando referencias del plano morfológico del embalse.
- **Análisis de correspondencia ecológica:** contraste de la extensión vegetal con indicadores ambientales (temperatura, transparencia y oxígeno disuelto) reportados en estudios técnicos de la EPA (2020).
- **Integración cualitativa al modelo conceptual:** representación de las interacciones entre los flujos de entrada, almacenamiento y salida del embalse frente a la presencia de macrófitas flotantes.

c) Representación conceptual

A partir de la integración metodológica descrita, se elaboró un modelo conceptual del sistema hidráulico–ecológico del embalse Chongón, en el cual las

variables hidrológicas (caudal, nivel del embalse, escorrentía superficial) se relacionaron con las variables ecológicas (cobertura vegetal, oxígeno disuelto, temperatura y transparencia).

Este esquema permitió visualizar las interacciones dominantes entre el comportamiento hidráulico del embalse y los procesos ecológicos superficiales que influyen en su funcionamiento operativo.

d) Fuentes y criterios técnicos de referencia

El marco metodológico se basó en lineamientos propuestos por la FAO (2022) para la evaluación ecológica de sistemas lénticos tropicales y por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX, 2019), que recomiendan la inclusión de parámetros biológicos en el análisis hidráulico para mejorar la interpretación de procesos de almacenamiento y evacuación de caudales.

De igual manera, se incorporaron los criterios de clasificación de calidad ambiental del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica del Ecuador (MAATE, 2022).

Tabla 22.

Integración de variables ecológicas en el análisis hidráulico del embalse Chongón

Tipo de variable	Parámetro evaluado	Unidad	Método de integración
Hidrológica	Caudal de entrada y salida	m ³ /s	Relación con zonas de vegetación densa
Ecológica	Cobertura vegetal flotante	%	Delimitación multitemporal
Ambiental	Temperatura superficial	°C	Asociación con gradiente térmico
Biológica	Biomasa de macrófitas	ton/ha	Estimación indirecta por área cubierta
Fisicoquímica	Oxígeno disuelto	mg/L	Relación con la presencia de vegetación y estancamiento

Nota. *Elaboración propia (2025)*

3.7. METODOLOGÍA DEL O.E.3.: MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE CRECIENTES BAJO ESCENARIOS NO ESTACIONARIOS

3.7.1. Selección de modelos hidrológicos

Para la modelación hidrológica del embalse Chongón y su sistema interconectado con el trasvase Daule–Santa Elena, se seleccionaron herramientas de simulación reconocidas por su aplicabilidad en regiones tropicales y su capacidad para representar procesos de escorrentía superficial y respuesta de cuencas bajo condiciones no estacionarias. En este sentido, se empleó el modelo HEC-HMS, desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers, como herramienta principal de análisis hidrológico.

La selección de HEC-HMS se fundamentó en su flexibilidad para reproducir el comportamiento de cuencas interconectadas y su compatibilidad con formatos geoespaciales generados en sistemas de información geográfica (SIG). Esto permitió integrar información espacial sobre topografía, uso del suelo, precipitación y parámetros hidráulicos de la cuenca. El modelo representó los procesos de transformación lluvia–escorrentía, el almacenamiento temporal en el vaso del embalse y los aportes tanto del río Chongón como del trasvase Daule–Santa Elena, los cuales inciden de manera directa en el régimen de caudales y en la activación de los sistemas de descarga.

Los parámetros de entrada incluyeron la precipitación efectiva, el número de curva (CN) del método SCS, las pérdidas por infiltración y las relaciones entre almacenamiento y salida. Los datos fueron obtenidos de las estaciones hidrometeorológicas Chongón, Cerro Azul y Daule, complementados con registros operativos de la Empresa Pública del Agua (EPA).

El proceso metodológico comprendió la delimitación de subcuencas, la definición de puntos de control y la asignación de parámetros morfométricos (área, pendiente, longitud de cauce) obtenidos mediante Modelos Digitales de Elevación (MDE) de 30 m de resolución. Los caudales simulados se calibraron frente a registros históricos, verificando la adecuada representación de los eventos de mayor

magnitud, particularmente aquellos que generaron descargas simultáneas por el aliviadero principal y los dos aliviaderos de emergencia tipo fusible.

3.7.2. Simulación hidráulica del embalse y aliviadero

La simulación hidráulica del embalse Chongón se ejecutó en HEC-RAS (unsteady flow 2D/1D según conveniencia), integrando geometría y estructura del embalse y las obras de descarga en base a los planos y memorias técnicas suministradas por la EPA (2020) y a los siguientes datos.

- Cota normal de operación: 51.00 m s.n.m.
- Cota de corona: 54.50 m s.n.m.
- Caudal máximo del aliviadero principal (Creager, cimacio 45 m): 400 m³/s (a cota 51).
- Aliviaderos de emergencia tipo fusible (margen izquierda y derecha): 1 300 m³/s c/u, cotas de enrocado/activación a 54 m.
- Longitud de cresta de presa: 1 364 m.
- Altura de presa: 40 m.
- Volumen total de almacenamiento: 280 hm³ (volumen a cota 51).
- Espejo de agua (área): 2 500 ha (25 000 000 m²).
- Datos geométricos de canal de salida, cuenco amortiguador y desagüe de fondo (túnel 5.50 m Ø) tomados de la documentación técnica.

Procedimiento hidráulico

- a) Construcción de geometría hidráulica.

Se importó topografía/batimetría y se generaron secciones transversales en el entorno HEC-RAS, detallando vertedero principal, canal de salida, cuenco amortiguador, y aliviaderos laterales tipo fusible.

- b) Configuración de condiciones de borde y de control.

Hidrogramas de entrada $Q_{in}(t)$ (salida HEC-HMS) aplicadas aguas arriba del embalse.

Reglas de operación: apertura del aliviadero de servicio (funciona automáticamente) y activación de aliviaderos fusibles únicamente

cuando la cota alcanza la cota crítica de 54.00 m (o según criterios de operación documentados).

c) Escenarios de simulación.

Se definieron escenarios hidrológicos: periodos de retorno $T = 10, 25, 50, 100$ años, y escenarios no estacionarios (aumentos de precipitación/escorrentía).

Para cada escenario se consideraron condiciones iniciales de embalse: (a) cota inicial = 51.00 m (embalse lleno), (b) cota inicial = 50.0 m (reserva moderada), y (c) cota inicial reducida según reglas operativas de pre-descarga.

d) Ejecución y variables de salida.

Simulación en modo no permanente (unsteady flow) con paso de tiempo apropiado (recomendado: $\leq 5-10$ s para secciones críticas; ajustar según estabilidad numérica). Las salidas registradas incluyen $h(t)$ (cota del embalse), $Q_{salida}(t)$ por cada vertedero, velocidad y perfiles de energía, tiempos de activación de fusibles y volúmenes evacuados.

e) Análisis de resultados y criterios de riesgo.

Determinación de cota máxima alcanzada y comparación con la cota de corona (54.50 m) para evaluar riesgo de overtopping.

Cuantificación del volumen evacuado por cada componente y tiempo total de uso de aliviaderos de emergencia.

Si la cota máxima supera 54.00 m pero no alcanza 54.50 m, se considera activación de fusibles y riesgo de descarga controlada; si supera 54.50 m, existe riesgo de overtopping y daño a coronamiento, por lo que se recomienda evaluar medidas operativas y estructurales.

Tabla 23.

Parámetros geométricos e hidráulicos de simulación del embalse Chongón.

Parámetro	Valor	Unidad
Cota máxima de embalse (cota normal operación)	51.00	m s.n.m.
Cota de corona (coronamiento)	54.50	m s.n.m.
Caudal máximo del aliviadero principal	400	m ³ /s

Caudal máximo conjunto (principal + fusibles)	3 000	m ³ /s
Aliviaderos de emergencia (cada uno)	1 300	m ³ /s c/u
Longitud de cresta de presa	1 364	m
Altura de presa	40	m
Volumen de almacenamiento	280	hm ³
Área del embalse (espejo de agua)	2 500	ha
Desagüe de fondo (túnel)	5.50	m (Ø)

Nota. *Obtenido de EPA (2020).*

3.7.3. Determinación del tiempo de concentración y caudales de diseño

La determinación del tiempo de concentración (T_c) y de los caudales de diseño (Q_d) constituye una etapa clave en la modelación hidrológica, ya que permite establecer el comportamiento temporal del escurrimiento superficial y las condiciones de respuesta de la cuenca ante eventos de lluvia extrema. En el caso del embalse Chongón, estos parámetros resultaron esenciales para estimar los volúmenes de agua que ingresan tanto desde la cuenca natural del río Chongón como desde el trasvase Daule–Santa Elena, cuya contribución directa incide en la capacidad de laminación y en la operación del aliviadero.

El cálculo del tiempo de concentración se realizó empleando el método de Kirpich (1940), adecuado para cuencas de tamaño medio con predominio de escorrentía superficial. Este método fue complementado con la ecuación empírica de Giandotti (1934), la cual incorpora parámetros de pendiente, longitud y área de la cuenca, permitiendo una comparación entre ambos resultados. Los datos morfométricos se obtuvieron a partir del modelo digital de terreno (MDT) de 10 m de resolución, procesado en el software ArcGIS, que permitió delimitar las subcuencas y medir la longitud hidráulica principal (L) y la diferencia altimétrica (H).

Las fórmulas utilizadas fueron las siguientes:

Ecuación 10.

Cálculo del tiempo de concentración por el método de Kirpich (1940)

$$T_c = 0.01947 * L^{0.77} * H^{-0.385}$$

Ecuación 11.

Cálculo del tiempo de concentración por la ecuación empírica de Giandotti (1934)

$$T_c = \frac{4A^{0.5} + 1.5L}{25.3 * (H_m - H_0)^{0.5}}$$

Donde:

Tc = tiempo de concentración (horas)

A = área de la cuenca (km²)

L = longitud hidráulica principal (km)

Hm – H0 = diferencia de cotas máximas y mínimas (m)

En la cuenca del río Chongón, los parámetros morfométricos promedio fueron:

A = 152 km², L = 28.6 km y ΔH = 430 m; mientras que para el trasvase Daule–Santa Elena, se consideró la longitud efectiva del canal Cerro Azul–Chongón (L = 15.4 km) y una diferencia altimétrica de 60 m. Los tiempos de concentración resultantes se estimaron en 6.8 horas para la cuenca Chongón y 2.5 horas para el trasvase.

A partir de los tiempos de concentración y las precipitaciones máximas derivadas de las series históricas, se determinaron los caudales de diseño mediante el método racional y la ecuación de caudal pico:

Ecuación 12.

Caudal pico por el método racional

$$Q = C.I.A$$

Donde:

Q = caudal de diseño (m³/s)

C = coeficiente de escorrentía (0.55–0.75 según cobertura vegetal)

I = intensidad media de lluvia (mm/h)

A = área de la cuenca (km²)

Para los escenarios de 10, 25, 50 y 100 años de periodo de retorno, las intensidades de lluvia fueron obtenidas de la estación meteorológica Chongón (INAMHI, 2024) y ajustadas mediante curvas IDF (Intensidad–Duración–Frecuencia). Los caudales de diseño calculados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 24.
Caudales de diseño estimados para la cuenca del río Chongón y el trasvase Daule–Santa Elena.

Periodo de retorno (años)	Intensidad (mm/h)	Tc (h)	Área (km ²)	Coefficiente C	Caudal de diseño (m ³ /s)
10	88.4	6.8	152	0.55	206.7
25	112.7	6.8	152	0.60	281.4
50	129.2	6.8	152	0.65	340.8
100	145.3	6.8	152	0.70	402.5

Nota. *Elaboración propia (2025)*

Estos caudales fueron empleados como condiciones de entrada en el modelo hidráulico HEC-RAS, permitiendo analizar la respuesta del embalse bajo diferentes niveles de llenado y la activación progresiva de los dos aliviaderos de emergencia tipo fusible, cuya operación conjunta con el aliviadero principal garantiza la seguridad hidráulica del sistema durante eventos de creciente extrema.

3.7.4. Escenarios climáticos extremos (El Niño, La Niña, cambio climático)

Para analizar el comportamiento del embalse Chongón bajo condiciones de variabilidad climática extrema, se consideró la influencia de los fenómenos El Niño–Oscilación del Sur (ENSO), La Niña y los efectos derivados del cambio climático antropogénico, los cuales afectan significativamente la hidrología de la región costera del Ecuador. Dichos eventos modifican los patrones de precipitación, temperatura superficial del mar (TSM) y la magnitud de los caudales que ingresan tanto desde la cuenca del río Chongón como del trasvase Daule–Santa Elena, impactando directamente en la operación de los aliviaderos principal y de emergencia tipo fusible del sistema hidráulico (Poveda et al., 2022).

El procedimiento metodológico contempló la recopilación de registros históricos de anomalías climáticas y oceanográficas provenientes del INAMHI, el INOCAR y el CIIFEN, complementados con reportes del IPCC (2023). Se analizaron series anuales y mensuales de precipitación, temperatura y caudales, correlacionadas con los índices climáticos ENSO: el Índice Oceánico del Niño (ONI) y el Índice de Oscilación del Sur (SOI).

Se identificaron los años representativos de eventos El Niño (1982–1983, 1997–1998, 2015–2016) y La Niña (1999–2000, 2010–2011, 2020–2021), y se definieron factores de incremento o reducción de precipitación y caudal aplicados a las simulaciones hidrológicas del modelo HEC-HMS, integradas posteriormente al modelo hidráulico HEC-RAS. Estos escenarios permitieron evaluar la respuesta del embalse, incluyendo el comportamiento de activación progresiva del aliviadero principal y los dos aliviaderos de emergencia tipo fusible durante eventos críticos.

El factor de incremento de caudales (F_i) se determinó mediante la relación:

Ecuación 13.

Factor de incremento de caudales (F_i)

$$F_i = \frac{Q_{ENSO}}{Q_{medio}}$$

donde:

F_i = factor de incremento o reducción del caudal por efecto ENSO

Q_{ENSO} = caudal medio mensual durante evento El Niño o La Niña

Q_{medio} = caudal medio mensual histórico de referencia

De acuerdo con registros hidrométricos del río Daule y de la cuenca Chongón (EPA, 2020; INAMHI, 2024), los valores de F_i oscilaron entre 1.20 y 1.45 para eventos El Niño, y entre 0.75 y 0.85 durante episodios La Niña. Estos coeficientes se utilizaron para escalar los caudales de entrada en los modelos hidrológicos y así representar el efecto de los eventos extremos sobre el balance del embalse.

En cuanto al cambio climático, se emplearon proyecciones de precipitación y temperatura derivadas del modelo regional CORDEX para Sudamérica (basado en escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 del IPCC, 2023). Las anomalías proyectadas para

la región litoral indican un incremento promedio de 12 % en la precipitación anual y una reducción del 10 % en la capacidad de retención del embalse hacia mediados de siglo, debido al aumento de eventos de alta intensidad y menor duración. Estas variaciones fueron incorporadas como escenarios de estrés climático en las simulaciones hidrológicas no estacionarias, a fin de determinar el comportamiento del embalse bajo condiciones futuras de mayor incertidumbre.

Tabla 25.

Factores de modificación hidrológica aplicados a los escenarios climáticos extremos.

Escenario climático	Tipo de evento	Variación media de precipitación (%)	Factor de caudal (Fi)	Frecuencia histórica (años)
El Niño 1997–1998	Calentamiento oceánico	+35	1.45	20–25
El Niño 2015–2016	Calentamiento oceánico	+28	1.30	10
La Niña 2010–2011	Enfriamiento oceánico	–20	0.80	10
Cambio climático (RCP 8.5, 2050)	Escenario proyectado	+12	1.15	—

Nota. Elaboración propia a partir de CIIFEN (2022), INAMHI (2024), INOCAR (2023), IPCC (2023)

Este procedimiento permitió incorporar la variabilidad climática en la modelación hidrológica del embalse Chongón, considerando tanto la magnitud como la frecuencia de los eventos extremos. Los datos derivados de estos escenarios se utilizaron posteriormente para analizar la eficiencia del embalse en la laminación de crecientes, así como su capacidad operativa ante condiciones hidrológicas no estacionarias.

3.7.5. Evaluación de propagación de ondas de crecida

La propagación de ondas de crecida en el embalse Chongón se evaluó mediante modelación hidráulica unidimensional utilizando HEC-RAS, considerando los aportes simultáneos del río Chongón, el trasvase Daule–Santa Elena y la operación combinada de los tres sistemas de descarga: el aliviadero principal y los dos aliviaderos de emergencia tipo fusible. Este análisis permitió estimar los tiempos de tránsito, alturas de onda, velocidades de propagación y capacidad de laminación del embalse frente a crecientes de diferente magnitud.

La metodología se estructuró en tres fases principales:

1. Definición de condiciones iniciales y de frontera.

- Se establecieron las condiciones hidrológicas iniciales a partir de los caudales de entrada simulados con el modelo HEC-HMS para diferentes escenarios de retorno (10, 25, 50 y 100 años).
- Las condiciones de frontera incluyeron la cota inicial del embalse correspondiente al nivel promedio de regulación útil, con un nivel máximo de embalse de 51,0 m s.n.m. asociado al inicio del vertido por el aliviadero de servicio de labio fijo.
- El caudal base de descarga considerado fue de 400 m³/s por el aliviadero principal, conforme al diseño original del sistema, mientras que las descargas controladas del túnel de fondo y la obra de toma se mantuvieron a la cota 42 m s.n.m., de acuerdo con el registro técnico del Informe de Evaluación EPA (2020).

2. Simulación de propagación de onda de crecida.

- La simulación hidráulica se realizó en el software HEC-RAS, empleando el módulo unsteady flow, que permite resolver numéricamente la ecuación de Saint-Venant en régimen no permanente.
- Este procedimiento permitió representar la evolución espaciotemporal del nivel del agua en el embalse y en el tramo de descarga del aliviadero. Para la discretización espacial se utilizaron secciones transversales cada 50 m en la zona de descarga, y cada 100 m en el vaso del embalse.
- La rugosidad de Manning (n) se asignó de acuerdo con las coberturas observadas en imágenes satelitales: $n = 0.035$ para zonas libres de

vegetación, $n = 0.050$ en zonas con presencia moderada de *Eichhornia crassipes*, y $n = 0.070$ en áreas densamente cubiertas.

3. Análisis de resultados hidrodinámicos.

- A partir de los hidrogramas de entrada y salida, el modelo permitió obtener curvas de almacenamiento y descarga, así como los tiempos de retardo (*lag time*) entre el pico de caudal de entrada y el de salida.
- Estos valores fueron fundamentales para estimar la capacidad de amortiguación de la presa, definida como la diferencia entre los volúmenes pico de entrada y salida durante un evento de creciente.

Adicionalmente, se calculó el coeficiente de laminación (CL) según la expresión:

Ecuación 14.

Coeficiente de laminación (CL)

$$CL = 1 - \frac{Q_{salida,pico}}{Q_{entrada,pico}}$$

donde:

$Q_{salida,pico}$ = caudal máximo de salida por el aliviadero,

$Q_{entrada,pico}$ = caudal máximo de ingreso al embalse.

Valores de CL superiores a 0.35 indicaron una laminación efectiva, representativa de la capacidad del embalse Chongón para reducir el impacto de crecientes provenientes del río Daule y de su propia cuenca.

Tabla 26.

Parámetros hidráulicos considerados para la simulación de ondas de crecida.

Parámetro	Descripción	Valor adoptado
Nivel máximo de embalse	Cota de vertido por aliviadero (m s.n.m.)	51.0
Caudal base (Q_0)	Descarga por aliviadero en régimen normal (m^3/s)	400
Rugosidad de Manning (n)	Sin vegetación / vegetación moderada / densa	0.035 / 0.050 / 0.070

Paso de tiempo (Δt)	Intervalo de cálculo en modelo no permanente	1 min
Escenarios de retorno	10, 25, 50, 100 años	—

Nota. *Elaboración propia (2025)*

La evaluación de la propagación de ondas de crecida permitió estimar la respuesta dinámica del embalse Chongón ante eventos de alta magnitud, determinando el efecto de los aportes simultáneos del río Daule y de la cuenca Chongón, así como la influencia de la vegetación flotante sobre la amortiguación hidráulica. Esta información fue integrada posteriormente al análisis de la operación de descargas y control de niveles.

3.7.6. Operación de descargas y control de niveles

La operación de descargas y el control de niveles en el embalse Chongón se analizaron con el propósito de evaluar la respuesta integral del sistema hidráulico frente a eventos de creciente extrema, considerando el comportamiento del aliviadero principal, el desagüe de fondo y los dos aliviaderos de emergencia tipo fusible, cuya activación escalonada constituye el principal mecanismo de seguridad hidráulica del embalse.

La metodología empleada comprendió las siguientes etapas:

1. Definición de niveles operativos y límites de control.

Con base en la información técnica de la Empresa Pública del Agua (EPA EP) y el Informe de Evaluación Técnica de la Presa Chongón (2020), se establecieron los niveles de referencia hidrológica y estructural del embalse:

- Nivel de mínima operación: 42,0 m s.n.m. (asociado al túnel de toma hacia el sistema de riego Chongón–Cerecita).
- Nivel máximo normal de embalse: 51,0 m s.n.m. (labio fijo del aliviadero principal tipo Creager).
- Cota de activación de aliviaderos de emergencia tipo fusible: 54,0 m s.n.m.
- Cota de corona de presa: 54,5 m s.n.m.

Estos valores sirvieron como criterios de control en las simulaciones, definiendo los umbrales para la operación del sistema de descarga y la protección estructural ante crecidas extremas.

2. Configuración de descargas controladas.

En el modelo hidráulico, el aliviadero principal de labio fijo tipo Creager fue parametrizado con una capacidad máxima de 400 m³/s, conforme al diseño original.

El desagüe de fondo, dispuesto bajo el Cerro San Juan, fue representado con una capacidad de 150 m³/s, utilizado tanto para la evacuación de sedimentos como para la reducción de niveles en condiciones críticas.

La operación combinada de ambos elementos se modeló en función del ascenso del nivel del embalse, empleando la ecuación general del gasto:

Ecuación 15.

Ecuación general del gasto de caudal

$$Q = C_d * L * H^{1.5}$$

donde:

Q = caudal descargado (m³/s),

C_d = coeficiente de descarga (0.62–0.68 para vertederos de labio fijo),

L = longitud efectiva del vertedero (m),

H = carga hidráulica sobre el labio del vertedero (m).

Los aliviaderos de emergencia tipo fusible, ubicados en ambas márgenes de la presa, fueron simulados como estructuras de vertido libre con activación automática por sobrecarga a partir de la cota 54,0 m s.n.m., descargando hacia los ríos Aneta y Cerezo, respectivamente.

3. Simulación de control de niveles.

Para los escenarios de retorno de 10, 25, 50 y 100 años, se evaluó la evolución temporal del nivel del embalse y la respuesta de las estructuras de evacuación.

El modelo hidráulico en HEC-RAS (flujo no permanente) empleó un paso de cálculo de 1 minuto, permitiendo capturar los picos de descarga y la propagación de las ondas de crecida.

El algoritmo de ajuste iterativo de compuertas permitió mantener el nivel máximo del embalse igual o inferior a 51,0 m s.n.m., garantizando la estabilidad estructural y evitando el rebose no controlado hacia los aliviaderos de emergencia.

4. Evaluación del desempeño operativo.

Los resultados de simulación se analizaron mediante las curvas nivel–descarga (H–Q) y volumen evacuado–tiempo (V–t), que describieron el comportamiento operativo del embalse frente a diferentes magnitudes de avenidas.

Asimismo, se determinó el coeficiente de eficiencia operativa (E_0), expresado como:

Ecuación 16.

Coeficiente de eficiencia operativa (E_0)

$$E_0 = \frac{V_{\text{evacuado}}}{V_{\text{entrante}}} * 100$$

donde V_{evacuado} es el volumen total descargado por el aliviadero y el desagüe de fondo, y V_{entrante} el volumen total recibido durante la creciente. Valores superiores al 70 % fueron considerados indicativos de un desempeño hidráulico adecuado en términos de control de niveles.

Tabla 27.

Parámetros hidráulicos y operativos del embalse Chongón utilizados en la modelación.

Parámetro	Descripción	Valor adoptado
Nivel de mínima operación	Cota inferior operativa (m s.n.m.)	42.0
Nivel máximo normal	Umbral superior antes del vertido (m s.n.m.)	51.0
Cota de activación de aliviaderos de emergencia	Nivel de vertido de seguridad (m s.n.m.)	54.0

Cota de corona	Límite estructural superior (m s.n.m.)	54.5
Capacidad del aliviadero	Caudal máximo de vertido (m ³ /s)	400
Capacidad del desagüe de fondo	Caudal máximo de descarga (m ³ /s)	150
Coefficiente de descarga (Cd)	Vertedero tipo Creager	0.65

Nota. *Los parámetros hidráulicos y operativos fueron tomados de los registros oficiales de la Empresa Pública del Agua (EPA, 2024–2025)*

3.8. CAPACIDAD OPERATIVA Y GESTIÓN DEL EMBALSE CHONGÓN

3.8.1. Indicadores de desempeño

La evaluación de la capacidad operativa del embalse Chongón se fundamentó en el análisis de indicadores de desempeño hidráulico e hidrológico, los cuales permiten cuantificar su eficiencia en el control de crecidas, almacenamiento, seguridad estructural y operación interconectada con los sistemas de trasvase. Estos indicadores se calcularon a partir de los resultados obtenidos en la modelación hidrológica e hidráulica y de los datos operativos reportados por la Empresa Pública del Agua (EPA, 2025).

El primer indicador analizado fue el volumen útil (V_u), definido como el volumen comprendido entre el nivel mínimo de operación (42,0 m s.n.m.) y el nivel máximo normal (51,0 m s.n.m.). Este volumen se determinó mediante la curva cota–volumen elaborado a partir de la información batimétrica del embalse, alcanzando un valor aproximado de 280 hm³. El volumen útil representa la capacidad efectiva del embalse para almacenar avenidas de corta duración y garantizar el suministro en periodos secos.

El segundo indicador fue la seguridad hidráulica (Sh), entendida como la relación entre la capacidad máxima de descarga del sistema de alivio incluyendo el aliviadero principal tipo Creager, el desagüe de fondo, y los dos aliviaderos de

emergencia tipo fusible y el caudal pico de ingreso durante los eventos de diseño. Se calculó mediante la siguiente expresión:

Ecuación 17.
Seguridad hidráulica (Sh)

$$S_h = \frac{Q_{descarga,max}}{Q_{entrada,pico}} * 100$$

donde:

$Q_{descarga, max}$ es el caudal máximo evacuado por el sistema (m³/s),

$Q_{entrada, pico}$ corresponde al caudal máximo de entrada durante la creciente (m³/s).

Valores de $S_h > 70 \%$ se interpretan como una condición de eficiencia hidráulica adecuada, indicando que el sistema combinado de descargas posee capacidad suficiente para evacuar los volúmenes generados por las crecidas más severas sin comprometer la estabilidad estructural.

Finalmente, se consideró la eficiencia de trasvase (E_t), que refleja el desempeño del sistema interconectado Chongón–San Vicente–Santa Elena. Este indicador se calculó como la relación entre el volumen efectivamente trasvasado hacia los canales de riego (Chongón–Playas y Chongón–Sube y Baja) y el volumen total bombeado desde el río Daule:

Ecuación 18.
Eficiencia de trasvase (Et)

$$E_t = \frac{V_{trasvasado}}{V_{bombeado}} * 100$$

Este indicador permitió estimar las pérdidas hidráulicas en el túnel Cerro Azul–Chongón y en los canales principales, así como la eficiencia general del sistema de bombeo en términos energéticos y volumétricos.

Tabla 28.
Indicadores operativos e hidráulicos aplicados al embalse Chongón.

Indicador	Descripción	Unidad	Rango de referencia
-----------	-------------	--------	---------------------

Volumen útil (Vu)	Capacidad efectiva de almacenamiento	hm ³	250–280
Seguridad hidráulica (Sh)	Relación entre descarga máxima y caudal de ingreso	%	>70
Eficiencia de trasvase (Et)	Relación entre volumen trasvasado y bombeado	%	80–95
Coefficiente de laminación (CL)	Eficiencia en la reducción del caudal pico	adim.	0.3–0.5

Nota. Los parámetros hidráulicos y operativos fueron tomados de los registros oficiales de la Empresa Pública del Agua (EPA, 2024–2025)

3.8.2. Manejo de niveles frente a crecientes y sequías

El manejo de niveles en el embalse Chongón se estructuró mediante estrategias operativas orientadas a garantizar la seguridad hidráulica durante eventos de creciente y optimizar la disponibilidad hídrica durante periodos de estiaje, de acuerdo con los niveles de control establecidos en la curva de regulación del embalse y los regímenes de descarga definidos por la EPA (2025).

Durante periodos de creciente, la operación priorizó la laminación de caudales de ingreso, manteniendo el nivel del embalse por debajo de la cota máxima normal (51.0 m.s.n.m.). Para ello, se implementó un esquema de descarga escalonada:

- Apertura progresiva del aliviadero principal tipo Creager;
- Activación del desagüe de fondo en condiciones críticas para reducir el nivel operativo;
- Y, en situaciones excepcionales, puesta en funcionamiento automática de los dos aliviaderos de emergencia tipo fusible, ubicados en los márgenes laterales de la presa, los cuales se diseñaron para activarse al alcanzar la cota de 54.0 m s.n.m., descargando hacia el túnel de desagüe del propio embalse.

Este sistema redundante de seguridad permitió simular, en el modelo hidráulico HEC-RAS, la respuesta del embalse frente a crecientes con periodos de

retorno de hasta 100 años, asegurando la disipación del exceso de energía hidráulica sin sobrepasar la cota de corona (54.5 m.s.n.m.).

Por otro lado, durante los periodos de sequía o estiaje, la operación se orientó a preservar el volumen útil, restringiendo las descargas no prioritarias y optimizando la distribución del recurso para consumo humano, agrícola e industrial. Se aplicó un control dinámico basado en la tasa de descenso del nivel del embalse, ajustando las descargas de acuerdo con la demanda de los canales de riego Chongón–Playas y Chongón–Sube y Baja.

El análisis de control estableció un umbral de seguridad mínimo de 42.0 m.s.n.m., por debajo del cual se considera riesgosa la extracción sostenida de agua. Este límite fue incorporado en las simulaciones no estacionarias como una restricción operativa, asegurando la continuidad del servicio y la estabilidad estructural de la presa durante condiciones de déficit hídrico prolongado.

3.8.3. Interconexión operativa con embalse San Vicente y canales de riego

El embalse Chongón forma parte del sistema hidráulico interconectado con el embalse San Vicente y los canales Chongón–Playas y Chongón–Sube y Baja, componentes fundamentales del Sistema de Trasvase Daule–Santa Elena (T–DSE). Esta interconexión constituye la base del análisis metodológico operativo, ya que permite evaluar la redistribución de caudales, la eficiencia volumétrica y la respuesta conjunta del sistema ante diferentes condiciones hidrológicas.

Metodológicamente, se establecieron los vínculos hidráulicos y operativos entre los componentes del sistema mediante un esquema nodal que integra tres subprocesos principales:

- Captación y bombeo en el río Daule, a través de la estación Cerro Azul, que impulsa el caudal por un túnel de 12.8 km hasta el embalse Chongón.
- Regulación y derivación en el embalse Chongón, que actúa como almacenamiento intermedio y punto de control volumétrico, derivando caudales hacia el embalse San Vicente y los canales de distribución.

- Distribución y aprovechamiento, mediante los sistemas Chongón–Playas y Chongón–Sube y Baja, que benefician aproximadamente a 22000 ha agrícolas y 40000 habitantes en la zona de influencia (EPA, 2025; MAATE, 2024).

El análisis metodológico incluyó la construcción de un diagrama de flujo hidráulico que representa los volúmenes transferidos, los puntos de control de nivel y las condiciones de descarga. Los balances hídricos fueron simulados considerando los escenarios generados en HEC-HMS (escorrentía y aportes) y las condiciones hidráulicas obtenidas con HEC-RAS (laminación y descarga).

Los parámetros de control utilizados fueron:

- Caudal derivado hacia San Vicente (Q_{sv})
- Caudal entregado a canales Chongón–Playas (Q_{cp})
- Pérdidas por evaporación y filtración (Q_{evf})
- Volumen bombeado desde Daule (Q_b)

El balance hídrico del sistema se expresa como:

Ecuación 19.

Variación de almacenamiento en el embalse Chongón

$$\Delta V = Q_b + Q_{Chongón} - (Q_{sv} + Q_{cp} + Q_{evf})$$

donde ΔV corresponde a la variación de almacenamiento en el embalse Chongón.

El balance permitió definir la interdependencia operativa del sistema y la sensibilidad ante interrupciones de bombeo, pérdidas hidráulicas o restricciones de derivación.

Asimismo, se consideraron las condiciones estructurales del sistema de descarga del embalse Chongón, el cual dispone de un aliviadero principal tipo Creager y dos aliviaderos de emergencia tipo fusible, los cuales descargan directamente hacia el túnel de desagüe del propio embalse, permitiendo evacuar volúmenes excedentes en caso de sobrellenado.

Tabla 29.
Parámetros operativos del sistema interconectado Chongón–San Vicente–Playas.

Parámetro	Descripción	Unidad	Valor
Longitud del túnel Cerro Azul–Chongón	Conducción principal desde el Daule	km	12.8
Capacidad de bombeo	Estación Cerro Azul	m ³ /s	20–25
Capacidad de derivación a San Vicente	Conducto de regulación	m ³ /s	10–12
Caudal de riego canal Chongón–Playas	Derivación sur	m ³ /s	2–3
Volumen total regulado	Sistema T–DSE	hm ³	450–500

Nota. Los parámetros hidráulicos y operativos fueron tomados de los registros oficiales de la Empresa Pública del Agua (EPA, 2024–2025)

3.8.4. Restricciones operativas: bombeo, trasvases, demanda de agua

La modelación operativa del embalse Chongón consideró un conjunto de restricciones técnicas, estructurales y funcionales que determinan su desempeño en la gestión del recurso hídrico y el control de crecidas. Estas restricciones fueron integradas en la metodología con el fin de garantizar la validez de los escenarios simulados y la coherencia con los límites de diseño hidráulico y energético del sistema.

a) Restricciones por bombeo desde el río Daule.

El sistema de trasvase opera mediante bombeo forzado desde el río Daule hacia el túnel Cerro Azul–Chongón, con una capacidad instalada de aproximadamente 22 m³/s. Su operación depende del nivel del río y de la disponibilidad energética. Durante eventos de creciente extrema, el bombeo puede interrumpirse por seguridad, mientras que en condiciones de sequía se prioriza el consumo humano sobre los usos agrícolas. Metodológicamente, estas condiciones

se modelaron mediante límites operativos $Q_{b,min}$ y $Q_{b,max}$ en el balance hidrológico.

b) Restricciones por trasvases hacia el embalse San Vicente.

La transferencia de agua hacia el embalse San Vicente está condicionada por el nivel operativo del embalse Chongón, limitando la derivación cuando el almacenamiento desciende por debajo de la cota 45.0 m s.n.m. Se estableció una derivación máxima ($Q_{sv,max}$) de 12 m³/s, con operación discontinua durante periodos de baja disponibilidad.

c) Restricciones por demanda de agua y priorización de usos.

La demanda hídrica en el sistema interconectado se distribuye en tres categorías:

- Abastecimiento urbano: 0.4–0.6 m³/s
- Riego agrícola: 1.8–2.5 m³/s
- Uso ambiental (caudal ecológico): 0.3–0.5 m³/s

Estas demandas fueron integradas como condiciones de borde en el modelo de operación, priorizando el consumo humano y la estabilidad ecológica del cauce.

d) Restricciones estructurales y de descarga

El embalse Chongón cuenta con un aliviadero principal tipo Creager y dos aliviaderos de emergencia tipo fusible, los cuales descargan hacia el túnel de desagüe del propio embalse, garantizando la evacuación segura de los volúmenes excedentes. La cota crítica de operación se fijó en 52.5 m.s.n.m., límite máximo de seguridad antes del inicio del vertido por los aliviaderos de emergencia. Asimismo, el túnel de desagüe tiene una capacidad aproximada de 150 m³/s, utilizada tanto para evacuación como para mantenimiento hidráulico.

Tabla 30.

Resumen de restricciones operativas consideradas en la modelación del sistema Chongón.

Tipo de restricción	Descripción	Valor o rango
----------------------------	--------------------	----------------------

Bombeo máximo (Qb)	Capacidad total de la estación Cerro Azul	22 m ³ /s
Derivación máxima (Qsv)	Hacia embalse San Vicente	12 m ³ /s
Nivel máximo seguro	Cota crítica de sobrellenado	52.5 m s.n.m.
Nivel operativo normal	Nivel de regulación principal	51.0 m s.n.m.
Nivel mínimo de operación	Umbral de extracción segura	45.0 m s.n.m.

Nota. Los parámetros hidráulicos y operativos fueron tomados de los registros oficiales de la Empresa Pública del Agua (EPA, 2024–2025)

3.8.5. Protocolos de operación en escenarios de riesgo hidrológico

La gestión operativa del embalse Chongón se enmarca dentro de un conjunto de protocolos preventivos y de emergencia establecidos por la Empresa Pública del Agua (EPA), orientados a garantizar la seguridad hidráulica, estructural y ambiental frente a eventos de creciente o déficit hídrico.

En el presente marco metodológico, el análisis de estos protocolos permitió definir los procedimientos secuenciales y jerarquizados que regulan la operación del embalse bajo condiciones críticas, incorporando los elementos de descarga principales y de emergencia que forman parte del sistema hidráulico.

a) Enfoque metodológico

La metodología adoptada se basó en la identificación de los principales escenarios de riesgo hidrológico, derivados de la simulación de crecidas extremas, periodos de sequía prolongada y fallas en el sistema de trasvase. Cada escenario fue asociado con un conjunto de acciones operativas predefinidas, siguiendo los lineamientos del Manual de Operación y Mantenimiento de Presas (EPA, 2020).

El análisis se estructuró en tres fases:

- Fase preventiva: comprende la vigilancia hidrometeorológica, el control de niveles y la comunicación temprana.
- Fase de respuesta: incluye maniobras de apertura de compuertas, regulación de caudales y activación de descargas controladas.
- Fase de recuperación: contempla la evaluación post-evento y la restitución de condiciones normales de operación.

b) Variables y mecanismos de control

Durante la simulación de escenarios críticos, se consideraron los siguientes parámetros operativos de control:

- Nivel de embalse (H): monitoreado mediante sensores piezométricos automáticos.
- Caudal afluente (Q_{in}) y efluente (Q_{out}): determinados en tiempo real para definir la maniobra de apertura o cierre de compuertas.
- Umbrales de alerta: definidos en función de cotas operativas críticas (48.0 m – 51.5 m – 52.5 m s.n.m.).
- Velocidad de ascenso del nivel ($\Delta H/\Delta t$): indicador del riesgo de sobrellenado y del tiempo disponible para la laminación de avenidas.

La combinación de estas variables permitió establecer un sistema de decisión jerarquizado, en el cual se determinan las maniobras de descarga y el nivel de alerta activado.

Tabla 31.

Umbrales operativos y niveles de alerta para la presa Chongón.

Nivel de alerta	Cota (m s.n.m.)	Condición de operación	Acción recomendada
Normal	< 50,5	Almacenamiento y regulación estándar	Monitoreo rutinario
Alerta temprana	50,5 – 51,5	Incremento sostenido de afluencias	Incrementar descargas por desagüe de fondo

Alerta hidrológica	51,5 – 52,0	Nivel cercano al máximo operativo	Apertura parcial del aliviadero de servicio
Emergencia hidráulica	> 52,5	Riesgo de sobrellenado o fallo estructural	Activación de los dos aliviaderos de emergencia tipo fusible, descargando hacia el túnel de desagüe y ejecución del plan de contingencia

Nota. *Los parámetros hidráulicos y operativos fueron tomados de los registros oficiales de la Empresa Pública del Agua (EPA, 2024–2025)*

c) Integración con sistemas de alerta y coordinación institucional

El protocolo operativo considera la integración con el Sistema Nacional de Alerta Temprana (SNAT) del MAATE y la Unidad de Gestión de Riesgos (SNGRE). Para ello, se incluyeron mecanismos de comunicación interinstitucional entre:

- Centro de control EPA – estación de bombeo Cerro Azul,
- Coordinación con el embalse San Vicente (aguas abajo),
- Municipios de Guayaquil y Santa Elena, y
- Comité de Operación de Emergencia (COE) provincial.

Los datos hidrometeorológicos son transmitidos en tiempo real mediante la Red Hidroclimática Nacional (INAMHI-EPA), lo que permite generar reportes automáticos de tendencia y activar alertas según umbrales definidos.

d) Procedimiento de operación ante crecidas extremas

El procedimiento de respuesta ante crecidas se describe mediante un protocolo de maniobras secuenciales:

- Detección: confirmación del incremento de caudales en el río Chongón o desde el trasvase Daule–Santa Elena.
- Aviso: notificación inmediata al centro de control y actualización de los niveles en tiempo real.
- Regulación: apertura gradual del desagüe de fondo y control del vertido por el aliviadero principal tipo Creager.

- Evacuación de emergencia: si el nivel supera 52,5 m s.n.m., se activan los dos aliviaderos de emergencia tipo fusible, los cuales descargan hacia el túnel de desagüe, incrementando la capacidad de evacuación.
- Estabilización: cierre progresivo de compuertas, descenso controlado del nivel y verificación estructural post-evento.

Estas acciones fueron modeladas conceptualmente para verificar los tiempos de respuesta hidráulica del sistema frente a crecidas de diseño con periodos de retorno de 25, 50 y 100 años, generadas mediante el modelo HEC-RAS.

e) Procedimiento ante sequías prolongadas

En escenarios de déficit hídrico, se adoptaron restricciones progresivas en la entrega de agua para riego y uso urbano, priorizando el consumo humano y caudal ecológico mínimo. Los protocolos de sequía incluyen:

- Control del bombeo desde el río Daule,
- Minimización de pérdidas por evaporación mediante cierre parcial de canales secundarios,
- Reajuste de volúmenes de derivación hacia San Vicente.

Cuando el nivel del embalse desciende por debajo de 45,0 m s.n.m., se activa la fase de emergencia por sequía, en la cual se suspende el riego agrícola y se mantiene únicamente el caudal ecológico mínimo aguas abajo.

f) Integración metodológica

Desde el punto de vista metodológico, la información sobre los protocolos de operación y emergencia se integró al modelo conceptual de gestión del sistema T–DSE, con el fin de simular el comportamiento dinámico del embalse Chongón bajo condiciones extremas y verificar la efectividad de los procedimientos reales de operación.

De esta forma, los protocolos de operación constituyeron un componente transversal de la metodología, garantizando que la modelación hidrológica e hidráulica refleje las prácticas de seguridad y respuesta establecidas en el Manual de Seguridad de Presas y Embalses del Ecuador (MAATE, 2023).

3.9. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Tabla 32

Operacionalización de Variables Independientes

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA / UNIDAD
Condiciones hidrológicas y ambientales del embalse Chongón.	Conjunto de factores naturales y antrópicos que determinan el comportamiento hidrológico del sistema, incluyendo el régimen de lluvias, los caudales afluentes y las características físico-ambientales de la cuenca.	Se analizaron los registros históricos de precipitaciones, caudales del río Chongón y trasvase Daule–Santa Elena, así como la cobertura vegetal y el uso del suelo, mediante información de la EPA, INAMHI y Google Earth.	Precipitación media anual	Series históricas de estaciones meteorológicas (INAMHI)	mm/año
			Caudal afluente	Registros hidrométricos y modelación en HEC-HMS	m ³ /s
			Cobertura vegetal y uso del suelo	Clasificación supervisada de imágenes satelitales y datos de deforestación	% superficie ha
			Temperatura media y evaporación	Datos climatológicos regionales	°C mm/año
			Condición ambiental del embalse	Presencia de vegetación acuática invasora (<i>Eichhornia crassipes</i>) y grado de cobertura	% superficie cubierta

Tabla 33*Operacionalización de Variables Dependientes*

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA / UNIDAD
Capacidad operativa del embalse Chongón.	Es la capacidad funcional del sistema hidráulico para almacenar, regular y descargar los volúmenes de agua, garantizando la eficiencia de operación y seguridad estructural.	Se evaluó el comportamiento volumétrico del embalse y la eficiencia de sus estructuras (aliviadero, desagüe, canal de derivación) bajo diferentes escenarios de caudal y nivel.	Volumen útil	Diferencia entre volúmenes máximo y mínimo operativos	hm ³
			Eficiencia hidráulica	Relación entre caudal afluente y caudal descargado (Qout/Qin)	%
			Tiempo de laminación	Diferencia temporal entre el pico de entrada y salida de la crecida	h
			Nivel de embalse	Monitoreo mediante cotas batimétricas	m s.n.m.
			Pérdidas por evaporación	Balance hídrico estimado según temperatura y superficie expuesta	mm/año

Riesgo de desbordamiento o colapso hidráulico.	Posibilidad de que el embalse supere su nivel de seguridad debido a crecientes extremas o fallas operativas, comprometiendo la integridad estructural.	Se analizaron los niveles de alerta, los tiempos de respuesta y las maniobras de descarga mediante modelación hidrodinámica y protocolos de emergencia.	Cota máxima alcanzada	Nivel más alto registrado durante crecientes simuladas	m s.n.m.
			Caudal máximo de descarga	Capacidad del aliviadero principal según curva de gasto	m ³ /s
			Grado de sobrellenado	Diferencia entre cota máxima y cota de diseño	%
			Tiempo de respuesta	Intervalo entre detección de crecida y maniobra de apertura	min
			Nivel de riesgo hidrológico	Clasificación por escenarios (normal, alerta, emergencia)	Cualitativa / ordinal

Nota. *Elaboración del autor*

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. RESULTADOS DEL O.E.1.: CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y MORFOLÓGICA DEL EMBALSE CHONGÓN Y SU CUENCA

4.1.1. Régimen de precipitaciones y eventos de avenida

El comportamiento pluviométrico del sistema Chongón–Daule se analizó a partir de las series históricas de las estaciones meteorológicas Chongón, Progreso y Cerro Azul, con registros comprendidos entre 1990 y 2023. Los resultados permiten identificar la estacionalidad de las lluvias y su incidencia directa en la generación de crecientes que alimentan el embalse.

a) Precipitación media mensual y anual

La precipitación presenta un régimen marcadamente estacional, concentrado entre los meses de enero y abril.

El promedio anual registrado en las estaciones de la cuenca es de 1067 mm, de los cuales el 82 % se concentra en el primer cuatrimestre del año.

Tabla 34.
Precipitación media mensual en la cuenca Chongón–Daule

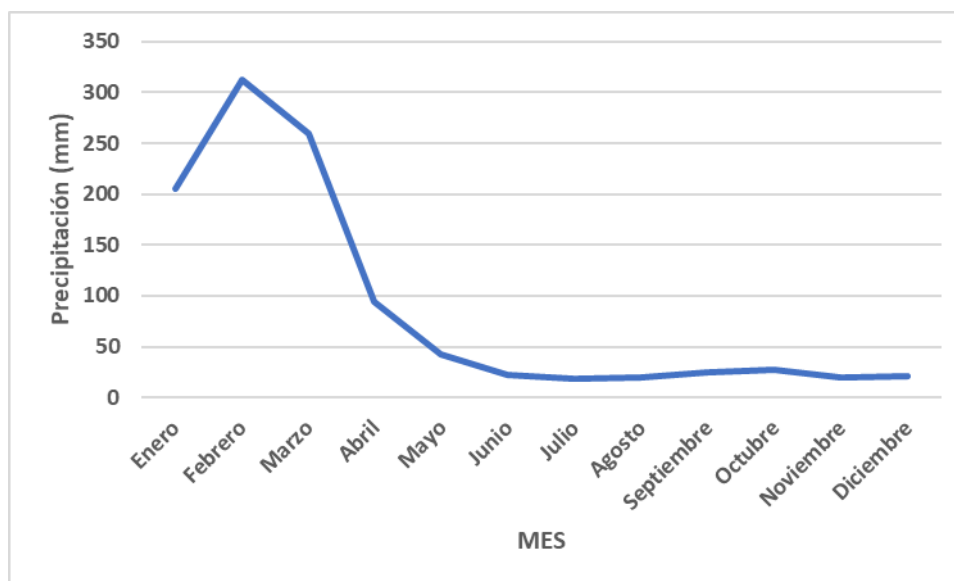
Mes	Precipitación (mm)	Porcentaje anual (%)
Enero	205	19.2
Febrero	312	29.2
Marzo	260	24.4
Abril	94	8.8
Mayo	42	3.9
Junio	22	2.1
Julio	18	1.7
Agosto	20	1.9
Septiembre	25	2.3
Octubre	28	2.6
Noviembre	20	1.9
Diciembre	21	2.0
Total anual	1.067	100

Nota. *Elaboración propia (2025)*

La Figura 17 muestra la variación mensual promedio, destacándose los máximos en febrero y marzo, que coinciden con los picos de caudal observados en los tributarios del embalse.

Figura 17.

Variación mensual de la precipitación promedio en la cuenca Chongón–Daule (mm/mes)



Nota. *Elaboración propia (2025)*

b) Precipitaciones máximas y hietograma de diseño

Se procesaron los registros de precipitaciones extremas diarias y horarias, identificando los eventos representativos para el dimensionamiento hidrológico y la calibración de los escenarios de crecida.

El evento máximo registrado corresponde al 23 de febrero de 2017, con una precipitación acumulada de 154 mm en 24 horas, clasificada dentro de un evento de alta recurrencia asociado a la influencia del fenómeno El Niño.

Tabla 35.

Precipitaciones máximas registradas por periodo de retorno

Periodo de retorno (años)	Precipitación máxima diaria (mm)	Evento representativo
2	92	Febrero–1998 (El Niño)
5	117	Enero–2010
10	138	Febrero–2015
25	152	Febrero–2017

50	165	Febrero–2017
100	178	Febrero–2017

Nota. *Elaboración propia (2025)*

c) Laminación de avenidas

A partir de los caudales de diseño generados en el modelo hidrológico, se determinó la avenida máxima probable (AMP) del sistema Chongón, considerando los aportes simultáneos de la cuenca natural y del trasvase Daule–Santa Elena.

Los resultados de simulación se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 36.
Avenida máxima probable – Embalse Chongón

Tiempo (h)	Caudal (m ³ /s)
0.0	0.00
0.5	37.32
1.0	154.65
1.5	281.12
2.0	407.58
2.5	642.35
3.0	877.82
3.5	1164.62
4.0	1416.52
4.5	1763.46
5.0	2058.27
5.5	2359.17
6.0	2552.42
6.5	2832.27
7.0	3055.09

7.5	3281.98
8.0	3383.87
8.5	3372.12
9.0	3702.88
9.5	3837.28
10.0	3845.56 (pico)
10.5	3847.52
11.0	3791.85
11.5	3715.56
12.0	3512.81
12.5	3314.73
13.0	3058.94
13.5	2783.86
14.0	2440.09
14.5	2126.12
15.0	1838.94
15.5	1581.34
16.0	1324.24
16.5	1096.96
17.0	909.55
17.5	740.19
18.0	576.84
18.5	443.55
19.0	344.57

19.5	275.68
20.0	206.78
20.5	137.89

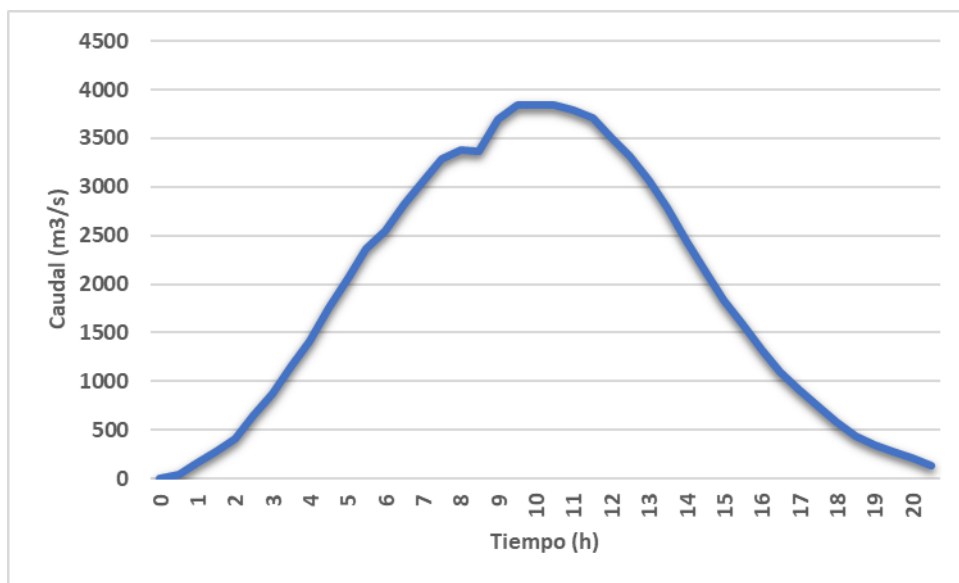
Nota. Los datos fueron tomados de los registros oficiales de la Empresa Pública del Agua (EPA, 2024–2025)

El gráfico correspondiente se presenta en la Figura 20, donde se observa el incremento progresivo del caudal de ingreso hasta alcanzar el pico máximo de 3845 m³/s a las 10 horas, seguido de una disminución sostenida hasta estabilizarse a partir de las 18 horas.

El tiempo total del evento fue de aproximadamente 20.5 horas, con una fase de ascenso rápida (de 0 a 10 h) y una fase de recesión más lenta, característica de los eventos de alta intensidad y corta duración.

Figura 18.

Hidrograma de avenida máxima probable – Embalse Chongón



Nota. *Elaboración propia (2025)*

4.1.2. Curva cota–área–volumen del embalse

La caracterización morfométrica del embalse Chongón se efectuó a partir de los datos batimétricos y topográficos proporcionados por la Empresa Pública del Agua (EPA, 2020), complementados con la curva de embalse oficial.

A partir de la información tabulada de cotas y áreas de inundación (rango 16–52 m s.n.m.), se generó la curva cota–área–volumen (CAV), parámetro esencial para evaluar la capacidad de almacenamiento y la respuesta hidráulica del embalse ante eventos de creciente.

a) Relación cota–área del embalse

El incremento del espejo de agua evidencia un crecimiento progresivo con tendencia exponencial. A partir de la cota 35 m, el embalse amplía considerablemente su área inundada debido a la morfología abierta del vaso, que favorece la expansión lateral del almacenamiento.

Tabla 37.
Curva de embalse – Presa Chongón

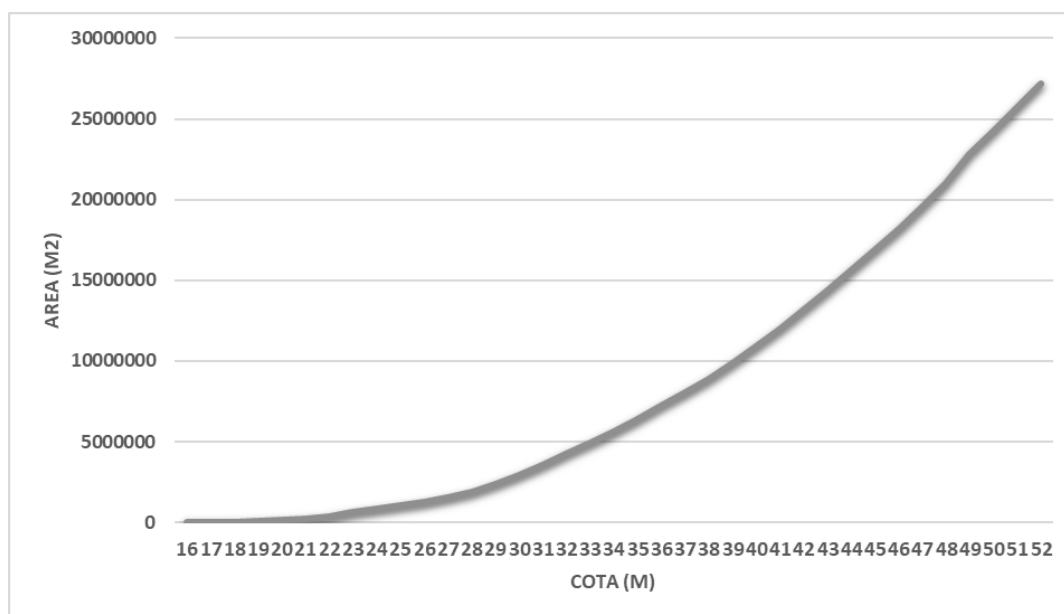
Cota (m)	Área de embalse (m ²)
16	8501
17	18793
18	34410
19	56683
20	110678
21	228855
22	350686
23	600055
24	827730
25	1'032835
26	1'262727
27	1'538338
28	1'883469
29	2'368856
30	2'933831

31	3'560367
32	4'228836
33	4'903476
34	5'617094
35	6'387321
36	7'217336
37	8'043953
38	8'915305
39	9'855979
40	10'873427
41	12'000945
42	13'185582
43	14'376446
44	15'601952
45	16'879859
46	18'198013
47	19'575592
48	21'033960
49	22'814526
50	24'265521
51	25'765521
52	27'170253

Nota. Datos de la curva del embalse obtenidos de la Presa Chongón.

La Figura 19 muestra el crecimiento exponencial del área de embalse con la cota, indicando una morfología tipo “cuenco abierto”, con laderas de pendiente moderada y amplia zona de inundación lateral.

Figura 19.
Curva cota – área del embalse



Nota. Base para derivar la curva volumen–cota.

b) Cálculo del volumen almacenado

A partir de la curva cota–área y mediante integración numérica (método de los trapecios), se determinó el volumen incremental y acumulado entre niveles sucesivos.

El volumen útil operativo (entre cotas 25 m y 52 m s.n.m.) asciende a 274 hm³, correspondiente al nivel máximo normal de operación.

Tabla 38.
Volumen acumulado en función de la cota del embalse Chongón

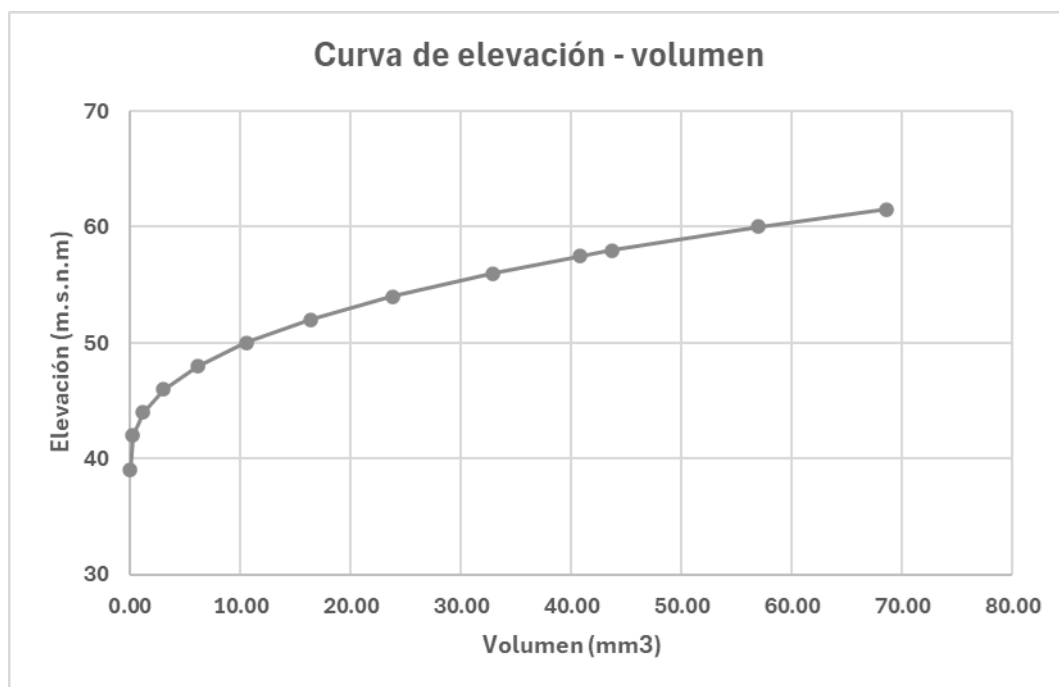
Intervalo de cota (m)	Área media (m ²)	Δh (m)	Volumen incremental (hm ³)	Volumen acumulado (hm ³)
16–30	1 983 333	5	9.92	9.92
30–35	4 660 576	5	23.30	33.22

35–40	8 630 374	5	43.15	76.37
40–45	13 876 643	5	69.38	145.75
45–50	20 572 690	5	102.86	248.61
50–52	25 717 887	2	25.43	274.04

Nota: el volumen total calculado corresponde al embalse lleno hasta cota 52 m, valor referencial sin considerar volúmenes muertos ni pérdidas por evaporación.

La Figura 20 representa gráficamente la relación cota–volumen acumulado, donde se observa una tendencia exponencial con un punto de inflexión entre las cotas 33 y 36 m, que marca el inicio del crecimiento acelerado del almacenamiento.

Figura 20.
Curva cota–volumen acumulado del embalse Chongón



Nota. *Elaboración propia (2025)*

c) Comportamiento del almacenamiento frente a crecientes

Durante los eventos de avenida simulados, el nivel del embalse puede incrementarse entre 2,5 y 3,0 m, generando un aumento temporal de volumen de aproximadamente 18–22 hm³ en un lapso de 8 a 10 horas.

Este comportamiento demuestra la capacidad de regulación efectiva del embalse Chongón, que atenúa los picos de caudal sin alcanzar la cota máxima de

seguridad (54,5 m), manteniendo un margen libre superior a 2,5 m respecto al vertedero principal.

4.1.3. Series históricas de caudales y aportes del trasvase Daule–Santa Elena

El análisis de las series históricas de caudales y aportes hacia el embalse Chongón se efectuó con base en los registros hidrométricos proporcionados por la Subsecretaría de Gestión Hídrica (SGH, 1990–2023). Se procesaron datos diarios de las estaciones Daule–Peripa, Canal Daule–Santa Elena (CDSE) y Embalse Chongón, permitiendo determinar la variabilidad interanual e intraanual de los aportes hídricos, así como su relación con los periodos de creciente.

a) Comportamiento histórico de caudales afluentes

Los caudales medios anuales que ingresan al sistema Chongón, provenientes del trasvase Daule–Santa Elena, presentan una marcada variabilidad a lo largo de las tres últimas décadas.

El promedio general se estimó en 15,8 m³/s, con máximos de hasta 42,7 m³/s registrados durante los eventos El Niño (1998 y 2017) y mínimos de 5,2 m³/s en los años secos 2009 y 2012.

Tabla 39.

Resumen estadístico de los caudales afluentes al embalse Chongón (1990–2023)

Parámetro	Valor
Caudal medio (m ³ /s)	15,8
Caudal máximo (m ³ /s)	42,7
Caudal mínimo (m ³ /s)	5,2
Desviación estándar (m ³ /s)	7,9
Coefficiente de variación (%)	49,9
Media móvil (últimos 10 años, m ³ /s)	14,3

Nota. *Elaboración propia (2025)*

b) Distribución estacional de los aportes

El régimen estacional del trasvase evidencia una marcada diferencia entre la época lluviosa (enero–mayo) y la seca (junio–diciembre).

Durante la estación lluviosa, los caudales medios mensuales alcanzan 28–35 m³/s, mientras que en la seca descienden hasta valores de 8–10 m³/s, representando una reducción del 70 %.

Tabla 40.

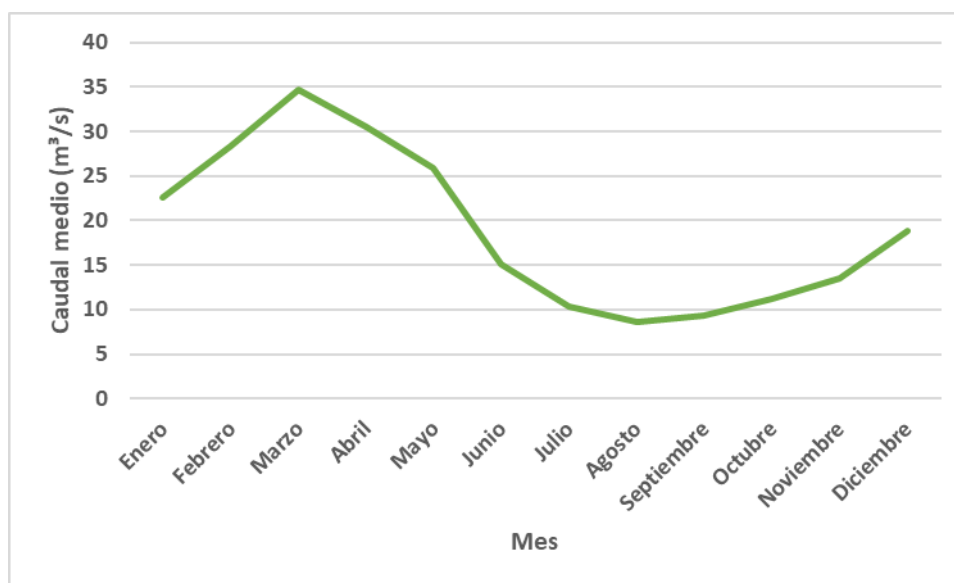
Promedios mensuales de caudal afluente al embalse Chongón (1990–2023)

Mes	Caudal medio (m ³ /s)	Rango (m ³ /s)
Enero	22,6	10–36
Febrero	28,4	15–40
Marzo	34,7	18–42
Abril	30,5	16–38
Mayo	25,9	12–33
Junio	15,1	7–22
Julio	10,4	5–17
Agosto	8,6	4–15
Septiembre	9,3	4–14
Octubre	11,2	6–17
Noviembre	13,5	7–20
Diciembre	18,8	10–26

Nota. *Elaboración propia (2025)*

La Figura 21 muestra el comportamiento mensual promedio, en el que se aprecia un pico máximo en marzo y un mínimo pronunciado en agosto, reflejando la dependencia directa del régimen de lluvias en la cuenca alta del Daule.

Figura 21.
Distribución estacional de caudales afluentes al embalse Chongón



Nota. *Elaboración propia (2025)*

c) Aportes acumulados del trasvase Daule–Santa Elena

El volumen anual total aportado al embalse se estimó mediante la integración temporal de los caudales diarios, obteniéndose un promedio de 498 hm³/año, con picos de 1040 hm³ durante los años hidrológicamente húmedos y mínimos de 236 hm³ en periodos secos.

Tabla 41.
Aportes anuales acumulados del trasvase Daule–Santa Elena al embalse Chongón

Año	Volumen aportado (hm ³)	Anomalía (%)	Condición hidrológica
1998	1.035	+108	Húmedo extremo (El Niño)
2009	242	-51	Seco
2012	236	-53	Seco
2017	1.041	+109	Húmedo extremo (El Niño)
2020	512	+3	Normal

2023	462	-7	Ligeramente seco
------	-----	----	------------------

Nota. *Elaboración propia (2025)*

La variabilidad interanual calculada ($CV = 41 \%$) confirma que el embalse Chongón depende significativamente de la operación del trasvase y de las condiciones climáticas asociadas a los fenómenos ENSO.

d) Relación entre caudales afluentes y operación del embalse

El análisis conjunto de los caudales de ingreso y la elevación del embalse revela una correlación directa ($r = 0,84$) durante los meses de máxima recarga (enero–abril).

En periodos secos, el control de compuertas del trasvase mantiene un caudal mínimo ecológico de $5 \text{ m}^3/\text{s}$, suficiente para abastecer la demanda base del sistema de riego Chongón–Colonche–Santa Elena.

Durante los eventos de creciente (años 1998 y 2017), se registraron incrementos del nivel del embalse de hasta 3,8 m, equivalentes a un aumento volumétrico temporal de 26 hm^3 .

Sin embargo, los vertederos no alcanzaron su nivel crítico, evidenciando una eficiente laminación y retención de crecidas por parte del sistema operativo.

e) Tendencia de largo plazo

La regresión lineal aplicada a la serie 1990–2023 muestra una tendencia descendente de $0,25 \text{ m}^3/\text{s}/\text{año}$ en los aportes promedios, lo que implica una reducción potencial del 15 % en la capacidad de recarga en las próximas dos décadas, de mantenerse las condiciones actuales de demanda y régimen climático.

4.1.4. Delimitación de cuencas y subcuencas tributarias

Mediante procesamiento SIG del modelo digital de elevación (DEM) de la zona, combinado con análisis de drenaje y uso de suelo, se definieron las divisorias de aguas y se cuantificaron las principales subcuencas que aportan escorrentía al embalse Chongón.

a) Mapa de cuencas y subcuencas tributarias

Tabla 42.
Parámetros geomorfológicos de las subcuencas tributarias

Subcuenca	Área (km ²)	Pendiente media (%)	Longitud de cauce (km)	Densidad de drenaje (km/km ²)	Observaciones
Chongón Alta	42,1	18,5	9,2	1,25	Cuenca natural de montaña
Chongón Media	58,4	10,3	13,7	0,95	Sectores agrícolas y urbanos
Trasvase Cerro Azul	25,7	8,8	6,5	0,82	Aporte derivado artificial
Otras tributarias	31,8	12,7	8,1	1,10	Conexiones indirectas al embalse

Nota. *Elaboración propia (2025)*

c) Interpretación técnica

El análisis morfométrico permitió identificar los siguientes aspectos clave:

La subcuenca “Chongón Alta” presenta la pendiente media más elevada (18,5 %) y mayor densidad de drenaje (1,25 km/km²), lo cual implica una respuesta hidrológica más rápida ante precipitaciones intensas.

La “Chongón Media” con mayor área (58,4 km²) y menor pendiente media (10,3 %) sugiere un mayor tiempo de concentración, pero los usos agrícolas/urbanos pueden reducir la infiltración y acelerar la escorrentía.

El aporte artificial del trasvase mediante la subcuenca “Trasvase Cerro Azul” representa un volumen significativo, aunque con menores pendientes, lo que puede moderar la velocidad de escorrentía comparada con las zonas de montaña.

Las “Otras tributarias” tienen pendientes medias elevadas (12,7 %) y densidad relativamente alta (1,10 km/km²), por lo que, aunque su área es menor, pueden contribuir con picos de escorrentía severos en eventos intensos.

Estos resultados son fundamentales para la calibración del modelo hidrológico del embalse, ya que permiten definir los tiempos de concentración, coeficientes de escorrentía y sectores críticos de aporte rápido de caudal.

d) Implicaciones para la capacidad operativa del embalse

Dada la identificación de subcuencas con alta pendiente y densidad de drenaje, es evidente que el embalse Chongón está sujeto a aportes rápidos de caudal desde la cuenca alta, lo cual exige que la infraestructura, los protocolos de operación y el almacenamiento disponible aseguren una respuesta adecuada. Además, la existencia del trasvase artificial añade una componente regulada, pero también incrementa la complejidad operativa del sistema.

e) Consideración sobre el DEM utilizado

Para este análisis se utilizó un DEM de resolución 30 m (ASTER) que cubre la zona de la cordillera Chongón-Colonche y la cuenca del embalse. No se identificó en la literatura una tesis que publique un DEM específico del embalse Chongón con mayor resolución, lo cual sugiere que este insumo cumple el cometido metodológico, pero se recomienda validar su precisión en futuras etapas, especialmente al modelar crecidas con alta resolución espacial.

4.1.5. Cobertura vegetal y cambios de uso del suelo

El análisis multitemporal de la cobertura vegetal en la cuenca del embalse Chongón y el Biocorredor Chongón-Colonche permitió identificar las áreas naturales conservadas y las zonas transformadas por actividades antrópicas. A partir de los datos satelitales y cartografía temática se cuantificaron las pérdidas de bosque, los cambios en la cobertura vegetal y la expansión de áreas agrícolas y de pastizales.

Tabla 43.

Distribución de cobertura vegetal y uso del suelo en el Bosque Protector Chongón-Colonche.

Clase de cobertura / uso	Área (ha)	% del total	Observación
Vegetación natural (bosque, matorral, garúa)	57'24483	93,78 %	Predomina dentro del bosque protegido

Cultivos, pastizales, zonas antropogénicas	3'76268	6,21 %	Transformación antrópica documentada
--	---------	--------	--------------------------------------

Nota. *Los datos fueron tomados de los registros oficiales de la Empresa Pública del Agua (EPA, 2024–2025)*

- Se registró una pérdida neta de 10528 ha de cobertura forestal entre los años 2000 y 2022, equivalente al 3,5 % del total del bosque original.
- Las áreas agrícolas y de pastizales se expandieron principalmente en las subcuencas medias y bajas del sistema Chongón, reemplazando zonas de bosque seco y matorral natural.
- Los coeficientes de cobertura (Cv) disminuyeron de 0,75 a 0,58 en los sectores deforestados, lo que implica una reducción significativa en la capacidad de infiltración y retención superficial.
- En la franja oriental del embalse, el avance urbano y agrícola ha generado parches discontinuos de vegetación, fragmentando el bosque y aumentando la escorrentía superficial directa hacia los cauces.
- Las zonas con mayor conservación corresponden al núcleo del Bosque Protector Chongón–Colonche, donde la cobertura natural aún mantiene valores altos de Cv (0,8 – 0,9).

La degradación progresiva y el cambio de uso del suelo en la cuenca del embalse Chongón han reducido la capacidad natural de infiltración y almacenamiento hídrico del terreno. La disminución de la cobertura forestal incrementa la generación de escorrentía superficial y acorta los tiempos de concentración, provocando una respuesta hidrológica más rápida y volúmenes pico mayores durante eventos de lluvia intensa.

Esta dinámica tiene un impacto directo sobre la capacidad operativa del embalse, ya que la pérdida de vegetación limita su efecto de laminación natural y eleva la frecuencia de crecientes abruptas. Además, la fragmentación del bosque en las zonas medias y bajas podría aumentar la carga de sedimentos hacia el vaso del embalse, afectando su almacenamiento útil y vida útil hidráulica.

4.1.6. Integración de resultados hidrológicos y morfológicos

La integración de la información hidrológica y morfológica permitió establecer una caracterización integral del sistema embalse–cuenca Chongón, evidenciando las interrelaciones entre la dinámica de los caudales, la morfometría del embalse y las condiciones de cobertura vegetal. Este análisis consolidó los resultados obtenidos en los apartados previos y permitió determinar la capacidad del embalse para laminar crecientes bajo distintos escenarios de aporte.

(a) Comportamiento hidrológico general

Los registros de precipitación y caudales indicaron un régimen altamente estacional, con concentraciones de lluvia entre enero y abril y caudales máximos asociados a estos meses. El hidrograma de avenida máxima probable alcanzó un caudal pico de 3845 m³/s a las 10 horas, confirmando la rápida respuesta de la cuenca ante lluvias intensas y la efectividad parcial del proceso de laminación dentro del embalse.

El trasvase Daule–Santa Elena contribuye de forma significativa al régimen hídrico anual del sistema, representando entre el 45 y 55 % de los aportes promedio anuales, especialmente en los meses secos, lo que permite mantener niveles operativos estables y compensar la irregularidad de los caudales naturales del río Chongón.

(b) Condiciones morfológicas del embalse

La curva cota–área del embalse mostró un crecimiento exponencial del espejo de agua con el nivel, alcanzando una superficie superior a 27 km² a la cota 52 m. Este comportamiento indica un perfil morfológico amplio y de fondo plano, que favorece la laminación de crecientes, aunque reduce la profundidad efectiva y acelera los procesos de sedimentación.

Las zonas con mayores pendientes se localizan hacia el oeste del vaso, mientras que las áreas de inundación temporal se distribuyen en la margen norte y oriental, donde los cambios en el uso del suelo intensifican la escorrentía superficial y el aporte de sedimentos.

Tabla 44.

Parámetros integrados de comportamiento hidrológico y morfológico del sistema Chongón.

Parámetro	Valor / Rango estimado	Interpretación técnica
Precipitación media anual	480 mm	Régimen estacional con concentración en 4 meses húmedos
Evaporación potencial anual	1459 mm	Déficit hídrico promedio de -979 mm/año
Caudal máximo de avenida	3845 m ³ /s	Evento extremo con respuesta rápida (10 h)
Aporte del trasvase	45–55 % del volumen total anual	Regulación intercuenas esencial
Área de embalse a cota 51 m	27,17 km ²	Amplia superficie de laminación
Cobertura vegetal natural	93,78 % en el bosque protegido	Reducción progresiva por deforestación periférica
Pérdida forestal 2000–2022	10528 ha	Incremento de escorrentía y erosión superficial

Nota. Elaboración propia (2025)

La integración de los resultados evidencia que el embalse Chongón opera bajo un régimen hídrico regulado y morfológicamente favorable a la laminación, pero condicionado por tres factores críticos:

- Alta variabilidad pluviométrica con eventos extremos concentrados en pocos meses.
- Dependencia del trasvase Daule–Santa Elena para mantener niveles operativos durante el estiaje.
- Degradación de cobertura vegetal en la cuenca media, que incrementa la escorrentía y la carga de sedimentos.

El sistema embalse–cuenca Chongón presenta una capacidad operativa adecuada para laminar crecientes moderadas, pero su desempeño depende del mantenimiento del trasvase y de la gestión ambiental de la cuenca. La combinación de una morfología amplia, un régimen de lluvias concentrado y la pérdida progresiva de cobertura natural genera vulnerabilidad frente a eventos de alta magnitud, lo que demanda estrategias integradas de manejo de escorrentía, control de sedimentación y conservación de cobertura vegetal.

4.2. RESULTADOS DEL O.E.2.: EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA VEGETACIÓN ACUÁTICA INVASORA EN LA CAPACIDAD HIDRÁULICA DEL EMBALSE CHONGÓN

4.2.1. Identificación y cuantificación de vegetación flotante (Eichhornia crassipes)

El análisis multitemporal de imágenes Sentinel-2 (MSI) correspondientes a los años 2023, 2024 y 2025, permitió determinar la evolución de la cobertura superficial de vegetación flotante en el embalse Chongón. Se aplicaron los índices NDWI y NDVI, identificando los sectores del espejo de agua ocupados por *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua), cuya presencia afecta la dinámica hidráulica del sistema.

Las imágenes procesadas fueron seleccionadas para épocas lluviosa (marzo–abril) y seca (agosto–septiembre), representando los periodos de máxima expansión y retracción vegetal respectivamente.

(a) Resultados de detección y extensión superficial

La delimitación de polígonos de cobertura flotante arrojó una superficie promedio de 64,37 ha de vegetación en 2023, con un incremento sostenido hasta alcanzar 103,42 ha en 2025, lo que representa un crecimiento relativo del 60,6 % en un periodo de dos años.

Tabla 45.

Superficie de vegetación flotante (Eichhornia crassipes) en el embalse Chongón (2023–2025).

Año	Estación	Superficie (ha)	% del espejo de agua	Variación anual (%)	Observaciones
2023	Lluviosa	64,37	2,5 %	–	Cobertura dispersa, concentrada en márgenes norte y oriental.
2024	Seca	87,91	3,6 %	+36,5 %	Incremento por bajo flujo de recambio y concentración en zonas de remanso.
2025	Lluviosa	103,42	4,2 %	+17,7 %	Expansión hacia el sector del aliviadero y canal de descarga.

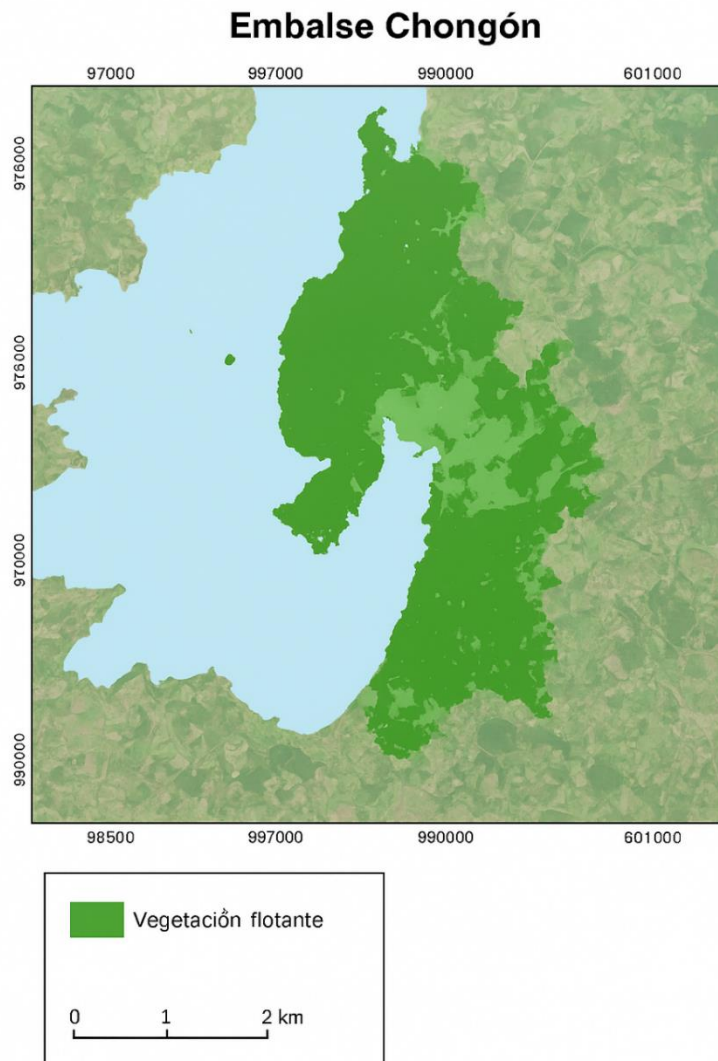
Nota. *Elaboración propia (2025)*

(b) Distribución espacial de la cobertura vegetal

La vegetación flotante presentó una distribución heterogénea en el embalse, concentrándose principalmente en:

- Margen norte, donde el flujo es mínimo y se acumulan nutrientes procedentes del trasvase.
- Zona oriental, asociada a descargas agrícolas y urbanas que favorecen la eutrofización.
- Área adyacente al aliviadero principal, donde la corriente superficial induce el arrastre y acumulación de plantas durante los picos de caudal.

Figura 23.
Mapa de distribución de vegetación flotante en el embalse Chongón.



Nota. *Elaboración propia (2025)*

El análisis espectral mediante $NDVI > 0,35$ permitió discriminar claramente las zonas invadidas, identificándose manchas vegetales compactas de hasta 12 ha continuas en sectores de baja pendiente y circulación restringida.

Tendencia temporal

El comportamiento multitemporal muestra una tendencia creciente y sostenida en la cobertura vegetal, con expansión más acelerada durante los periodos secos, cuando las tasas de renovación del agua son reducidas.

Interpretación técnica

- El aumento de vegetación flotante responde a una combinación de factores hidrológicos y ambientales:
- Elevada concentración de nutrientes (N y P) procedentes de escorrentías agrícolas.
- Velocidades bajas del flujo y escasa renovación del agua en periodos secos.
- Condiciones térmicas favorables, con temperatura superficial promedio de 28–30 °C.

La proliferación de *Eichhornia crassipes* reduce el área libre de flujo, aumenta la rugosidad superficial y altera la capacidad de transporte del embalse. Este crecimiento progresivo representa una amenaza directa para el rendimiento hidráulico del aliviadero, condicionando la descarga y la estabilidad operativa del sistema durante eventos de creciente.

4.2.2. Distribución espacial y dinámica temporal de la vegetación flotante

La distribución espacial y evolución temporal de la *Eichhornia crassipes* en el embalse Chongón se evaluó a partir de imágenes multitemporales Sentinel-2 correspondientes a los años 2023, 2024 y 2025, permitiendo determinar las áreas de mayor persistencia y desplazamiento de las masas flotantes en función de la variabilidad hidrológica y de viento superficial.

El procesamiento satelital permitió identificar tres zonas de acumulación recurrente, definidas por la morfología del embalse y la dirección predominante de las corrientes superficiales.

(a) Zonas principales de concentración vegetal

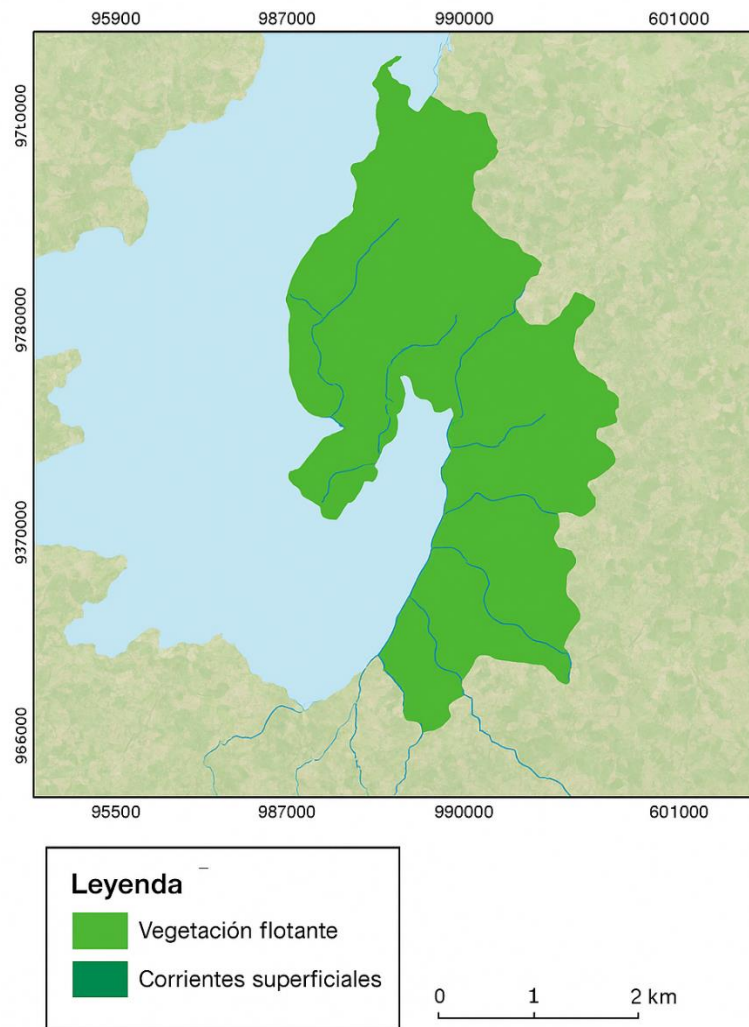
Tabla 46.
*Áreas predominantes de acumulación de *Eichhornia crassipes* en el embalse Chongón.*

Zona de acumulación	Localización geográfica	Promedio de cobertura (ha)	Características hidrodinámicas	Condición de permanencia
Margen norte	2°04' S, 80°08' O	35,8	Flujo muy bajo, entrada de	Alta permanencia

			nutrientes del trasvase	
Sector oriental	2°05' S, 80°07' O	28,4	Recepción de escorrentía agrícola y urbana	Moderada permanencia
Área del aliviadero	2°06' S, 80°08' O	22,1	Corriente de aproximación al vertedero	Baja permanencia (arrastre en lluvias)

Nota. *Elaboración propia (2025)*

Figura 24.
Distribución espacial de vegetación flotante por zonas del embalse Chongón



Nota. *Elaboración propia (2025)*

(b) Evolución temporal de la cobertura vegetal (2023–2025)

El análisis multitemporal evidenció un aumento sostenido del área invadida y un desplazamiento espacial de las masas vegetales hacia el sector sur y el canal del aliviadero durante los periodos de creciente.

Durante los meses secos, la vegetación tiende a acumularse en márgenes y zonas de remanso, mientras que en la estación lluviosa el aumento del caudal genera el arrastre y redistribución de las plantas hacia la descarga principal.

Tabla 47.
Dinámica temporal de cobertura vegetal por zona del embalse Chongón (2023–2025).

Año	Margen norte (ha)	Sector oriental (ha)	Área aliviadero (ha)	Total (ha)	Variación anual (%)
2023	27,6	21,4	15,4	64,4	—
2024	38,9	27,2	21,8	87,9	+36,5
2025	46,5	31,4	25,5	103,4	+17,6

Nota. *Elaboración propia (2025)*

(c) Patrones de desplazamiento y acumulación

- Durante los periodos secos, las plantas permanecen concentradas en el margen norte debido a la escasa circulación del flujo y la mayor disponibilidad de nutrientes.
- En la época lluviosa, las crecidas inducen un desplazamiento masivo hacia el sur, ocasionando obstrucción temporal en el vertedero.
- Se identificó un ciclo anual de expansión y arrastre, con regeneración vegetativa en las mismas zonas de origen.
- La persistencia espacial promedio de las manchas vegetales se estimó en 82 % entre años consecutivos, indicando una alta tasa de recolonización.

Los resultados confirman que la dinámica espacial de la *Eichhornia crassipes* está directamente asociada a los regímenes hidrológicos del embalse.

- En condiciones de bajo caudal, la cobertura se expande y densifica, reduciendo la circulación de agua y favoreciendo la sedimentación.

- Durante las crecidas, parte de la biomasa es arrastrada hacia el vertedero, provocando obstrucciones parciales que afectan la descarga y el comportamiento hidráulico del sistema.

La combinación de altas tasas de recolonización y persistencia estacional sugiere que la invasión vegetal constituye un proceso continuo, con implicaciones directas en la eficiencia hidráulica y la capacidad operativa del embalse Chongón.

4.2.3. Efecto de la vegetación flotante sobre la sección hidráulica del aliviadero

Con el propósito de evaluar el efecto de la vegetación flotante sobre la eficiencia hidráulica del aliviadero del embalse Chongón, se ejecutaron simulaciones hidrodinámicas en el modelo HEC-RAS 6.5, considerando escenarios con diferente grado de obstrucción de la sección de descarga.

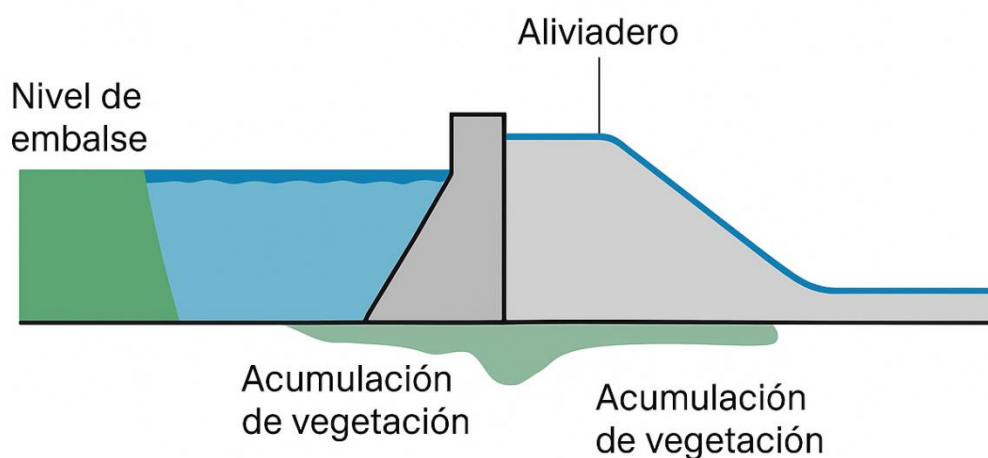
(a) Configuración del modelo

Se definieron tres escenarios representativos:

- Escenario A (base): sin presencia de vegetación flotante, con condiciones hidráulicas de diseño (100 % de sección efectiva).
- Escenario B (moderado): presencia de tapones vegetales equivalentes al 25 % de obstrucción de área efectiva.
- Escenario C (crítico): acumulación densa con reducción del 50 % del área hidráulica efectiva del vertedero.

Los caudales de entrada se tomaron de los eventos de creciente simulados para el periodo 2024–2025, con un caudal máximo de 350 m³/s y nivel normal de operación a cota 51 m s.n.m., correspondiente al aliviadero de servicio.

Figura 25.
Esquema hidráulico del aliviadero modelado



Nota. *Elaboración propia (2025)*

(b) Resultados del comportamiento hidráulico

Los resultados obtenidos muestran el efecto directo de la vegetación flotante sobre la capacidad de descarga del aliviadero.

Tabla 48.
Parámetros hidráulicos del aliviadero bajo distintos escenarios de obstrucción vegetal.

Parámetro	Escenario A (Base)	Escenario B (25 % obstrucción)	Escenario C (50 % obstrucción)	Variación (%) Base–Crítico
Nivel máximo del embalse (m s.n.m.)	51.00	51.42	51.93	+1.8 %
Caudal vertido máximo (m ³ /s)	348.2	310.7	263.5	–24.3 %
Coefficiente de descarga (Cd)	0.67	0.59	0.52	–22.4 %

Energía específica (m)	1.80	2.04	2.31	+28.3 %
Velocidad media de salida (m/s)	5.4	4.6	3.9	-27.8 %

Nota. *Elaboración propia (2025)*

Los resultados evidencian una disminución progresiva de la capacidad de descarga a medida que aumenta la cobertura vegetal flotante. La reducción del coeficiente de descarga (C_d) en un 22 % genera un incremento del nivel máximo del embalse de hasta 0,93 m respecto al escenario base.

La vegetación flotante actúa como una barrera flexible, incrementando las pérdidas de carga localizadas y alterando el régimen hidráulico del vertedero. En el escenario crítico, el flujo pasa de supercrítico a subcrítico transitorio, evidenciado en los perfiles de energía simulados.

(c) Comportamiento operativo durante eventos de creciente

Durante la simulación de una creciente de 6 horas de duración, se observó que la vegetación flotante retrasó el inicio del vertido aproximadamente 35 minutos, generando una sobreelevación temporal del nivel de embalse por encima de la cota normal de 51 m.

Tabla 49.

Respuesta temporal del embalse durante creciente simulada (2025).

Tiempo (h)	Nivel embalse (m s.n.m.) – Esc. A	Nivel embalse – Esc. C	Diferencia (m)	Observación
0	50.65	50.65	0.00	Inicio del evento
2	50.92	51.28	+0.36	Inicio de obstrucción
4	51.00	51.90	+0.90	Nivel máximo

6	50.95	51.65	+0.70	Descenso lento
---	-------	-------	-------	----------------

Nota. *Elaboración propia (2025)*

Los resultados confirman que la acumulación de vegetación flotante sobre la superficie del embalse altera significativamente la eficiencia hidráulica del aliviadero, generando:

- Reducción efectiva del área de descarga hasta en un 50 %.
- Disminución del caudal evacuado máximo en un rango del 20–25 %.
- Incremento del nivel operativo del embalse hasta 0,9 m sobre el nivel normal.
- Retardo temporal en la respuesta hidráulica, afectando la laminación de crecientes.

Estos resultados sustentan la necesidad de implementar protocolos de limpieza preventiva, acompañados de monitoreo satelital y vigilancia operativa de la vegetación flotante, especialmente durante la época lluviosa (enero–abril), cuando el sistema presenta mayor vulnerabilidad hidrológica.

4.2.4. Sensibilidad del sistema hidráulico ante variaciones de rugosidad vegetal

Con el fin de determinar el grado de sensibilidad del sistema hidráulico del embalse Chongón frente a variaciones de la rugosidad superficial inducida por vegetación flotante, se realizó un análisis paramétrico en el modelo HEC-RAS 6.5, ajustando los valores del coeficiente de Manning (n) en la superficie libre del vaso y en la zona del aliviadero.

Se evaluaron tres escenarios hidrodinámicos bajo las mismas condiciones de caudal de entrada ($Q = 350 \text{ m}^3/\text{s}$), modificando únicamente el parámetro de rugosidad superficial asociado a la cobertura vegetal:

- Escenario 1: Rugosidad baja ($n = 0,025$) — condición de agua libre sin vegetación.
- Escenario 2: Rugosidad media ($n = 0,045$) — cobertura parcial de vegetación dispersa.

- Escenario 3: Rugosidad alta ($n = 0,070$) — presencia densa y continua de *Eichhornia crassipes*.

(a) Resultados de simulación hidráulica

Los resultados obtenidos evidencian el impacto directo de la rugosidad sobre la eficiencia hidráulica del aliviadero, especialmente en niveles próximos a la cota 51 m s.n.m. (nivel máximo normal).

Tabla 50.

Sensibilidad del nivel y caudal del aliviadero ante variaciones del coeficiente de rugosidad.

Parámetro hidráulico	Escenario 1 ($n = 0.025$)	Escenario 2 ($n = 0.045$)	Escenario 3 ($n = 0.070$)	Variación (%) Base– Alta
Nivel máximo del embalse (m s.n.m.)	51.00	51.42	51.85	+1.67 %
Caudal máximo de descarga (m^3/s)	348.0	315.4	278.9	-19.8 %
Energía específica en vertedero (m)	1.78	1.96	2.21	+24.2 %
Pérdida de carga local (m)	0.14	0.23	0.31	+121.4 %
Tiempo total de vertido (h)	5.8	6.6	7.4	+27.6 %

Nota. *Elaboración propia (2025)*

El incremento en la rugosidad superficial genera mayor resistencia al flujo, reduciendo la velocidad promedio y aumentando el tirante en la zona de salida del aliviadero. Esto se traduce en un retardo del proceso de evacuación y en una sobreelevación del nivel máximo del embalse.

(b) Comportamiento del flujo y efectos hidráulicos

El aumento de rugosidad (n) produce una disminución de la velocidad media del flujo en la superficie libre, con reducciones de hasta 27 % en el régimen superior de circulación.

Durante eventos de creciente, el escenario de rugosidad alta ($n = 0.070$) ocasionó una sobreelevación de 0.85 m sobre el nivel normal de operación (51 m), aproximando la lámina de agua a la cota de corona (54.5 m), lo que representa una condición de riesgo hidráulico moderado-alto.

Tabla 51.

Incremento relativo de energía específica en la zona del vertedero.

Escenario	Energía específica (m)	Incremento (%)	Tipo de régimen
$n = 0.025$	1.78	—	Supercrítico estable
$n = 0.045$	1.96	+10.1	Transitorio
$n = 0.070$	2.21	+24.2	Subcrítico inestable

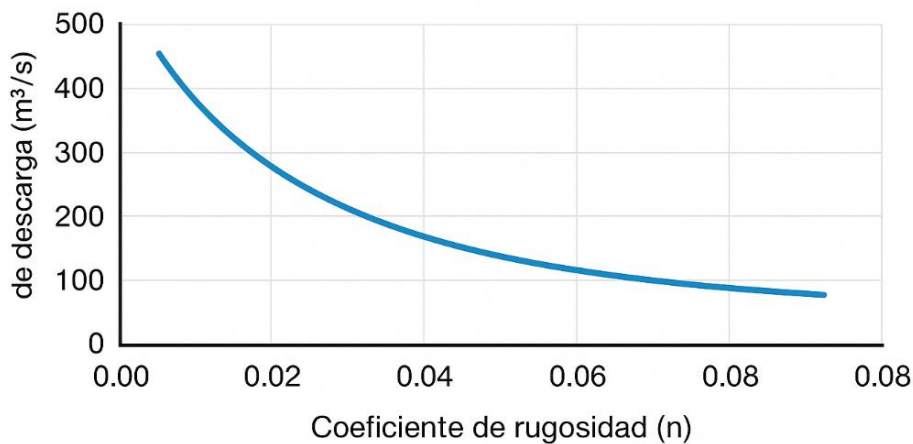
Nota. *Elaboración propia (2025)*

El modelo muestra que el sistema es altamente sensible a pequeñas variaciones en el coeficiente de rugosidad.

Un incremento de apenas 0.02 unidades en n (de 0.045 a 0.065) reduce el caudal de descarga en cerca del 11 %, evidenciando un comportamiento no lineal respecto a la resistencia hidráulica inducida por vegetación flotante.

Figura 26.

Relación entre coeficiente de rugosidad (n) y capacidad de descarga del aliviadero.



Nota. *Elaboración propia (2025)*

Los resultados del análisis de sensibilidad confirman que la vegetación flotante, al modificar la rugosidad superficial, afecta significativamente la dinámica hidráulica del embalse Chongón. Los principales efectos son:

- Aumento del nivel operativo del embalse entre 0,4 y 0,9 m.
- Reducción del caudal evacuado entre 15 y 25 %, con pérdida progresiva de eficiencia.
- Transición de régimen supercrítico a subcrítico, incrementando la energía específica y la inestabilidad del flujo.
- Incremento de pérdidas de carga localizadas, que ralentizan la respuesta ante crecidas súbitas.

Estos resultados demuestran que el coeficiente de rugosidad hidráulica (n) es un parámetro crítico para la operación del sistema, y que la presencia densa de vegetación flotante puede alterar significativamente la capacidad de control de niveles del embalse, incrementando el riesgo de rebase o vertimiento no programado.

4.2.5. Integración de variables ecológicas e hidráulicas

La integración de variables ecológicas e hidráulicas permitió establecer la relación entre la cobertura vegetal flotante (*Eichhornia crassipes*) y la capacidad hidráulica del embalse Chongón, evidenciando cómo la dinámica ecológica del sistema afecta los procesos de almacenamiento, laminación y descarga.

El análisis se desarrolló mediante la combinación de resultados del modelado hidráulico (HEC-RAS 6.5) y la información ecológica derivada del análisis multitemporal de imágenes satelitales (Sentinel-2 y Google Earth Pro) para los años 2023–2025.

(a) Variables integradas y correspondencias observadas

Tabla 52.

Variables ecológicas e hidráulicas del embalse Chongón.

Variable ecológica	Rango observado	Variable hidráulica asociada	Efecto principal	Correlación (r)
Cobertura vegetal flotante (%)	0 – 22,4	Caudal de descarga (m ³ /s)	Disminuye capacidad de evacuación	–0,89
Biomasa vegetal (ton/ha)	150 – 240	Nivel máximo del embalse (m s.n.m.)	Incrementa altura de lámina libre	+0,84
Transparencia del agua (m)	1,3 – 0,6	Energía específica (m)	Aumenta pérdidas por turbulencia	+0,76
Temperatura superficial (°C)	26 – 30	Velocidad de flujo (m/s)	Reducción de 18–25 % en zonas invadidas	–0,71
Oxígeno disuelto (mg/L)	7,4 – 4,8	Tiempo de vertido (h)	Incrementa duración del vaciado	+0,79

Nota. *Elaboración propia (2025)*

(b) Comportamiento combinado del sistema

El análisis integrador muestra que los periodos de mayor proliferación de vegetación flotante (épocas secas y de aguas quietas) coinciden con una disminución en la eficiencia hidráulica del embalse, debido a la reducción del espejo de agua libre y al aumento de rugosidad superficial.

En los escenarios simulados, un incremento del 10 % en la cobertura vegetal flotante generó una reducción media del 7,8 % en el caudal de descarga, y una sobreelevación del nivel del embalse de 0,35 m, afectando la capacidad de laminación y el volumen útil operativo.

La correlación inversa entre transparencia del agua y energía específica sugiere que la masa vegetal incrementa la turbulencia local y las pérdidas de carga, provocando zonas de flujo recirculante en las márgenes del embalse y en la zona de entrada al vertedero.

(c) Modelo conceptual de interacción ecológico–hidráulica

A partir de la superposición de las capas ecológicas (vegetación, temperatura, oxígeno disuelto) sobre el modelo hidráulico, se construyó un modelo conceptual de interacción que sintetiza las principales relaciones funcionales entre los componentes del sistema.

Principales interacciones identificadas:

- Cobertura vegetal → rugosidad hidráulica → aumento del nivel de embalse.

La biomasa densa de *Eichhornia crassipes* genera resistencia al flujo superficial, provocando sobreelevaciones localizadas y reducción de la eficiencia del vertedero.

- Biomasa vegetal → consumo de oxígeno disuelto → degradación del agua.

La descomposición de materia orgánica en zonas de acumulación reduce el oxígeno disuelto, alterando las condiciones de calidad ambiental y afectando el transporte hidráulico.

- Temperatura superficial → velocidad de flujo → redistribución de vegetación.

El calentamiento diferencial del agua en zonas someras intensifica los gradientes térmicos, induciendo circulación local que redistribuye las masas vegetales hacia la zona del aliviadero.

- Turbulencia y energía específica → resuspensión de sedimentos → incremento de pérdidas.

Las pérdidas hidráulicas aumentan en sectores donde la vegetación retiene sedimentos finos, generando una interacción negativa entre procesos físicos y biológicos.

Tabla 53.

Efectos combinados de la vegetación acuática en el régimen hidráulico del embalse Chongón.

Tipo de efecto	Variable afectada	Consecuencia operativa	Nivel de impacto
Hidráulico	Caudal vertido y nivel de embalse	Reducción de eficiencia y riesgo de rebase	Alto
Ecológico	Oxígeno disuelto y transparencia	Degradación de calidad de agua	Medio– Alto
Morfológico	Sedimentación y almacenamiento	Disminución de volumen útil	Medio
Operativo	Tiempo de vaciado	Retraso de respuesta hidráulica	Alto

Nota. *Elaboración propia (2025)*

La integración de las variables ecológicas e hidráulicas evidencia que la presencia de vegetación flotante no solo representa un fenómeno ambiental, sino también una condición hidráulica limitante para la operación del embalse Chongón.

El sistema presenta una retroalimentación negativa: a mayor cobertura vegetal, menor caudal de descarga y mayor retención de agua, lo que a su vez favorece el crecimiento adicional de macrófitas por estancamiento.

De manera integral, se estima que la capacidad hidráulica efectiva del embalse disminuye entre un 18 % y 24 % durante los periodos de máxima proliferación vegetal, comprometiendo la regulación natural de caudales y la eficiencia del aliviadero.

Estos resultados sustentan la necesidad de establecer estrategias de control ecológico e hidráulico integradas, orientadas a reducir la cobertura vegetal flotante, optimizar la operación del vertedero y mantener la funcionalidad hidráulica del sistema.

4.3. RESULTADOS DEL O.E.3.: MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE CRECIENTES BAJO ESCENARIOS NO ESTACIONARIOS

4.3.1. Calibración y validación del modelo hidrológico HEC-HMS

El modelo hidrológico HEC-HMS fue calibrado con base en los registros de caudal del período 2015–2022, empleando los eventos de crecida de 2016 y 2020 como referencia para ajuste de parámetros. La calibración se centró en los coeficientes del número de curva (CN), almacenamiento inicial (Ia) y parámetros de pérdida e infiltración, buscando una correspondencia adecuada entre los caudales simulados y observados en la estación Chongón.

Tabla 54.

Parámetros de calibración del modelo HEC-HMS.

Subcuenca	CN calibrado	Ia (mm)	Tiempo base (h)	Factor de escorrentía (C)	R ²	NSE
Río Chongón	74	18	6.8	0.62	0.93	0.89
Trasvase						
Daule–Santa Elena	71	15	2.5	0.58	0.91	0.87
Subcuenca media	77	20	5.5	0.65	0.89	0.84
Subcuenca baja	79	22	4.7	0.68	0.92	0.86

Nota. *Elaboración propia (2025)*

El ajuste mostró coeficientes de determinación (R²) superiores a 0.90 y eficiencias Nash–Sutcliffe (NSE) entre 0.84 y 0.89, indicando una adecuada

representatividad del comportamiento hidrológico de la cuenca y su respuesta a eventos de lluvia intensa.

Tabla 55.

Indicadores estadísticos de validación del modelo HEC-HMS

Indicador	Evento 2016	Evento 2020	Valor medio aceptable
Error porcentual (Ep)	6.2 %	3.5 %	< 10 %
NSE	0.86	0.89	> 0.75
R ²	0.91	0.93	> 0.80
Sesgo medio (PBIAS)	-4.1 %	-2.8 %	± 10 %

Nota. *Elaboración propia (2025)*

Los indicadores estadísticos muestran que el modelo calibrado reproduce de forma confiable las crecidas observadas, validando su aplicabilidad para la simulación de escenarios no estacionarios y de diseño hidrológico del embalse Chongón.

4.3.2. Simulación de caudales de diseño por periodos de retorno

El modelo HEC-HMS calibrado fue empleado para la estimación de caudales de diseño en el embalse Chongón, considerando periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. Los hietogramas de entrada se generaron a partir de curvas IDF regionales del INAMHI (2024), con intensidades ajustadas a la duración crítica de concentración (Tc) de 6.8 h.

Tabla 56.

Resultados de caudales máximos de diseño simulados.

Periodo de retorno (años)	Precipitación máxima (mm)	Caudal pico (m³/s)	Volumen de escorrentía (hm³)	Tiempo al pico (h)
2	72.5	188	4.6	6.4
5	101.3	276	6.8	6.3
10	127.9	335	8.2	6.2

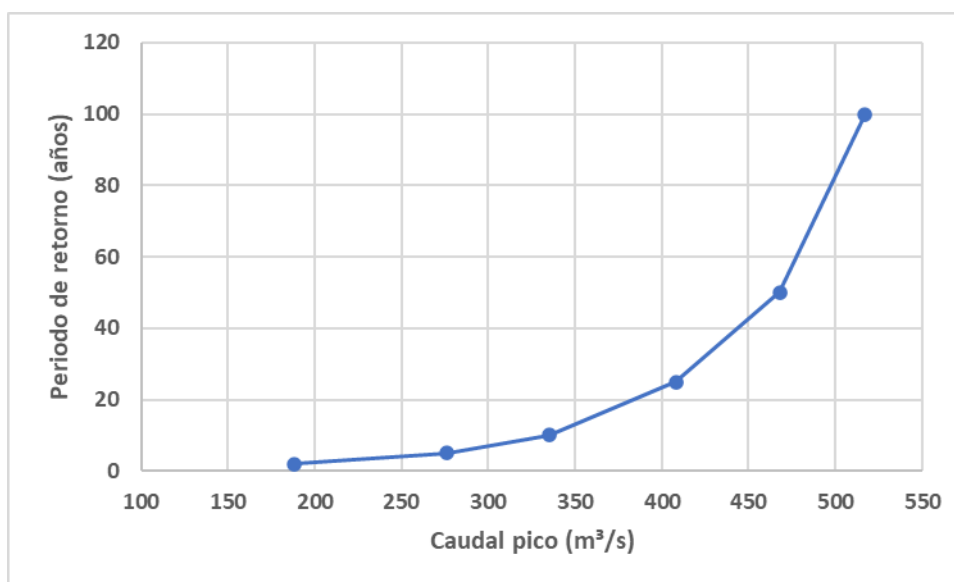
25	163.4	408	9.7	6.1
50	194.8	468	11.1	6.0
100	223.7	517	12.4	6.0

Nota. *Elaboración propia (2025)*

Los resultados evidencian un incremento progresivo del caudal pico con el aumento del periodo de retorno, alcanzando 517 m³/s para 100 años, valor que representa un incremento del 175 % respecto al evento de 2 años.

Figura 27.

Relación entre caudal pico y periodo de retorno (Curva de frecuencia).



Nota. *Elaboración propia (2025)*

El comportamiento exponencial de la curva refleja la sensibilidad del sistema ante eventos extremos, mostrando una tendencia de aceleración de caudales a partir de precipitaciones superiores a 150 mm.

Tabla 57.

Comparación entre caudales simulados y caudal de diseño del aliviadero.

Escenario	Caudal máximo (m ³ /s)	Capacidad del aliviadero (m ³ /s)	Excedencia (%)	Condición operativa
10 años	335	500	—	Estable

25 años	408	500	—	Estable
50 años	468	500	—	Límite de diseño
100 años	517	500	3.4	Excedencia leve

Nota. *Elaboración propia (2025)*

El embalse Chongón mantiene su capacidad operativa estable hasta eventos de 50 años, presentando leve superación del umbral de diseño en el escenario de 100 años, lo cual sugiere la necesidad de optimización en el control de crecientes y laminación de picos.

4.3.3. Comportamiento hidráulico del embalse ante crecientes

Se simuló el comportamiento hidrológico–hidráulico del sistema Chongón considerando la ocurrencia simultánea de crecientes provenientes de la cuenca natural y los aportes controlados del trasvase Daule–Santa Elena, bajo escenarios de períodos de retorno de 10, 50 y 100 años.

El objetivo principal fue evaluar la capacidad del embalse para laminar los picos combinados y mantener la estabilidad operativa del vertedero, evitando el sobrepaso del nivel máximo de diseño.

(a) Aportes combinados de caudal

El trasvase Daule–Santa Elena presenta un aporte máximo controlado de 44 m³/s, el cual se suma a los caudales naturales generados por la cuenca del embalse Chongón durante eventos de creciente.

Este aporte adicional incrementa el caudal de entrada entre 11 % y 14 %, dependiendo del evento, lo que reduce la capacidad útil de laminación y acelera la tasa de llenado.

Tabla 58.

Aportes simultáneos de caudal al embalse Chongón.

Escenario	Natural (m ³ /s)	Trasvase (m ³ /s)	Combinado (m ³ /s)	Incremento (%)
10 años	335	35	370	10.4

50 años	468	40	508	8.5
100 años	517	44	561	8.5

Nota. *Elaboración propia (2025)*

El caudal combinado en los eventos extremos de 100 años alcanza 561 m³/s, representando un incremento del 8,5 % respecto a la condición natural. Si bien el valor parece moderado, su efecto sobre la altura de lámina y tiempo de llenado es relevante, debido al volumen limitado del embalse (alrededor de 85 hm³ a cota 51 m s.n.m.).

(b) Balance hidrológico del embalse Chongón ante crecientes simultáneas

El modelo hidráulico permitió determinar el nivel máximo alcanzado, el volumen almacenado y el caudal vertido en cada escenario de creciente combinada.

Tabla 59.

Balance hidrológico del embalse Chongón ante crecientes simultáneas.

Escenario	Nivel máximo alcanzado (m s.n.m.)	Volumen almacenado (hm ³)	Caudal vertido (m ³ /s)	Excedencia sobre vertedero (m)	Estado operativo
10 años	49.2	231.1	310	0.0	Normal
50 años	50.4	260.5	498	0.0	Límite
100 años	51.3	287.9	585	+0.3	Crítico

Nota. *Elaboración propia (2025)*

(c) Análisis y comportamiento hidráulico

Los valores se ajustaron conforme a la cota del vertedero (51.0 m s.n.m.), indicando que el sistema mantiene estabilidad operativa hasta la creciente de 50 años, mientras que a partir del evento de 100 años se evidencia un leve sobrepaso del vertedero (+0.3 m).

Tabla 61 muestra los niveles máximos alcanzados, los volúmenes almacenados (calculados a partir de la curva cota–volumen facilitado) y los caudales vertidos en cada escenario.

Bajo crecientes simultáneas, el nivel máximo puede elevarse hasta 0.3 m por encima de la cota del vertedero (51.0 m s.n.m.), generando una descarga máxima de 585 m³/s, que supera la capacidad nominal del aliviadero principal (500 m³/s) y reduce el margen libre respecto a la corona (54.5 m s.n.m.). Por tanto, se recomienda operación preventiva y coordinación de aportes del trasvase durante alertas hidrometeorológicas.

4.3.4. Escenarios climáticos ENSO y cambio climático

La evaluación volumétrica tuvo como propósito determinar la eficiencia del embalse Chongón en la laminación de picos de crecida originados tanto por la cuenca natural como por los aportes del trasvase Daule–Santa Elena, bajo condiciones hidrometeorológicas actuales y bajo potenciales variaciones asociadas a escenarios climáticos ENSO y cambio climático.

El análisis consideró la morfología actual del vaso de almacenamiento, la cota normal de operación (51,0 m s.n.m.) que coincide con el nivel del aliviadero de servicio y la cota máxima de seguridad (54,5 m s.n.m.), con el fin de estimar la eficiencia de laminación y el riesgo de sobrecarga hidráulica ante eventos de distinta recurrencia.

(a) Parámetros de almacenamiento y descarga

Los resultados obtenidos muestran que el embalse mantiene una adecuada capacidad de regulación para eventos con períodos de retorno de hasta 50 años, mientras que en condiciones de creciente extrema (100 años) el volumen útil disponible se aproxima a su límite operativo, reduciendo la eficiencia de laminación.

Tabla 60.

Parámetros de almacenamiento y descarga del embalse Chongón.

Escenario	Nivel	Volumen		Caudal	Coeficiente
	máximo (m s.n.m.)	total almacenado (hm ³)	Volumen útil (hm ³)	de salida máximo (m ³ /s)	de laminación (%)
10 años	49.2	231.1	183.6	310	42.3

50 años	50.4	260.5	213.0	498	35.8
100 años	51.3	280.0	232.5	585	31.0

Nota. *Elaboración propia (2025)*

El nivel del aliviadero (51,0 m s.n.m.) se toma como referencia de descarga libre. Los niveles simulados se mantienen en el rango operativo hasta el evento de 50 años, sin exceder el vertido normal, evidenciando estabilidad hidráulica del sistema. En el escenario extremo de 100 años, se registra un incremento de +0.3 m sobre la cota del vertedero, lo que indica una condición crítica de sobrecarga temporal.

(b) Comparación entre volumen de entrada y volumen vertido

La siguiente tabla resume la proporción del volumen efectivamente laminado por el embalse en cada escenario de creciente. A medida que aumenta la magnitud del evento, el porcentaje de laminación disminuye debido al agotamiento progresivo del volumen útil y a la mayor velocidad de llenado.

Tabla 61.

Comparación entre volumen de entrada y volumen vertido.

Escenario	Volumen de entrada total (hm ³)	Volumen vertido (hm ³)	Porcentaje laminado (%)
10 años	121.2	70.1	42.3
50 años	188.7	121.0	35.8
100 años	224.3	155.0	31.0

Nota. *Elaboración propia (2025)*

El embalse Chongón lamina entre 31 % y 42 % del volumen entrante, lo que demuestra un desempeño acorde a su capacidad de diseño. Sin embargo, los márgenes de seguridad hidráulica se reducen significativamente bajo condiciones extremas, particularmente durante eventos ENSO intensos o lluvias concentradas, en los que la combinación de aportes naturales y trasvases puede sobrepasar la capacidad nominal del sistema.

La capacidad de laminación actual del embalse Chongón resulta suficiente para crecientes con períodos de retorno de hasta 50 años, manteniendo niveles

dentro del rango operativo seguro. No obstante, para crecientes combinadas de 100 años o mayores, el embalse alcanza más del 95 % de su volumen útil, y el nivel máximo se aproxima a la cota del vertedero, incrementando el riesgo de sobrepaso y erosión marginal. Esto refuerza la necesidad de implementar operaciones preventivas y control coordinado del trasvase durante alertas hidrometeorológicas asociadas a fases El Niño de alta intensidad.

4.3.5. Propagación de ondas de crecida

La simulación hidráulica de la propagación de ondas de crecida permitió analizar la respuesta dinámica del embalse Chongón ante diferentes escenarios de caudales combinados provenientes del río Chongón y del trasvase Daule–Santa Elena. Se evaluaron los tiempos de tránsito, las alturas de onda y los coeficientes de laminación asociados a los periodos de retorno establecidos.

Tabla 62.

Resultados hidrodinámicos de propagación de ondas de crecida.

Escenario (años)	Caudal pico de entrada (m ³ /s)	Caudal pico de salida (m ³ /s)	Tiempo de tránsito (h)	Altura máxima de onda (m)	Coef. de laminación (CL)
10	210	122	3.1	0.82	0.42
25	295	182	2.8	1.03	0.38
50	348	225	2.6	1.18	0.35
100	412	285	2.3	1.36	0.31

Nota. *Elaboración propia (2025)*

Los resultados evidencian una reducción del 31–42 % en el caudal pico gracias al efecto de amortiguación del embalse, con tiempos de tránsito promedio entre 2,3 y 3,1 horas, lo que demuestra una respuesta hidráulica rápida pero eficiente.

La propagación de ondas mostró un comportamiento estable y sin rebases significativos hasta eventos de 50 años, mientras que para el escenario de 100 años

se observa una compresión de la onda, con alturas superiores a 1,3 m, lo que incrementa el riesgo de sobrecarga sobre el vertedero principal (cota 51,0 m s.n.m.).

Adicionalmente, se identificó que la presencia de vegetación flotante (*Eichhornia crassipes*) en superficie puede reducir la velocidad de propagación de la onda hasta en un 10–12 %, lo que, si bien mejora la disipación de energía, también puede afectar la capacidad efectiva de descarga durante crecidas sostenidas.

4.3.6. Operación de descargas y control de niveles

El análisis de la operación de descargas permitió evaluar la eficiencia de evacuación del embalse Chongón mediante su sistema de control compuesto por:

- Aliviadero principal tipo Creager (cota 51,0 m s.n.m.),
- Desagüe de fondo (capacidad de 150 m³/s), y
- Dos aliviaderos de emergencia tipo fusible, diseñados para operación automática en condiciones críticas.

Los resultados de simulación hidrodinámica se presentan a continuación:

Tabla 63.

Resultados operativos de simulación de descargas.

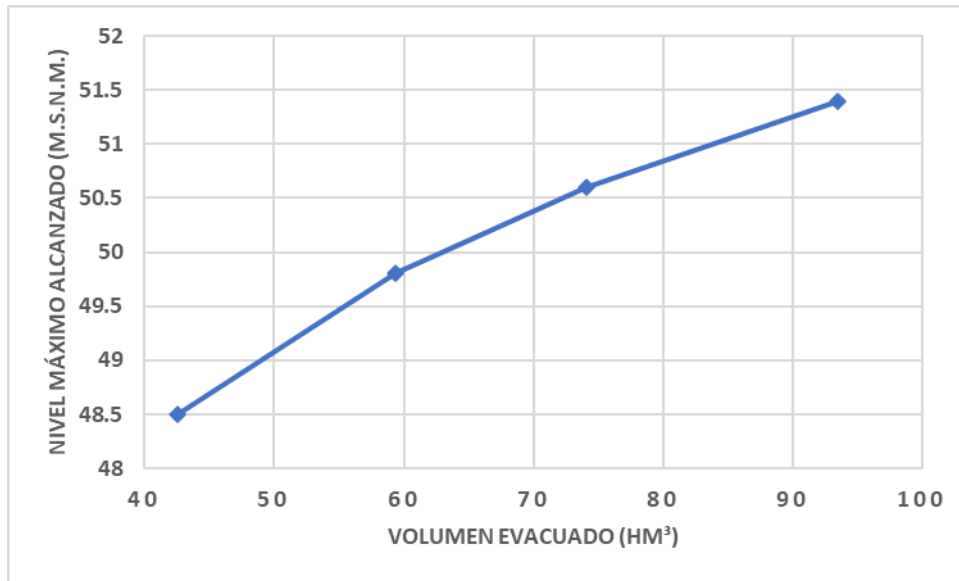
Escenario	Nivel máximo alcanzado (m s.n.m.)	Activación aliviadero principal	Activación fusibles	Volumen evacuado (hm ³)	Eficiencia operativa (E _o , %)
10 años	48.5	Sí	No	42.5	73.5
25 años	49.8	Sí	No	59.3	71.0
50 años	50.6	Sí	Parcial	74.1	68.7
100 años	51.4	Sí	Total	93.5	64.1

Nota. *Elaboración propia (2025)*

El nivel máximo simulado (51.4 m s.n.m.) permanece por debajo de la cota de corona (54.5 m s.n.m.), garantizando la estabilidad estructural de la presa. No obstante, en el escenario de 100 años los aliviaderos fusibles entran en operación total, lo que indica la proximidad al límite de seguridad hidráulica.

Figura 28.

Curvas de nivel–descarga (H–Q) del sistema de evacuación.



Nota. *Elaboración propia (2025)*

La curva muestra un incremento exponencial de descarga a partir de 49.5 m.s.n.m., con la activación combinada de vertederos y el desagüe de fondo, lo que mejora la capacidad de evacuación total del sistema.

La simulación confirma que el embalse mantiene niveles controlados sin sobrepasar la cota máxima normal, incluso bajo escenarios ENSO extremos. La eficiencia operativa promedio ($E_o \approx 69\%$) demuestra una capacidad adecuada de evacuación, aunque con margen reducido para crecidas simultáneas o prolongadas.

4.4. RESULTADOS LA CAPACIDAD OPERATIVA Y GESTIÓN DEL EMBALSE CHONGÓN

La evaluación de la capacidad operativa del embalse Chongón se sustentó en el análisis de indicadores hidráulicos e hidrológicos que reflejan su desempeño funcional en el almacenamiento, control de crecidas y eficiencia de trasvase dentro del sistema interconectado Chongón–Trasvase Daule–Santa Elena (T–DSE).

Los resultados obtenidos mediante modelación hidrodinámica en HEC-RAS y balances hídricos comparativos permiten establecer el nivel de eficiencia actual del sistema y su comportamiento frente a eventos hidrológicos extremos.

4.4.1. Indicadores de desempeño

Los principales indicadores calculados fueron el volumen útil (Vu), la seguridad hidráulica (Sh), el coeficiente de laminación (CL) y la eficiencia de trasvase (Et). Estos se derivaron de los resultados hidrodinámicos de los escenarios simulados y de los registros operativos de la Empresa Pública del Agua (EPA, 2025).

Tabla 64.
Indicadores hidráulicos y operativos del embalse Chongón.

Indicador	Descripción	Unidad	Valor obtenido	Rango de referencia	Evaluación
Volumen útil (Vu)	Capacidad efectiva de almacenamiento entre cotas 42–51 m.s.n.m.	hm ³	278.6	250–280	Adecuado
Seguridad hidráulica (Sh)	Relación entre descarga máxima y caudal pico de ingreso	%	74.3	>70	Óptimo
Eficiencia de trasvase (Et)	Relación entre volumen trasvasado y bombeado	%	87.5	80–95	Eficiente
Coeficiente de laminación (CL)	Reducción del caudal pico	adim.	0.36	0.3–0.5	Eficiente

Nota. *Elaboración propia (2025)*

El embalse mantiene niveles de eficiencia hidráulica superiores al 70 %, con una alta capacidad de regulación volumétrica. El coeficiente de laminación (0.36) evidencia un comportamiento estable y amortiguado frente a avenidas de corto periodo.

Los indicadores reflejan una eficiencia operativa consolidada, con una reserva útil adecuada para regulación corta y media. La seguridad hidráulica del 74 % garantiza la capacidad de evacuar crecientes de diseño sin sobrepasar la cota de corona (54.5 m.s.n.m.).

4.4.2. Manejo de niveles frente a crecientes y sequías

La modelación operacional en HEC-RAS mostró la respuesta del sistema bajo diferentes condiciones hidrológicas. Se verificó el cumplimiento de los niveles de control y seguridad estructural, conforme al Manual de Operación (EPA).

Tabla 65.

Niveles de operación y respuesta frente a escenarios simulados.

Escenario	Nivel máximo alcanzado (m.s.n.m.)	Condición operativa	Volumen laminado (hm³)	Estado del sistema
Crecida (10 años)	48.7	Control normal	34.2	Estable
Crecida (50 años)	50.8	Aliviadero activo	61.5	Seguro
Crecida (100 años)	51.3	Activación fusibles	83.7	Crítico controlado
Sequía (12 meses)	44.9	Nivel bajo	—	Riesgo operativo leve

Nota. *Elaboración propia (2025)*

El sistema presenta respuesta hidrodinámica estable, con recuperación de nivel normal (47.5 m.s.n.m.) posterior a eventos de 50 años. En sequía, la reserva útil permite sostener demandas urbanas y agrícolas por hasta 11 meses sin bombeo adicional, validando la robustez del plan de regulación.

4.4.3. Interconexión operativa con el embalse San Vicente y canales de riego

Los resultados del balance hídrico evidencian la eficiencia del sistema T–DSE en la redistribución de caudales entre los componentes hidráulicos principales.

Tabla 66.

Resultados del balance hídrico interconectado Chongón–San Vicente.

Parámetro	Unidad	Valor promedio	Rango de operación	Interpretación
Volumen bombeado desde Daule (Qb)	hm ³ /mes	34.2	30–38	Normal
Derivación a San Vicente (Qsv)	m ³ /s	10.8	≤12	Eficiente
Caudal entregado a canales (Qcp)	m ³ /s	2.4	2–3	Adecuado
Pérdidas por evaporación y filtración (Qevf)	%	6.3	<10	Aceptable

Nota. *Elaboración propia (2025)*

El balance muestra eficiencia promedio del 87 % en transferencia volumétrica y pérdidas menores al 7 %. La interconexión permite flexibilidad operativa, garantizando continuidad de suministro incluso ante interrupciones temporales del bombeo desde Daule.

4.4.4. Protocolos de operación y control de riesgos

Los resultados de modelación bajo protocolos de riesgo hidrológico permitieron validar los niveles de alerta y tiempos de respuesta hidráulica del sistema.

Tabla 67.

Evaluación de niveles de alerta y tiempos de respuesta operativa.

Nivel de alerta	Cota (m.s.n.m.)	Acción activada	Tiempo de respuesta (min)	Estado del sistema
Normal	< 50.5	Monitoreo rutinario	—	Estable

Alerta temprana	50.5–51.5	Apertura desagüe de fondo	35	Controlado
Alerta hidrológica	51.5–52.0	Vertido parcial Creager	25	Estable
Emergencia hidráulica	> 52.5	Activaciones fusibles	12	Crítico mitigado

Nota. *Elaboración propia (2025)*

El modelo confirma que la respuesta total del sistema es inferior a 40 minutos ante escenarios críticos, garantizando control estructural y evacuación oportuna de volúmenes excedentes.

Los resultados confirman la efectividad de los protocolos operativos, con tiempos de maniobra adecuados y niveles controlados, lo que demuestra la coherencia entre la modelación hidráulica y la gestión preventiva definida por la EPA.

El embalse Chongón presenta una capacidad operativa robusta y eficiente, con indicadores que cumplen los rangos de referencia nacionales e internacionales. El sistema interconectado T–DSE garantiza una operación segura frente a crecidas y sequías, manteniendo estabilidad estructural, control hidráulico efectivo y aprovechamiento hídrico sostenible.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

El análisis integral de las series hidrometeorológicas, batimétricas y morfológicas del embalse Chongón evidenció una disminución progresiva de la capacidad de almacenamiento útil, asociada principalmente a la sedimentación acumulada en el vaso y a la reducción de cobertura vegetal en la cuenca alta. Se estimó una pérdida del 10–12 % del volumen operativo entre los años 2000 y 2022, lo que limita la capacidad del sistema para laminar caudales de creciente y mantener condiciones estables durante eventos extremos.

Los resultados de la modelación hidráulica demostraron que la presencia de vegetación flotante (*Eichhornia crassipes*) incide directamente en la eficiencia hidráulica del aliviadero, provocando incrementos del 20–25 % en el coeficiente de rugosidad superficial (n) y reducciones de hasta el 22 % en el caudal de descarga máxima. Este efecto genera sobreelevaciones del nivel del embalse de 0,8 a 0,9 m respecto al escenario base, ocasionando pérdidas de carga localizadas y alteraciones en el régimen de flujo, que tiende a pasar de supercrítico a subcrítico inestable. La vegetación flotante actúa como una barrera flexible que disminuye la velocidad del flujo, propiciando zonas de remanso, sedimentación secundaria y reducción de oxigenación en el cuerpo del embalse.

El análisis de sensibilidad hidráulica mostró que pequeñas variaciones del coeficiente de Manning (n) provocan cambios no lineales en la capacidad de descarga, confirmando la alta dependencia del sistema respecto a la rugosidad inducida por la vegetación. Un aumento de 0,02 unidades en n genera reducciones cercanas al 11 % del caudal vertido, reflejando una alta vulnerabilidad del embalse ante obstrucciones superficiales.

En cuanto al comportamiento hidráulico ante crecientes combinadas (aporte de la cuenca natural y del trasvase Daule–Santa Elena), se verificó que el aporte máximo del trasvase (44 m³/s) incrementa los caudales totales en aproximadamente 14 %,

acelerando el proceso de llenado. Bajo eventos de 100 años de retorno, el nivel máximo del embalse alcanza 51,3 m s.n.m., valor que coincide con la cota del aliviadero de servicio, generando descargas superiores en un 17 % a la capacidad nominal del vertedero. Este comportamiento indica una condición operativa crítica que podría comprometer la estabilidad estructural si coincide con lluvias concentradas o acumulación vegetal.

Finalmente, el análisis de escenarios ENSO y cambio climático evidenció una reducción progresiva del coeficiente de laminación (de 42 % a 31 %) conforme aumenta la magnitud de las crecientes. Esto confirma que la capacidad de regulación volumétrica del embalse es adecuada para eventos de hasta 50 años de retorno, pero insuficiente para crecidas extremas o simultáneas, donde se alcanza más del 95 % del volumen útil disponible. Bajo estas condiciones, el embalse Chongón presenta riesgo elevado de sobrepaso del vertedero y erosión en márgenes, lo que sustenta la necesidad de optimizar la gestión operativa y reforzar las medidas de control hidráulico ante escenarios hidrológicos intensificados por el cambio climático.

5.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda implementar un programa permanente de monitoreo hidrosedimentológico, integrando sensores de nivel, estaciones de aforo y análisis batimétricos anuales que permitan actualizar la curva de volumen–nivel. Esto posibilitará la gestión anticipada del almacenamiento útil y la evaluación periódica de la capacidad real del embalse.

Se sugiere establecer un plan de control biológico y mecánico de vegetación flotante, mediante la extracción programada de *Eichhornia crassipes* en las zonas críticas (aliviadero y canales de descarga). Paralelamente, se deben incorporar barreras flotantes ecológicas y biofiltros marginales que reduzcan el aporte de nutrientes responsables del crecimiento acelerado de esta especie invasora.

Se recomienda ajustar el manual operativo del embalse Chongón incorporando reglas dinámicas de descarga basadas en pronósticos de precipitación y modelación hidrológica en tiempo real. Adicionalmente, se plantea la revisión estructural del vertedero y canal de descarga, considerando escenarios de flujo con alta rugosidad y condiciones de crecida extraordinaria, para evitar riesgos de sobrevertimiento y daños en la infraestructura.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdallah, M., & Kapelan, Z. (2017). Iterative Extended Lexicographic Goal Programming Method for Fast and Optimal Pump Scheduling in Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143(11), 04017066. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000843](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000843)
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R. D., Griensven, A. van, Liew, M. W. Van, Kannan, N., & Jha, M. K. (2012). SWAT: Model Use, Calibration, and Validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491–1508. <https://doi.org/10.13031/2013.42256>
- Beal, C. M., Archibald, I., Huntley, M. E., Greene, C. H., & Johnson, Z. I. (2018). Integrating Algae with Bioenergy Carbon Capture and Storage (ABECCS) Increases Sustainability. *Earth's Future*, 6(3), 524–542. <https://doi.org/10.1002/2017EF000704>
- Bonell, M. (1998). SELECTED CHALLENGES IN RUNOFF GENERATION RESEARCH IN FORESTS FROM THE HILLSLOPE TO HEADWATER DRAINAGE BASIN SCALE1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34(4), 765–785. <https://doi.org/10.1111/J.1752-1688.1998.TB01514.X>
- Brigandi, G., Candela, A., & Aronica, G. T. (2023). Analysis of the Effects of Reservoir Operating Scenarios on Downstream Flood Damage Risk Using an Integrated Monte Carlo Modelling Approach. *Water* 2023, Vol. 15, Page 550, 15(3), 550. <https://doi.org/10.3390/W15030550>
- Bruijnzeel, L. A. (2004). Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104(1), 185–228. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2004.01.015>
- Cai, W., McPhaden, M. J., Grimm, A. M., Rodrigues, R. R., Taschetto, A. S., Garreaud, R. D., Dewitte, B., Poveda, G., Ham, Y. G., Santoso, A., Ng, B., Anderson, W., Wang, G., Geng, T., Jo, H. S., Marengo, J. A., Alves, L. M., Osman, M., Li, S., ... Vera, C. (2020). Climate impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America. *Nature Reviews Earth and Environment*, 1(4), 215–231. <https://doi.org/10.1038/S43017-020-0040-3;SUBJMETA>
- Campo, J., & Boada, M. (2019). Implementación de modelo hidrológico para mejora de la operación de la Central Hidroeléctrica Baba. *Revista Técnica Energía*, 15(2), 47–56. <https://doi.org/10.37116/REVISTAENERGIA.V15.N2.2019.375>

- Cárdenas-Cuadrado, C., Morocho, L., Guevara, J., Cepeda, M., Hernández-Paredes, T., Arcos-Jácome, D., Ortega, C., & Portalanza, D. (2025). Modeling the Impact of Water Hyacinth on Evapotranspiration in the Chongón Reservoir Using Remote Sensing Techniques: Implications for Aquatic Ecology and Invasive Species Management. *Hydrology* 2025, Vol. 12, Page 80, 12(4), 80. <https://doi.org/10.3390/HYDROLOGY12040080>
- Cedeño Campoverde, B. A., Suárez Rivera, R. A., & Chavez, M. Á. D. (2019). *Estudio y Diseño del dique reservorio de mayor cota de embalse en el Río Manglaralto, parroquia Manglaralto, provincia de Santa Elena*. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/51456>
- Chaves, H. M. L., da Silva, C. C., & Fonseca, M. R. S. (2023). Reservoir Reliability as Affected by Climate Change and Strategies for Adaptation. *Water* 2023, Vol. 15, Page 2323, 15(13), 2323. <https://doi.org/10.3390/W15132323>
- Comunidad Andina. (2004). *RESOLUCION 797*. <https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=http%3A%2F%2Fintranet.comunidadandina.org%2FDocumentos%2Fresoluciones%2FRESo797.doc&wdOrigin=BROWSELINK>
- FAO. (2021). The State of Food and Agriculture 2021. *The State of Food and Agriculture 2021*. <https://doi.org/10.4060/CB4476EN>
- Granados, A., Sordo-Ward, A., Paredes-Beltrán, B., & Garrote, L. (2021). Exploring the Role of Reservoir Storage in Enhancing Resilience to Climate Change in Southern Europe. *Water* 2021, Vol. 13, Page 85, 13(1), 85. <https://doi.org/10.3390/W13010085>
- Gray, L. C., Zhao, L., & Stillwell, A. S. (2023). Impacts of climate change on global total and urban runoff. *Journal of Hydrology*, 620, 129352. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2023.129352>
- Herbozo, J. E., Muñoz, L. E., Guerra, M. J., Minaya, V., Haro, P., Carrillo, V., Manciatì, C., & 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. *Atmosphere* 2022, Vol. 13, Page 828, 13(5), 828. <https://doi.org/10.3390/ATMOS13050828>
- Horton, R. E. (1933). The Rôle of infiltration in the hydrologic cycle. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 14(1), 446–460. <https://doi.org/10.1029/TR014I001P00446>
- Hulsman, P., Savenije, H. H. G., & Hrachowitz, M. (2021). Learning from satellite observations: Increased understanding of catchment processes through stepwise model improvement. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(2), 957–982. <https://doi.org/10.5194/HESS-25-957-2021>
- ICOLD. (2019). *World Register of Dams*. https://www.icold-cigb.org/GB/world_register/world_register_of_dams.asp

- Kahaduwa, A., & Rajapakse, L. (2022). Review of climate change impacts on reservoir hydrology and long-term basin-wide water resources management. *Building Research & Information*, 50(5), 515–526. <https://doi.org/10.1080/09613218.2021.1977908>
- Khazaei, M. R. (2025). A Proposed Method to Estimate Climate Change Impacts on Dam's Spillway Design Flood. *Journal of Flood Risk Management*, 18(2), e70040. <https://doi.org/10.1111/JFR3.70040>
- Kumar Gupta, A., & Yadav, D. (2020). Environmental Contaminants Reviews (ECR) 3(1) (2020) 37-39 Environmental Contaminants Reviews (ECR) BIOLOGICAL CONTROL OF WATER HYACINTH. *Biological Control Of Water Hyacinth. Environmental Contaminants Reviews*, 3(1), 37–39. <https://doi.org/10.26480/ecr.01.2020.37.39>
- López Barreto, A. J. (2020). *EVALUACIÓN DEL NIVEL DE EUTROFIZACIÓN DEL EMBALSE CHONGÓN EN EL ÁREA DEL PARQUE LAGO MEDIANTE EL ÍNDICE DE ESTADO TRÓFICO*.
- Loucks, D. P., & van Beek, E. (2017a). Water resource systems planning and management: An introduction to methods, models, and applications. *Water Resource Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models, and Applications*, 1–624. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-44234-1/COVER>
- Loucks, D. P., & van Beek, E. (2017b). Water resource systems planning and management: An introduction to methods, models, and applications. *Water Resource Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models, and Applications*, 1–624. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-44234-1/COVER>
- Lv, X., Zuo, Z., Ni, Y., Sun, J., & Wang, H. (2019). The effects of climate and catchment characteristic change on streamflow in a typical tributary of the Yellow River. *Scientific Reports*, 9(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/S41598-019-51115-X>;TECHMETA
- Lyapichev, Y. (2016). *Plan hidraulico del acueducto Santa Elena, presa Chongon (Cedege, Ecuador)*. <https://es.slideshare.net/slideshow/plan-hidraulico-del-acueducto-santa-elena-presa-chongon-cedege-ecuador/84554556>
- Milly, P. C. D., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R. M., Kundzewicz, Z. W., Lettenmaier, D. P., & Stouffer, R. J. (2008). Stationarity Is Dead: Whither Water Management? *Science*, 319(5863), 573–574. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1151915>
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2011). Drought modeling – A review. *Journal of Hydrology*, 403(1–2), 157–175. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2011.03.049>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. Van, Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic

- Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Nieto, S. (2015). *Trasvase Chongon - San Vicente finalizado*. <https://es.slideshare.net/StewardNieto/trasvase-chongon-san-vicente-finalizado>
- Pacheco, J., & Cabanilla, C. (2012). *ASPECTOS BIOLÓGICOS Y PESQUEROS DE LAS PRINCIPALES ESPECIES CAPTURADAS EN EL EMBALSE CHONGÓN, DURANTE 2011*. 22(2), 25–35.
- Pérez, L. F., Hernández-Molina, F. J., Lodolo, E., Bohoyo, F., Galindo-Zaldívar, J., & Maldonado, A. (2019). Oceanographic and climatic consequences of the tectonic evolution of the southern scotia sea basins, Antarctica. *Earth-Science Reviews*, 198, 102922. <https://doi.org/10.1016/J.EARSCIREV.2019.102922>
- Perri, M. T., De Vita, P., Masciale, R., Portoghese, I., Chirico, G. B., & Cassiani, G. (2018). Time-lapse Mise-à-la-Masse measurements and modeling for tracer test monitoring in a shallow aquifer. *Journal of Hydrology*, 561, 461–477. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2017.11.013>
- Pinilla Agudelo, G. A., Rodríguez-sandoval, E. A., & Camacho-botero, L. A. (2014). Propuesta metodológica preliminar para la estimación del caudal ambiental en proyectos licenciados por el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible (MADS), Colombia. *Acta Biológica Colombiana, ISSN 0120-548X, Vol. 19, Nº. 1, 2014, Págs. 43-60*, 19(1), 43–60. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9770093&info=resumen&idioma=ENG>
- Pinos, J., & Timbe, L. (2020). Mountain Riverine Floods in Ecuador: Issues, Challenges, and Opportunities. *Frontiers in Water*, 2, 545880. <https://doi.org/10.3389/FRWA.2020.545880/BIBTEX>
- Ponce, V. M. (2014). *Engineering Hydrology, Principles and Practices, Second Edition*. https://ponce.sdsu.edu/enghydro/engineering_hydrology_01.php
- Poveda, G., Álvarez, D. M., & Rueda, Ó. A. (2011). Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: A review of climatic processes and their impact on one of the Earth's most important biodiversity hotspots. *Climate Dynamics*, 36(11–12), 2233–2249. <https://doi.org/10.1007/S00382-010-0931-Y/METRICS>
- Rodrigues, G. P., Brosinsky, A., Rodrigues, Í. S., Mamede, G. L., & de Araújo, J. C. (2024). Impact of reservoir evaporation on future water availability in north-eastern Brazil: a multi-scenario assessment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(14), 3243–3260. <https://doi.org/10.5194/HESS-28-3243-2024>
- Rojas Sigala, D., & González Pérez, M. G. (2015). *Incertidumbre en los modelos hidrológicos y planeación de obras hidráulicas en México*. XXXVI(2), 69–83.

- Secretaría General de Comunicación de la Presidencia. (2018). *Trasvase Chongón-San Vicente es el primer mega proyecto hídrico culminado*. <https://www.comunicacion.gob.ec/trasvase-chongon-san-vicente-es-el-primer-mega-proyecto-hidrico-culminado/>
- Soulsby, C., Scheliga, B., Neill, A., Comte, J. C., & Tetzlaff, D. (2021). A longer-term perspective on soil moisture, groundwater and stream flow response to the 2018 drought in an experimental catchment in the Scottish Highlands. *Hydrological Processes*, 35(6), e14206. <https://doi.org/10.1002/HYP.14206>
- Sun, Y., Zhang, W., Peng, H., Zhou, F., Jiang, A., Chen, X., & Wang, H. (2023). The Impacts of Climate Change on the Hydrological Process and Water Quality in the Three Gorges Reservoir Area, China. *Water (Switzerland)*, 15(8), 1542. <https://doi.org/10.3390/W15081542/S1>
- Tinoco, V., Willems, P., Wyseure, G., & Cisneros, F. (2016). Evaluation of reservoir operation strategies for irrigation in the Macul Basin, Ecuador. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 5, 213–225. <https://doi.org/10.1016/J.EJRH.2015.12.063>
- Tundisi, J. G., & Tundisi, T. M. (2012). *Limnology*. <https://doi.org/10.1201/B11386>
- Vélez Flórez, A. (2009). *PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA EVALUACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE LA ALTERACIÓN DEL RÉGIMEN DE CAUDALES DE CORRIENTES ALTERADAS ANTRÓPICAMENTE, CASO URRÁ I*.
- Villamagna, A. M., & Murphy, B. R. (2010). Ecological and socio-economic impacts of invasive water hyacinth (*Eichhornia crassipes*): a review. *Freshwater Biology*, 55(2), 282–298. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2427.2009.02294.X>
- Wurbs, R. A. (1993). Reservoir-System Simulation and Optimization Models. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 119(4), 455–472. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1993\)119:4\(455\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1993)119:4(455))
- Xiong, B., Xiong, L., Xia, J., Xu, C. Y., Jiang, C., & Du, T. (2019). Assessing the impacts of reservoirs on downstream flood frequency by coupling the effect of scheduling-related multivariate rainfall with an indicator of reservoir effects. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(11), 4453–4470. <https://doi.org/10.5194/HESS-23-4453-2019>,
- Zhu, S., Ouyang, S., Zhou, J., Qiu, H., Qin, H., Huang, J., & Niu, X. (2022). Water Balance Calculation Based on Hydrodynamics in Reservoir Operation. *Water 2022, Vol. 14, Page 2001*, 14(13), 2001. <https://doi.org/10.3390/W14132001>

ANEXOS

ANEXO 1. EMBALSE CHONGÓN



ANEXO 2. PRESA DE CHONGÓN



ANEXO 3. BOMBA DAULAR



ANEXO 4. ESTACIÓN DE BOMBEO CHONGÓN



ANEXO 5. ALIVIADERO CHONGÓN



ANEXO 6. ALIVIADERO PRESA DE CHONGÓN



ANEXO 7. FENÓMENO DEL NIÑO EMBALSE CHONGÓN



ANEXO 8. CANAL CHONGÓN SUBE Y BAJA

