

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra**

Propuesta metodológica para reparación de represas de tierra en  
operación, caso de estudio represa El Azúcar.

**Proyecto de Titulación**

Previo la obtención del Título de:

**Magíster en Geotecnia**

Presentado por:

Ing. Nella Rosalía Friend Montesdeoca

Guayaquil - Ecuador

Año: 2026

## Dedicatoria

---

A mi madre, Aunque parezca habitual mencionarla, realmente no existe presencia más auténtica ni amor más transparente que el de una madre. Aun cuando caminaba en oscuridad ella fue el faro que me guio y sigue irradiando esa luz que me recuerda, incluso en silencio y en distancia, que todo estará bien.

Al Ing. Jorge Enrique Herbozo Alvarado. Un Ingeniero cuya genialidad en la geotecnia desafía cualquier pronóstico. Realizó el diseño de la reparación de la represa que inspira este trabajo con valentía, criterio y una visión poco común, aun sin recibir el valor ni el reconocimiento que merece.

Agradezco su confianza al entregarme este tema y su compromiso inquebrantable con la ingeniería.

## Agradecimientos

---

A Dios, cuya sabiduría sostiene los procesos invisibles que hacen posible nuestra existencia: desde los equilibrios microscópicos entre minerales hasta las fuerzas silenciosas que regulan el agua en lo profundo. Aquello que para nosotros es misterio, para Él es diseño. Conoce cada estructura, cada equilibrio y cada mecanismo oculto bajo nuestros pies. A Él, autor de lo visible y lo invisible, de inteligencia anterior pero siempre superior, agradezco la posibilidad misma de estar aquí...

A Leidy y a mi querido amigo Milton, Alejandro, por su generosidad sincera y su apoyo justo en el momento preciso. A Walther, por acompañarme en mi desarrollo profesional.

A mi Familia, Por su amor constante y su presencia en cada etapa. A todos ustedes, gracias. Su apoyo ha sido parte de la estructura que sostiene este logro.

## Declaración Expresa

---

Yo Nella R. Friend Montesdeoca acuerdo y reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 26 de febrero 2026.

---

Ing. Nella R. Friend Montesdeoca

## **Evaluadores**

---

**Ph. D. Davide Besenzon Venegas**

Profesor de Materia

---

**Ph. D. Samantha Jiménez Oyola**

Profesor de Materia

---

**Ing. David Omar Stay Coello, Mg. Geo**

Tutor de proyecto

## Resumen

Las represas son estructuras fundamentales para el desarrollo económico y social de un país, ya que garantizan la disponibilidad de agua segura para consumo humano, riego, generación de energía eléctrica y otros usos. Sin embargo, también pueden representar un peligro potencial si no se diseñan adecuadamente o si no se monitorean de manera periódica durante su operación. La rotura de una represa puede desencadenar la liberación súbita y descontrolada de grandes volúmenes de agua, sedimentos y escombros, arrasando todo a su paso aguas abajo. Por ello, conocer los modelos de comportamiento, deterioro y falla de las represas puede contribuir a prevenir estos desastres, identificando eventos endógenos o exógenos que podrían comprometer la estabilidad de la estructura.

Para los escenarios potenciales de falla o el desarrollo de modelos de deterioro estructural en presas de tierra, este trabajo propone una metodología que permite identificar y evaluar los mecanismos más probables de degradación y pérdida de estabilidad, especialmente en represas de tierra o materiales sueltos, con énfasis en el modelo geotécnico de diseño y planes de monitoreo periódico. La metodología propuesta se aplicó al caso de estudios de la reparación de la represa El Azúcar, ubicada en la provincia de Santa Elena, Ecuador.

**Palabras clave:** *Represas de tierra, Seguridad de presas, Modelos de deterioro estructural, Mecanismos de falla, Estabilidad geotécnica, Monitoreo.*

## ***Abstract***

*Dams are essential structures for the economic and social development of a country, as they ensure the availability of safe water for human consumption, irrigation, hydropower generation, and other uses. However, they may also pose a potential hazard if they are not properly designed and or if they are not periodically monitored throughout their operation. The failure of a dam can trigger the sudden and uncontrolled release of large volumes of water, sediments, and debris, sweeping away everything along its downstream path. Therefore, understanding the behavior, deterioration, and failure models of dams is crucial for preventing such disasters by identifying endogenous or exogenous events that may compromise the stability of the structure.*

*For potential failure scenarios or the development of structural deterioration models in earth dams, this study proposes a methodology that enables the identification and evaluation of the most probable mechanisms of degradation and loss of stability, particularly in earthfill or embankment dams, with emphasis on the geotechnical design model and periodic monitoring plans. The proposed methodology was applied to the case study of the repair of the El Azúcar Dam, located in the province of Santa Elena, Ecuador.*

**Keywords:** *Earth dams, Dam Safety, Structural deterioration models, Failure mechanisms, Geotechnical stability, Monitoring.*

## Índice General

RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i> .....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS.....	VIII
SIMBOLOGÍA.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIII
ÍNDICE DE PLANOS.....	XVI
CAPÍTULO 1.....	1
1.1.1.....	<i>Alineamiento con los Objetivos de Desarrollo</i>
<i>Sostenible</i> .....	7
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	8
1.4.1 <i>Objetivo general</i> .....	10
1.5 MARCO TEÓRICO.....	11
1.5.1 <i>Contexto geográfico y climático de Ecuador</i> .....	11
1.5.2 <i>Impacto de periodos de lluvias intensas, episodios del ENSO (El Niño</i>	
<i>Oscilación del Sur), y su afectación sobre la infraestructura hidráulica del país.</i> .....	11
ANÁLISIS PSEUDOESTÁTICO.....	44
COMPORTAMIENTO OBSERVADO EN PRESAS DE MATERIALES SUELTOS	
.....	45

1.5.9.....	<i>Marco referencial: Metodologías de reparación de represas de tierra</i>	54
CAPÍTULO 2 .....		65
2.1.1.....	<i>Fase 1: Caracterización de la estructura</i>	69
2.1.2.....	<i>Fase 2: Análisis del comportamiento y modos de falla</i>	77
2.1.3.....	<i>Fase 3: Evaluación de escenarios de emergencia y criterios de intervención</i>	78
2.1.4.....	<i>Fase 4: Diseño técnico de la intervención y plan de reparación inmediata</i>	82
2.2.....	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS	84
CAPÍTULO 3 .....		85
3.....	APLICACIÓN PROPUESTA AL CASO DE ESTUDIO “REPRESA EL AZÚCAR”	86
3.1.....	FASE 1: RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN NORMATIVA Y TÉCNICA PARA INTERVENCIÓN Y REGULARIZACIÓN DE PRESAS.	86
3.1.1.....	<i>Criterios técnicos y operativos aplicables en contextos similares al ecuatoriano, revisión bibliográfica y Estado del arte de Intervenciones de presas en operación</i>	89
3.1.4.....	<i>Antecedentes técnicos de la represa El Azúcar (visitas técnicas, informes CEDEX-INNERHI 1965-1996)</i>	92

3.1.5.....	<i>Comportamiento geotécnico e hidráulico de la presa El Azúcar.....</i>	98
3.1.6.....	<i>Evaluación de parámetros geotécnicos de la presa El Azúcar: .....</i>	105
3.2.....	<b>FASE 2: ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO Y MODOS DE FALLA DE LA PRESA EL AZÚCAR .....</b>	107
3.2.1	<i>Comportamiento histórico de la represa (cotas, filtraciones, recrecimientos, reparaciones anteriores).....</i>	107
3.2.2.	<i>Modelaciones geotécnicas en condiciones estáticas, sísmicas e hidrológicas extremas. ....</i>	111
3.2.3.....	<i>PHA (Preliminary Hazard Anaylisis) para identificar modos de falla y niveles de riesgo en presa El Azúcar. (Tabla#31) .....</i>	136
3.3.....	<b>FASE 3: APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA AL CASO DE ESTUDIO: PRESA EL AZÚCAR. ....</b>	137
3.3.1 .....	<i>Escenarios de emergencias con base en umbrales.....</i>	137
	<i>Escenarios de emergencias con base en umbrales. ....</i>	138
3.3.2.....	<i>Indicadores y variables basadas en instrumentación de la presa. ....</i>	139
3.3.3.....	<i>Matriz de decisiones para seleccionar la intervención adecuada según el daño, componente afectado y factibilidad de operación sin vaciado. ....</i>	141
3.4.....	<b>FASE 4: DISEÑO TÉCNICO DE LA INTERVENCIÓN Y PLAN DE REPARACIÓN INMEDIATA .....</b>	144
3.4.1 .....	<i>F4.1 Criterio Hidráulico: .....</i>	144

3.4.2.....	<i>F4.2 Criterio Geotécnico de diseño:</i>	144
3.4.3.....	<i>F4.3 Soluciones de ingeniería seleccionadas</i>	145
3.4.4.....	<i>F4.5 Diagnóstico de estabilidad de la propuesta preliminar (No cumplía con FS mínimo)</i>	147
3.4.5.....	<i>F4.6 Mejoras incorporadas en la sección revisada</i>	147
3.4.6.....	<i>Modelación de Sección de presa en nuevas condiciones</i>	151
3.4.7.....	<i>F4.7 Resultado de estabilidad con la sección revisada</i>	157
3.5.....	<b>FASE 5: APLICACIÓN AL CASO DE ESTUDIO: REPRESA EL AZÚCAR</b>	159
3.5.1.....	<i>Aplicación práctica de la metodología diseñada el caso de la represa El Azúcar</i>	159
3.5.2.....	<i>Instalación de instrumentación adicional (piezómetros, inclinómetros, medidores de caudal en drenajes)</i>	163
3.5.3....	<i>Capacitación del personal sobre riesgos y procedimientos geotécnicos en presas activas</i>	163
3.5.4....	<i>Secuencia Operativa abreviada para la intervención en la Presa el Azúcar (Sin Vaciar embalse)</i>	163
3.5.5.....	<i>Durante toda la intervención:</i>	168
CAPÍTULO 4.....		173

4.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	174
4.2. RECOMENDACIONES .....	176

## Abreviaturas

ARCA	Agencia Regulación y Control del Agua
ASDSO	Association of State Dam Safety
CAF	Corporación Andina de Fomento
CEDEGE	Comisión de Estudios para el Desarrollo de la cuenca del Rio Guayas.
CEDEX	Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
CEPAL	Comisión Económica para América Latina
ENOS	El Niño Oscilación del Sur
ENSO	El Niño Southern Oscillation
EPA.	Empresa Pública del Agua
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FEMA	Agencia Federal para el Manejo de Emergencias
FS	Factor de Seguridad
ICOLD	International Commission on Large Dams
INHERI	Instituto Ecuatoriano de Recursos Hídricos
MAATE	Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica
MSNM	Metros Sobre Nivel del Mar
NAME	Nivel de aguas extraordinarias
NAMO	Nivel de aguas máxima ordinaria
NEC.	Norma Ecuatoriana de la Construcción
NTU	Nephelometric Turbidity Unit
ORSEP	Organismo Regulador de Seguridad de Presas
PGA	Peak Ground Aceleration
PHA	Preliminary Hazard Analysis
PHASE	Plan Hidráulico Acueducto Santa Elena

SGR Secretaría de Gestión de Riesgos

SPT Standard Penetration Test

USACE U.S. Army Corps of Engineers.

## Simbología

$\emptyset$	Ángulo de fricción
cm.	centímetro
$^{\circ}C$	Grados centígrados
g	gravedad
km.	Kilómetros
l	litro
$m^2$	metros cuadrados
m	Metro
mm	Milímetros
s	segundo
s	segundo
T	Toneladas

## Índice de figuras

FIGURA 1 CONFIGURACIÓN TECTÓNICA Y MORFOLÓGICA DEL ECUADOR, (ALVARADO & ALVARADO, 2012).....	14
FIGURA 2 FUENTES SISMOGÉNICA SUBDUCCIÓN, INTERFACE E INTRA-PLACA(PARRA CÁRDENAS, 2016).....	15
FIGURA 3 FUENTE SISMOGÉNICA CORTICAL, (PARRA CÁRDENAS, 2016).....	15
FIGURA 4 DISTRIBUCIÓN DE ACELERACIONES PARA EVENTOS ESTOCÁSTICOS INDICATIVOS (BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO, 2020).....	19
FIGURA 5 MAPA DE RIESGO SÍSMICO ECUADOR NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN 2015, (MINISTERIO DE DESARROLLO URBANO Y VIVIENDA, 2014) .....	20
FIGURA 6 UBICACIÓN DE EMBALSES Y SU VALOR EXPUESTO ANTE RIESGOS DE PÉRDIDAS POR SISMICIDAD(BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO, 2020).....	21
FIGURA 7 ADAPTADO, CLASIFICACIÓN DE TIPOS DE REPRESAS DE TERRAPLÉN, (US DEPARTMENT OF THE INTERIOR BUREAU OF RECLAMATION, 2011).....	30
FIGURA 8 TIPOS DE PRESAS DE TERRAPLÉN, TOMADO Y ADAPTADO DE (FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY, 2013). .....	31
FIGURA 9 MODOS DE FALLA EN PRESAS DE TIERRA, ICOLD BOLETÍN 99.....	32
FIGURA 10 SECUENCIA DE EVOLUCIÓN DE UNA FALLA.....	34
FIGURA 11 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE FALLAS DE PRESAS BOLETÍN # 9.....	35
FIGURA 12 FIGURA SUBCATEGORÍA POR EROSIÓN INTERNA EN LAS PRESAS DE TIERRA.....	36
FIGURA 13 SUBCATEGORÍAS POR FALLAS ESTRUCTURALES EN PRESAS DE MATERIALES SUELTOS ....	36
FIGURA 14 MODOS DE FALLA DE UNA PRESA.....	37
FIGURA 15 DIAGRAMA DE FLUJO METODOLOGÍA PROPUESTA .....	67
FIGURA 16 DIAGRAMA DE FLUJO, INTERVENCIÓN Y PLAN DE REPARACIÓN INMEDIATA .....	68
FIGURA 17 MAPA DE UBICACIÓN REPRESA EL AZÚCAR .....	94

FIGURA 18 <i>MAPA FORMACIONES GEOLÓGICAS LOCAL</i> .....	95
FIGURA 19 <i>GEOMETRÍA INICIAL REPRESA EL AZÚCAR 1975</i> .....	96
FIGURA 20 <i>CRONOLOGÍA EVENTOS HISTÓRICOS PRESA EL AZÚCAR</i> .....	98
FIGURA 21 <i>CROQUIS UBICACIÓN DE ENSAYOS REALIZADOS, CAMPAÑA EXPLORATORIA INICIAL PARA CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA</i> .....	99
FIGURA 22 <i>MAPA DE RIESGO SÍSMICO NEC-15</i> .....	112
FIGURA 23 <i>ECUACIONES DE SPT Y Vs</i> .....	115
FIGURA 24 <i>TABLA DE CORRELACIÓN TIPO O PERFIL DE SUELO Y FACTOR DE AMPLIFICACIÓN FA, (MINISTERIO DE DESARROLLO URBANO Y VIVIENDA, 2014)</i> .....	117
FIGURA 25 <i>MODELACIÓN GEOTÉCNICA DE LA ESTRUCTURA REPRESA "EL AZUCAR"1976</i> .....	120
FIGURA 26 <i>MODELACIÓN GEOTÉCNICA SEEP/W FILTRACIONES</i> .....	121
FIGURA 27 <i>HISTÓRICO PRECIPITACIONES OBSERVADAS EN GUAYAQUIL DE 1915 A 1983, COMPARADAS CON LA OCURRENCIA DE EL NIÑO SEGÚN QUINN (1993), (ENERGÍA Y MINAS &amp; ROSSEL, 1997)</i> .....	134
FIGURA 28 <i>GRÁFICO NIVELES DE COTA ALCANZADOS EN LA PRESA EL AZÚCAR</i> .....	135
FIGURA 29 <i>PLANO # 2: LA NUEVA SECCIÓN DE LA PRESA SE MUESTRA A CONTINUACIÓN:</i> .....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
FIGURA 30 <i>MODELACIÓN SEEP/W REPRESA 'EL AZÚCAR' 1997</i> .....	151
FIGURA 31 <i>MANCHA DE INUNDACIÓN ROTURA DE PRESA EL AZÚCAR</i> .....	161
FIGURA 32 <i>ZONAS DE ENCUENTRO ANTE ROTURA DE PRESA</i> .....	162
FIGURA 33 <i>DESPLAZAMIENTOS DE ACUERDO A PGA</i> .....	171

## Índice de tablas

TABLA 1 <i>HISTORIAL EVENTOS SÍMICOS BASE DE DATOS NOAA (BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO, 2020).</i> .....	16
TABLA 2 <i>EVENTOS SÍMICOS Y SUS CARACTERÍSTICAS GENERALES (BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO, 2020)</i> .....	18
TABLA 3 <i>VALORES DEL FACTOR Z EN FUNCIÓN DE LA ZONA SÍSMICA ADOPTADA (MINISTERIO DE DESARROLLO URBANO Y VIVIENDA, 2014)</i> .....	20
TABLA 4 <i>REPORTE DE MONITOREO DE AMENAZAS Y EVENTOS PELIGROSOS – No 0490, SGR, 2023.</i> .....	24
TABLA 5 <i>CLASIFICACIÓN DE LAS REPRESAS EN EL ECUADOR, POR SU TIPOLOGÍA CONSTRUCTIVA (MARÍN, 1987).</i> .....	25
TABLA 6 <i>SISTEMAS HÍDRICOS, RENDICIÓN DE CUENTAS EPA, 2021 (GOBIERNO DE LA REPÚBLICA DEL ECUADOR, 2021).</i> .....	26
TABLA 7 <i>TABLA MODO DE FALLA (PRESAS DE MATERIALES SUELTOS)</i> .....	35
TABLA 8 <i>MEDIDAS DEFENSIVAS PARA MECANISMOS DE FALLA EN PRESAS DE MATERIALES SUELTOS (AGENCY, 2005).</i> .....	41
TABLA 9 <i>UMBRALES NIVELES DE EMERGENCIA MANUAL SEGURIDAD DE PRESAS DEL MICOL</i> .....	47
TABLA 10 <i>TABLA CLASIFICACIÓN DE LAS CAUSAS DE DETERIORO DE LAS PRESAS DE MATERIALES SUELTOS ICOLD 1983</i> .....	49
TABLA 11 <i>CLASIFICACIÓN DE LAS CAUSAS DE ROTURA DE PRESAS (ICOLD BOLETIN 99)</i> .....	50
TABLA 12 <i>FACTORES DE SEGURIDAD NEC 15</i> .....	53
TABLA 13 <i>FACTOR DE SEGURIDAD NEC 15</i> .....	53
TABLA 14 <i>CASOS DE PRESAS REHABILITADAS A NIVEL INTERNACIONAL</i> .....	56
TABLA 15 <i>BIBLIOGRAFÍA DE CASOS SOBRE FALLAS DE PRESAS DE MATERIALES SUELTOS A NIVEL INTERNACIONAL</i> .....	69

TABLA 16	<i>FACTORES DE SEGURIDAD MÍNIMOS REQUERIDOS</i>	73
TABLA 17	<i>ESCALA NUMÉRICA PARA CALIFICACIÓN DE CONSECUENCIA DE FALLA</i>	74
TABLA 18	<i>APLICACIÓN DE PRELIMINARY HAZARD ANALYSIS (PHA)</i>	74
TABLA 19	<i>EVALUACIÓN DE VARIABLES CRÍTICAS EN PRESAS DE TIERRA</i>	77
TABLA 20	<i>IDENTIFICACIÓN DE ESCENARIOS DE EMERGENCIAS (0 AL 3)</i>	78
TABLA 21	<i>REGLAS RÁPIDAS PARA FILTROS</i>	80
TABLA 22	<i>TABLA DE AFECTACIÓN DE ACUERDO CON COMPONENTE</i>	81
TABLA 23	<i>REVISIÓN DE NORMATIVA, ICOLD, USACE, FEMA, MITECO, ORSEP</i>	87
TABLA 24	<i>ANÁLISIS COMPARATIVO PRESA TURIMIQUIRE Y AZÚCAR</i>	90
TABLA 25	<i>SONDEOS Y CALICATAS REALIZADOS EN EL CUERPO DE LA PRESA</i>	100
TABLA 26	<i>EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA REALIZADA EN REPRESA EL AZÚCAR 1976</i>	102
TABLA 27	<i>FÓRMULAS DE CORRELACIÓN ENTRE EL SPT Y EL Vs</i>	114
TABLA 28	<i>CORRELACIÓN TIPO DE SUELO Y Vs NEC-15</i>	115
TABLA 29	<i>ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO DIVERSOS AUTORES SOBRE EL KH. (VÁZQUEZ-BALLESTER &amp; BEIRA-FONTAINE, 2018)</i>	118
TABLA 30	<i>FACTORES DE SEGURIDAD OBTENIDOS EN CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA</i>	132
TABLA 31	<i>PHA PARA IDENTIFICACIÓN DE MODOS DE FALLA Y NIVELES DE RIESGO EN PRESA EL AZÚCAR</i>	136
TABLA 32	<i>ESCENARIOS DE EMERGENCIAS CON BASE EN UMBRALES</i>	138
TABLA 33	<i>VARIABLES PARA CONSIDERAR DE ACUERDO CON ESCENARIOS EN INSTRUMENTACIÓN</i>	140
TABLA 34	<i>MATRIZ DE DECISIÓN ABORDANDO LOS ESCENARIOS Y LA ACCIÓN INMEDIATA A TOMAR</i>	142
TABLA 35	<i>FACTORES DE SEGURIDAD ADOPTADOS PARA VERIFICACIÓN DE ESTABILIDAD PARA REDISEÑO</i>	145
TABLA 36	<i>FACTORES DE SEGURIDAD ANÁLISIS ESTÁTICO NUEVA SECCIÓN</i>	158
TABLA 37	<i>FACTORES DE SEGURIDAD ANÁLISIS PSEUDO - ESTÁTICO NUEVA SECCIÓN</i>	158

<i>TABLA 38 CAUDAL Y EXTENSIÓN DE INUNDACIÓN MODELADA</i> .....	160
<i>TABLA 39 EXCAVACIÓN CONTROLADA</i> .....	164
<i>TABLA 40 INSTALACIÓN DE DRENES Y FILTROS</i> .....	165
<i>TABLA 41 RELLENO Y COMPACTACIÓN</i> .....	166
<i>TABLA 42 CONSIDERACIONES INSTALACIÓN DE GEOSINTÉTICOS</i> .....	167
<i>TABLA 43 INSTALACIÓN RECUBRIMIENTO</i> .....	167
<i>TABLA 44 PARÁMETROS PARA MONITOREO CONTINUO</i> .....	168
<i>TABLA 45 FACTORES DE SEGURIDAD Y DESPLAZAMIENTOS</i> .....	170
<i>TABLA 46 DESPLAZAMIENTOS Y UMBRALES DE SEGURIDAD</i> .....	172

## ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1 Sección Y Geometría Inicial Diseño De Presa El Azúcar En 1976

PLANO 2 Sección Y Geometría Post Intervención De Presa El Azúcar En 1996

# Capítulo 1

## 1.1 Introducción

Las represas son consideradas estructuras de gran importancia en el desarrollo social de un país (Schleiss Anton & Pougatsch Henri, 2011). Pueden ser construidas mediante materiales sueltos (presas de tierra) u hormigón, siendo la primera categoría una de las más utilizadas en la historia del desarrollo humano. En este sentido, se debe destacar que el suelo ha sido uno de los más antiguos y complejos materiales que ha permitido al hombre darles forma a grandes estructuras (Rolando Armas Novoa, Profesor Auxiliar, 2002); pero, a la vez, su diversa e intrincada naturaleza le confiere la necesidad de un análisis exhaustivo, puesto que sus propiedades físico-mecánicas, al no ser bien empleadas o entendidas, podrían conllevar a desastres de extensa envergadura (US Army Corps of Engineers, 2004).

Dentro de las estructuras de las represas pueden desencadenarse procesos que no son fácilmente observables (CIGB-ICOLD, 2013). Las represas de tierra proporcionan una fuente confiable de agua para el consumo; sin embargo, deben ser consideradas como infraestructuras de gran peligrosidad, ya que albergan una masa importante de agua en el trasdós de su estructura (U.S. Department of Homeland Security, 2013). Con el tiempo, estas estructuras se degradan; sus componentes tienen una vida útil limitada, por lo cual deberían ser fundamentales los planes de mantenimiento y auscultación periódica, pudiéndose considerar como límite 50 años, ya que de acuerdo a un informe de la ONU del 2021 (Perera, 2021), a mayor edad son más proclives a fallar, pudiendo liberar grandes cantidades de agua de forma súbita, con implicaciones de económica, pérdidas de vidas humanas, animales y cultivos, afectando a las comunidades asentadas aguas abajo.

Las construcciones hidráulicas de la antigüedad son un testimonio vivo de épocas de esplendor. Algunas de estas obras, como las presas de Proserpina y Cornalbo en España, erigidas por el Imperio Romano hace aproximadamente dos mil años, todavía están en

funcionamiento (Angelakis et al., 2024) gracias a trabajos de reparación y mantenimiento. Si bien es cierto que, desde tiempos antiguos hasta la actualidad, la ingeniería ha dado pasos agigantados en el desarrollo y análisis del comportamiento de estas estructuras, no obstante, considerando las fallas que se han generado, el marco normativo y jurídico no ha avanzado a la par, puesto que es a partir de fallos y roturas con graves consecuencias, ocurridas principalmente en EE. UU. y Europa, es desde 1960 se tomó importancia a la revisión y creación de normativa que respalde un control riguroso de estas obras hidráulicas (Contreras & Escuder-Bueno, 2023).

De acuerdo con la ASCE (American Society of Civil Engineers, 2021), en 2021 se realizó la evaluación de represas con una antigüedad mayor a 50 años de operación, calificándolas de muy riesgosas, ya que, en la mayoría de los casos, su diseño parte de conceptos ingenieriles y conocimientos de hidrología poco sólidos. Ante cambios en los regímenes hidrológicos por el cambio climático, y al carecer de un adecuado mantenimiento, pueden acumular fallas estructurales durante décadas, agravando la situación y estabilidad de las represas. Las fallas en una represa deberían conducir a investigaciones que permitan determinar modos de falla y las causas de rotura (Toledo & Morán, 2022).

Las represas de tierra construidas con arcilla compactada son muy comunes por su bajo costo, pero también son más vulnerables, ya que pueden erosionarse internamente a medida que el agua se infiltra, disgregando el material del núcleo y trasladar el material de soporte río abajo. Esto puede generar filtraciones que conduzcan a grietas y eventualmente al colapso (Emergency Management Agency, 2005).

Otra problemática muy frecuente es la insuficiente capacidad del aliviadero para drenar excedencias desde el volumen del embalse, lo cual puede desembocar en un sobrevertido que provoque erosión en la cara frontal de la represa y desencadene su colapso (Wahl, 1998) .

Numerosos incidentes en presas, tanto de hormigón como de materiales sueltos, se deben a causas hidrológicas o sísmicas, como sobrevertidos durante avenidas. Sin embargo, en muchas ocasiones, los problemas tienen un origen geotécnico, relacionado con el comportamiento estructural de la presa, lo que subraya la importancia de comprender estas patológicas geotécnicas para evitar incidentes (Sánchez Castro, 2007). [3]

A nivel mundial son múltiples los casos de represas que han fallado, dejando a su paso una estela de pérdidas materiales y de vidas humanas, tal como el caso de la represa Vajont (Italia) en 1963, con 2.000 personas fallecidas. Países como España -a partir del evento suscitado en 1959 con la rotura de la presa "Embalse de Vega de Tera", en el cual se liberaron más de ocho millones de metros cúbicos, dejando al menos 144 personas entre desaparecidas y fallecidas- han implementado instrumentos legales como la "Guía Técnica para la elaboración de planes de emergencia de presas", con el fin de garantizar la seguridad de estas estructuras (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2014).

Casos emblemáticos incluyen fallas de represas tales como Bradfield (1864), Aznalcóllar (1998) y Teton (1976). Uno de los casos más mortíferos ocurridos en EE.UU., fue en 1889, con la rotura de la represa de South Fork, cuya falla dejó alrededor de 2.200 víctimas mortales; fue tal la masa de agua liberada que, de acuerdo con expertos, igualó temporalmente el caudal del río Misisipi (Morin & Hutt, 1999).

En Puerto Rico ocurrió un incidente con la represa Guajataca (2017), la cual pudo ser reparada (Cepero et al., 2020). En Venezuela se registró una rotura en la represa "El Guapo" en el año 1999 (1999 Suárez et al.). En Argentina, un incidente fatal suscitado en enero de 1970 produjo un saldo de 42 personas fallecidas y 60 desaparecidas, luego de que la presa Frías colapsara a raíz de una intensa tormenta, inundando parte de la ciudad de Mendoza. En la última década, Brasil ha sido escenario de varias roturas de represas que han causado un alto número de víctimas humanas (Organismo Regulador de Seguridad de Presas, 2010).

Se excluyen del presente trabajo las represas de tierra que, por su propósito, están diseñadas para almacenar desechos mineros, conocidas como presas de relaves. Este tipo de presas no será considerado en este análisis debido a las diferencias fundamentales en su comportamiento desde el punto de vista de la seguridad. Aunque también son estructuras de materiales sueltos que deberían tener las mismas consideraciones de diseño, este trabajo se centra exclusivamente en presas hidráulicas de materiales sueltos, cuya seguridad y diseño responden a estándares y normativas diferentes, y cuyos mecanismos de falla difieren significativamente de los observados en presas de relaves (Vick, 1990). Vale la pena mencionar estas estructuras, ya que, al ser construidas específicamente para contener residuos mineros, presentan características y riesgos inherentes que las hacen más vulnerables a fallos, con una probabilidad de colapso significativamente mayor en comparación con las presas hidráulicas, diseñadas para almacenar agua. Esta mayor susceptibilidad a fallos ha sido documentada en eventos trágicos como los desastres de Mariana (2015) y Brumadinho (2019), donde se evidenció la fragilidad de las estructuras de relaves ante eventos naturales y errores en su gestión. El incidente de Brumadinho marco un punto de inflexión en Brasil, ya que dicha rotura dejó un saldo trágico de 270 personas fallecidas y decenas de desaparecidas, desatando un debate internacional sobre estas estructuras y su controvertido método de alteo aguas arriba (Fuller Matt, 2019).

En el contexto de las represas hidráulicas de materiales sueltos, Perú al igual que el Ecuador, es afectado por la variación extraordinaria del régimen hidrológico debido a la anomalía del Fenómeno del Niño (ENOS o ENSO), con periodos de lluvias fuertes. No obstante, Perú cuenta con un Reglamento de Seguridad de Presas Públicas de Embalse de Agua (RSP), aprobado mediante la N.º 272-2018-ANA, que establece la normativa para dar garantía del correcto funcionamiento de presas en el territorio peruano. Considerando la sismicidad, dicha normativa exige que cada presa cuente con un plan de acción ante

emergencias (Reglamento de Seguridad de Presas Públicas de Embalse de Agua, 2018). Otros países, como Argentina, cuentan con un organismo de regulación y control de la seguridad de presas, siendo considerado el ORSEP una de las entidades más importante de América del Sur. México también cuenta con normativas establecidas en 2015 para la evaluación de riesgos, el análisis y clasificación de presas (NMX-AA-17S-SCFI-2015), la inspección de seguridad (NMX-AA-175/2-SCFI-2016) y el Plan de Acción ante emergencias (NMX-AA-175/3-SCFI-2017) (Arreguín Cortés et al., 2020). El objetivo de esta entidad es "fortalecer la seguridad de los aprovechamientos multipropósitos bajo su jurisdicción, supervisando y orientando la acción de las empresas concesionarias y, a la vez, estableciendo pautas para el proyecto, construcción, operación y mantenimiento de nuevas presas en la Argentina" (Organismo Regulador de Seguridad de Presas, 2010).

Bajo estas circunstancias, a pesar de lo mencionado anteriormente, tanto Ecuador como Perú sufren los efectos de las anomalías del ENOS/ENSO. En la historia de Ecuador, estos fenómenos han provocado eventos catastróficos debido a su alta intensidad en el país, lo que ha incrementado el riesgo de la población. Esto se debe, en parte, a la falta de infraestructura adecuada y a la ausencia de planes de emergencia o medidas de mitigación frente a los riesgos potenciales, lo cual aumenta la vulnerabilidad ante la amenaza que simboliza el ENOS para el país (CORPORACIÓN ANDINA DEL FOMENTO, 1997). En el contexto de seguridad de presas, los eventos ocurridos en 1982-83 y 1997-98, que de acuerdo al estudio realizado por la CEPAL son clasificados como extraordinarios debido a las alteraciones provocadas- alcanzando temperaturas de 35°C y excesos pluviométricos mayores a 2.630 mm-, evidenciaron que, con excepción del evento de 1969, todos los ENSO se han caracterizado por precipitaciones que han superado entre 40% y 130% la media de los años normales, sobrepasando la capacidad de respuesta. Solo el evento de 1997-1998 significó daños materiales 7.500 millones de dólares (Comisión Económica para América Latina y el Caribe,

1998). Los daños ocasionados por la intensidad de las precipitaciones ocasionaron desborde de ríos, afectando a la infraestructura vial e incremento del riesgo potencial. El desborde de la represa San Marcos ocasionó daños al río Coche-Pichilingue; otras amenazas se produjeron con la rotura de la presa El Chapucal, en Colonche, generando inundaciones y pérdidas en las poblaciones aledañas aguas abajo (Corporación Andina de Fomento, 2000).

Se enfatiza la falta de una normativa, metodología o planes en Ecuador que asegure la evaluación periódica para garantizar el correcto funcionamiento de estas estructuras, así como la ausencia de planes de emergencia que permitan una respuesta resiliente ante eventos de esta naturaleza. En relación con este tema, y considerando los eventos pasados, el presente trabajo propone una metodología para la eventual abordaje ante la reparación de represas de tierra en el país, previniendo de esta manera el riesgo de rotura ante la variabilidad del régimen hidrológico. Para ello se toman como base el reglamento español, el ORSEP y la ICOLD, así como la guía del USACE (United States Army Corps of Engineers) y el Bureau of Reclamation. Esta metodología se aplica al caso de estudio de la represa "El Azúcar", construida en 1967 y ubicada en la provincia de Santa Elena, la cual fue intervenida evitando así el potencial colapso durante el evento del Fenómeno del Niño 1997-1998, considerado uno de los eventos más severos en el país, que generó cuantiosas pérdidas materiales y humanas.

### **1.1.1 Alineamiento con los Objetivos de Desarrollo Sostenible**

En el contexto de los desafíos que enfrenta actualmente la sociedad y el planeta relacionados con el cambio climático, la gestión de los recursos hídricos y la seguridad de las estructuras destinadas al almacenamiento de grandes cantidades volúmenes de agua-, la presente investigación se enmarca en los principios de la Agenda de la ONU del 2030.

- **ODS 6.-** Agua limpia y Saneamiento. Busca garantizar la disponibilidad y gestión de agua para todos. Este estudio contribuye directamente al fortalecimiento de dicho objetivo al proponer una metodología que mejora la seguridad, operación y resiliencia de las represas de materiales sueltos, garantizando la continuidad y calidad de recursos hídricos.
- **ODS 11.-** Ciudades y Comunidades sostenibles. Orienta sus metas hacia la reducción de los riesgos de desastres y la protección de las comunidades frente a los impactos ambientales. La aplicación de esta propuesta metodológica permite reducir la vulnerabilidad de las poblaciones aguas abajo, fortaleciendo su resiliencia ante eventos hidrometeorológicos extremos asociados al fenómeno ENSO (El Niño-Oscilación del Sur).

## **1.2 Descripción del Problema**

Debido a las múltiples incertidumbres que rodean el funcionamiento de las represas existentes, junto con la posibilidad de fallas catastróficas como filtraciones o defectos en el diseño estructural, es fundamental reconsiderar las estrategias de seguridad en los planes de manejo de represas en el Ecuador. En este sentido, se vuelve necesario implementar un plan de acción mediante una metodología que permita la intervención controlada ante el eventual riesgo de colapso en represas de tierra y, en casos específicos, aumentar los factores de seguridad por encima de los valores tradicionales. Esto garantizaría una mayor protección ante eventuales fallas, minimizando los riesgos tanto para las infraestructuras como para la población que reside aguas abajo. Considerando el riesgo asociado a un evento de esta magnitud y basándonos en experiencias históricas a nivel mundial, este trabajo incorpora

criterios establecidos por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE), las normas de diseño del Bureau of Reclamation (Normas de Diseño No. 13 para Represas de Materiales Suelos), y las recomendaciones de la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA). Asimismo, se consideran las normativas aplicadas en España (La Guía Técnica para la elaboración de planes de emergencia de presas) y en Argentina (ORSEP).

### **1.3 Justificación del Problema**

A pesar de que existen modelos internacionales para el análisis del comportamiento de presas de tierra, en el Ecuador persisten vacíos en la aplicación constante, actualización y monitoreo de estos enfoques, lo que incrementa la incertidumbre sobre su desempeño real. Un ejemplo crítico es el colapso de la represa Chapucal en 1998 (Corporación Andina de Fomento, 2000), ocurrido por la insuficiencia del vertedero de servicio frente al evento extremo asociado al Fenómeno de El Niño. Este antecedente evidencia la urgencia de contar con una metodología integral que permita intervenir y reparar este tipo de estructuras incluso durante su operación, considerando que muchas de ellas cumplen funciones esenciales de riego y abastecimiento de agua para la población.

El Ing. Enrique Herbozo Alvarado, MSc., responsable del rediseño de la represa "El Azúcar" (estructura considerada como caso de estudio en el presente trabajo), señaló que la estructura debía ser intervenida debido a la presencia de agrietamiento longitudinal intenso, con fisuras de hasta 4 metros de profundidad, lo cual podría haber desencadenado la inestabilidad de los taludes debido a las filtraciones de agua lluvia, incluyendo filtraciones en el estribo izquierdo. El citado profesional también señaló inconsistencias en el diseño estructural, siendo necesario rediseñar el núcleo e incrementar el nivel de la corona. Esto deja

en evidencia la importancia de desarrollar una propuesta que permita la intervención y reparación de la represa El Azúcar, garantizando su óptimo funcionamiento y su seguridad a largo plazo.

## **1.4 Objetivos**

### ***1.4.1 Objetivo general***

Desarrollar una propuesta metodológica para la intervención y reparación de represas de materiales sueltos en Ecuador, tomando como referencia normativa internacional y experiencias previas, con la finalidad de prevenir el riesgo de colapso ante eventos hidrológicos extremos como el ENSO, garantizando el correcto funcionamiento de las infraestructuras y la seguridad de la población.

### ***1.4.2 Objetivos específicos***

1. Establecer el Estado del Arte, mediante investigación bibliográfica en el contexto mundial, regional y local, con el fin de implementar experiencias previas en esta tipología de trabajos y las intervenciones en estructuras hidráulicas en operación.
2. Aplicar un PHA para identificar los modos de falla y niveles de riesgo de la presa El Azúcar, con el fin de analizar su comportamiento y estabilidad global.
3. Evaluar la factibilidad y aplicar la metodología propuesta al caso de la presa El Azúcar, mediante la verificación de umbrales y modos de falla críticos, y el desarrollo de una secuencia operativa para su intervención en estado activo.

## **1.5 Marco teórico**

### **1.5.1 Contexto geográfico y climático de Ecuador**

Ecuador, situado en el noroeste de América del Sur, presenta una notable diversidad climática debido a sus regiones geográficas. La Costa representa una faja de ancho variable entre 20 y 200 km y de 530 km de longitud (Ayón et al., 1998), presenta un clima cálido y húmedo. La Sierra, con altitudes variables, es más fría en sus zonas de mayor elevación. La Amazonía tiene un clima tropical y lluvioso, y las Islas Galápagos presentan con un clima subtropical seco con estaciones diferenciadas. Estos climas se deben a factores como la altitud, la latitud, las corrientes marinas y la presencia de la Cordillera de los Andes (Secretaría de Gestión de Riesgos & Gobierno del Ecuador, 2023). Debido a esta variabilidad e influencia climática, el país enfrenta una gran vulnerabilidad ante desastres naturales de origen meteorológico y geológico. Bajo condiciones normales, su clima está determinado por la interacción de corrientes de aire provenientes de ambos hemisferios. La zona de Convergencia Intertropical, una franja donde convergen estas corrientes, cambia su posición entre el norte y el sur a lo largo del año, jugando un papel clave en la configuración del clima del país (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 1998).

### **1.5.2 Impacto de periodos de lluvias intensas, episodios del ENSO (El Niño Oscilación del Sur), y su afectación sobre la infraestructura hidráulica del país.**

Los fenómenos oceánicos y atmosféricos que ocurren en el Pacífico intertropical son cruciales para el clima en Ecuador. Su ubicación costera, al este de este océano, lo sitúa en una zona donde el Fenómeno de El Niño tiene una influencia especialmente intensa constituyendo así uno de los eventos más catastróficos para el ecosistema costero e insular del país. Diversos estudios han demostrado que este fenómeno genera una gran variabilidad en el

clima de la costa ecuatoriana, provocando fluctuaciones significativas en las lluvias, con períodos de sequía y lluvias intensas en diferentes años (Corporación Andina de Fomento, 2000). Las lluvias vinculadas a los períodos de ENOS provocan inundaciones, principalmente debido al desbordamiento de ríos y la saturación del suelo. Algunas de estas inundaciones avanzan lentamente, mientras que otras son súbitas y violentas (Secretaría de Gestión de Riesgos & Gobierno del Ecuador, 2023), lo que constituye una amenaza de enormes proporciones puesto que, al provocar el aumento en el caudal de los ríos, superando los niveles de diseño; si esto se combina con infraestructura mal mantenida, se incrementa significativamente la probabilidad de fallos estructurales.

A lo largo del siglo XX, el fenómeno de El Niño afectó repetidamente a Ecuador y países vecinos, siendo los eventos de 1982-3, 1957-8, 1972-3 y 1997-8 los más graves. El evento de 1982-3 ocasionó pérdidas estimadas en 650 millones de dólares, impactando la producción, infraestructura y sectores sociales. Estas afectaciones trajeron serias consecuencias macroeconómicas y afectaron el bienestar de gran parte de la población (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 1998). En 1997 constituyó un evento del ENSO de magnitud excepcional, comparable posiblemente solo al de mediados del siglo XVI. Las anomalías se intensificaron: en diciembre, el nivel del mar alcanzó 45 centímetros por encima de lo normal, superando al evento de 1982-1983. La temperatura del agua subió casi a 30 grados Celsius en marzo de 1998. Según los estudios del INAMHI y los criterios técnico-científicos internacionales, los eventos de El Niño de 1983 y 1998 se caracterizaron por temperaturas superiores a 35°C y niveles de precipitación que superaron los 2,630 mm (Corporación Andina de Fomento, 2000). Dicho evento correspondió a un periodo de retorno de 500 años.

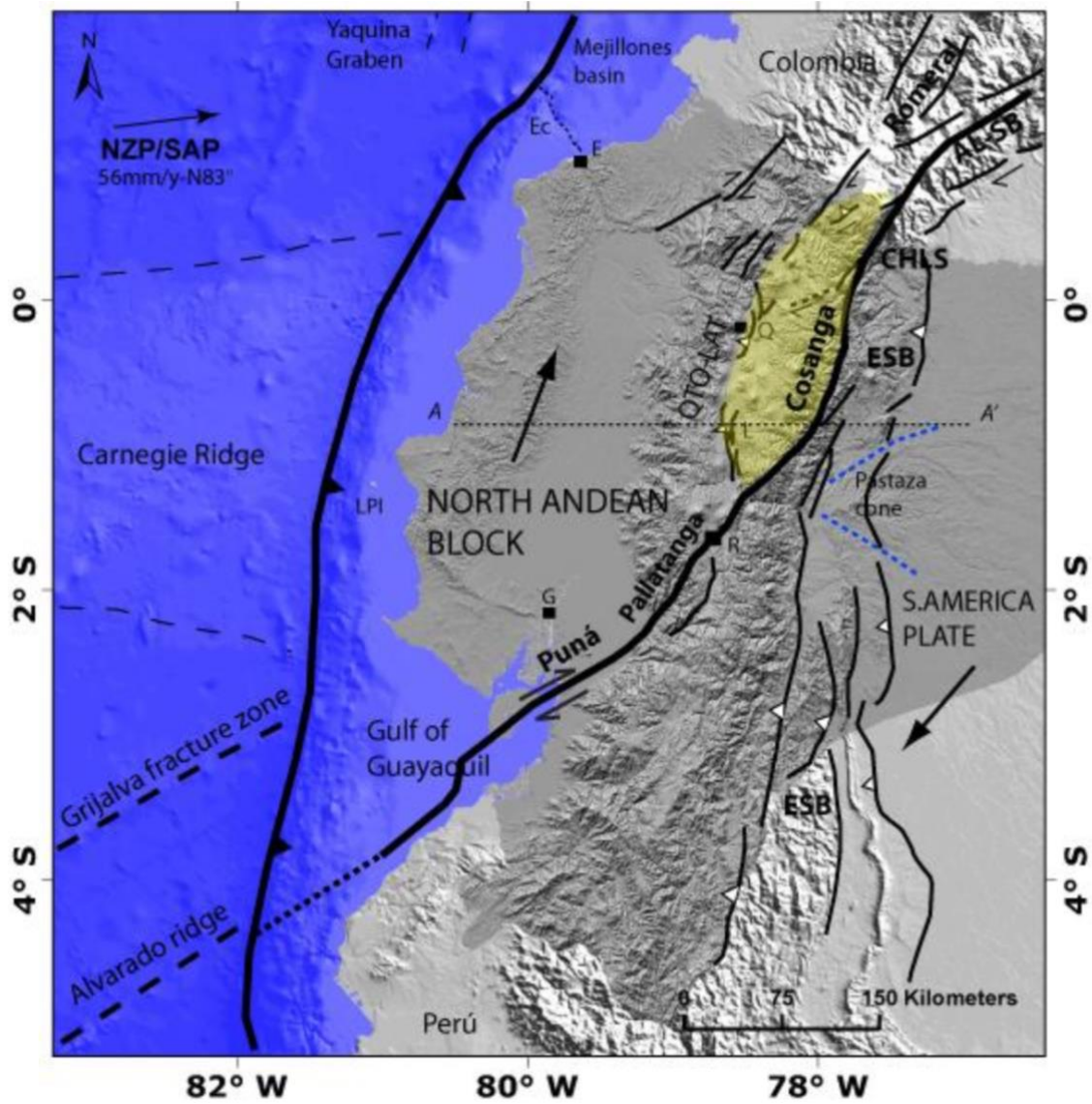
### 1.5.3 Riesgo Sísmico en Ecuador:

El Ecuador se localiza en el extremo noroccidental de Sudamérica, dentro de la zona de convergencia entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana, donde la primera se introduce bajo la segunda a través de la fosa peruana-ecuatoriana, con una velocidad aproximada a 61 mm/año ( [Figura #1](#)). Este proceso tectónico, dentro del Cinturón de Fuego del Pacífico, da lugar a una intensa actividad sísmica, manifestada en terremotos de interfaz, sismos Intraplaca y eventos corticales asociados al acortamiento de la corteza terrestre en los Andes.

La compleja dinámica geológica del país, caracterizada por fallamiento activo y deformación tectónica continua, explica la recurrencia de terremotos de gran magnitud. Se estima que, desde la época colonial, más de 65.000 personas han fallecido a causa de eventos sísmicos. El más reciente de gran escala ocurrió en 16 de abril, alcanzando una magnitud de Mw 7.8 y afectando severamente a la provincia de Manabí y al sur de Esmeraldas (Instituto Geofísico – Escuela Politécnica Nacional, 2022.).

De acuerdo con los registros históricos comprendidos entre 1542 y 2021, Ecuador ha experimentado numerosos sismos de gran magnitud asociados a su ubicación en una zona de subducción activa. Estos procesos, capaces de originar terremotos de alta energía a corta distancia de áreas pobladas, han tenido un notable impacto en la infraestructura, la población y la economía nacional (Banco Interamericano de Desarrollo, 2020).

**Figura 1** Configuración tectónica y morfológica del Ecuador, (Alvarado & Alvarado, 2012)

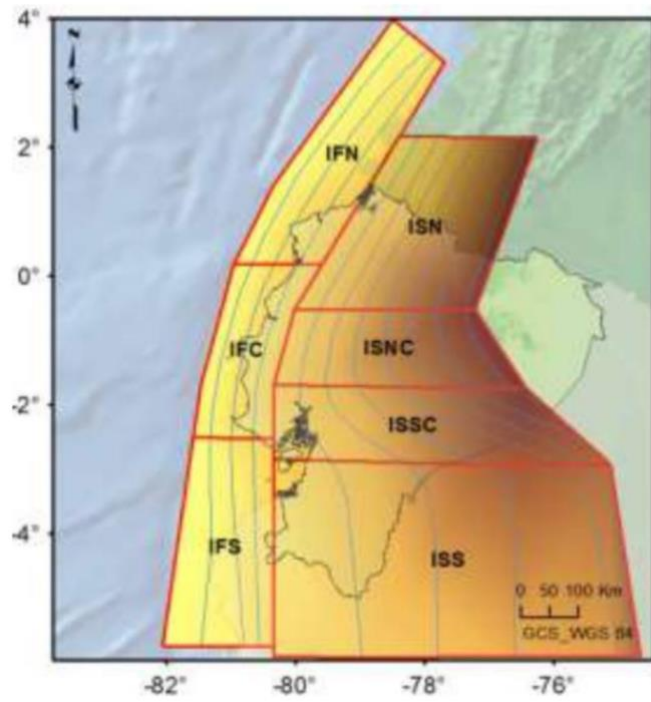


Las principales fuentes sismogénicas del país provienen de tres tipos de origen, Interfaz, Intraplaca y Cortical ([Figura #2](#) y [#3](#)). De acuerdo con el modelo probabilista de amenaza sísmica desarrollado por Parra (2016), se identifican 21 fuentes en total, distribuidas en:

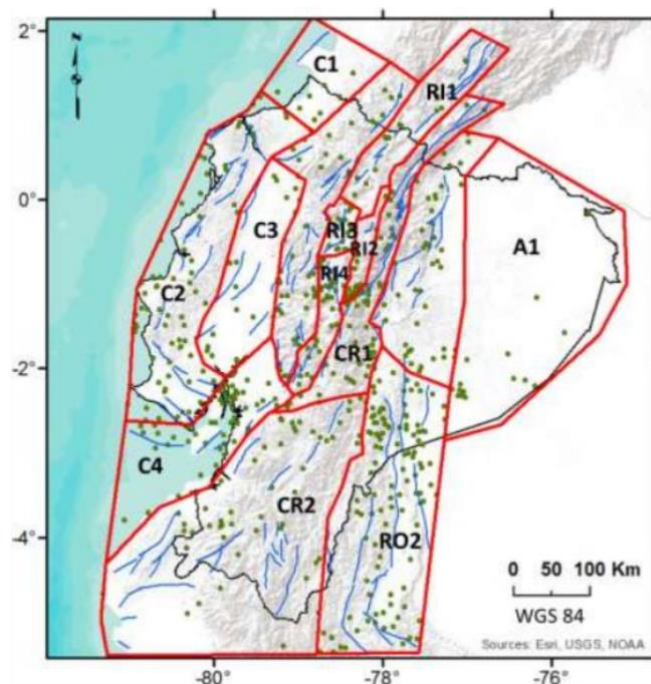
- 3 de Interfaz
- 4 Intraplaca
- 14 corticales

La caracterización de estas fuentes se realiza mediante la asignación de eventos de catálogo sísmico, considerando su geometría tridimensional (Banco Interamericano de Desarrollo, 2020)

**Figura 2** Fuentes sísmogénica subducción, Interface e Intra-Placa (Parra Cárdenas, 2016)



**Figura 3** Fuente sísmogénica cortical, (Parra Cárdenas, 2016)



Los registros históricos muestran que, en los últimos cinco siglos, Ecuador ha sufrido varios terremotos con graves consecuencias humanas y económicas. Entre ellos destacan los de 1797 y 1868, que provocaron aproximadamente 40,000 y 70,000 víctimas, respectivamente, así como los de 1987 y 2016, cuyas pérdidas económicas se estimaron en cerca de 1.000 millones de dólares (BID) ([Tabla #1](#) y [Tabla # 2](#)).

**Tabla 1** Historial eventos sísmicos base de datos NOAA (Banco Interamericano de Desarrollo, 2020).

AÑO DE EVENTOS	prof.	Mag.	Int	Víctimas fatales		Heridos		Pérdidas Económicas		Casas Destruídas		Casas Afectadas	
	(km)	(-)	(-)	#	Cat	#	Cat	\$Mill	Cat	#	Cat	#	Cat
1556\10\17		7.6											
1575\9\8		7.8			3								
1587\8\30			9		3								
1590\8\7									2				
1627\6\26			8						2				
1640\2\				5000	4				3				
1641\1\10		7.6											
1645\2\19		7.5			3								
1660\10\27		7.7											
1662\1\1									2				
1674\8\29		7.7	10										
1687\11\22		7.3							2				
1689\3\	5	6.8	10										
1698\6\20		7.7	10		3								
1698\7\19				1000	3				3				
1736\12\5									2				
1755\4\26		7.0	9		3				3				
1757\2\22		7.0	9	1000	3				3				
1797\2\4		8.3	11	40000	4				4		4		
1808									1				
1859\3\22					1				3				
1868\8\15		8.0	8		1				3		3		
1868\8\16	20	7.7	10	70000	4				4		4		
1901\1\7	25	7.8											
1904\11\1		7.7											
1906\1\31	25	8.6	9	1000	3				2		3		
1906\2\7													

1906\9\28	150	7.9	7						1				
1913\2\24	50	7.7	7		3				3		3		
1914\5\31	10	5.8	10										
1923\2\24		6.8	9		2								
1924\3\3		6.9		40	1				1				
1933\10\2	33	6.9											
1938\8\10	10	6.3	10										
1942\5\14	30	7.9	9	200	3			2.5	2		3		
1943\1\30	100	6.9	6						2				3
1949\8\4	10	6.7	10										
1949\8\5	60	6.8		6000	4			7.5	3				
1950\8\5	60	6.8	11										
1956\1\16		7.3	9						2				
1960\7\30	21			11	1				1				
1969\12\17	27	4.2							3				
1976\4\9	9	6.7		10	1			4	2				
1980\8\18	55	5.6		8	1	100	2	5	2				
1987\3\6	10	7.2		5000	4			1500	4				
1987\9\22	10	6.2		2	1	12	1		2		3		
1989\6\25	15	6.1	7						2				
1990\8\11	5	4.4		4	1	10	1		3			1300	4
1995\10\3	24	7.0		2	1	5	1		1	83	2		
1996\3\28	33	5.9	6	27	1			7	3				
1998\8\4	33	7.2		3	1	40	1		2				3
2005\1\24	17	6.1							2		2		
2005\10\24	35	4.8	6						1				
2007\7\13	50	4.5							1				
2007\11\16	123	6.8							1				
2009\10\9	35	5.4							1				
2010\8\12	207	7.1							1				
2011\10\29	3	4.0							1				2
2014\8\12	5	5.1		2	1	8	1						
2016\4\16	21	7.8		663	3	6274	4	3300	4	6998	4	29672	4
2016\5\18	31	6.8		1	1	162	3		1		1	32	1
2016\12\19	10	5.4		3	1				1	10	1	65	1

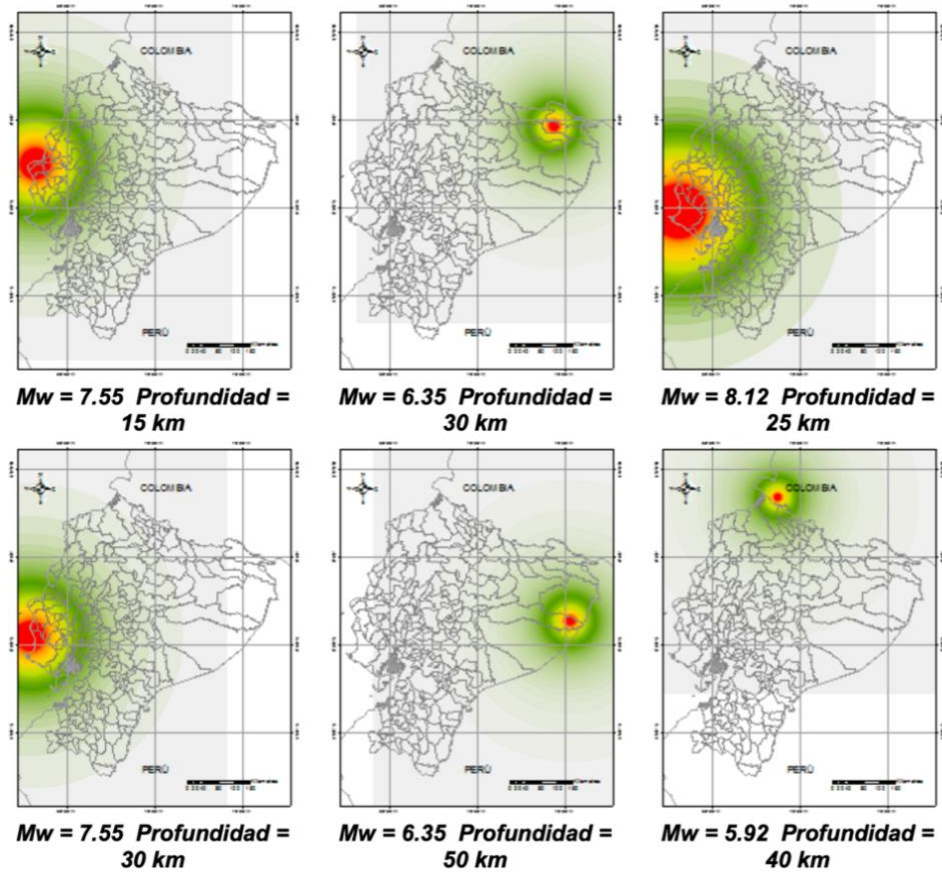
**Tabla 2** *Eventos sísmicos y sus características generales (Banco Interamericano de Desarrollo, 2020)*

Año	Ubicación	Magnitud	Profundidad	Perdidas	Número	Número de Afectados	Periodo de retorno aproximado o del evento (años)
			(km)	(Millones US\$)	Víctimas		
04/02/1797	Riobamba	8.3*	10	40	40	-	15
15/02/1868	El Ángel	6.6	10	15	-	-	2
16/02/1868	Ibarra	7.3	10	40	70	-	12
31-01-06	Costas del	8.8	20	3	1	-	> 100
	Norte						
	Ecuador						
14-05-42	Manabí	7.8	19	3	200	-	25
05-08-49	Pelileo	6.1	10	15	6	100	< 1
19-01-58	Esmeraldas	7.6	30	3	110	-	15
09-04-76	Esmeraldas	6.6	17	4	10	20	2
12-12-79	Tumaco,	8.2	38	3	800	-	70
	Colombia						
18-08-80	Guayaquil	5.9	56	5	10	100	< 1
06-03-87	Napo	7.1	12	1,5	5	-	8
28-03-96	Cotopaxi	5.9	14	7	27	30	< 1
04-08-98	Bahía de	7.1	34	15	50	2	8
	Caráquez						
16-04-16	Pedernales	7.8	17	3,3	663	390	25

Mediante estudios realizados por el BID se esperan las siguientes recurrencias de magnitudes de sismos importantes:

- M>8.0 con un periodo de retorno aproximado de 110 años
- M>7.5 con un periodo de retorno aproximado de 24 años
- M>7.0 con un periodo de retorno aproximado de 8 años

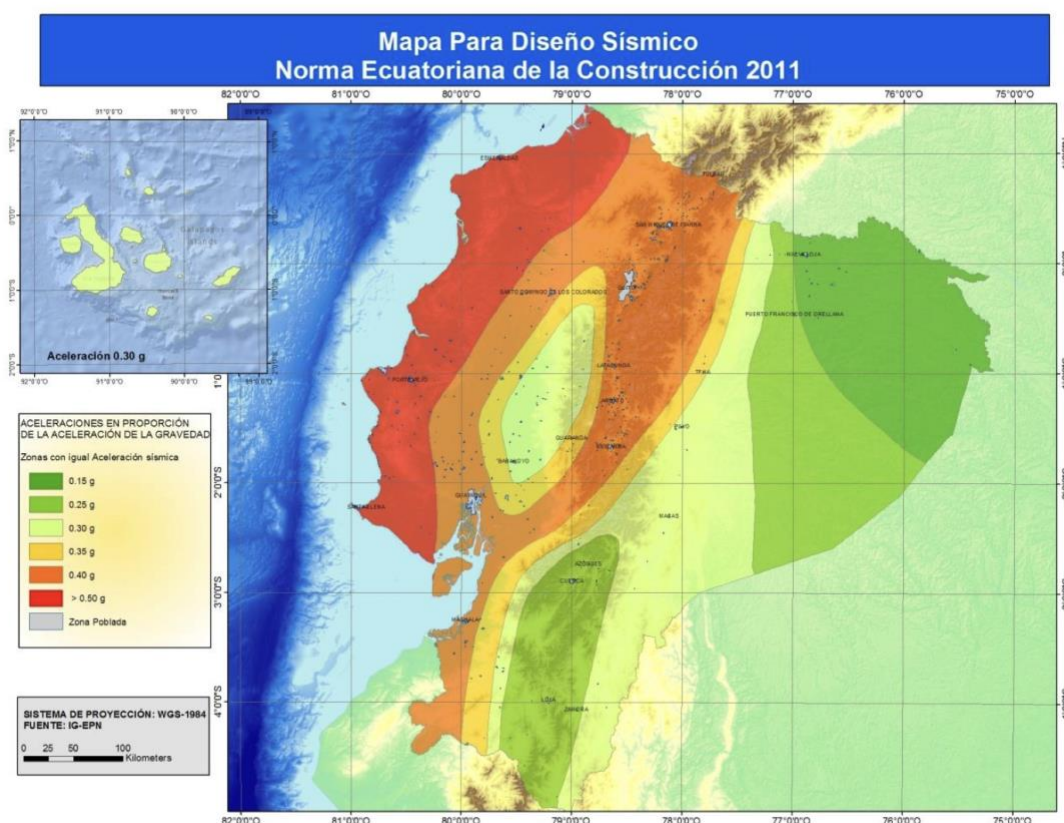
**Figura 4** Distribución de aceleraciones para eventos estocásticos indicativos (Banco Interamericano de Desarrollo, 2020)



En estudios más recientes de peligrosidad sísmica en Ecuador, destaca el mapa de zonificación sísmica 2011 (NEC-11), elaborado bajo un enfoque probabilístico para un 10% de probabilidad de excedencia en 50 años (equivalente a un periodo de retorno de 475 años). Este mapa define seis zonas sísmicas según la aceleración pico esperada en roca (PGA), que varía entre 0.15 g en el nororiente y más de 0.50 g en la región costera (PM).

Actualmente se cuenta con la versión al 2015 de la NEC (NEC-15), que incorpora un mapa sísmico más preciso (Figura # 5), mayores exigencias en diseño estructuras y un mejor alineamiento con normas internacionales, fortaleciendo la seguridad sísmica en el país.

**Figura 5** Mapa de Riesgo Sísmico Ecuador Norma Ecuatoriana de la Construcción 2015, (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2014)



**Tabla 3** Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2014)

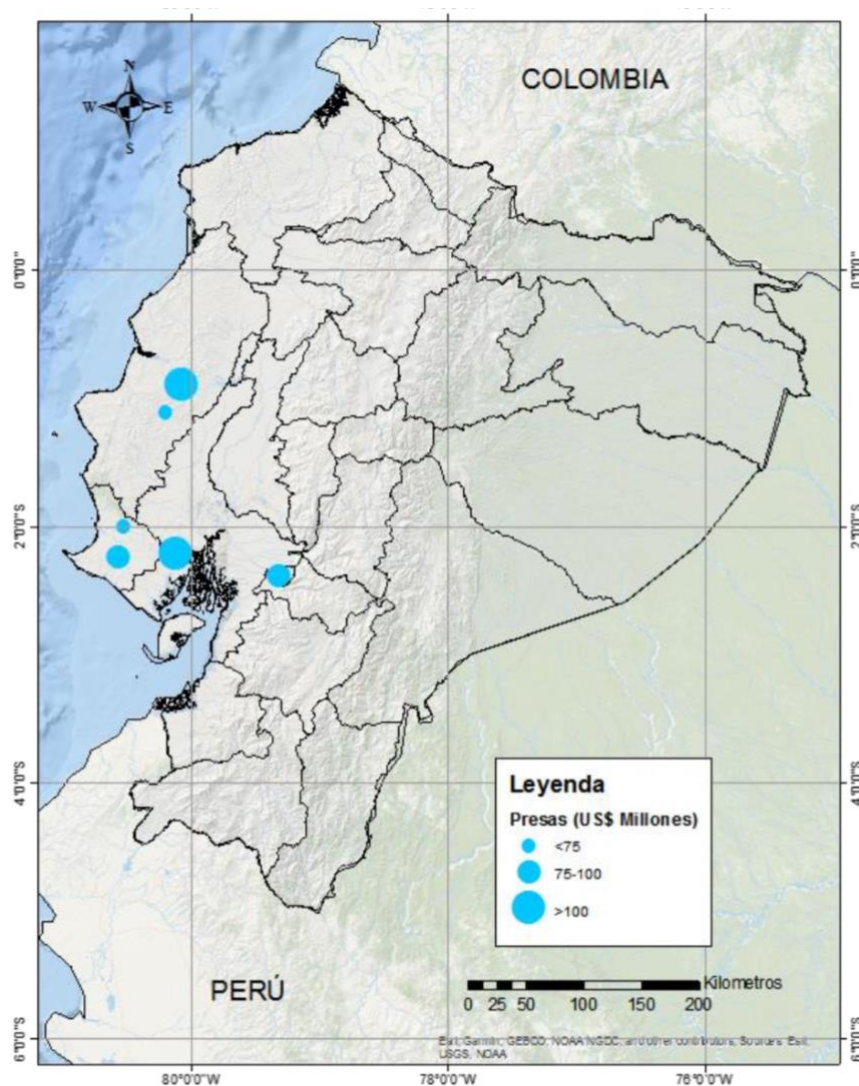
Zona Sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Valor Factor Z	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	$\geq 0.50$
Caracterización del peligro sísmico	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy Alta

Con base en información provista por el Ministerio del Agua, se realizó la zonificación considerando el valor expuesto y ubicación de los embalses a mayor potencial de pérdida en el Ecuador. El embalse Chongón se identifica como el de mayor tamaño con un

valor aproximado de \$ 165 millones de dólares y un volumen de almacenamiento cercano de  $275 \text{ Hm}^3$ .

Las demás presas presentan un valor expuesto de \$ 137 millones. En total se tienen 6 presas con un valor expuesto de \$ 1,150 millones ( [Figura 6](#)).

**Figura 6** Ubicación de embalses y su valor expuesto ante riesgos de pérdidas por sismicidad(Banco Interamericano de Desarrollo, 2020)



#### **1.5.4 Falta de planes de seguridad y mantenimiento en Ecuador, incrementa el riesgo de rotura de represas de tierra.**

Ecuador cuenta con el Sistema Nacional Estratégico del Agua, que involucra activamente a varias entidades y ministerios responsables de regular la infraestructura hidráulica del país. Asimismo, la Constitución ecuatoriana la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua, creada en el año 2014 (Reglamento Ley Recursos Hídricos, usos y Aprovechamiento del Agua, 2015) , mediante la cual se definen las normas y decretos relacionados con la gestión del agua.

La Autoridad Única del Agua, anteriormente conocidas como Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA), es el ente principal responsable de la planificación y gestión de los recursos hídricos en el país (Ministerio del Ambiente, 2023). A partir del Decreto Ejecutivo No 59, publicado en el Registro Oficial No. 478 del 22 de junio del 2022, esta autoridad pasó a ser ejercida por el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) (Gobierno de la República del Ecuador, 2024).

De la Autoridad Única del Agua, se derivan dos instituciones principales: la Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA), la cual es un organismo técnico administrativo, con personalidad jurídica de derecho público, que tiene entre sus 14 objetivos, y el que va más enfocado a este trabajo, el *“Recopilar, procesar y administrar la información hídrica de carácter técnico y administrativo”*; *“Emitir normativa técnica para el diseño, construcción y gestión de la infraestructura hídrica, y controlar su cumplimiento”* (Decreto Presidencial N310, 2014). Y la Empresa Pública del Agua (EPA), cuyo objeto comprende *“La contratación, administración, y supervisión de proyectos de infraestructura hídrica de competencia del Gobierno Central en sus fases de diseño, construcción, operación y mantenimiento”* (Decreto Presidencial N310, 2014). También intervienen el Consejo

Intercultural y Pluricultural del Agua, Los Ministerios de Agricultura, Salud y Ambiente, Los Gobiernos Autónomos Descentralizados y Los Consejos de Cuenca, estos últimos deben participar en “la formulación de directrices y orientaciones, así como el seguimiento del plan de gestión por cuenca hidrográfica, en el marco del Plan Nacional de Recursos Hídricos”.

La normativa se basa principalmente en la Ley de Recursos Hídricos y el Código Orgánico del Ambiente; aunque estos establecen estudios de impacto ambiental obligatorios, no especifican planes de mantenimiento dirigidos o enfocados directamente hacia represas. Aunque en Julio del 2023 la EPA, publicó un plan de acción ante el Fenómeno del Niño, en el cual contempla la identificación de los principales Sistemas Hídricos, así como las zonas susceptibles a inundación, y una gestión integrada interinstitucionalmente ante emergencias (Secretaria de Gestión de Riesgos, 2023), por otra parte, la página web de la Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA), se puede encontrar **“La guía para la formulación del plan de contingencia a implementarse ante la ocurrencia de eventos adversos que afecten a la calidad del agua de consumo humano”, así como “ ; “ Fichas técnicas para el levantamiento de información”** (ARCA, 2024), y en este sentido, siguiendo el plan de acción de la gestión integrada interinstitucionalmente, es la Secretaria de Gestión de Riesgos quien emite boletines mediante la Dirección de Monitoreo de Eventos Adversos, en donde hace hincapié el monitoreo de presas y represas, pero solo enfocado al monitoreo del nivel de cota mínima y máxima (Dirección de Monitoreo de Eventos Adversos, 2023), como se muestra en la [Tabla #4](#).

**Tabla 4** Reporte de Monitoreo de amenazas y eventos peligrosos – No 0490, SGR,  
2023.

<b>Peligro por apertura y/o colapso de presas y represas, región costa. Secretaria de Gestión de Riesgo</b>					
<b>Recurso</b>	<b>Cota</b>	<b>Cota</b>	<b>Cota</b>	<b>Hora de</b>	<b>Valoración</b>
Daule Peripa, Guayas	70.00	-	85.00	-	-
Central Baba, Los Ríos	114.00	-	117.00	-	-
Chongón, Guayas	44.50	-	51.15	-	-
El Azúcar, Santa Elena	40.00	-	45.09	-	-
San Vicente, Santa Elena	50.00	-	57.49	-	-
La Esperanza, Manabí	53.40	-	55.00	-	-
Poza Honda, Manabí	104.29	-	106.50	-	-
Multipropósito Chone, Manabí	48.00	-	68.50	-	-

La normativa de países como EE. UU., España o Argentina, en lo que respecta a Inspección y Mantenimiento, exige el monitoreo continuo o anual de las represas; en el Ecuador no hay un sistema formalizado para inspecciones regulares con la misma frecuencia o rigor que en otros países. La falta de sistemas de telemetría en muchas presas es un área que necesita mejorar.

Las presas en Ecuador deben contar con planes de emergencia, aunque en la práctica, estos planes no siempre están actualizados ni implementados de manera efectiva. Los sistemas de alerta temprana aún no están plenamente desarrollados en el contexto de una emergencia ante el colapso de una represa. De acuerdo al “Plan de Acción ante el Fenómeno del Niño en Ecuador, 2023-2024”, este plan está guiado a establecer acciones “interinstitucionales y de multinivel” ante el riesgo inminente de inundación, así como movimientos en masa, pero no determina un plan o guía previa para el monitoreo y mantención de represas, tal que, ante el ENSO, puedan tener un desempeño óptimo. (Secretaría de Gestión de Riesgos, 2023).

### 1.5.5 Estado actual de las represas en Ecuador:

La variedad geográfica y los distintos microclimas en Ecuador hacen que planificar la construcción de presas sea un reto complejo para la ingeniería. Alrededor del 70% de las presas construidas están en zonas secas con escasas precipitaciones, asentadas en suelos débiles o en rocas blandas y fracturadas, y la mayoría son presas de tierra destinadas a riego y abastecimiento de agua potable. Sin embargo, las inversiones más grandes se han orientado a proyectos hidroeléctricos o de uso múltiple, como las presas de Paute y Daule Peripa. Los principales obstáculos en la construcción y operación de presas en Ecuador incluyen la falta de materiales de calidad en las proximidades de las obras, la debilidad de las cimentaciones, la alta sedimentación en los embalses y la falta de documentación técnica en el diseño. Esta última situación se debe a que muchas de las presas medianas y grandes fueron desarrolladas por consultores extranjeros que, en muchos casos, no compartieron la información técnica para beneficio del país (Marín, 1987) ([Tabla #5](#)).

**Tabla 5** *Clasificación de las Represas en el Ecuador, por su tipología constructiva (Marín, 1987).*

Nombre	Provincia	Tipología
Seria Albarradas	Guayas-Manabí	Tierra
El Junco	Galápagos	Gravedad o Mampostería
Punta Carnero	Guayas	Tierra
CNR El Oro	El Oro	Gravedad o Mampostería
Serie CNR	Manabí	Gravedad o Mampostería
Serie CNR	Guayas	Gravedad o Mampostería
Serie CNR	Pichincha	Gravedad o Mampostería
Serie CNR	Chimborazo	Gravedad o Mampostería
Serie	Sierra	Gravedad o Mampostería
Tembladeras	El Oro	Tierra
El Azúcar	Guayas	Tierra
Poza Honda	Manabí	Tierra

San Vicente	Guayas	Tierra
Series CEDEGE	Guayas	Gravedad o Mampostería
Labrador	Azuay	Gravedad o Mampostería
Pisayambo	Tungurahua	Tierra
Paute	Azuay	Presa de Arco
Tahuín	El Oro	Tierra
Agoyán	Tungurahua	Gravedad o Mampostería
Daule Peripa	Guayas	Tierra
Paján	Manabí	Tierra

De acuerdo con el boletín de "Rendición de Cuentas del 2021", emitido por la Empresa Pública del Agua, EPA, el Ecuador cuenta con 15 sistemas hídricos construidos por la EPA EP y otros construidos por entidades Estatales [\(Tabla #6\)](#) (Gobierno de la República del Ecuador, 2021).

**Tabla 6** *Sistemas Hídricos, Rendición de cuentas EPA, 2021 (Gobierno de la República del Ecuador, 2021).*

	<b>SISTEMAS HÍDRICOS</b>	
	<b>SISTEMAS ADMINISTRADOS</b>	<b>POBLACIÓN BENEFICIADA</b>
<b>CONSTRUIDO POR EPA EP</b>	Trasvase Chongón-San Vicente	85.000
	Trasvase Daule - Vinces	127.000
	Propósito Múltiple Chone	125.000
	Control de Inundaciones Bulubulu	65.000
	Control de Inundaciones Cañar	61.000
	Control de Inundaciones Naranjal	81.000
	<b>SUBTOTAL</b>	544.000
<b>CONSTRUIDO POR OTRAS ENTIDADES ESTATALES</b>	Trasvase Daule-Santa Elena	500.000
	Trasvase Manabí	465.000
	Control de Inundaciones Cuenca Baja del Guayas	58.000
	Multipropósito Tahuín	60.000
	Latacunga-Salcedo - Ambato	15.000
	Multipropósito Quimiag	6.200
	Ambuqui	4.300
	Santiagoullo-Cuambo	465
	<b>SUBTOTAL</b>	1.108.965
	<b>TOTAL</b>	<b>1.652.965</b>

Mediante la Secretaria de Gestión de Riesgos, existen planes y guías para evacuación en caso de Eventos Adversos; así mismo, mediante la Dirección de Monitoreo de Eventos Adversos, se emite diariamente un boletín donde se realiza una verificación de los niveles máximos y mínimos de las cotas de agua en las represas, como se comentó en líneas anteriores, pero no provee un plan de revisión a nivel técnico para la inspección de dichas obras. Hasta la presente fecha, solo se cuenta con la Resolución emitida el 4 de octubre del 2024, considerando lo estipulado en la Ley Orgánica para la Gestión Integral de Riesgo de Desastres; en dicha resolución, en el numeral 3, "Se ordena a la Empresa Pública del Agua, a través del Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica, que presente un informe sobre el Plan de Operaciones de las represas bajo su responsabilidad. El objetivo es asegurar el suministro de agua para los cantones que dependen de estas infraestructuras" (COE Nacional, 2024). De acuerdo con las resoluciones del ARCA, existe un rubro destinado para la mantención de la Infraestructura Hidráulica, incluida las represas, con el objeto de gasto denominado "Operación de Infraestructura (Obras civiles y Redes)".

#### ***1.5.6 Marco conceptual sobre represas de tierra***

De acuerdo con la Comisión Internacional Para Grandes Presas (ICOLD), define como "presa grande" aquella estructura cuya envergadura con 15 metros o más desde su cimiento hasta su coronación, o una presa de entre 5 metros y 15 metros que embalsan más de 3 millones de metros cúbicos (Comisión Internacional de Grandes Presas, 1997). Pueden ser clasificadas según su potencial de peligrosidad, el cual no implica una relación directa a la propensión a la falla, sino la devastadora consecuencia si dicha falla se produjera (Infrastructure Report Card- DAMS, 2021).

Estas infraestructuras de almacenamiento, regulación y control de avenidas se encuentran en manos de diversas instituciones y particulares, pero por lo general están situadas sobre cauces de propiedad nacional, por lo cual, cuando ocurre un evento que pone en riesgo a la población o le ocasiona algún perjuicio a la sociedad o a otra infraestructura, obliga a las instituciones públicas a intervenir, ya sea en auxilio de la población, o como autoridad para evitar consecuencias funestas.( Murillo).Una falla debe ser conceptualizada de forma diferente que un incidente (Suárez et al.).

Las represas de terraplén están hechas de suelo compactado. Los dos tipos más comunes son las de relleno de roca o enrocados y las de terraplén; estas últimas se componen de suelos adecuados obtenidos de áreas de préstamo o excavación requerida, que se extienden y compactan en capas por medios mecánicos (Federal Emergency Management Agency, 2013). El diseño y construcción de las represas de terraplén o de relleno de roca es complejo debido a la naturaleza de las condiciones variantes de la cimentación y del rango de propiedades de los materiales disponibles para el uso del terraplén (US Army Corps of Engineers, 2004b). Los métodos modernos de transporte y los avances en la mecánica de suelos desde finales del siglo XIX han aumentado en gran medida la seguridad y la vida útil de estas estructuras (US Department of the interior Bureau of Reclamation, 2011).

Las principales ventajas de las presas de tierra son:

- Utilizan materiales naturales locales.
- Su diseño es relativamente sencillo.
- Se requiere maquinaria y equipo de menor tamaño.
- Los requisitos para la cimentación son menos estrictos en comparación con otros tipos de represas.
- Su amplia base distribuye la carga de manera uniforme sobre la cimentación.

- Son más flexibles ante asentamientos y movimientos del terreno, lo que las hace ideales para áreas con actividad sísmica o movimientos de suelo.

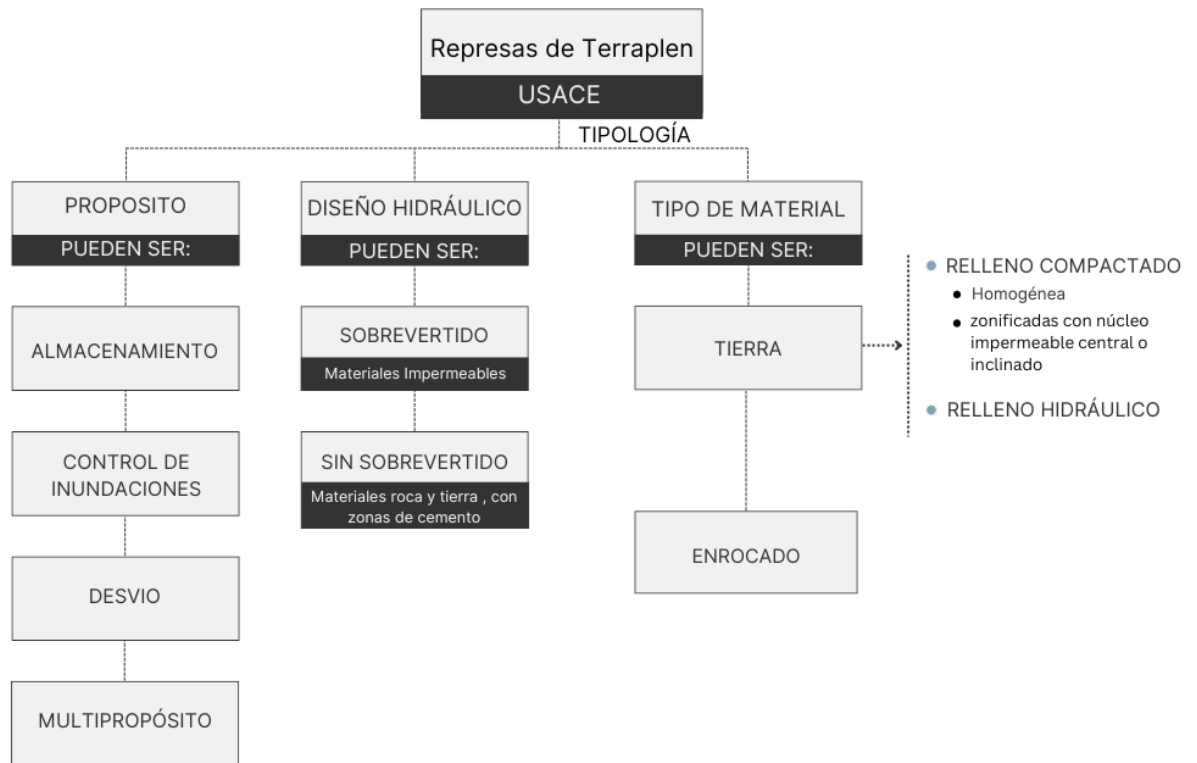
No obstante, presentan algunas desventajas:

- Las represas de tierra pueden sufrir daños graves si el agua fluye sobre ellas o ejerce presión en contra, por lo que requieren de un aliviadero y de una adecuada protección en la cara aguas arriba.
- El diseño y la construcción de aliviaderos eficientes representan el mayor desafío técnico en la construcción de estas represas, y cualquier sitio con un aliviadero deficiente no debe utilizarse.
- Si no se compactan correctamente durante su construcción, pueden presentar una estructura débil y posibles vías de filtración.
- Exigen un mantenimiento continuo para prevenir erosión, el crecimiento de árboles, hundimientos y daños causados por animales e insectos que pueden comprometer su integridad estructural.

***Tipos de represas de tierra: (Descripción de las características de las represas zonadas, homogéneas, y de enrocado con núcleo impermeable, entre otras.)***

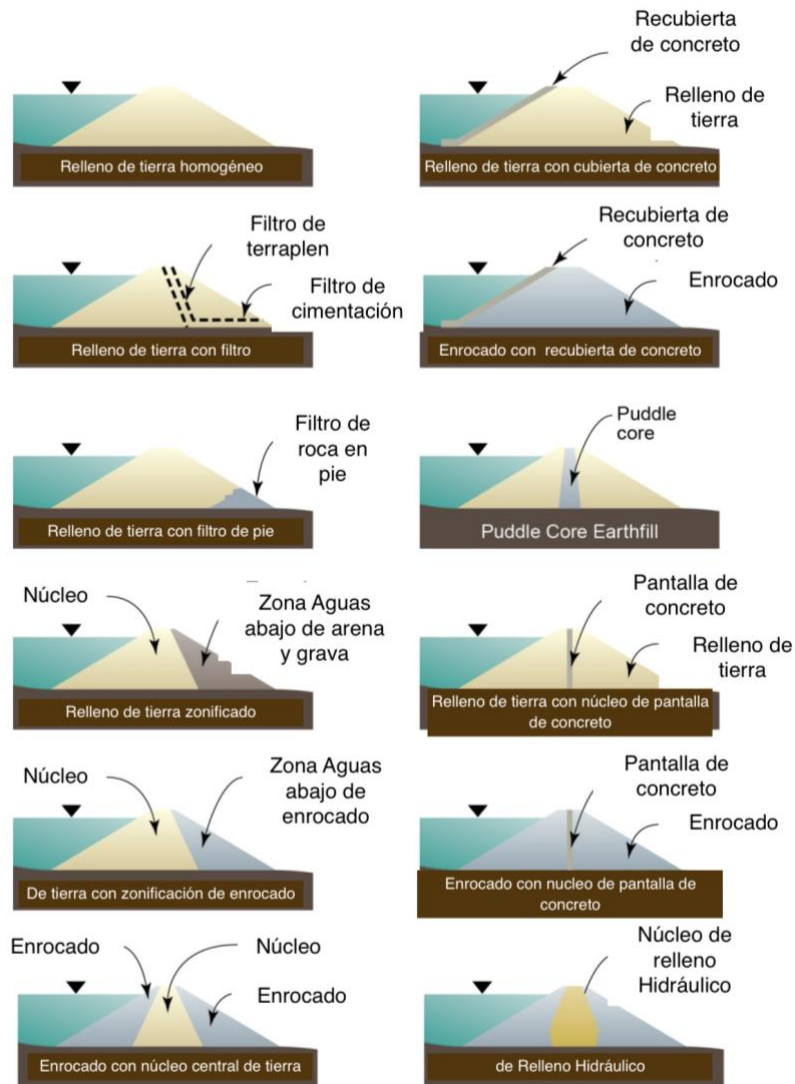
Los tipos de presas de terraplén se pueden clasificar en una serie de categorías, dependiendo de la finalidad. La norma emitida por la US. Army Corps of Engineers (USACE), “*Design Standards No. 13 Embankment Dams, Chapter 1: General Design Standards*”; divide esta tipología en 3 clasificaciones generales ( [Figura # 7](#)).

**Figura 7** Adaptado, clasificación de tipos de represas de terraplén, (US Department of the interior Bureau of Reclamation, 2011)



Si se considera la clasificación por el tipo de material, se pueden distinguir dos subcategorías: las de relleno de tierra, que a su vez se subdividen en relleno compactado (que también pueden ser homogéneas o zonificadas con núcleo impermeable central o inclinado), y las de relleno hidráulico, siendo las de relleno compactado más económicas, así como presentar una mayor estabilidad frente a sismos que las de relleno hidráulico (US Department of the interior Bureau of Reclamation, 2011). Y la otra clasificación concierne a las represas de enrocado, las cuales se emplean capas de roca compactada y se impermeabilizan mediante una membrana, que puede estar en el paramento de aguas arriba o en un núcleo interior ( [Figura #8](#)).

**Figura 8** Tipos de presas de terraplén, tomado y adaptado de (Federal Emergency Management Agency, 2013).

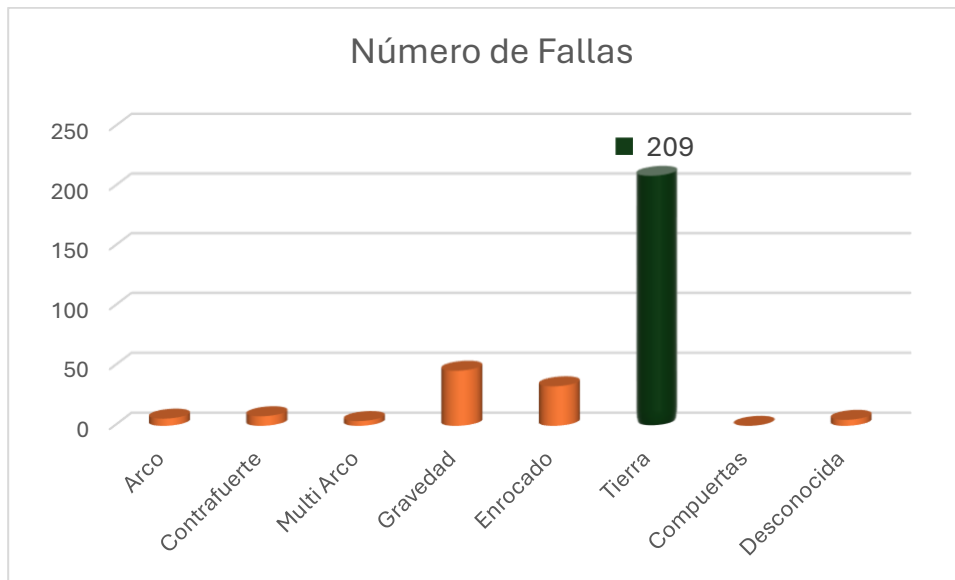


### 1.5.7 Modos de falla en presas de tierra:

Lo primero al evaluar o diseñar cualquier presa es comprender los mecanismos por los cuales las presas de materiales sueltos pueden causar la falla. El Boletín 99 de la ICOLD documenta un total de 209 casos de fallas en presas, siendo las presas de tierra las que

presentan la mayor incidencia, lo que evidencia su vulnerabilidad frente a ciertos mecanismos de falla (Jovani et al., 2019) ([Figura # 9](#)).

**Figura 9** Modos de falla en presas de tierra, ICOLD Boletín 99



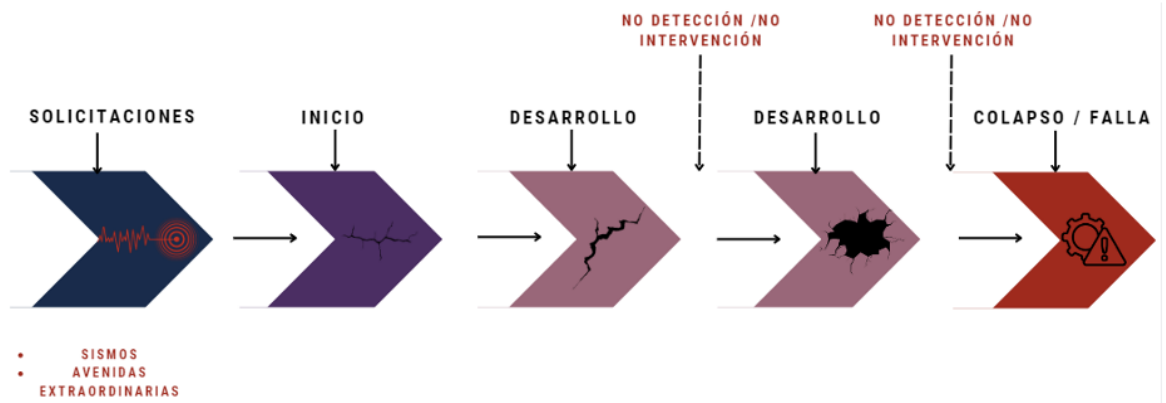
Para garantizar la estabilidad y seguridad en todas las condiciones, las represas de terraplén deben cumplir con requisitos esenciales, lo cual puede asegurar que la represa mantenga su integridad y funcionalidad a largo plazo, incluso en condiciones climáticas adversas, por lo cual se debe asegurar las siguientes condiciones:

- Estabilidad Estructural: cimientos, estabilidad en los laterales (Estribos) y estabilidad de taludes de la presa y embalse.
- Control de filtraciones: Se debe implementar filtros y drenajes para evitar la tubificación y la presión de poros que pueden afectar la integridad de la estructura internamente.

- Protección contra erosión: Se debe proteger la superficie del embalse contra la erosión causada por las olas y la escorrentía superficial. Esto puede incluir revestimientos de roca o cemento y vegetación en áreas críticas.
- Capacidad de retención de la represa: Además, el diseño debe incluir un adecuado sistema de vertedero y capacidad de desvío para prevenir el desbordamiento, así como métodos de control de presión de poros y compactación de materiales para evitar desplazamientos no deseados.
- Los modos de Falla: De acuerdo con la Guía Técnica para la elaboración de planes de Emergencia de Presas, del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España, se debe identificar las causas exógenas y endógenas que puedan estar afectando la seguridad de las presas y establecer un umbral para los indicadores de anomalía en el comportamiento de la represa (España Ministerio de Agricultura, 2012).

Para identificar un modo o mecanismo de falla, previamente debe ser considerado como una secuencia específica de eventos que, al no ser intervenidas pueden desencadenar en el funcionamiento anormal o inadecuado de un sistema o parte de este. Puede producirse por la combinación de varios sucesos que pueden conllevar al fallo de la estructura, como se presenta en la [Figura#10](#) (Banco Interamericano de Desarrollo).

**Figura 10** *Secuencia de evolución de una falla*

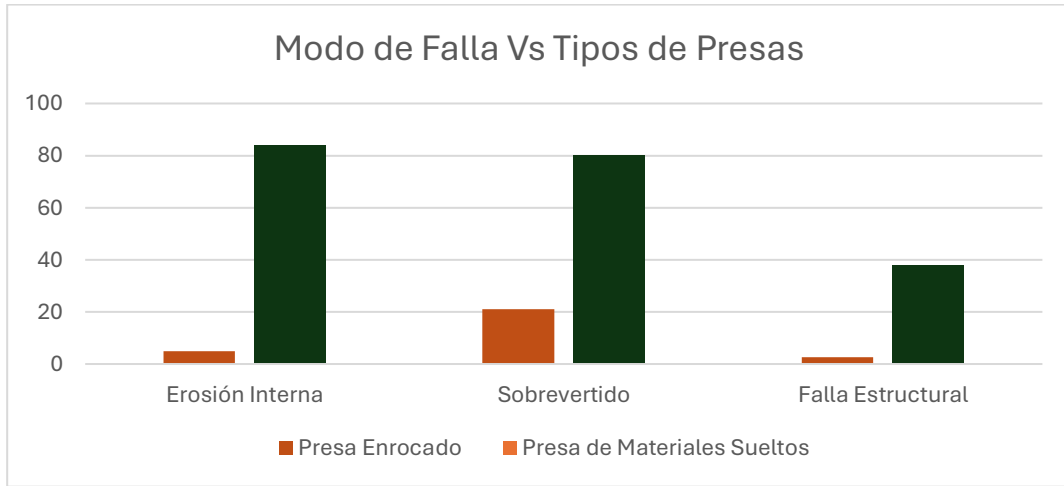


Las causas de fallas o incidentes en represas de tierra vienen suscitado debido a errores o carencias en el desarrollo en las etapas de estudio previo, en el diseño de la represa, en la etapa constructiva, asimismo en la etapa operativa, y también se evidencian por una falta de auscultación y mantenimiento. Es decir, son estructuras que deben ser monitoreadas continuamente, puesto que, en cualquier punto de su vida funcional, puede presentar fallas de extensas proporciones.

Pese a que muchos incidentes suscitados en represas se han relacionado con el factor hidrológico o sísmico, el componente Geológico-Geotécnico ha jugado un papel primordial en el comportamiento de la estructura (Sánchez Castro, 2007). Ya que se debe asegurar estudios geológicos que determinen la probabilidad de problemas de filtraciones debido a cavernas, diaclasas, fallas geológicas y fallas tectónicas; mientras que en el componente Geotécnico debe primar la obtención de materiales de calidad, asimismo asegurar la estabilidad, la compactación adecuada, asentamientos, agrietamientos y filtraciones, tanto del embalse como el de la estructura.

La ICOLD en su boletín # 99 Análisis estadístico de fallas de represa (Jovani et al., 2019), considera que, de acuerdo con los modos de falla Vs tipo de presa, Rockfill o Earthfill, el 81% de causas de falla, perteneces a la erosión interna ([Figura # 11](#)).

**Figura 11** Análisis estadístico de fallas de presas Boletín # 9



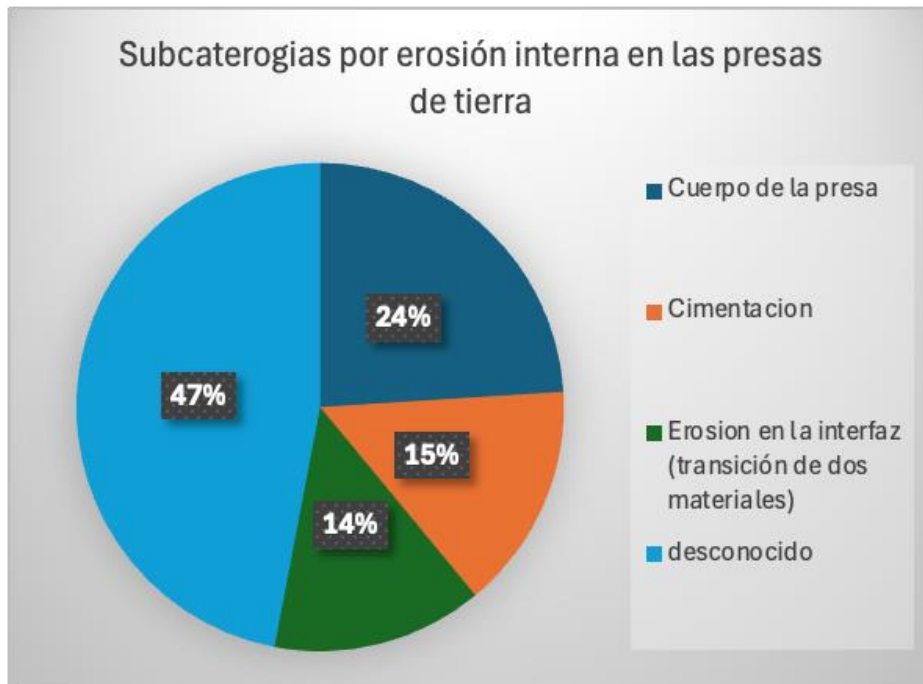
Mientras que la comparación entre el tipo de falla, y el año de construcción de la presa considera que el mayor modo de falla se da por sobrevertido y erosión interna, focalizándose en las presas de materiales sueltos construidas en el periodo de 1951-1975 Jovani et al (2019).

**Tabla 7** Tabla modo de falla (presas de materiales sueltos)

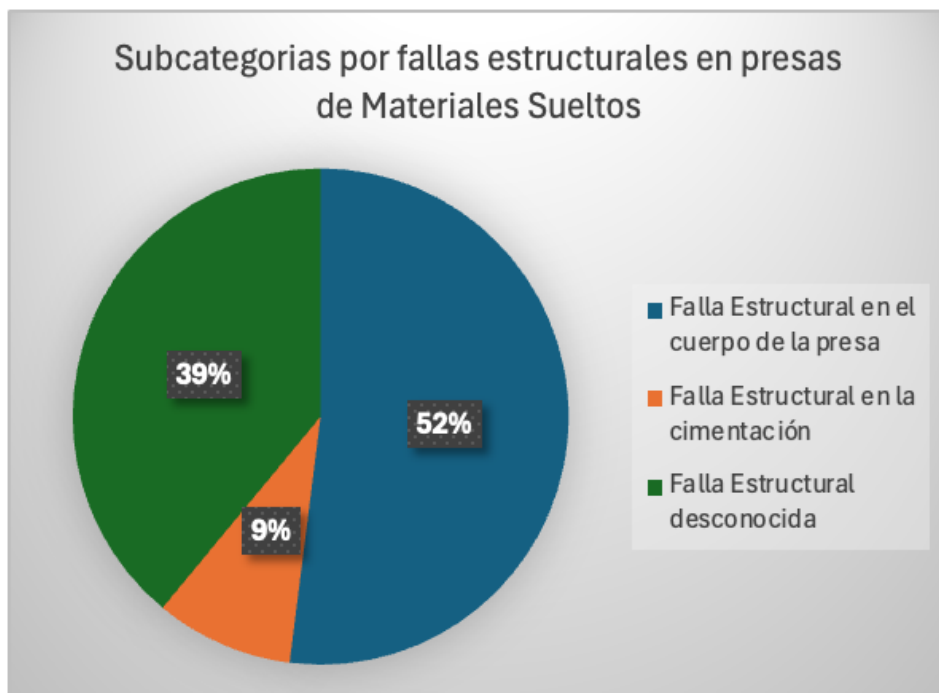
Modo de Falla (Presas de Materiales Suetos)	Año de Construcción						Total
	≤ 1900	1901-1925	1926-1950	1951-1975	1976-2000	>2000	
Erosión Interna	18	20	11	16	12	3	80
Sobrevertido (Erosión Externa)	22	22	11	30	11	5	101
Falla Estructural	8	9	12	12	5		46
Desconocido	2			2		1	5
Total	50	51	34	60	28	9	232

También realiza un análisis detallado demostrando que la erosión interna y las fallas estructurales puede ser subdividida en varias categorías como se muestra en las [Figuras # 12](#) y [#13](#).

**Figura 12** *Figura subcategoría por erosión interna en las presas de tierra*



**Figura 13** *Subcategorías por fallas estructurales en presas de materiales sueltos*



De acuerdo con (Pardo de Santayana & CEDEX, 2010). En su libro "Las presas de Materiales Suelos y sus patologías", las causas y modos de falla más comunes en estas estructuras se presentan en la [Figura #14](#).

**Figura 14** Modos de falla de una presa

MODOS DE FALLA DE UNA PRESA DE TIERRA	CAUSA	DE FALLA	INTERVENCIÓN	DE FALLA
	Rebosamiento	Emisión Hidráulica Deslizamiento Masivo	Observación de la Presa Mantenimiento y Control de dispositivos de vertedero y desagüe	30 %
	Filtración a través de la presa o el cimiento	Fuga de agua en conductos Deficiente compactación lateral	Obras de Impermeabilización, Jet Grouting, drenajes, sellado de grietas y juntas, reforzamiento de la presa	25 %
	Erosión Interna Tubicación	Formación de canales preferenciales Transporte de partículas finas	Soluciones de Impermeabilización: Trincheras rellenas de suelo arcilloso, muros de pantalla de hormigón, tablaestacas, inyecciones, mantos de impermeabilización horizontal	13 %
	Terreno de cimentación	Núcleo y Espaldones Formación de Grietas Creación de caminos de filtración preferenciales	Limpieza Inyecciones Construcción de elementos de drenaje Tratamiento de rocas fracturadas	-%
	Estabilidad de taludes	Deslizamientos Presiones intersticiales Fallo por sismos: Falla cimentación, licuación, tubificación	Implementación de zonas de transición, drenes chimenea, zonas de filtro, zonas de drenaje amplias, estabilización de laderas, filtros arriba del núcleo, materiales de núcleo plásticos	15%
	Erosión de taludes	Erosión por oleaje del embalse	Implementación de protección superficial del talud aguas arriba: Escollera Vertida, Pantalla de Hormigón armada, Recubrimiento de suelo-cemento, Pantalla asfáltica	5%

La Association of State Dam Safety Official (ASDSO), también considera los siguientes mecanismos de falla como los más comunes en presas de tierra entre los cuales se citan a continuación: Falla por sobrevertido, Falla por filtración, Falla estructural y Combinación de Fallas. También indica que actuar de forma oportuna puede prevenir posibles fallas y resultados con efectos catastróficos en áreas aguas abajo (Association of State Dam Safety Officials, 2012). La presencia de grietas hace que los taludes del suelo sean susceptibles a la filtración de agua, la erosión, la pérdida de resistencia al corte y las consiguientes fallas. (Souza et al).

Siguiendo esta misma idea (Armas Novoa, 2002), sostiene que los principales mecanismos de falla en una represa de tierra son:

- 1.- Rebase de cortina.
- 2.- Sifonamiento mecánico.
- 3.- Agrietamiento transversal.
- 4.- Deslizamiento del talud aguas abajo.
- 5.- Sismos.
- 6.- Licuación.
- 7.- Pérdidas por Filtración.

Un sistema de filtros y drenes es vital para evitar el movimiento de partículas de suelo desde o entre varias zonas y cimientos de presas de terraplén. Este movimiento si no se controla, puede dar lugar al desarrollo de fugas concentradas, que pueden tener graves consecuencias y, en casos extremos, la rotura de una presa de terraplén. De hecho, aproximadamente el 50% de todas las fallas de las presas se atribuyen al exceso de filtración (Filters for Embankment Dams Best Practices for Design and Construction, 2011). La interacción entre el filtro y drenajes tiene una acción triple, al aliviar los gradientes hidráulicos dentro de la presa, prevenir el movimiento de partículas de suelo y servir como una zona de autorreparación para detener la erosión por filtración a través de las grietas ( Everett W Taylor).

Muchos casos de fallas por erosión interna pueden ser contrarrestados si se realiza un buen diseño de filtros y drenes que permiten el paso del agua; todas las zonas del drenaje y zonas aledañas deben ser compactadas. Los geotextiles no deben ser usados en o sobre presas de tierra (US Army Corps of Engineers, 2003). Los efectos debido a las fallas antes

mencionadas pueden resultar en respuestas que, de acuerdo con (Glez Haramboure Yoermes et al., 2017), se clasifican en:

**Violentas:** Si se libera agua embalsada en pocas horas creando una inundación aguas abajo, quedando la presa parcial o totalmente destruida.

**Vaciado Controlado:** Requieren el vaciado controlado del embalse y permite hacerlo de forma progresiva, sin pérdidas de vidas humanas, de animales o pérdidas materiales. La presa necesitará posteriormente una reparación importante.

**Incidentes Graves:** Son aquellas fallas que obligan a una limitación de la explotación o incluso a un vaciado parcial, para redistribuir la funcionalidad de la presa. En caso de presas en construcción obligan a paralizar la obra y reconsiderar el proyecto.

Si una presa experimenta daños repentinos o graves que representan un riesgo inmediato para su integridad o la seguridad aguas abajo, pueden ser necesarias reparaciones de emergencia. En tales casos, los ingenieros pueden necesitar bajar temporalmente el nivel del agua o implementar medidas de emergencia para estabilizar la presa mientras se realizan las reparaciones. En este mismo sentido, el FEMA (Federal Emergency Management Agency) clasifica el nivel de riesgo en su Guía Federal para Seguridad de Represas o (Federal Guidelines for Dam Safety).

#### **1.5.7.1 Cómo Fallan ante sismo las presas de Materiales Suelos**

El punto de partida en el diseño y análisis de una presa consiste en identificar las posibles formas de falla. A continuación, se presentan distintas condiciones sísmicas que pueden provocar la ruptura de una presa de materiales suelos.

- **Sobrepaso de la coronación:** La seguridad de una presa de materiales suelos depende en gran medida de las deformaciones que puedan sufrir. Si estas reducen la altura de la coronación por debajo del nivel del embalse, el sobrepaso

y la erosión pueden causar la falla total. Las deformaciones se evalúan mediante métodos directos (modelación del sismo, presa y cimentación) o indirectos (observaciones empíricas y análisis de estabilidad post-sismo).

La magnitud de estas deformaciones depende de la resistencia de los materiales: en suelos saturados puede ocurrir pérdida de resistencia al corte por aumento de presión intersticial, generando fenómenos como licuefacción o movilidad cíclica, que pueden provocar asentamientos significativos e incluso inestabilidad global. Además, el sobrepaso también puede originarse por movimiento de fallas geológicas, deslizamientos masivos en el embalse o grandes olas sísmicas o (Seiches).

- Agrietamiento y erosión interna: Los sismos pueden producir deformaciones que generen grietas en la presa o alteren los filtros internos, favoreciendo la erosión y procesos de tubificación (piping). Las zonas más vulnerables son las interfaces con estructuras rígidas (como aliviaderos), los cambios bruscos en la sección del terraplén. El riesgo depende de los materiales, la zonificación interna (Filtros, drenes, pantallas impermeables), el nivel del embalse y la presencia de estructuras accesorias.

Las conducciones a través del terraplén puntos críticos: pueden fracturarse o separarse en sus juntas durante un sismo, creando trayectorias no controladas de flujo y acelerando la erosión interna. Incluso conducciones intactas han sido origen de fallas erosivas (Agency, 2005).

### **Medidas Defensivas:**

No todas las situaciones que podrían comprometer la seguridad de una presa requieren un análisis complejo: en muchos casos, la implementación adecuada de medidas defensivas brinda la confianza de que la estructura resistirá incluso escenarios adversos. Sin embargo, si estas medidas se diseñan de forma incorrecta, pueden anular sus beneficios y poner en riesgo la presa (Agency, 2005) ([Tabla # 8](#)).

**Tabla 8** *Medidas Defensivas para mecanismos de falla en presas de materiales sueltos (Agency, 2005)*

<b>Categoría</b>	<b>Medidas defensivas</b>
<b>Cimentación</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>* Remover materiales problemáticos.</li><li>* Dar forma a los contactos evitando cambios abruptos, voladizos o escalones.</li><li>* Tratar interfaces presas–cimentación en caso de fallas potenciales.</li></ul>
<b>Núcleo del terraplén</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>* Usar núcleos anchos de materiales plásticos resistentes a la erosión.</li><li>* Ampliar el núcleo en las zonas de contacto con estribos.</li><li>* Ubicar el núcleo para lograr la línea freática más baja posible.</li></ul>
<b>Filtros y drenes</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>* Colocar filtros bien graduados: Aguas arriba: sellar grietas. Aguas abajo: impedir salida de partículas. Construir drenes tipo chimenea aguas abajo del núcleo.</li></ul>
<b>Protección y coronación</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>* Incorporar detalles en la coronación y taludes aguas abajo para reducir erosión por sobrepaso moderado.</li><li>* Asegurar un bordo libre (freeboard) suficiente para asentamientos o deslizamientos.</li></ul>
<b>Taludes y embalse</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>* Estabilizar las laderas del embalse para prevenir deslizamientos hacia el agua.</li><li>* Usar enrocados de alta calidad y libre drenaje en protección.</li></ul>
<b>Compactación y rellenos</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>* Compactar adecuadamente los materiales para minimizar presión intersticial.</li><li>* Incluir filtros o medidas que prevengan erosión a lo largo de conducciones y estructuras internas.</li></ul>

### **Método de Análisis:**

Cuando la presa y su cimentación no son susceptibles a licuefacción, las deformaciones sísmicas suelen ser menores y no comprometen la estabilidad, siempre que se cumplan condiciones como:

- Materiales no licuables ni suelos débiles.
- Construcción Compactada ( $> 95$  % Proctor o  $> 80\%$  densidad relativa).
- Taludes tendidos ( $\geq 3H:1V$ ) y línea freática baja.
- Aceleración sísmica máxima  $< 0,2g$  en la base
- FS estáticos  $> 1,5$  antes del sismo.
- Freeboard de al menos 3-5% de la altura ( $\geq 0,9$  m).
- Ausencia de estructuras accesorias críticas que puedan generar grietas.

Dadas las condiciones planteadas, al no cumplirse, se requieren análisis más detallados: estabilidad post-sismo, deformaciones y licuefacción. En suelos no licuables puede aplicarse el método simplificado de Newmark; en casos con exceso de presión de poros, se recomiendan análisis numéricos avanzados (FEM/FDM). El objetivo es estimar si las deformaciones podrían generar sobrepaso o grietas críticas que desencadenen erosión interna.

Si no se anticipa licuefacción ni inestabilidad global, las deformaciones pueden estimarse con métodos simplificados (Newmark, Makdisi-Seed) o numéricos, según las características del sitio y materiales.

### 1.5.7.2 Newmark

#### **Análisis de deformaciones de Newmark**

El método de Newmark (1965) es el más usado para estimar el comportamiento dinámico de presas de materiales sueltos. Se basa en modelar la presa como bloques rígidos que deslizan cuando la aceleración sísmica supera la aceleración de fluencia (valor que corresponde a  $FS = 1,0$ ). El movimiento se reinicia y detiene según varía la aceleración durante el sismo.

Para aplicarlo se requiere un registro temporal del movimiento a lo largo de la superficie de falla, obtenido con un análisis dinámico de la presa (Agency, 2005).

#### **Método simplificado de Makdisi–Seed (1977)**

Este método emplea nomogramas desarrollados a partir de datos de presas afectadas por sismos, y estima el desplazamiento neto esperado considerando:

1. El coeficiente sísmico de fluencia.
2. La aceleración horizontal máxima en la masa deslizante.
3. La duración del movimiento fuerte, ligada a la magnitud del sismo.

#### **Otros métodos tipo Newmark**

Entre ellos destaca el análisis de Sarma, que calcula desplazamientos y pérdida de coronación, así como métodos más avanzados que incorporan aceleraciones horizontales y

verticales, variaciones de presiones de poros y resistencia al corte durante el sismo. Estudios de casos muestran que las deformaciones suelen ser moderadas si la aceleración máxima no excede tres veces la aceleración de fluencia, siempre que no ocurra licuefacción.

### **Resultados del análisis**

Los resultados se interpretan en función de la severidad de las deformaciones: pérdida de freeboard o aparición de grietas que comprometan la presa. Algunas agencias limitan los desplazamientos admisibles en superficies críticas a un máximo de 0,6 m (2 pies).

### **Análisis Pseudoestático y Evaluación de Resultados en Presas de Materiales**

#### **Sueltos**

##### **Análisis pseudoestático**

El análisis pseudoestático, también llamado de coeficiente sísmico, solo brinda un indicador de resistencia sísmica en presas no susceptibles a acumulación de presión intersticial. No predice fallas, pero si el FS pseudoestático es  $>1,0$  (con resistencias adecuadas), suele indicar que la presa sufriría poco o ningún daño durante un sismo.

##### **Evaluación de resultados en presas de materiales sueltos**

##### **Generalidades**

Los resultados de los análisis deben interpretarse considerando no solo los valores numéricos, sino también la confianza en los supuestos adoptados y las consecuencias de la incertidumbre.

## **Estabilidad**

- FS post-sismo 1,0 (ej.  $\geq 1,25$ ), deformaciones pequeñas, buen desempeño esperado.
- FS  $\approx 1,0$  o menor (con licuefacción) altas deformaciones, riesgo de falla por sobrepaso o erosión interna.

## **Deformaciones**

El criterio clave es que las deformaciones calculadas (por Newmark o FEM/FDM) no excedan lo que la presa puede tolerar sin riesgo de liberación catastrófica del embalse.

Condiciones de análisis:

1. Sin licuefacción.
2. Con licuefacción, pero sin inestabilidad.
3. Con licuefacción e inestabilidad.

La determinación depende de resistencias post-sismo confiables, freeboard suficiente y ausencia de grietas críticas.

## **Comportamiento observado en presas de materiales sueltos**

La experiencia histórica muestra que:

- Rellenos hidráulicos: muy vulnerables a fallas.
- Presas compactadas: suelen resistir sismos moderados ( $\geq 0,2g$ ) y fuertes, con deformaciones mínimas si están bien construidas.
- Arcillas y cimentaciones firmes: han resistido sacudidas muy fuertes (0,35–0,8g) sin daños.
- Enrocados y CFRD: buen desempeño en sismos moderados y fuertes, aunque se esperan deformaciones o fisuras en la cara.

## **Evaluación de presas existentes**

Muchas presas antiguas pueden no cumplir los criterios modernos. Si se demuestra riesgo de falla, deben evaluarse las consecuencias y documentar la decisión. Si no hay riesgo para vidas ni propiedades, no siempre es necesaria una intervención. (Agency, 2005)

## **Remediación sísmica de presas susceptibles a licuefacción**

1. Excavación y reemplazo: elimina materiales deficientes cercanos a la superficie, garantizando calidad del relleno.
2. Densificación o cementación in situ: columnas de grava, vibro-compactación, inyecciones, etc. Requieren controles estrictos y verificación del grado de mejora.

### ***1.5.8 Marco Normativo: Revisión de normas y estándares internacionales***

Se revisaron normativas de NEC15 (Ecuador), CEDEX (España), FEMA, USACE (EE.UU.), ICOLD y casos de América del Sur (Argentina, ORSEP). Se identificaron criterios técnicos y operativos aplicables en contextos similares al ecuatoriano.

#### **1.5.8.1 Manual de Seguridad de Presas de España:**

- Los aspectos más importantes del reglamento español son los requisitos de inspección periódica, análisis de estabilidad y planes de contingencia, así como establecer umbrales para los niveles de emergencia. El Manual de Seguridad de Presas del Ministerio para la Transición Ecológica de España establece una clasificación de niveles de emergencia con base en umbrales de indicadores como filtraciones, deformaciones y niveles piezométricos (Ministerio Para la Transformación Ecológica y El Reto Demográfico, 2023)[52], como se muestra en la [Tabla # 9](#).

**Tabla 9** Umbrales niveles de emergencia Manual Seguridad de presas del MICOL

Umbral o Escenario	Descripción del Escenario	Condiciones de Activación
Escenario 0 - Control de la seguridad	No hay peligro inminente, pero se requiere vigilancia reforzada.	Nivel o caudal máximo registrado se alcanza o se prevé alcanzar sin riesgos para la presa. No se superan los resguardos. Aviso por activación del Escenario 1 en una presa aguas arriba.
Escenario 1 - Aplicación de medidas correctoras	Situación de riesgo moderado. Se requiere aplicar medidas técnicas o de explotación para evitar daño.	Se prevé que el nivel del embalse supere la capacidad segura sin agotar resguardos. Vertido sobre compuertas previsto, pero sin rotura. Activación de Escenario 2 en presa aguas arriba.
Escenario 2 - Situación excepcional	Hay riesgo alto de rotura o avería grave. Las medidas disponibles podrían no ser suficientes.	Es posible el rebose de la presa si se agotan los resguardos. Fallo en compuertas con posible rotura. Activación del Escenario 3 en presa aguas arriba.
Escenario 3 - Situación límite	Rotura de presa inminente o ya iniciada. La situación es crítica.	Rebose incontrolado y rotura previsible o en curso. Las medidas implementadas no son suficientes para evitar el colapso.

- Plan de emergencia, modelación y plan de emergencia ante rotura de presa de materiales sueltos (ICOLD, 2017; Ministerio Para la Transformación Ecológica y El Reto Demográfico, 2023).

#### Tiempo de rotura (T)

Es el intervalo que transcurre desde que comienza una brecha (por erosión o tubificación) hasta que alcanza su forma definitiva. Este tiempo se estima usando

fórmulas empíricas, entre las más utilizadas, como la Guía Técnica 1996 y la ecuación de Froehlich.

#### Consideraciones adicionales

- Presas con núcleos delgados o no compactados se consideran más erodibles.
- Las presas homogéneas o con núcleo grueso tienden a tener erodabilidad baja.
- Las características geométricas (como la forma de la brecha) son menos relevantes que el ancho de la brecha y el tiempo de rotura, pues estos definen el volumen y velocidad del flujo de rotura.

#### **1.5.8.2 Referencias técnicas de la ICOLD (International Commission on Large Dams, sobre la seguridad y operación de presas:**

Causas posibles de deterioro y rotura de presas de Materiales Suelos. Tabla

Clasificación de las causas de deterioro de las presas de materiales sueltos, ICOLD 1983

([Tabla #10](#) y [11](#)).

**Tabla 10** *Tabla clasificación de las causas de deterioro de las presas de materiales sueltos ICOLD*

1983

<b>Tipología</b>	<b>Causas del deterioro</b>
Componente estructural	Falla en los estribos o estructuras laterales
	Mal funcionamiento de drenajes internos
	Degradación de la protección en taludes
	Fallos en filtros o zonas de transición
	Problemas en zonas de contacto entre estructuras rígidas y terraplén
	Movimientos diferenciales, fisuras, efecto arco o fracturas hidráulicas
	Filtraciones excesivas o no controladas
	Erosión interna por tubificación
	Riesgo de licuefacción
	Deslizamientos aguas arriba
	Deslizamientos aguas abajo
	Fugas o rotura de conductos en el cuerpo de la presa
Deficiencia en la auscultación	Uso de dispositivos inadecuados o mal calibrados
Fallas en el mantenimiento	Falta o insuficiencia de inspecciones regulares

	Drenes obstruidos o sin limpiar
	Falta de control sobre los caudales de filtración
	Descuido en el mantenimiento de taludes
	Daños causados por animales cavadores
	Apertura intencional de una brecha para evitar rebose

**Tabla 11** Clasificación de las causas de rotura de presas (Icold Boletín 99)

Tipología	Causa de la rotura
Proyecto inadecuado	Cualquier aspecto
Componente cimentación	Deformaciones y asentos
	Deficiencia en resistencia al corte
	Filtración
	Erosión interna (tubificación)
	Tratamiento de consolidación
Por materiales y ejecución del relleno	Reactivación de antiguos deslizamientos
	Arcillas dispersivas
	Limos y arenas finas uniformes
	Colocación
Por acciones imprevistas o excepcionales	Compactación
	Presión hidrostática y empuje de sedimentos (incluyendo hielo)
	Precipitación
	Olas en el embalse

	Sismos (naturales o provocados)
	Rebosamiento
	Rotura de presa aguas arriba
Por comportamiento estructural de la presa	Núcleo impermeable
	Otros sistemas de estanqueidad
	Zonas de transición
	Protección de taludes
	Contacto entre estructuras rígidas y terraplenes
	Movimientos diferenciales (transferencia de carga, fisuración, efecto arco, fractura hidráulica)
	Filtración
	Erosión interna (tubificación)
	Licuefacción
Debido al mantenimiento	Deslizamiento agua arriba y abajo

- Directrices sobre el manejo de presas, factores de seguridad, y protocolos de emergencia.

La ICOLD en el boletín 168 expone que, debido a la complejidad e impacto de las obras mayores, su planificación requiere una atención especial. Estas intervenciones deben adaptarse a las condiciones operativas y a los posibles efectos en los ingresos, ya que no siempre es viable sacar de servicio un embalse, debiendo ejecutarse los trabajos incluso con el embalse lleno. Además, el uso comunitario del embalse, como la recreación, impone restricciones adicionales.

Esto obliga al propietario a planificar intervenciones complejas y por etapas. Aunque las reparaciones bajo el agua pueden ser costosas y lentas, a menudo resultan más

convenientes que vaciar el embalse. Gracias a los avances tecnológicos, estas tareas se han vuelto más viables, incluso en grandes profundidades (ICOLD, 2017).

Los proyectos de mejora de gran envergadura pueden requerir varios años de estudios, análisis y evaluación de alternativas. Este proceso debe considerar las tecnologías más recientes que puedan aportar mejoras significativas. En este contexto, es habitual que se elaboren diversos planes estratégicos para garantizar la correcta ejecución del proyecto, entre los que se incluyen:

- Seguridad y salud ocupacional.
- Gestión ambiental.
- Seguridad de presas.
- Gestión de emergencias.
- Planificación del trabajo.
- Comunicación.
- Financiamiento.
- Aseguramiento de la calidad.
- Relaciones laborales.
- Gestión del tránsito.
- Seguridad general.

#### **1.5.8.3 ORSEP (Organismo Regulador de Seguridad de Presas) en Argentina:**

- Enfoque en la supervisión y reparación de presas en operación, y los estándares para mejorar la seguridad a nivel nacional.
- Importancia de implementar sistemas de monitoreo y diagnóstico temprano para represas de tierra en estado crítico.

#### **1.5.8.4 NEC-15: Norma Ecuatoriana de construcción:**

La Norma Ecuatoriana de la Construcción 2015 estipula en su capítulo Geotecnia y cimentaciones factores de seguridad por resistencia al corte que pueden ser aplicables a

presas, consideradas como estructuras esenciales, con valores que se presentan en las tablas siguientes ([Tabla # 12](#) y [# 13](#)).

**Tabla 12** Factores de seguridad NEC 15

Condición	FS corte Mínimo	
	Diseño	Construcción
Carga muerta + Carga viva nominal	1.5	1.25
Carga muerta + Carga viva Máxima	1.25	1.1
Carga Muerta + Carga Viva Nominal + Sismo de diseño Pseudo estático	1.1	1.00
Taludes - condición estática y Agua Subterránea Normal	1.5	1.25
Taludes - condición pseudo estática con agua Subterránea Normal y Coeficiente Sísmico de diseño	1.05	1.00

**Tabla 13** Factor de seguridad NEC 15

Condición	Construcción	Estático	Sismo	Pseudo Estático
Deslizamiento	1.60	1.60	Diseño	1.05
Volcamiento: el que resulte más crítico de:				
Momento Resistente / Momento Actuante			Diseño	
Excentricidad en el sentido del momento (e/B)			Diseño	
Capacidad Portante				
<b>Estabilidad general del sistema</b>				
Permanente o de larga duración (> 6 meses)	1.20	1.50	Diseño	1.05
Temporal o de Corta duración (< 6 meses)	1.20	1.30	50% de Diseño	1.00

## **1.5.9 Marco referencial: Metodologías de reparación de represas de tierra**

### **1.5.9.1 Revisión Bibliográfica y Estado del Arte de casos e intervenciones de presas en operación.**

Algunos casos de referencia a nivel mundial pueden ser citados:

Presa de Oroville, California, EE. UU. (2017): En febrero de 2017, daños en el vertedero de la presa de Oroville en California provocaron reparaciones de emergencia mientras la presa seguía en funcionamiento. El vertedero dañado fue reconstruido en un enfoque escalonado para garantizar la seguridad continua de la presa y las comunidades circundantes (France et al., 2018).

Presa Tetón, el 5 de junio de 1976 se observó de 20 a 30 ft<sup>3</sup> de infiltración saliendo de las juntas rocosas cerca del estribo derecho de la presa. Se determinó que el modo de falla física más probable era el agrietamiento del núcleo impermeable de la presa debido a la erosión interna iniciada por la tubificación del material de relleno de la zanja clave (Graham, 2008).

Represa Banqiao China (1975), construida en 1951 como un núcleo de arcilla rodeada por una capa de arena con una altura estructural de aproximadamente 80 pies, fue intervenida por primera vez en 1955 a 1956 al observarse grietas en la represa y las compuertas. También fue reforzada y elevada en casi 10 pies; desde dicha intervención fue considerada como "Presa de Hierro". Pese a esta denominación, el 7 de agosto de 1975 el tifón Nina elevó los niveles de los embalses de toda la región; sin comunicación, los operadores no pudieron recibir instrucciones ni informar al gobierno de las condiciones de la presa. Los niveles de agua siguieron subiendo hasta que el terraplén comenzó a desbordarse; todo intento fue en vano, la

erosión fue inminente, lo que finalmente produjo, a las 1 am del 8 de agosto, una ola de casi 500.000 acres-pies con una velocidad de 30 millas por hora (44 pies por segundo), arrasó con granjas y aldeas río abajo (Si, 1999).

En América del Sur, la represa El Guapo (Venezuela), construida en 1975 y finalizada en 1980, la estructura constaba con 197 pies de altura y almacenaba 114 000 acres-pies de agua. Posee un historial de acontecimientos, incluyó una intervención exitosa la cual evitó una posible falla en la tubería. Los análisis encontraron que, debido al aumento de la presión de poros y gran porción saturada del terraplén, la pendiente aguas abajo de la Presa de Terraplén era apenas estable, con un factor de seguridad de aproximadamente uno, lo que indicaba que la falla era inminente (Suárez et al).

La represa Laguna Robada en Bolivia, construida en 1952, colapsa en 1963 por falta de mantenimiento. En 1975 se inicia la reconstrucción bajo el Programa de Riego Altiplano Valles, concluyendo en 1985. Represa Quecoma, ubicada en Sacamamba, Bolivia, pese a que no ha colapsado, presenta importantes filtraciones en la roca de la fundación, por lo cual de acuerdo con el Inventario Nacional de Presas Bolivia 2010, requiere ser intervenida (Ministerio de Medio Ambiente y Agua Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego, 2010).

En Colombia, el proyecto Hidroituango presentó un colapso en el túnel de desviación, relacionado con fallos en el soporte de la galería y condiciones geológicas adversas que comprometieron la estabilidad del terreno. Expertos colombianos han advertido que, en caso de una rotura no controlada, este evento podría considerarse “la segunda catástrofe mundial más grande de la ingeniería”, después del desastre nuclear de Chernóbil La FM (2019).

Se analizó bibliografía nacional e internacional sobre fallas, reparaciones e intervenciones en presas de materiales sueltos.

- a) Investigación de criterios técnicos en casos de presas rehabilitadas a nivel internacional. ([Tabla # 14](#))

**Tabla 14** *Casos de presas rehabilitadas a nivel internacional*

<b>País</b>	<b>Nombre de la presa</b>	<b>Tipo de falla</b>	<b>Características</b>	<b>Causas</b>	<b>Intervención realizada</b>
Zimbabue	Tokwe Mukosi	Falla temprana (durante llenado)	Presa de escollera con pantalla de hormigón (CFRD), 90 m altura, 1.750 Mm <sup>3</sup>	Capacidad insuficiente de desvío del río; pantalla no terminada	No colapsó; se evitó el colapso con medidas durante la emergencia
Colombia	Ituango	Falla temprana (construcción)	Presa de escollera con núcleo de arcilla, 227 m altura, 2.700 Mm <sup>3</sup>	Deslizamiento bloqueó el túnel de desvío; subida incontrolada del embalse	Relleno de emergencia; descarga de emergencia; presa salvada
Laos	Xe Pian - Xe Namnoy	Falla temprana (primer llenado)	Dique homogéneo, 16 m altura, cimiento de laterita 18 m	Erosión regresiva en cimiento permeable; sin tratamiento del cimiento	No hubo tiempo de intervención, 140 muertos, 12.000 afectados
Uzbekistán	Sardoba	Falla durante avenida	Presa de materiales sueltos, 29 m altura, 922 Mm <sup>3</sup>	Avenida extrema	Evacuación masiva (70.000 en Uzbekistán y 20.000 en Kazajistán)
China	Xinfa	Rebose	No detalladas	Avenida extrema	No especificada
India	Annamayya	Rebose	No detalladas	Avenida extrema	No especificada

Brasil	Igua	Rebose	No detalladas	Avenida extrema	No especificada
EE.UU.	Edenville	Falla por avenida	No detalladas	Cambio climático, avenida	No especificada
Ucrania	Kakhovka	Destrucción por guerra	No detalladas	Acción deliberada (guerra)	Evacuación de 70.000 personas
Venezuela	Las Majaguas	Sifonamiento	Tierra homogénea, arcilla limosa dispersiva.	Arcillas dispersivas Sifonamiento progresivo	Sí, se reemplazó material por arcilla no dispersiva
Venezuela	Presa el Isiro	Agrietamiento	Núcleo de arcilla impermeable con espaldones de gravas.	Asentamiento diferencial – desplazamiento del núcleo	Sí, pero limitada. Se monitoreó y estabilizó
Venezuela	San Francisco de Macanao	Filtración por el vaso	Tierra zonificada con núcleo impermeable.	Filtración profunda por base kárstica	No efectiva, no se logró retener agua
Venezuela	Tulé	Deslizamiento	Homogénea, limos arenosos, espaldones con enrocado.	Saturación, baja compactación, vaciado incompleto	Sí, con vaciado total y reconstrucción parcial
India	Chang	Licuação por sismo	Tierra zonificada, núcleo de arcilla, espaldones arenosos.	Sismo Bhuj 2001 Licuação en cimentación y cortina	No se documentó reparación efectiva
Cuba	Las Cabrerías	Sifonamiento por arcillas dispersivas	Tierra con suelos dispersivos (Guáimaro, Camagüey).	Sifonamiento progresivo desde cimentación	No. Fue una falla catastrófica total

Cuba	Varios Casos	Filtración y rebase	Diversas presas de materiales sueltos.	Inadecuado diseño hidráulico / mal mantenimiento	Algunas fueron puestas en 'prevención hidrológica'
Colombia	La Honda	Inestabilidad Geológicas del sitio cavidades subterráneas	Enrocado con núcleo de tierra H: 225 m V: 19 millones m <sup>3</sup>	Inestabilidad Geológicas del sitio cavidades subterráneas	Excavación, relleno con concreto dental, inyecciones de consolidación
Venezuela	Turimiquire	Sifonamiento	Homogénea de Tierra con núcleo de materiales arcillosos	Erosión interna debido a mala compactación	Bajar el embalse
Argentina	Campo Alegre	Filtración (Parcial)	-	Fugas Localizadas, Falta de mantenimiento	Control del nivel de embalse, monitoreo con instrumentación, propuesta de pantalla impermeable aguas arriba, rehabilitación de drenes internos, recompactación de sectores críticos, instalación de sistema de alerta

Bolivia	Muyu Loma	Filtración e Inestabilidad de Taludes	Tierra, H: 8:00 m longitud de coronamiento 285 m	filtraciones que produjeron inestabilidad en los taludes	Creación de vertedero de desfogue
Bolivia	Chua Loma	permeabilidad en la cimentación	Tierra, H: 19,60m, Longitud de corona: 112 m	Permeable en su fundación a consecuencia de la meteorización de la roca	Inyección de impermeabilización en la base, colocación de geotextiles y construcción de filtros.

### 1.5.9.2 Caso de estudio represa "Turimiquire" en el estado de Sucre, Venezuela.

Como punto de referencia en América Latina, el sistema Turimiquire (Venezuela) opera a una escala mayor y con tipologías diferentes a El Azúcar; su presa principal Las Canalitas es de enrocado con cara de concreto y se complementa con la presa Algarrobo, de tierra zonificada. Es un sistema estratégico de abastecimiento urbano, donde las intervenciones recientes se han centrado en la rehabilitación de la pantalla y elementos asociados; El Azúcar, en cambio, el foco técnico es objetivo al establecer la continuidad del núcleo arcilloso, mejorar al drenaje interno y estabilizar taludes. En sistemas, aunque comparten riesgos de filtraciones y de resguardo hidráulico, las prioridades de monitoreo e intervención se ajustan a su escala y tipología estructural.

### **1.5.9.3 Factores específicos en Ecuador:**

Ecuador cuenta con diversos microclimas que hacen de la planificación de construcción de presas uno de los problemas más complejos de la ingeniería. Se puede decir que el 70% de las obras construidas en el país están en zonas de baja precipitación o cimentadas en suelos débiles, rocas blandas o fracturadas, siendo la mayor parte de ellas destinadas al riego y provisión de agua para consumo humano y clasificadas como presas de tierra principalmente. Sin embargo, las mayores inversiones de presas en el Ecuador se han destinado para obras Hidroeléctricas o uso múltiple, como es el caso de Paute y Daule Peripa.

Prácticamente todas las presas pequeñas que han fallado en el país o que han sufrido daños, corresponden al fenómeno de tubificación. La presa Jama en el río del mismo nombre, La Estancilla sobre el río Carriza, en Manabí; así como en Arenillas y Santa Rosa en la provincia de El Oro. Daños en una serie de presas pequeñas de CEDEGE en Babahoyo, se ocasionaron también por tubificación. Se han registrado pequeñas filtraciones posteriormente tratadas, como en el Azúcar, Poza Honda; daños en la pantalla asfáltica de Poza Honda; asentamientos bruscos debido a suelos colapsables en la Presa El Azúcar; deslizamientos de taludes en el embalse en la presa Amaluza.

Los principales problemas que hasta la fecha se han experimentado en la construcción y durante el comportamiento de las presas en el Ecuador han sido por la poca disponibilidad de materiales de buena calidad en la vecindad de las obras, la debilidad de la cimentación, alta sedimentación de los reservorios y, sobre todo, escasa información sobre las prácticas del diseño, en particular debido a que muchas de las obras medianas y grandes han sido realizadas por consultoría extranjera, que no ha dejado la información suficiente a beneficio del país.

### ***1.5.10 Plan de manejo de riesgos***

#### **1.5.10.1 Evaluación de riesgos y vulnerabilidad:**

- Aplicación del análisis de modos de falla (IMF) para identificar los posibles puntos críticos en represas de tierra en operación.
- Propuesta de un plan de seguridad nacional para represas, incluyendo simulacros, monitoreo y planes de emergencia.

#### **Inspección visual e investigaciones**

- La inspección visual aporta información cualitativa; el monitoreo, datos cuantitativos.
- Se combinan rondas diarias/semanales, revisiones periódicas por ingenieros, control de instrumentos y pruebas de sistemas.
- Zonas críticas (galerías, túneles, coronamiento, estribos) requieren atención extra.
- Revisión anual por especialistas; investigación formal cada 5–10 años.

#### **Monitoreo**

- Busca detectar tempranamente anomalías para corregir y prevenir daños.
- Considera presa y cimentación, priorizando deformaciones, filtraciones, presiones intersticiales y esfuerzos.
- Distingue variables causales (niveles, clima, sismicidad, etc.) y de efecto (respuestas estructurales como filtraciones, piezometría, deformaciones).

#### **Inspecciones**

- Periódica (anual): repaso de datos, verificación de instrumentos y estado; informe anual.

- Formal: desde la puesta en marcha; fija líneas base, criterios, frecuencias y responsabilidades; incluye evidencia y juicio sobre seguridad o necesidades de estudio/rehabilitación.
- Especial: tras sismos, tormentas, filtraciones súbitas, hundimientos o fallas.

#### **1.5.10.2 Planes de acción y monitoreo:**

Las intervenciones o sus fases deben ajustarse a limitaciones de operación y de ingresos. Retirar de servicio un embalse activo resulta complicado; las actuaciones suelen ejecutarse con el embalse en funcionamiento, incluso a máxima cota; además, existen restricciones sociales por usos como la recreación. Estas condiciones obligan al propietario a diseñar planes detallados para trabajar con el vaso lleno de manera intermitente. Aunque el trabajo subacuático tiende a ser más lento y costoso, las pérdidas por abatir el nivel pueden ser aún mayores; los avances tecnológicos, no obstante, han abaratado estas tareas incluso en gran profundidad.

En proyectos de gran escala, se implementan contratos complejos para evitar que el titular asuma costos cuando el contratista no puede operar por el nivel del agua. Si bien antes se optaba por gestión directa, la complejidad y el equipo especializado requerido hacen imprescindible contar con contratistas expertos (International Commission on Large Dams, 2017).

- Detallar las acciones preventivas y correctivas que deben implementarse antes y durante la temporada de lluvias intensas.
- Uso de tecnologías como sistemas de monitoreo remoto, análisis piezométricos y modelos predictivos para identificar vulnerabilidades en tiempo real.

De acuerdo con USACE, todas las represas deben contar con instrumentación suficiente para controlar y evaluar su seguridad durante la construcción y en operación. La instrumentación no corrige un mal diseño, pero sirve para comprobar cómo se comporta la obra real. En síntesis, la instrumentación adecuada no reemplaza un buen y correcto diseño, más si valida el desempeño (Ministerio Para la Transformación Ecológica y El Reto Demográfico, 2023).

Por razones de seguridad, las presas de tierra y enrocado requieren instrumentación que permita seguir su comportamiento en construcción y bajo todas las cargas de operación; las inspecciones visuales y datos de instrumentación en el cuerpo de la presa, cimentación, estribos y obras accesorias son la base para juzgar su seguridad. La tecnología para medir filtraciones, esfuerzos y movimientos ha avanzado en precisión, confiabilidad y costo. Con el envejecimiento de las obras, las presas antiguas los registros históricos son la principal base para verificar la seguridad frente a normas vigentes, puede requerir instrumentación adicional. Los datos solo sirven si los instrumentos son confiables y se comparan contra límites de diseño y comportamiento histórico.

Datos históricos: Clave para reevaluar seguridad

Presas antiguas: Posible refuerzo de instrumentación; comparar siempre con límites de diseño o antecedentes; se debe medir movimientos, alineación, esfuerzos, deformaciones, presiones (poro/supresión), freático, filtraciones.

a) Piezómetros

Presión de poros/filtración; se instalan por secciones, en terraplén-fundación-estribos; punta en material permeable; sellos herméticos críticos.

b) Monumentos de superficie

Control de movimientos verticales/horizontales en coronación y taludes; referenciados externamente; espaciamiento 50, 400 ft; proteger y medir regularmente.

c) Inclínómetros

Perfilan deformación lateral; clave en presas altas, fundaciones débiles y valles estrechos; abarcar zona crítica; lecturas en obra y operación.

d) Indicadores misceláneos de movimiento

Miden dispersión, asentamientos y deformaciones (especialmente en estribos y bajo coronación); usar monumentos cada 50 ft donde haya extensión axial.

e) Celdas de presión

Miden presiones de tierra; diseños modernos funcionan mejor; muy útiles en interfaz hormigón-relleno.

f) Acelerógrafos

Registran respuesta sísmica; preferir digitales con disparo automático; integrarlos al plan de seguridad.

g) Filtración

Solo es medible lo que emerge/drenes; el flujo subsuperficial se estima; captar con zanjas/drenes y medir con vertederos.

h) ADAS (General)

Automatizar para datos en tiempo real y mejor calidad/oportunidad; considerar en nuevos, mejoras y rehabilitaciones.

## **Capítulo 2**

## **2 Enfoque Metodológico**

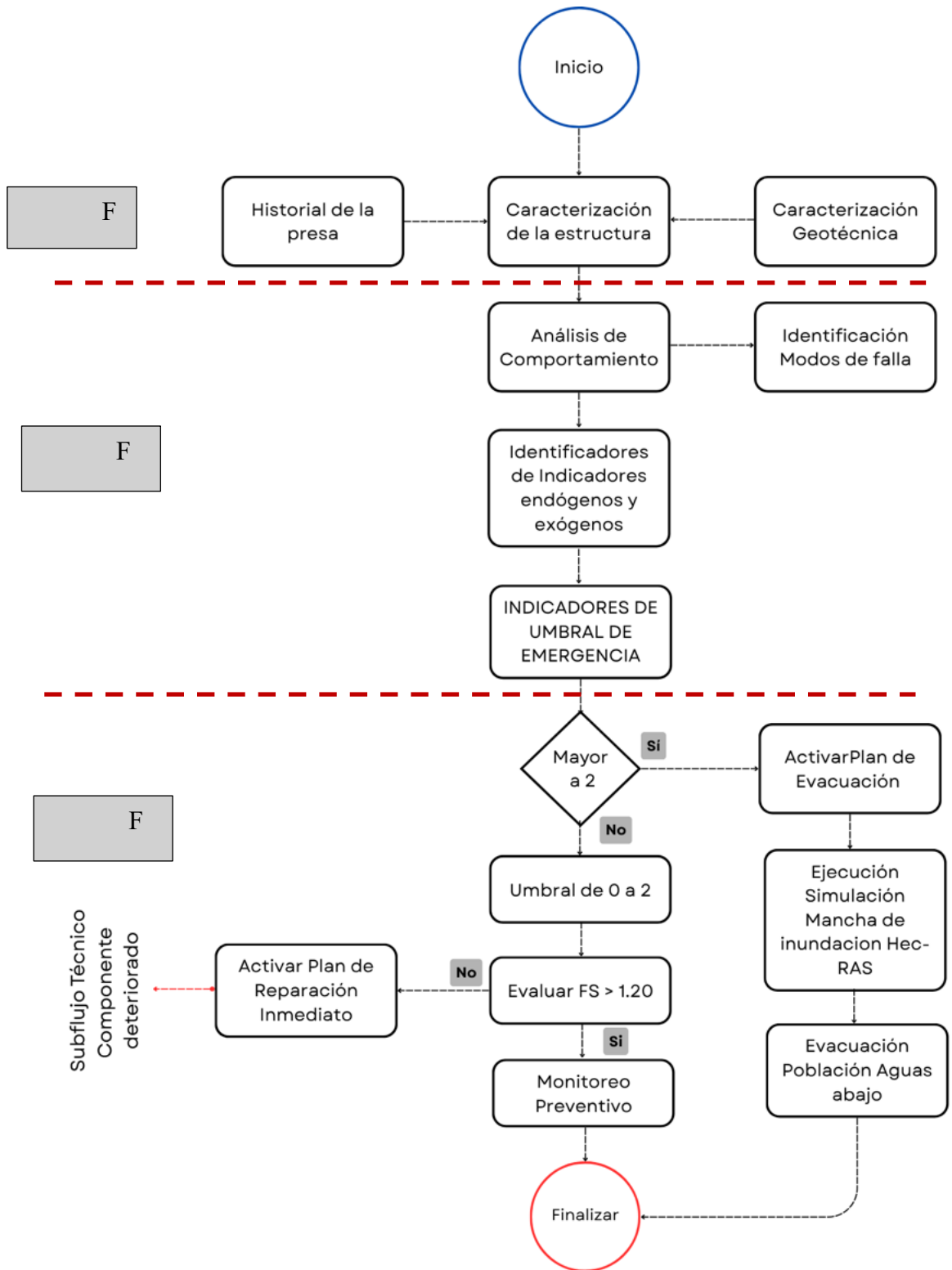
La presente investigación tiene un enfoque aplicado y técnico, orientado al diseño de una propuesta metodológica para intervención y reparación de represas de materiales sueltos en estado operativo, con énfasis en contexto de alto riesgo hidrometeorológico como el fenómeno den Niño o ENSO en Ecuador. Se trata de una investigación de carácter descriptivo-explicativo, aplicado en un caso de estudio (La represa El Azúcar), combinando revisión bibliográfica, diagnóstico técnico, modelación y análisis de riesgo.

### **2.1 Propuesta Metodológica**

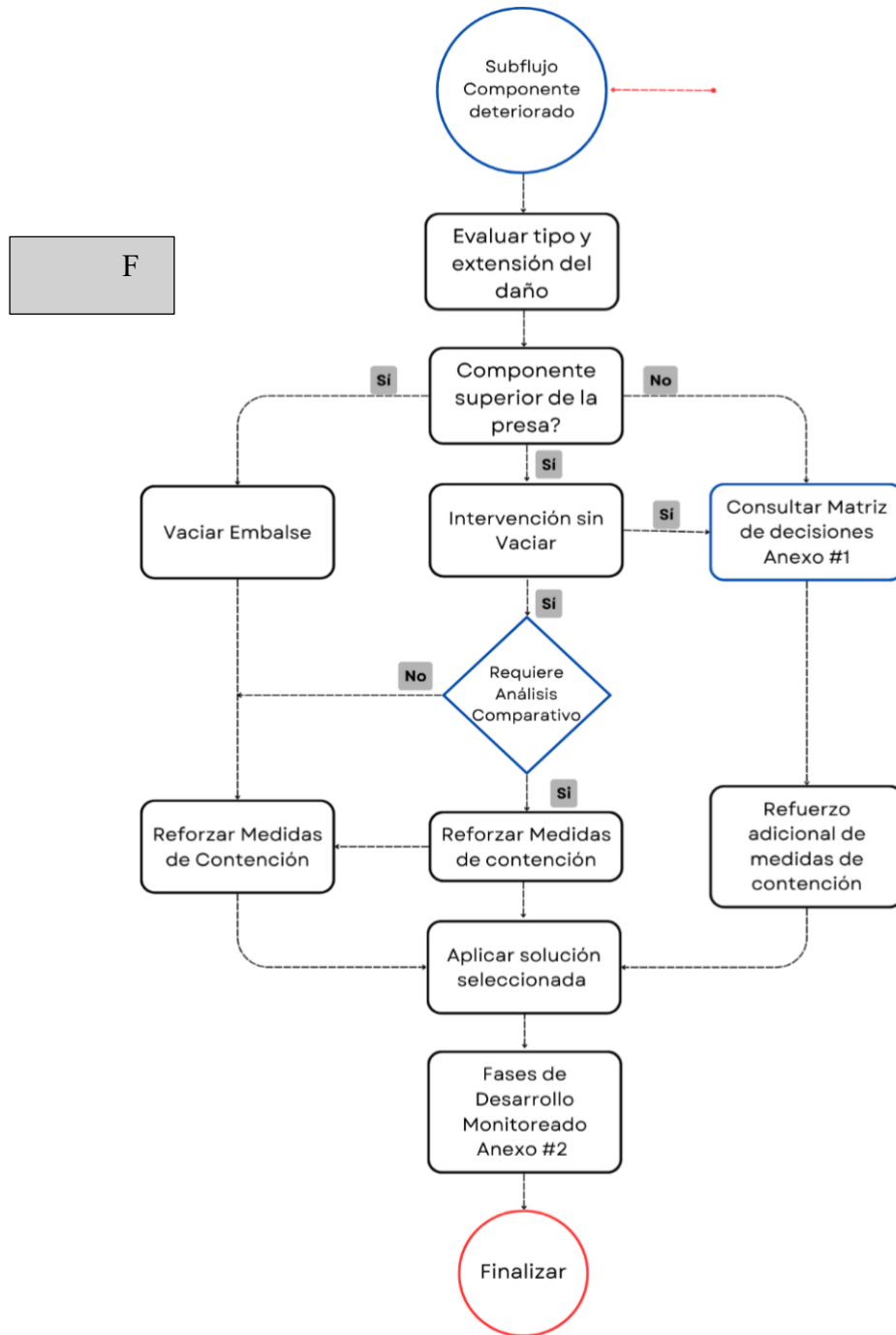
Comprende la descripción de las etapas de inspección, diagnóstico y reparación, basada en los reglamentos del ICOLD, ORSEP, USACE, FEMA y el Manual de Seguridad de Presas de España. Consideración de análisis geotécnicos, mejora de las capacidades de drenaje, refuerzo de núcleos impermeables, y técnicas para el control de filtraciones.

La propuesta metodológica se desarrolla en cuatro fases secuenciales ([Figura #15](#) y [16](#)).

**Figura 15** Diagrama de flujo metodología propuesta



**Figura 16** Diagrama de flujo, Intervención y plan de reparación inmediata



### 2.1.1 Fase 1: Caracterización de la estructura

En esta etapa se determina el modelo constructivo, el historial de la presa, identificación del medio geológico, la caracterización geotécnica de los materiales que componen la estructura principal y las obras conexas. Se realiza la evaluación de la instrumentación instalada en la presa y se construye el modelo de comportamiento de la estructura con base en una inspección inicial que considere los modelos de deterioro que se han presentado hasta el momento de la intervención.

Se analiza bibliografía internacional sobre fallas, reparaciones e intervenciones en presas de materiales sueltos, casos documentados de intervención, identificando fallas típicas y soluciones recurrentes (Filtros, drenes, inyecciones, pantallas de impermeabilización, mejoras de vertedero, instrumentación [\(Tabla #15\)](#)).

**Tabla 15** Bibliografía de casos sobre fallas de presas de materiales sueltos a nivel internacional

País	Tipo de falla	Características	Causas	Intervención realizada
<b>Zimbabue</b>	Falla temprana (durante llenado)	Presa de escollera con pantalla de hormigón, 90 m altura, 1.750 Mm <sup>3</sup>	Capacidad insuficiente de desvío del río; pantalla no terminada	No colapsó; se evitó el colapso con medidas durante la emergencia
Tokwe Mukosi				

<b>Colombia</b>	Falla temprana (durante la construcción)	Presa de escollera con núcleo de arcilla, 227 m altura, 2.700 Mm <sup>3</sup>	Deslizamiento, bloqueó el túnel de desvío; subida incontrolada del embalse	Relleno de emergencia; descarga de emergencia; presa salvada
Ituango				
<b>China</b>	Rebose	No detalladas	Avenida extrema	No especificada
Xinfa				
<b>India</b>	Rebose	No detalladas	Avenida extrema	No especificada
Annamayya				
<b>Brasil</b>	Rebose	No detalladas	Avenida extrema	No especificada
Igua				
<b>EE.UU.</b>	Falla por avenida	No detalladas	Cambio climático, avenida	No especificada
Edenville				
<b>Venezuela</b>	Sifonamiento	Tierra homogénea, arcilla limosa dispersiva.	Arcillas dispersivas Sifonamiento progresivo	Sí, se reemplazó material por arcilla no dispersiva
Las Majaguas				
<b>Venezuela</b>	Agrietamiento	Núcleo de arcilla impermeable con espaldones de gravas.	Asentamiento diferencial – desplazamiento del núcleo	Se monitoreó y estabilizó
Presa el Isiro				
<b>Venezuela</b>	Deslizamiento	Homogénea, limos arenosos, espaldones con enrocado.	Saturación, baja compactación, vaciado incompleto	Sí, con vaciado total y reconstrucción parcial
Tulé				
<b>India</b>	Licuación por sismo	Tierra zonificada, núcleo de arcilla, espaldones arenosos.	Sismo Bhuj 2001 – Licuación en cimentación y cortina	No se documentó reparación efectiva
Chang				
<b>Cuba</b>	Filtración y rebase	Diversas presas de materiales sueltos.	Inadecuado diseño	Algunas fueron puestas en

Varios Casos			hidráulico / mal mantenimiento	'prevención hidrológica'
<b>Colombia</b>	Inestabilidad Geológicas del sitio cavidades subterráneas	Enrocado con núcleo de tierra H: 225 m V: 19 millones m <sup>3</sup>	Inestabilidad Geológicas del sitio cavidades subterráneas	Excavación, relleno con concreto dental, inyecciones de consolidación
La Honda				
<b>Venezuela</b>	Sifonamiento	Homogénea de Tierra con núcleo de materiales arcillosos	Erosión interna debido a mala compactación	Bajar el embalse
Turimiquire				
<b>Argentina</b>	Filtración (Parcial)		Fugas Localizadas, Falta de mantenimiento	Control del nivel de embalse, monitoreo con instrumentación, pantalla impermeable aguas arriba, rehabilitación de drenes internos, instalación sistema de alerta
Campo Alegre				
<b>Bolivia</b>	Filtración e Inestabilidad de Taludes	Tierra, H: 8:00 m longitud de coronamiento 285 m	filtraciones que produjeron inestabilidad en los taludes	Creación de vertedero de desfogue
Muyu Loma				
<b>Bolivia</b>	permeabilidad en la cimentación	Tierra, H: 19,60m, Longitud de corona: 112 m	Permeable en su fundación a consecuencia de la meteorización de la roca	Inyección de impermeabilización en la base, colocación de geotextiles y construcción de filtros.
Chua Loma				

Se elabora un Plan de intervención de la estructura y se planifica, aplicando diversas normativas: FEMA (Federal Guidelines for Dam Safety: Emergency Action Planning for Dam Owner), USACE (EM 1110-2-1913) sobre instrumentación en presas, de ser requerido para el análisis. CEDEX (Manual de Seguridad de Presas - España) preparación y planificación de la intervención. Principalmente, los siguientes aspectos:

- Diseño del plan de trabajo en etapas: definir horarios, equipos, monitoreo, control de tráfico de maquinaria.
- Establecer protocolo de emergencia y evacuación ante empeoramiento de condiciones.
- Instalación de instrumentación adicional (piezómetros, inclinómetros, medidores de caudal en drenajes).
- Capacitación del personal sobre riesgos y procedimientos geotécnicos en presas activas

La actuación se inicia con la activación del COE (Comité Operativo de Emergencias) para interacción y cooperación interinstitucional. Previamente, se debe contar con un Plan de Emergencias que incluya las etapas de atención y evacuación de la población potencialmente afectada. Mediante un enfoque normativo, se establecen los requisitos de comportamiento del sistema para que se considere seguro, luego de la intervención. De acuerdo con EM 1110-2-1902 (U.S: Army Corps of Engineers, 2003), no basta con calcular un factor de seguridad de taludes. En presas existentes, no se debe depender solo del análisis de estabilidad; hay que investigar en campo, revisar diseño/construcción históricos y vigilar instrumentación. Para reevaluar, usar métodos que satisfacen todo el equilibrio; enfoques antiguos de equilibrio de fuerzas pueden dar FS erróneos. Analizar condiciones a largo (régimen permanente a nivel máximo y recargo), vaciado rápido y potencial de deslizamientos que bloqueen descargas.

El fin de construcción, solamente si se modifica la sección. Los Factores de Seguridad (FS) en presas existentes pueden ser menores que en presas nuevas si lo respalda el desempeño observado. La elección del FS afecta si se rehabilita o no; se debe usar también análisis de confiabilidad para decidir la intervención. [\(Tabla 16\)](#).

**Tabla 16** Factores de seguridad mínimos requeridos

<b>EM1110-2-1902</b> <b>31 Oct 03</b> <b>Factores de seguridad mínimos requeridos: Presas de tierra y presas de enrocado nuevas</b>		
Condición de análisis	Factor de seguridad mínimo requerido	Talud
Fin de la construcción (incluida la construcción por etapas) <sup>2</sup>	1.3	Talud aguas arriba y aguas abajo
Largo plazo (filtración permanente, nivel máximo de almacenamiento, cresta del aliviadero o compuertas)	1.5	Aguas abajo
Máximo nivel de sobrecarga <sup>3</sup>	1.4	Aguas abajo
Descenso rápido	1.1 – 1.3 <sup>45</sup>	Aguas arriba
1.-Para cargas sísmicas, ver ER 1110-2-1806 para orientación. Una Circular de Ingeniería, “Dynamic Analysis of Embankment Dams”, aún está en preparación. 2.-Para presas mayores a 50 pies en cimentaciones blandas y para presas que estarán sometidas a carga del embalse durante la construcción, puede ser necesario un factor de seguridad mínimo de fin de construcción más alto. 3.-Empuje del embalse bajo el máximo nivel de sobrecarga. Las presiones de poro generalmente se consideran como las desarrolladas bajo flujo permanente en el nivel máximo de almacenamiento. Sin embargo, para cimentaciones permeables sin un cierre positivo que detenga la filtración en estado estable, podría desarrollarse flujo bajo el máximo nivel de sobrecarga. 4.-Factor de seguridad (FS) que debe utilizarse con el método mejorado de análisis descrito en el Apéndice G. 5.-FS = 1.1 se aplica al descenso rápido desde el máximo nivel de sobrecarga; FS = 1.3 se aplica al descenso rápido desde el máximo nivel de almacenamiento.		

En esta etapa se realiza también un Análisis Preliminar de Amenazas, PHA (Preliminary Hazard Analysis) para identificar los estados del sistema y sus implicaciones, los modos de falla del sistema (la falla de un subsistema puede hacer fallar todo el sistema) y los métodos que se pueden utilizar para controlar los niveles de riesgo y las consecuencias

potenciales. Se describen los componentes del sistema, el tipo de falla esperada en esos componentes, una estimación cualitativa de la probabilidad de ocurrencia para luego calificar la probabilidad en una escala numérica. Así mismo, se califica la consecuencia de la falla potencial mediante escala numérica. [\(Tabla 17\)](#).

**Tabla 17** Escala numérica para calificación de consecuencia de falla

Probabilidad de Ocurrencia		Consecuencia del evento adverso	
Muy poco probable	1	Consecuencia muy baja	1
Poco probable	2	Consecuencia baja	2
Posible	3	Consecuencia moderada	3
Muy Posible	4	Consecuencia grave	4
Seguramente se presenta	5	Consecuencia muy grave	5

El valor de la amenaza se obtiene del producto de la probabilidad y la consecuencia, como se muestra en la tabla siguiente. [Tabla #18](#)

**Tabla 18** Aplicación de Preliminary Hazard Analysis (PHA)

Componente	Tipo de Falla Esperada	Probabilidad de Falla	Consecuencia (1-5)	Valoración de la amenaza (P x C)	Solución Sugerida
		(1-5)			
<b>Cimentación</b>	Asentamiento diferencial, pérdida de soporte, filtración basal	5.0	5.0	25.0	Refuerzo con inyecciones de consolidación, drenes de fondo, control piezométrico, análisis geotécnico.

<b>Núcleo</b>	Filtración interna, erosión progresiva (piping)	4.0	5.0	20.0	Instalación de filtros y drenes, control piezométrico, relleno con material impermeable.
<b>Drenaje interno</b>	Obstrucción, colapso de filtros, disminución de eficiencia	4.0	4.0	16.0	Limpieza con cámaras de inspección, construcción de drenes paralelos, mantenimiento preventivo.
<b>Estribos</b>	Deslizamientos, inestabilidad por infiltración	3.0	4.0	12.0	Refuerzo con anclajes, control de escurrimiento, monitoreo topográfico.
<b>Espaldón aguas abajo</b>	Fisuración, subsidencia local, deslizamientos	3.0	3.0	9.0	Excavación y recompactación, geotextiles, estabilización con bermas.
<b>Espaldón aguas arriba</b>	Reblandecimiento por oleaje o infiltración	2.0	3.0	6.0	Protección con enrocado o geoceldas, drenaje superficial.
<b>Vertedero</b>	Obstrucción, erosión en solera o paramentos	2.0	3.0	6.0	Revestimiento con concreto, disipadores de energía, mantenimiento regular.
<b>Coronación</b>	Asentamientos diferenciales, grietas por compactación deficiente	2.0	2.0	4.0	Relleno y compactación, monitoreo topográfico, refuerzo con juntas o superficie.

La posibilidad que se presente un evento adverso implica una pérdida potencial. La siguiente evaluación es identificar las variables críticas que definen el modelo de comportamiento de la presa de tierra y las consecuencias de su evolución en detrimento de la seguridad de la estructura. Variables críticas como la sismicidad, la saturación y las filtraciones. [Tabla#19](#)

**Tabla 19** Evaluación de variables críticas en presas de tierra

Escenario de daño	Tipo de intervención sugerida	Componentes afectados	¿Requiere intervención inmediata?	Instrumentación necesaria	¿Activar protocolo de emergencia?	Nivel prudente de agua en embalse	¿Se puede vaciar el embalse?	Criterio técnico para activar protocolo
<b>Filtración concentrada en núcleo (no visible en superficie)</b>	Instalación de drenes internos y filtros; monitoreo piezométrico reforzado	Núcleo impermeable	Sí	Piezómetros, sensores de presión intersticial	Sí, si hay aumento súbito de presión o filtración visible	Reducir al 50% si se confirma filtración significativa	No, solo si el núcleo falla completamente	Filtración supera 0.5 l/s 100m y presión > 80% del máximo
<b>Fisura longitudinal en espaldón aguas abajo</b>	Excavación controlada y recompacción; incorporación de geotextiles	Espaldón aguas abajo	Sí	Inclinómetros, extensómetros	Sí, si hay evidencia de desplazamiento activo	Mantener bajo monitoreo; bajar un 20% si hay actividad	Sí, si se agrava la fisura	Desplazamiento > 2 cm o inclinación > 3° del diseño
<b>Reblandecimiento local por saturación</b>	Instalación de drenes superficiales y protección vegetal o roca	Zona de contacto núcleo-espaldón	Depende del nivel de saturación	Medidores de humedad superficial, piezómetros	No, salvo si hay signos de propagación acelerada	Reducir 30% si la saturación continúa	Generalmente no necesario	Elevación sostenida del nivel piezométrico > 70%
<b>Inestabilidad general por sismo leve</b>	Evaluación geotécnica rápida y refuerzo de taludes	Cuerpo completo de la presa	Sí	Acelerógrafos, inclinómetros, piezómetros	Sí, activación inmediata en caso de pérdida de estabilidad	Reducir mínimo 40% para reducir carga hidráulica	Sí, si hay riesgo de falla generalizada	Pérdida de estabilidad en análisis sísmico o inclinación anormal
<b>Asentamientos diferenciales en coronación</b>	Relleno con material compactado; control topográfico periódico	Coronación	Depende del grado de asentamiento	Nivel topográfico, deformímetros	Solo si se detecta subsidencia peligrosa	Mantener nivel bajo si hay riesgo de subsidencia	No necesario si se monitorea correctamente	Asentamiento superior a 5 cm en 24 h
<b>Obstrucción de drenes existentes</b>	Limpieza o construcción de nuevos drenes paralelos	Sistema de drenaje	Sí	Caudalímetros en drenes, cámaras de inspección	Sí, si la obstrucción genera represamiento interno	Sin necesidad de reducción si se actúa rápidamente	No requerido, salvo aumento significativo de presión	Caudal detenido completamente y aumento del nivel freático

### 2.1.2 Fase 2: Análisis del comportamiento y modos de falla

En esta etapa se realizan modelaciones geotécnicas en condiciones estáticas, sísmicas e hidrológicas extremas. Se determina el grado de estabilidad total del sistema y de cada uno

de los componentes. Los modos de falla se califican como frágil o rápido y dúctil o progresivo.

### 2.1.3 Fase 3: Evaluación de escenarios de emergencia y criterios de intervención

Se identifican escenarios de emergencias con base en umbrales definidos por la Guía Técnica para la elaboración de Planes de Emergencia de Presas (Ministerio Para la Transformación Ecológica y El Reto Demográfico, 2023). [Tabla #20](#).

**Tabla 20** Identificación de Escenarios de Emergencias (0 al 3)

Escenario	Descripción breve	Nivel del embalse / avenida prevista	Resguardos	Compuertas	Resultado previsto	Condición adicional (aguas arriba)
0	Nivel sin riesgo	Puede alcanzarse el nivel máximo histórico y el caudal vertido máximo histórico sin comprometer la seguridad; con el nivel actual y la avenida prevista no supera el nivel seguro.	No se agotan los resguardos.	Sin vertido por imposibilidad de maniobra (no aplica).	La presa opera dentro de límites seguros.	Si aguas arriba se declara Escenario 1.
1	Se superará el nivel sin riesgo, aún con resguardo disponible	Con nivel actual y avenida prevista se superará el nivel que la presa soporta sin riesgo, sin agotar resguardos.	Existen resguardos disponibles (no agotados).	Puede haber vertido sobre compuertas por imposibilidad de accionarlas, SIN rotura (están diseñadas para esa lámina).	Riesgo moderado; control mediante explotación y vigilancia.	Si aguas arriba se declara Escenario 2.

2	Riesgo de agotar resguardos y rebasamiento	Con las medidas y medios disponibles no se puede asegurar que no se agoten los resguardos y que no ocurra rebasamiento.	Pueden agotarse los resguardos existentes.	Posible vertido sobre compuertas por imposibilidad de operarlas, con RIESGO de rotura (no diseñadas para ese vertido).	Riesgo alto de rebasamiento y daño si no se actúa.	Si aguas arriba se declara Escenario 3.
3	Rebasamiento y rotura (inminente o en curso)	Situación anormal sin margen de seguridad	Resguardos agotados o insuficientes.	Condición superada; el rebase compromete la integridad.	Rotura inminente o iniciada.	—

En esta etapa se incorporan variables observacionales y de diseño conforme a EM 1110-2-2300, niveles piezométricos para verificar régimen de presiones y eficacia de drenes/filtros, caudal de filtraciones y turbidez del agua infiltrada como traza de erosión interna, deformaciones horizontales y verticales mediante inclinómetros y estabilidad general evaluada con los estados de carga del proyecto. Estas series se integraron en una matriz de umbrales vs acciones y, cuando sea posible, en un sistema ADAS para lectura y alarma temprana (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2004). Se establecen las condiciones de operación de los filtros, deben retener el suelo protegido (antipiping), permitir el paso del agua (permeabilidad) y, cuando actúan como dren, además deben coleccionar y conducir el caudal a la descarga. Se evalúan los criterios de estabilidad, permeabilidad de los filtros a partir de relaciones granulométricas del suelo base y el material de filtro para evitar migración de finos y colmatación,  $D_{15}(\text{filtro})/d_{15}(\text{base}) \approx 3-5$  (preferible  $\geq 5$ ;  $D_{15}(\text{filtro}) \geq 0,1 \text{ mm}$ ). El filtro suele tener  $\sim 9-25\times$  la permeabilidad del suelo base; limitar finos ( $\leq 5\%$  pasa #200) y plasticidad ( $PI=0$ ) en la fracción fina. Se evalúan conexiones de filtro con tuberías perforadas,  $D_{50}(\text{filtro})$  sea mayor que el diámetro de orificio (o ancho de ranura); frecuentemente requiere filtros multicapa (“graded filters”).

La instrumentación debe ser incorporada a sistemas automatizados de adquisición de datos, útiles para piezometría y movimientos; mejoran frecuencia, exactitud, alarmas y acceso remoto, protegen de vandalismo, descargas eléctricas; permiten mantenimiento y gestión de datos con formatos que faciliten reducción e interpretación rápida; definir umbrales y alarmas; integrar CAD/GIS; mantener O&M, planos as-built y plan de calibraciones. Se establecen los parámetros de desempeño: fijar criterios/umbrales en fases tempranas y actualizarlos con datos de instrumentación y operación. ([Tabla#21](#)).

**Tabla 21** Reglas rápidas para filtros

<b>REGLA CRITERIO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
Relación de permeabilidad	$D_{15}(\text{filtro})/d_{15}(\text{base}) = 3-5$ (preferible $\geq 5$ ).
Granulometría mínima	$D_{15}(\text{filtro}) \geq 0,1 \text{ mm}$ ; controlar $D_{10}-D_{90}$ para evitar segregación.
Contenido de finos	$\leq 5\%$ pasando #200; evitar plasticidad ( $PI \approx 0$ ) en la fracción fina.
Conexión a dren perforado	$D_{50}(\text{filtro}) >$ diámetro de orificio o ancho de ranura del tubo.
Capa de asiento bajo riprap	Cumplir relaciones $D_{15}/D_{85}$ entre terreno, asiento y riprap para impedir lavado.

Con la información recabada se construye una matriz de interacción para seleccionar la intervención adecuada según el daño, componente afectado y factibilidad de operación sin vaciado. ([Tabla#22](#)).

**Tabla 22** *Tabla de afectación de acuerdo con componente*

<b>Zona / Parte</b>	<b>Componente principal</b>	<b>Clasificación en la matriz</b>
<b>Zona superior</b>	- Coronación (crest)	Componente superior
	- Espaldón aguas arriba (zona alta)	Componente superior
	- Protección superficial (en coronación)	Componente superior
<b>Zona intermedia (media altura)</b>	- Núcleo impermeable (arcilla, limo)	Componente interno/central
	- Filtros y drenes	Componente interno
	- Zona de transición	Componente interno
<b>Zona inferior / pie</b>	- Espaldón aguas abajo (baja altura)	Componente estructural clave
	- Cimentación	Componente estructural clave
	- Sistema de drenaje de base	Componente estructural clave

<b>Obras accesorias</b>	- Vertedero, toma, túnel de desvío	Componente funcional crítico
	- Instrumentación (piezómetros, inclinómetros)	Componente de control

#### 2.1.4 Fase 4: *Diseño técnico de la intervención y plan de reparación inmediata.*

Se formulan soluciones como drenajes, filtros, recrecimiento de corona, refuerzo de taludes y mejoras operacionales. USACE (EM 1110-2-2300) incluye métodos de reparación y control en presas de materiales sueltos. FEMA (Federal Guidelines for Dam Safety: Earthquake Analysis and Design of Dams) plantea la revisión de intervenciones bajo condiciones críticas. ICOLD, Boletines 52 y 109, contienen lineamientos para reparación sin vaciado y el uso de geo sintéticos. CEDEX: intervenciones parciales y refuerzo sin vaciado. La intervención se planifica por etapas:

- Etapa 1: Sellado temporal del área de intervención (geotextiles, inyecciones superficiales, membranas).
- Etapa 2: Excavación controlada en zona afectada, con maquinaria liviana, desde coronación o espaldón aguas abajo.
- Etapa 3: Instalación de drenes de alivio (horizontal o vertical), filtros de arena y gravas según USACE/FEMA.
- Etapa 4: Relleno con materiales seleccionados compactados por capas (según el tipo de daño).

- Etapa 5: Integración de geosintéticos si es necesario (geomembranas, geodrenes).
- Etapa 6: Recubrimiento de protección superficial (con roca, césped, o suelo vegetal).

Durante toda la intervención:

- Se realiza monitoreo en tiempo real de piezómetros y asentamientos.
- Se evalúa constantemente el FS por métodos numéricos (*Software Geotécnico* etc.).
- Cualquier desviación → detención inmediata y activación de plan de contingencia.

Una vez realizada la intervención, se realiza la verificación exPost, con las siguientes consideraciones:

USACE (EM 1110-2-1902): evaluación del comportamiento post-reparación. CEDEX: control posterior mediante auscultación (Cap. 6).

FEMA: recomienda evaluaciones posteriores con parámetros base:

- Verificación del comportamiento estructural mediante monitoreo.
- Control visual de filtraciones, deformaciones y estabilidad de taludes.
- Comparación de parámetros antes y después de la intervención (evaluación de mejora).
- Revalidación del FS actualizado con nuevas condiciones.

## **2.2 Técnicas e Instrumentos**

- Fuentes secundarias: Análisis documental de informes técnicos, planos, memorias de intervención y normativa.
- Modelación Numérica para modelos geotécnicos
- Matrices de decisión y análisis de riesgo: adaptación de formatos propuestos por CEDEX y FEMA
- Diagrama y flujogramas: Para representar gráficamente el proceso metodológico.

## **Capítulo 3**

### **3 Aplicación propuesta al Caso de Estudio “Represa El Azúcar”**

La represa El Azúcar, en Ecuador, fue seleccionada como caso de estudio por su relevancia histórica, su tipología constructiva en materiales sueltos, su operación prolongada en condiciones hidrológicas variables, y la existencia de antecedentes técnicos que permiten analizar su comportamiento, deterioro y reparación. Su análisis permite validar una metodología que podría replicarse en otras presas del país con características similares. Mediante una entrevista realizada al Ing. Enrique Herbozo Alvarado, MSc., quien fue encargado del rediseño e intervención para la reparación de la represa El Azúcar, construida en 1967, constaba inicialmente con una altura de 47 metros. De acuerdo con la asesoría requerida al CEDEX por CEDEGE, concluyó que la Presa Azúcar se hallaba en muy mal estado y, dadas la incertidumbre que se planteaba sobre una obra construida hace mucho tiempo, había que plantearse un diseño de adecuación que considere factores de seguridad algo mayores que los convencionales. La represa El Azúcar presentaba un intenso agrietamiento longitudinal, con fisuras abiertas hasta 4 metros de profundidad, lo que constituía un serio motivo de preocupación sobre el comportamiento de la presa, ya que la penetración de aguas lluvias en dichas fisuras representaba un factor de inestabilidad de los taludes (Herbozo Alvarado, 2024).

#### **3.1 Fase 1: Recolección de Información normativa y técnica para intervención y regularización de presas.**

Se realizó una revisión sobre el contexto de planes de emergencias, procedimientos, umbrales de tolerancia ante eventos adversos en los cuerpos de las presas de materiales

sueltos, se pueden recopilar los puntos importantes a los cuales cada país con normativa considera clave con respecto a la seguridad de presas. [\(Tabla#23\)](#)

**Tabla 23** Revisión de normativa, Icold, USACE, FEMA, MITECO, ORSEP

<b>NORMA-AMBITO Clasificación Alcance</b>	<b>Revisiones e instrumentación</b>	<b>Cargas clave (hidrológicas / sísmicas)</b>	<b>Notas técnicas para intervenciones</b>
<b>ICOLD (Boletines y guías)</b> Buenas prácticas internacionales para presas de materiales sueltos (no regulatorio). Fuerte foco en erosión interna y filtros.	Recomienda PAE y gestión del riesgo. Fuerte énfasis en auscultación y control por etapas.	Aborda crecidas y sismo como escenarios de evaluación (enfoque de riesgo).	Uso de filtros y drenes bien graduados, tratamiento de contactos y control de línea freática
<b>EE. UU. (USACE/FEMA)</b> Manuales técnicos obligatorios para agencias federales y guías ampliamente adoptadas: EM 1110-2-1901 (seepage), DS-13 USBR (filtros, materiales).	EAP obligatorio para presas de alto peligro (FEMA P-64) Requiere programas de inspección y auscultación; criterios para seepage, filtros y estabilidad.	IDF por directriz federal (FEMA P-94); análisis sísmico per guías federales; verificación abatimiento rápido.	Para rehabilitación: retro filtrado (chimenea/base), mejora de drenaje, documentación de desempeño post-obra. (Cuerpo de Ingenieros del Ejército, FEMA)
<b>España (RD 264/2021 MITECO)</b> Marco legal obligatorio: clasificación, proyecto, llenado y explotación + revisiones de seguridad para todas las fases.	PEP obligatorio según NTS (contenido e implantación). Revisiones de seguridad periódicas, Normas de Explotación; guías MITECO 2023–2025 para PEP, instrumentación.	Exige justificar capacidad hidráulica (crecidas de proyecto) y comportamiento sísmico según categoría y emplazamiento.	Intervenciones: admite gestión por etapas con control de niveles, auscultación intensiva y criterios de aceptación en revisiones.
<b>Argentina (ORSEP)</b> Ente regulador nacional para presas bajo su jurisdicción; aplica lineamientos de	PADE obligatorio para presas cuyo fallo pueda causar pérdidas de vida.	Exige demostrar seguridad hidráulica y estructural; adopta	En rehabilitación: gestión por sistemas de seguridad (PADE + operación), trazabilidad y control

seguridad y control operativo.	Programas de seguridad, inspecciones y auscultación bajo supervisión ORSEP.	estándares internacionales.	del desempeño post-intervención. (Argentina.gob.ar)
<b>O Perú (ANA , Reglamento seguridad de presas públicas)</b> obligatorio para presas públicas: define clasificación por dimensiones y riesgo potencial (A, B, C).	Plan de Acción en Emergencia requerido y actualizado. Archivo Técnico, Manual de Operación y Mantenimiento, auscultación y evaluaciones periódicas (frecuencias definidas).	Verificación de seguridad estructural, frente a avenidas y de operación; coordinación con sistema nacional de GRD.	Intervenciones: obligación de informes de seguridad, control de drenes y estabilidad de taludes, y mantenimiento preventivo.
<b>Chile</b> No existe ley marco única de seguridad de presas de agua; sí regulaciones específicas: Ley 20.304 para “embalses de control” (crecidas) y manuales sectoriales. Decreto 50	Manuales de Emergencia exigidos para embalses de control Exige monitoreo diario, operativo en embalses de control; lineamientos técnicos sectoriales.	Enfasis en crecidas (alertas) para embalses de control; requisitos técnicos específicos para relaves.	Para rehabilitación en presas de tierra: aplicar buenas prácticas internacionales (ICOLD/USACE/Spain) en ausencia de marco general.
<b>Colombia</b> Sin reglamento técnico nacional específico de seguridad de presas de agua; requisitos dispersos vía licenciamiento ambiental (ANLA) y gestión del riesgo (Ley 1523/2012; Decreto 2157/2017)	PAE/EAC exigible por esquemas de gestión del riesgo y licencias según proyecto. Seguimiento e inspecciones en marco de licencias ambientales; planes y monitoreo bajo GRD.	Hidrología/sismo según normas aplicables del proyecto y autoridad; no hay NTS nacionales para presas de agua.	En rehabilitación se adopta estándar internacional (ICOLD/USACE/USBR/Spain) como referencia técnica en expedientes. (ANLA, Función Pública)
<b>Ecuador (NEC-SE-DS + práctica)</b> No hay norma específica nacional para seguridad de presas; se usa NEC-SE-DS para cargas sísmicas y se permite adoptar normas	Planes de emergencia se formulan según autoridad sectorial/proyecto o GAD. Auscultación y revisiones conforme a	Sismo NEC-SE-DS; crecidas según diseño del proyecto.	En rehabilitación: se referencian CEDEX/ICOLD/USACE para filtros, drenes y operación por etapas.

internacionales (NEC 2015/2016).	buenas prácticas y exigencias del titular/autoridad.		
<b>Venezuela.</b> Marco específico nacional incompleto; existen propuestas/diagnósticos y manuales sectoriales, pero sin norma unificada de seguridad de presas.	PAE y gestión del riesgo recomendados por buenas prácticas y organismos técnicos. Inspección/auscultación según programas de los operadores; referencias a guías internacionales.	Criterios hidrológicos/sísmicos se adoptan por proyecto (y normas generales).	En rehabilitación: seguir estándares internacionales (ICOLD/USACE/Spain) y protocolos internos.

### 3.1.1 Criterios técnicos y operativos aplicables en contextos similares al ecuatoriano, revisión bibliográfica y Estado del arte de Intervenciones de presas en operación.

En este punto se realizó un análisis comparativo con una estructura y caso muy similar al Azúcar, se trata del embalse Turimiquire - las Canalias, Sucre (Venezuela), es una las presas más importantes de este sistema, la cual constituye en un enrocado con cara de concreto o (CRFD), de 113m y 480, diseñada y construida entre 1976-1980, pese a que la represa el Azúcar posee una altura y longitud que dista en escala, L 261 : y H: 45.90 inicialmente, ambas represas coinciden en la naturaleza de su constitución, materiales sueltos y comparten procesos críticos gobernados por gradientes hidráulicos, condiciones de saturación e interacción material estructura, que cómo lo dispone EL FEMA, en su publicación (FEMA, 2011). [\(Tabla#24\)](#).

**Tabla 24** Análisis comparativo presa Turimiquire y Azúcar

Aspecto	Turimiquire (Las Canalitas, VE)	El Azúcar (Santa Elena, EC)
Tipo de presa	CFRD (enrocado con cara de concreto)	Materiales sueltos: tierra zonificada con núcleo arcilloso
Altura / Long. cresta	113 m / 480 m	45.90 m / 261 m
Puesta en servicio / Hitos	1989 / múltiples intervenciones	Reparación documentada en 1996 por filtraciones y problema en un espaldón
Uso principal	Abastecimiento urbano y riego	Abastecimiento
Modo de deterioro dominante	Fugas por cara/juntas; soporte sin finos, no autosellante	Filtración/erosión interna en núcleo y contactos; drenaje/filtros insuficientes
Desencadenantes relevantes	Sismo 2018; envejecimiento; parches parciales (geomembranas); vandalismo	ENSO/avenidas; envejecimiento/colmatación; mantenimiento insuficiente
Síntomas principales	Pérdidas 4.000–9.800 l/s; fisuras/daños en losas; cambios en color de fugas	Humedades/surgencias AD; turbidez en drenes; asentamientos/fisuras locales
Riesgos dominantes	Gradientes elevados y apertura de juntas; vulnerabilidad sísmica de la cara	Piping y posible inestabilidad bajo saturación
Intervenciones previas	7–8 reparaciones sectorizadas con geomembranas PVC	Sellos/inyectados y mejoras locales (1996)
Estrategia recomendada (síntesis)	Intervención integral en seco: rehacer juntas y losa-plinto; regularizar soporte; geomembrana continua; berma	Filtro chimenea + drenes de base (continuos); mejora de contactos, recrecimiento de la corona, mejoramiento del núcleo

Operación durante obra	Drawdown controlado; by-pass; PAE activo; 4–6 meses a cota aprox 277 m para trabajar en seco	Operación por etapas sin vaciado; reglas de abatimiento/día; PAE y método observacional
Instrumentación prioritaria	Piezómetros; aforos de fugas; inspección sistemática de cara y anclajes	Piezómetros VW; aforos de drenes; inclinómetros; prismas topográficos
Verificación de aceptación	Caudal fugas y turbidez bajo; FS (estático/rápido abat./sísmico) $\geq$ objetivo; capacidad de vertedero adecuada	FS estático/rápido abat./sísmico $\geq$ objetivo; FS > 1.5; D15(filtro)/d85(suelo) y $k_{\text{filtro}} \geq 10\text{--}20$ ; capacidad de vertedero
Lección transferible clave	Evitar parches locales; soluciones continuas y tolerantes; control de transiciones.	Diseños continuos de filtros/drenes y mejora de contactos; inspección en gradaciones y compactación

### 3.1.2 Antecedentes técnicos de la represa El Azúcar (visitas técnicas, informes CEDEX- INERHI 1965-1996).

Se recopiló y analizó el libro de obra y los informes históricos (CNR 1965–67; INERHI 1983–85; CEDEX 1995–96). La presa, de 21 m de altura y 261 m de longitud (coronación 45.9 msnm), presentó desde el primer llenado (1967) asentamientos en el talud de aguas arriba por saturación rápida. En 1976 el nivel alcanzó 41.2 msnm y, tras trabajos de 1977, se elevó la coronación a 46.7 msnm; se registraron filtraciones en el estribo izquierdo. Después del evento El Niño 82–83 se midieron surgencias (7.2 L/min) y filtraciones superficiales (10 L/min) en dicho estribo. Las inyecciones de 1983–84 no resultaron eficaces: en 1992, con el embalse próximo a coronación, reaparecieron filtraciones. Los registros y campañas (1995–96) evidencian: i) núcleo impermeable insuficiente/heterogéneo y fisuras profundas; ii) drenaje de pie inoperante y ausencia de drenes longitudinales en estribos; iii)

filtros y enrocados deteriorados; iv) falta de un sistema de drenaje interno efectivo. Se ejecutaron sondeos (PA-101–105), calicatas (CPA-201–402), ensayos in situ y de laboratorio, que sustentan la calibración de modelos y la definición de umbrales de vigilancia.

- a) Revisión de libro de obra y memorias
- b) Línea de tiempo de eventos relevantes
- c) Geometría y Drenaje
- d) Identificación de problemas estructurales y operativos identificados
- e) Investigaciones geotecnicas (1995-1996)
- f) Lecturas clave para el diagnóstico.

### **3.1.3 Comportamiento geotécnico e hidráulico de la presa El Azúcar.**

Se realizó un análisis conceptual utilizando el historial de los ensayos realizados para la represa el Azúcar y mediante la geometría y parámetros obtenidos de los ensayos realizados se realizó una modelación del comportamiento de la represa, usando el software de modelación geotécnica, se realizó una comparación con la geometría inicial.

A partir de datos históricos e instrumentales, el comportamiento (tensión, deformación, filtración) de la represa y su cimentación.

### **3.1.4 Antecedentes técnicos de la represa El Azúcar (visitas técnicas, informes CEDEX-INNERHI 1965-1996).**

Cabe destacar que la realización de esta recopilación de información se hizo con base en los libros y memorias técnicas recopiladas por el Ing. Enrique Herbozo, quien fue el Ingeniero Fiscalizador del Trasvase a la Península de Santa Elena, dicha

información, se presenta en los Anexos. Dicho informe fue realizado a su vez con información procedente de los siguientes archivos:

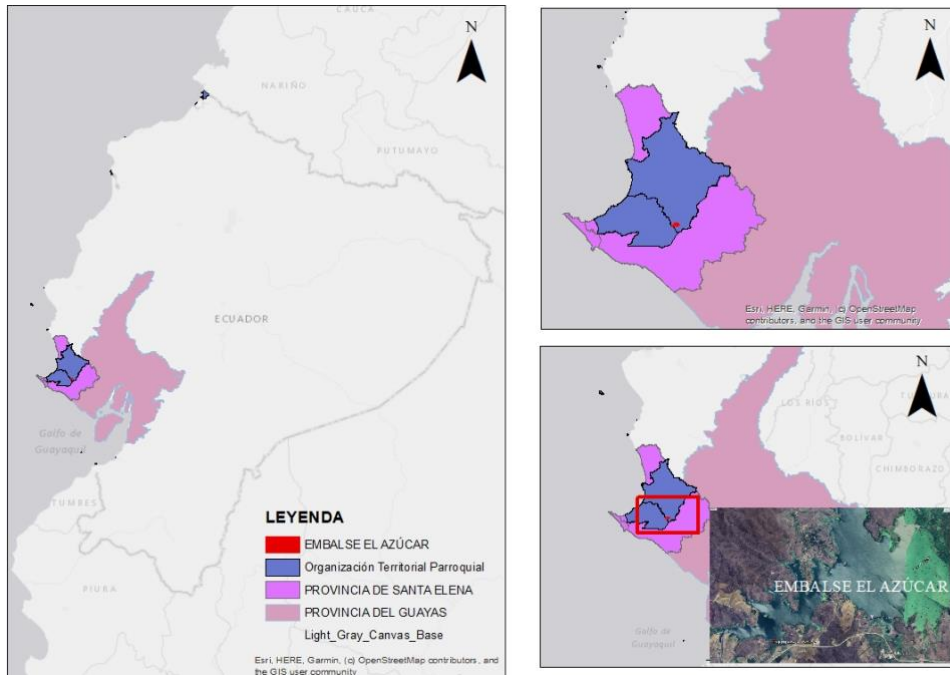
- a. Memoria Técnica y Dibujos de los estudios de Factibilidad (diciembre 1965) por la Caja Nacional de Riego (CNR).
- b. Memoria Técnica del Canal Azúcar- Rio Verde CEDEX 1984
- c. Presa El Azúcar. - Inyecciones para control de filtraciones (marzo 1985) por Instituto de Recursos Hidráulicos (INERHI).
- d. Informe Preliminar sobre Acondicionamiento Presa Azúcar (septiembre 1995) CEDEX
- e. Notas sobre ensayos Presa Azúcar. CEDEX (15-12-95)
- f. Memorándum sobre visita técnica del CEDEX al nivel del Traspase P. Sta. Elena 25 de enero al 9 de febrero.

**Ubicación:**

Presa el Azúcar ubicada en la comuna El Azúcar, cantón Santa Elena, provincia de Santa Elena, Ecuador, en las coordenadas 2°13'56.75" S, 80°33'25.12"

W. [Figura #17](#)

**Figura 17** Mapa de ubicación represa el Azúcar



### **Descripción General:**

La presa el Azúcar es una estructura de materiales sueltos, conformada por un núcleo central impermeable de arcillas y arcillas limosas de alta plasticidad. Espaldones de limos arenosos de plasticidad media a baja; enrocados en ambos paramentos de roca arenisca de la Fm. Azúcar.

### **Geología:**

En la Península de Santa Elena, muestra en la base a la Fm. Cayo (Cretácico tardío), con capas de arenas volcánicas y barros marinos depositadas en talud. Encima aparece el Grupo Azúcar (Paleoceno-Eoceno inferior), un abanico submarino con una facies de capas delgadas de arena y barro con marvas de corrientes y otra de areniscas más gruesas y conglomerados en canales (Chanduy), a veces afectadas por deslizamientos submarino. Le sucede el Grupo Ancón (Eoceno medio-Superior), con capas delgadas de arena y barro

frecuentes y deformaciones por deslizamientos, y localmente areniscas costeras (Punta Ancón). Tras una pausa, continua la Fm. Tosagua (Oligoceno superior-Mioceno inferior); Inicia con el Miembro Zapotal (conglomerado basal sobre Ancón y areniscas), seguido por Dos bocas (Barro con yeso) y Villingota (Lutitas Diatomáceas). [Figura #18](#)

**Figura 18** Mapa formaciones geológicas local

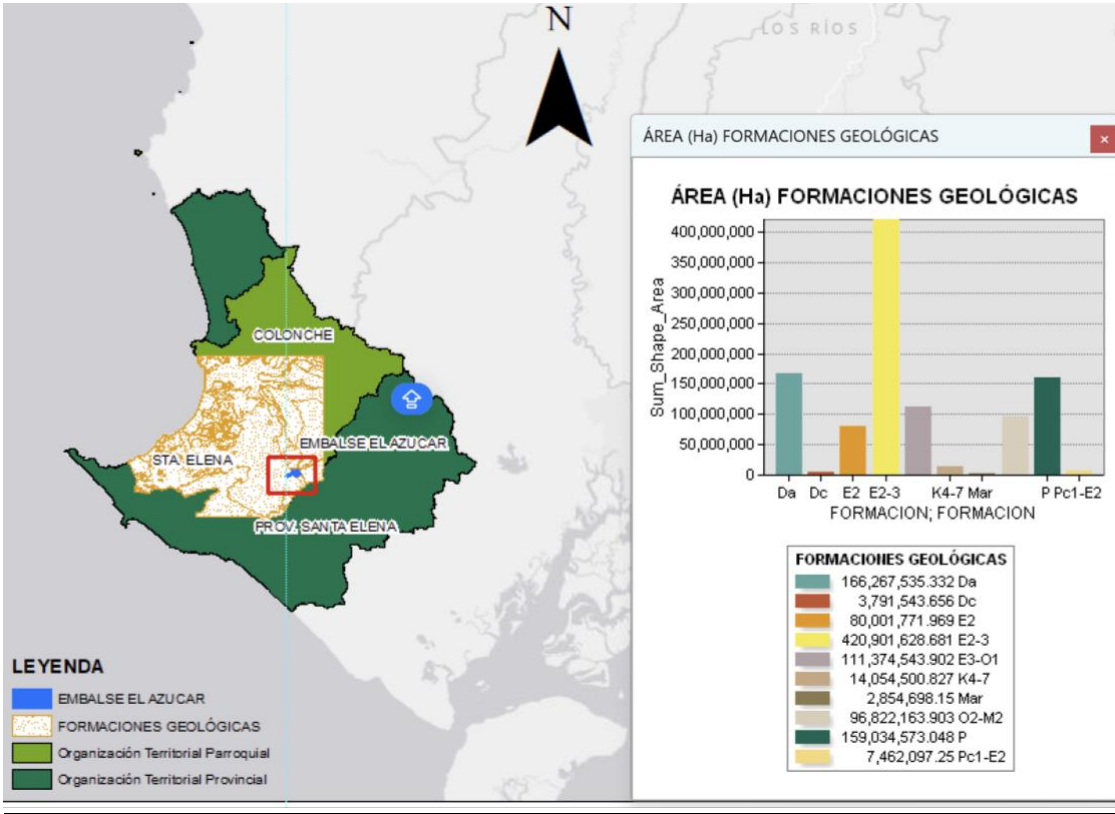
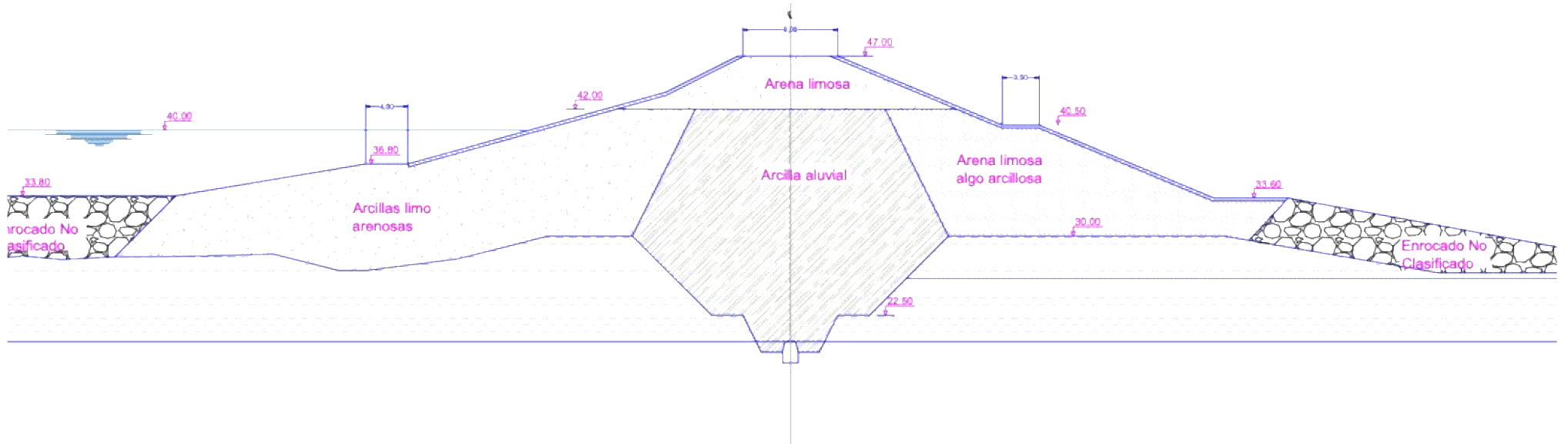


Figura 19 Geometría Inicial Represa el Azúcar 1975



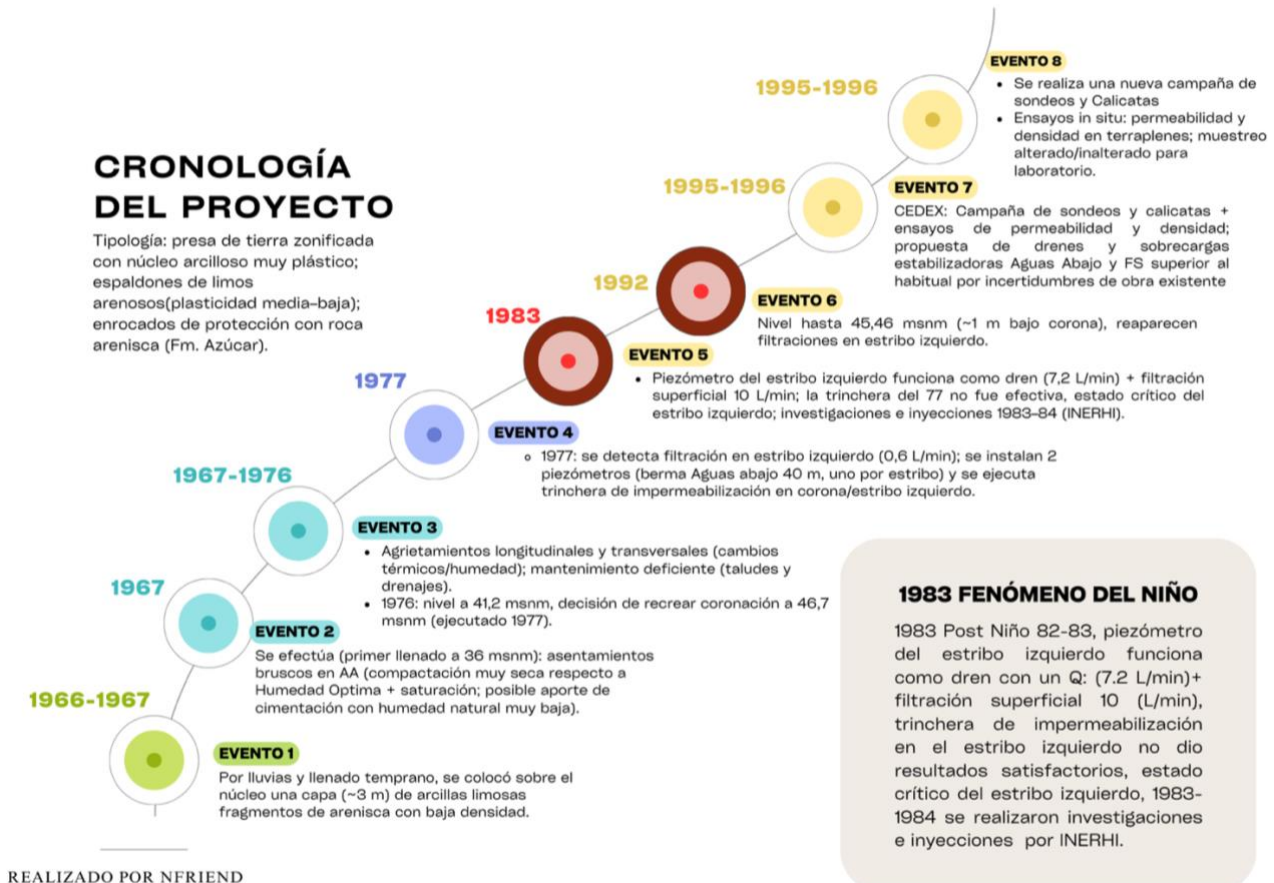
La geometría inicial de la represa Figura # 19 , estaba configurada con las siguientes medidas:

- Altura de coronación 45,90 msnm
- Ancho de la corona 12 m
- Taludes Aguas arriba 1V: 3H, con bermas 1V: 6H
- Taludes aguas abajo 1V: 2.5H, con bermas 1V:6H.
- Drenaje Aguas abajo: Filtro de arena 1.5 m + grava 2.00 m, dren de pie  $\varnothing$  0.15m

### **Línea de Tiempo:**

Desde sus inicios la presa el Azúcar, construida en 1967 existió transferencias de competencia entre los organismos oficiales responsables, esto implicó dificultades en la recopilación de información en cuanto al funcionamiento del reservorio desde su construcción, mientras que mediante el informe Presa el Azúcar, Inyecciones para Control de Filtraciones (marzo de 1985) Instituto Ecuatoriano de Recursos Hidráulicos (INERHI) se describe el comportamiento de la presa desde su construcción. ([Figura # 20](#))

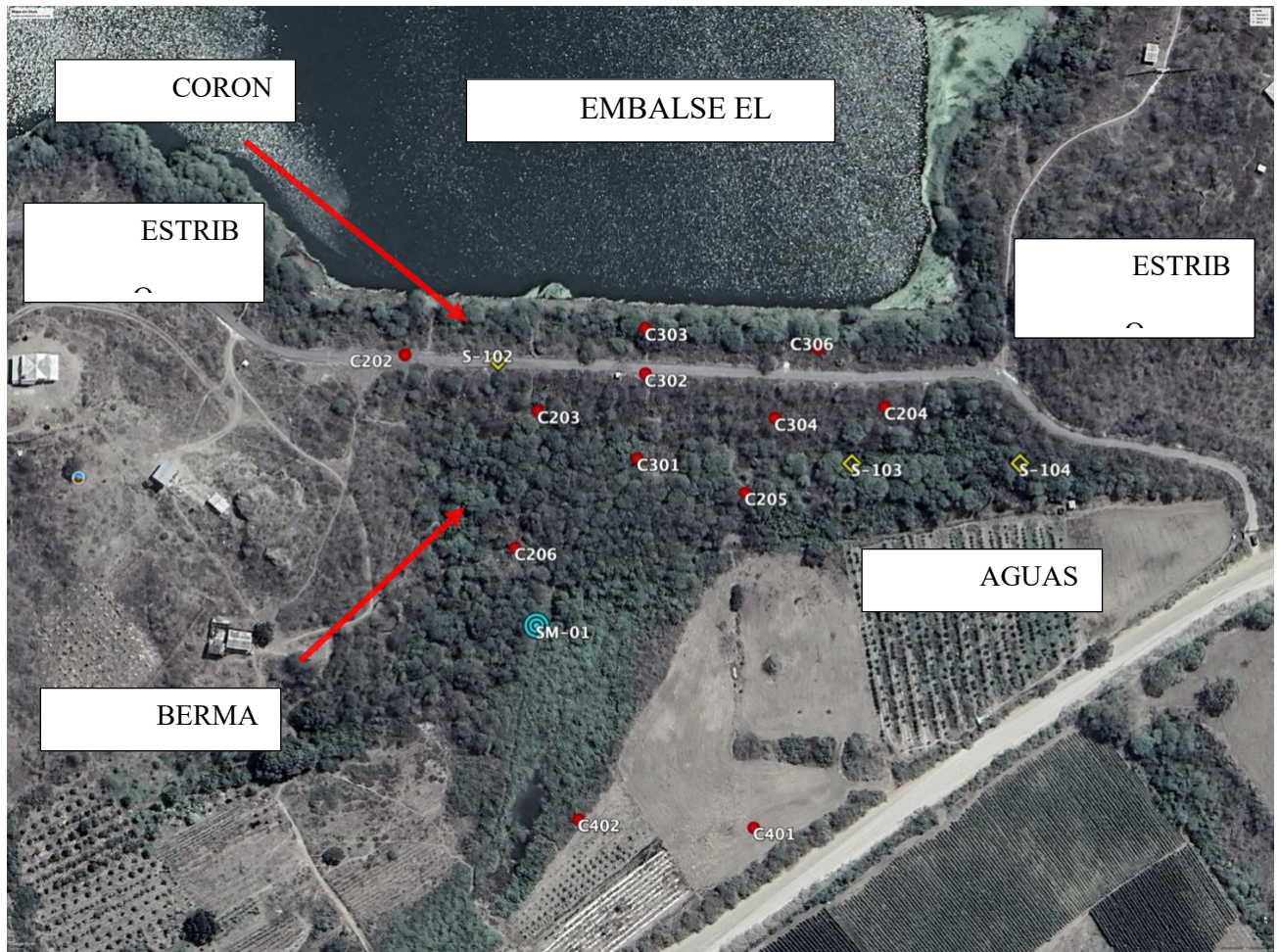
**Figura 20** Cronología eventos históricos presa el azúcar



### 3.1.5 Comportamiento geotécnico e hidráulico de la presa El Azúcar.

Mediante la campaña exploratoria, la cual consistió en calicatas y sondeos en el cuerpo de la presa ([Tabla #25](#) y [26](#)), así como pruebas de campo de ensayos de permeabilidad y densidad de los terraplenes. Junto a la campaña de calicatas y sondeos se realizó una campaña de pruebas de laboratorio, se adjunta el croquis de ubicación, así como una tabla que resume todos los sondeos realizados. [Figura #21](#)

**Figura 21** Croquis ubicación de ensayos realizados, campaña exploratoria inicial para caracterización Geotécnica



**Tabla 25** Sondeos y Calicatas realizados en el cuerpo de la presa

<b>SONDEOS</b>	
PA-101	Sondeo de percusión en el borde aguas arriba de la corona de la presa en la abscisa 0+180, de 25.35 m de profundidad.
PA-102	Sondeo de percusión, a partir de la cota 40.70 msnm, berma aguas debajo de la presa en la abscisa 0+180 de 19.90 m de profundidad.
PA-103	Sondeo de percusión, a partir de la cota 40.70 msnm, berma aguas abajo de la presa en la abscisa 0+100 de 16.50 m de profundidad.
PA-104	Sondeo de percusión, a partir de la cota 40.70 msnm, berma aguas abajo de la presa en la abscisa 0+044 de 11.00 m de profundidad
SM-01	Sondeo Manual en la terraza aluvial, cercano al pie de aguas abajo de la presa junto al cauce del río, de 4.20 m, de profundidad
PA-105	Sondeo de rotación en el eje de la presa. Abscisa 0+016, junto al empotramiento izquierdo de la presa, de 10m de profundidad, ensayos de permeabilidad in situ tipo lefranc.
<b>CALICATAS</b>	
CPA-201	En la corona de la presa en la abscisa 0+060, de 2.00 m de la profundidad
CPA-202	En la corona de la presa en la abscisa 0+200, de 4.00 m de profundidad
CPA-203	En la berma aguas abajo de la presa, cota 40.40 msnm, abscisa 0+170, de 3.00 m de profundidad
CPA-204	En la berma aguas abajo de la presa, cota 33.60 msnm, en la abscisa 0+100, de 2.00 m de profundidad
CPA-205	En el talud aguas debajo de la presa, cota aproximada 23.00 msnm, en la abscisa 0+170, de 2 m de profundidad
CPA-206	En el talud aguas debajo de la presa, cota aproximada 23.00 msnm, en la abscisa 0+170, de 2 m de profundidad
CPA-207	En la margen izquierda del embalse a unos 1500m aproximadamente desde el estribo izquierdo de la presa siguiendo el camino a Julio Moreno y hacia el embalse, de 2 m de profundidad
CPA-208	En la margen izquierda del embalse a unos 1500m aproximadamente desde el estribo izquierdo de la presa siguiendo el camino a Julio Moreno y hacia el embalse, de 2 m de profundidad
CPA-213	En la aluvial agua abajo de la presa, de 2 m de profundidad
CPA-301	En la berma aguas abajo de la presa, cota 40.40 msnm, en la abscisa 0+150, de 3,60 m de profundidad. Ensayos de compactación in situ
CPA-302	En la corona de la presa en la abscisa 0+150, de 6 m de profundidad. Ensayos de compactación in Situ

CPA-303	En la berma aguas arriba de la presa, cota 42.00 msnm, en la abscisa 0+150, de 4 m de profundidad. Ensayos de compactación in situ.
CPA-304	En la berma aguas arriba de la presa, cota 40.40 msnm, en la abscisa 0+100, de 2 m de profundidad. Ensayos de compactación in situ
CPA-306	En la berma aguas arriba de la presa, cota 42.00 msnm, en la abscisa 0+100, de 2.00 m de profundidad. Ensayos de compactación in situ
CPA-307	En la terraza aluvial aguas abajo de la presa contiguo al préstamo de arcilla utilizado para la construcción de la presa
CPA-308	En la terraza aluvial aguas abajo de la presa contiguo al préstamo de arcilla utilizado para la construcción de la presa
CPA-401	En la terraza aluvial aguas abajo de la presa, a 160 m del eje de la corona de la presa y a 50m del borde izquierdo del río.
CPA-402	En la terraza aluvial aguas abajo de la presa, a 150 m del eje de a corona de la presa y a 20 metros del borde izquierdo del río

**Tabla 26** Exploración Geotécnica realizada en represa El Azúcar 1976

M Fecha	Calicata	Sector	Abscisa	Prof. (m)	N° de Muestra	Descripción Visual	Densidad de Campo Kg/m3	% Humedad de Campo	Densidad laboratorio Proctor	% Humedad Optima	% Compactación	Limite Liquido	Limite Plástico	Indice de Plasticidad	%Past. tamiz # 4	% Past. Tamiz # 40	% Past. Tamiz # 100	% Past. Tamiz # 200
08-feb-96	CPA-301	Aguas Abajo	0+150	2.40	C30143SB	Limo arenoso amarillento	1553	12.32	1759	15.15	88.29	35.17	16.55	18.62	100	92	82	52
08-feb-96	CPA-301	Aguas Abajo	0+150	2.40	C30144SB	Limo arenoso amarillento	1483	13.48	1744	16.14	85.03	37.09	16.34	20.25	100	94	85	58
08-feb-96	CPA-301	Aguas Abajo	0+150	3.00	C30141SB	Limo Amarillento con algo de arena fina	1502	18.10	1622	20.55	92.60	42.94	26.52	16.32	100	99	91	78
08-feb-96	CPA-301	Aguas Abajo	0+150	3.00	C30142SB	Limo Amarillento con algo de arena fina	1538	15.15	1713	16.76	89.78	40.75	22.14	18.61	100	99	92	72
09-feb-96	CPA-301	Aguas Abajo	0+150	3.60	C30145SB	Limo arenoso amarillento	1539	17.69	1694	18.32	93.80	36.42	16.83	19.59	99	97	89	77
09-feb-96	CPA-301	Aguas Abajo	0+150	3.60	C30143SB	Limo arenoso amarillento	1585	19.44	1694	18.32	92.38	36.42	16.83	19.59	99	97	89	77
	CPA-302	Corona	0+150	6.40		Arcilla Limosa con arena fina color gris a café	1513	24.35				50.8	18.8	32.0		100	93	83.7

13-feb-96	CPA-303	Aguas Arriba	0+150	3.00	C30154SB	Limo Arcilloso marrón grisáceo con arena fina (estado húmedo)	1458	29.08	1625	23.02	89.72	45.02	17.96	28.06	100	99	98	82
13-feb-96	CPA-303	Aguas Arriba	0+150	3.00	C30153SB	Limo Arcilloso marrón grisáceo con arena fina de plasticidad media (estado húmedo)	1457	28.63	1580	17.35	86.73	45.11	18.81	27.30	100	99	89	72
13-feb-96	CPA-303	Aguas Arriba	0+150	4.00	C30155SB	Limo Arcilloso marrón grisáceo con arena fina (estado húmedo)	1614	25.48	1773	15.47	91.03	41.63	15.44	26.19	100	85	61	53
13-feb-96	CPA-303	Aguas Arriba	0+150	4.00	C30156SB	Limo Arcilloso marrón grisáceo con arena fina (estado húmedo)	1557	27.07	1683	18.59	92.51	50.04	18.86	31.18	100	95	83	72
09-feb-96	CPA-304	Aguas Abajo	0+100	3.00	C30147SB	Arcilla marrón grisácea plástica	1265	22.30	1484	25.53	85.24	73.00	22.88	50.12	100	98	95	92
09-feb-96	CPA-304	Aguas Abajo	0+100	3.00	C30148SB	Arcilla marrón grisácea plástica	1327	22.47	1484	25.53	89.42	73.00	22.88	50.12	100	98	95	92

13-feb-96	CPA-304	Aguas Abajo	0+100	4.00	C30157SB	Limo Amarillento con algo de arena fina, baja plasticidad	1618	19.90	1646	20.52	98.30	49.99	19.07	30.92	100	99	91	80
13-feb-96	CPA-304	Aguas Abajo	0+100	4.00	C30158SB	Limo Amarillento con algo de arena fina, baja plasticidad	1555	18.75	1646	20.52	94.47	49.99	19.07	30.92	100	99	91	80
09-feb-96	CPA-304	Aguas Abajo	0+100	1.95 - 2.10	C30149SB	Arcilla gris oscura muy plástica, consistente						90.25	20.43	69.82	100	99	93	84
	CPA-306	Aguas Arriba	0+100	2.00		Arcilla Limosa con arena café oscura	1243	20.4				57.7	21.6	31.1		99	96	92.2
13-feb-96	Muestra 1	E. Izquierdo			C30160SB	Arenisca								0.00				
13-feb-96	Muestra 2	E. Izquierdo			C30159SB	Arenisca								0.00	68	63	37	27
13-feb-96	Muestra 3	E. Derecho			C30161SB	Arenisca			1920	11.22		23.57	13.35	10.22	100	93	56	40

### 3.1.6 Evaluación de parámetros geotécnicos de la presa El Azúcar:

Con la información obtenida de las campañas de investigación geotécnica se procede a clasificar y procesar los datos obtenidos con la finalidad de evaluar los parámetros geotécnicos utilizados en el análisis del estado inicial de la presa y, la seguridad de la estructura en condiciones de operatividad futuras, se describe los parámetros obtenidos de acuerdo con cada elemento de la estructura:

#### ESPALDÓN AGUAS ABAJO

ESPALDÓN AGUAS ABAJO		
DISEÑO ORIGINAL		
TIPO	C (T/m <sup>2</sup> )	PHI
Arena limosa de baja plasticidad	3	12°
ENCONTRADO EXPLORACIÓN GEOTECNICA		
Limo Arcilloso con fracción de arena fina en términos. de $\sigma_t$	0.2	16.5°

#### ESPALDÓN AGUAS ARRIBA

ESPALDÓN AGUAS ARRIBA		
DISEÑO ORIGINAL		
TIPO	C T/m <sup>2</sup>	PHI
Limos/arcillas limosas de mediana plasticidad	4.5	13°
ENCONTRADO EXPLORACIÓN GEOTECNICA		

Arenas finas limosas, arcillosas a poco arcillosas y limos arenosos arcillosos de mediana alta plasticidad	0.5	16.1°
--	-----	-------

### NÚCLEO

NÚCLEO		
DISEÑO ORIGINAL		
TIPO	C T/m <sup>2</sup>	PHI
Arcilla plástica (CH), impermeable	8.0	0°
ENCONTRADO EXPLORACIÓN GEOTECNICA		
0 - 6 m Arenas limosas fisuradas (No arcilla impermeable)	0.5	16.1°
6-12 Núcleo de arcilla adecuado	2.8	20.4°
por debajo de la cota 36	6	20°

Se encontró que el material utilizado posee una baja compactación, las capas de arcilla encontrada retienen y desvían el flujo hacia el talud, generado asentamientos diferenciales y riesgos de deslizamiento superficial. Al haberse encontrado material granular en las primeras capas, no actuando como barrera al sellar el paso del agua, sino que permite la percolación, por debajo si actúa como tal.

## CIMENTACIÓN

CIMENTACIÓN		
DISEÑO ORIGINAL		
TIPO	C T/m <sup>2</sup>	PHI
Aluvial fino heterogéneo con SPT altos; trinchera de impermeabilización llega a roca.		
ENCONTRADO EXPLORACIÓN GEOTECNICA		
Estratos arcillosos blandos con SPT $\approx$ 6 o menor; ensayos CU	2 - 2.1	16° -17°

Existen horizontes débiles casi horizontales bajo el paramento aguas abajo lo que puede activar deslizamientos en la base si suben presiones de poro o si ocurre un sismo, debe considerarse en la estabilidad.

### 3.2 Fase 2: Análisis del comportamiento y modos de falla de la presa El Azúcar

#### 3.2.1 Comportamiento histórico de la represa (cotas, filtraciones, recrecimientos, reparaciones anteriores).

##### 1966–1967 (fase de construcción).

Por efecto de lluvias y de un llenado temprano, se colocó sobre el núcleo una capa de aproximadamente tres metros compuesta por arcillas limosas y fragmentos de arenisca con baja densidad.

##### 1967 (primer llenado hasta +36,00 msnm).

Se registraron asentamientos bruscos en el espaldón de aguas arriba debido a que el material había sido compactado en la rama seca respecto de la humedad óptima y luego se saturó. Posiblemente también influyó que la cimentación tenía humedad natural muy baja.

**1967–1976.**

Se observaron grietas longitudinales y transversales asociadas a cambios de temperatura y humedad, junto con mantenimiento deficiente de taludes y drenajes.

**1976.**

Con el nivel del embalse en +41,2 msnm, se decidió elevar la coronación hasta +46,70 msnm. Esta elevación se ejecutó en 1977.

**1977.**

Se detectó filtración en el estribo izquierdo  $Q=0,6$  l/min. Se instalaron dos piezómetros, uno en cada estribo, ubicados en la berma del talud de aguas abajo a la cota +40,00 msnm y se ejecutó una trinchera de impermeabilización en la coronación y en el estribo izquierdo, sin datos completos de su geometría.

**1983 (posterior al episodio de El Niño de 1982–1983, con nivel normal de operación).**

El piezómetro del estribo izquierdo comenzó a drenar aproximadamente 7,2 l/m, además apareció filtración superficial del orden de diez litros por minuto. La trinchera construida en mil novecientos setenta y siete no resultó efectiva, dejando al estribo izquierdo en condición crítica. Se realizaron investigaciones e inyecciones entre 1983 y 1984 por parte del Instituto Ecuatoriano de Recursos Hidráulicos.

**1992.**

El nivel del embalse alcanzó cuarenta y cinco como cuarenta y seis metros sobre el nivel del mar, aproximadamente un metro por debajo de la coronación, y reaparecieron las filtraciones en el estribo izquierdo, lo que evidencia que la cortina de inyecciones de mil novecientos ochenta y tres a mil novecientos ochenta y cuatro fue insuficiente.

1995–1996 (campana del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas).

Condiciones generales observadas.

- I. Filtraciones en estribo izquierdo cuando nivel de embalse supera cota +42.00 msnm
- II. El dren de pie bajo la berma inferior del talud de aguas abajo es inoperante
- III. No existe dren continuo a lo largo del pie en los estribos por encima de la cota +33.0 msnm
- IV. Los enrocados de protección de los taludes externos están deteriorados
- V. No hay sistema de drenaje interno capaz de interceptar, recoger y conducir la percolación a través del núcleo y de los estribos.

**ESPALDON AGUAS ABAJO:**

Los materiales colocados difieren de los previstos en el diseño en cuanto a plasticidad y compacidad. Se observa bajo grado de compactación, especialmente hacia el talud externo con agrietamiento intenso en los 3 m superficiales. A partir de la berma en cota +40.40 msnm aparecen capas horizontales de arcilla muy plástica. Estas capas interrumpen la continuidad del flujo hacia el dren del pie, el cual es inoperante, favoreciendo la saturación del macizo en el paramento aguas abajo.

### **ESPALDÓN AGUAS ARRIBA:**

Los materiales son en general consistentes con los previstos en el diseño original, aunque con plasticidad algo mayor. Se identifica bajo grado de compactación, principalmente cerca del talud externo, y presencia de grietas en los 2,0 m superiores. Los parámetros de resistencia muestran cohesión baja y ángulo de fricción relativamente alto (condición típica de compactación seca respecto a la humedad óptima).

### **NÚCLEO:**

Los 6,0 m superiores no cumplen el requisito de baja permeabilidad (materiales heterogéneos y fisurados, con baja compactación). A partir de 6,0 m de profundidad el núcleo está constituido por arcillas de baja permeabilidad, homogéneas y bien compactadas, en concordancia con el diseño. Se constata un aumento de resistencia por debajo de la cota 36 msnm, coherente con el incremento del índice SPT.

### **CIMENTACIÓN:**

Se determinó la presencia de estratos débiles dentro del aluvial de cimentación bajo el paramento aguas abajo, que deben considerarse como superficies potenciales de deslizamiento a lo largo de planos casi horizontales. La diferencia respecto de SPT antiguos se atribuye a ensayos previos en aluviales resecaos y sin influencia de carga hidráulica.

### **3.2.2 Modelaciones geotécnicas en condiciones estáticas, sísmicas e hidrológicas extremas.**

#### ***4.3.2.1 Sismicidad***

En el capítulo 2 en el apartado 2.1.7.1, se contextualizó la importancia de garantizar la seguridad sísmica en presas de materiales sueltos ya que pueden suscitarse mecanismos de falla tales como el sobrepaso de la coronación, (deformaciones, licuefacción, seiches o deslizamientos) y por agrietamiento y erosión interna (grietas, piping o fallas en las conducciones).

Para reducir estos riesgos asociados a los mecanismos de falla, es fundamental la aplicación de medidas defensivas de diseño (núcleos plásticos, filtros, drenes, protección de taludes, etc.). Si se implementan adecuadamente, estas medidas pueden garantizar un buen desempeño de la presa incluso en condiciones sísmicas severas; por el contrario, si son mal diseñadas, puede comprometer seriamente la estabilidad de la estructura.

##### ***4.3.2.1.1 Peligro Sísmico Ecuador***

En el contexto ecuatoriano, el estudio y diseño sísmico en presas de materiales sueltos es fundamental para garantizar la seguridad estructural y operativo frente a terremotos de gran magnitud, como se desarrolló en el capítulo 2 apartado, 2.1.3, Ecuador es un país sísmico, la historia devela los eventos de gran potencia que han desencadenado desastres, pérdidas materiales y de vidas humanas, como el del 16 de Abril del 2016 con alrededor de 668 víctimas mortales y 2000 millones en pérdidas materiales (Banco Interamericano de Desarrollo, 2020), por lo cual y encasillado a este contexto. No garantizar la seguridad estructural y operativa de estas estructuras atenta contra la población y el desarrollo

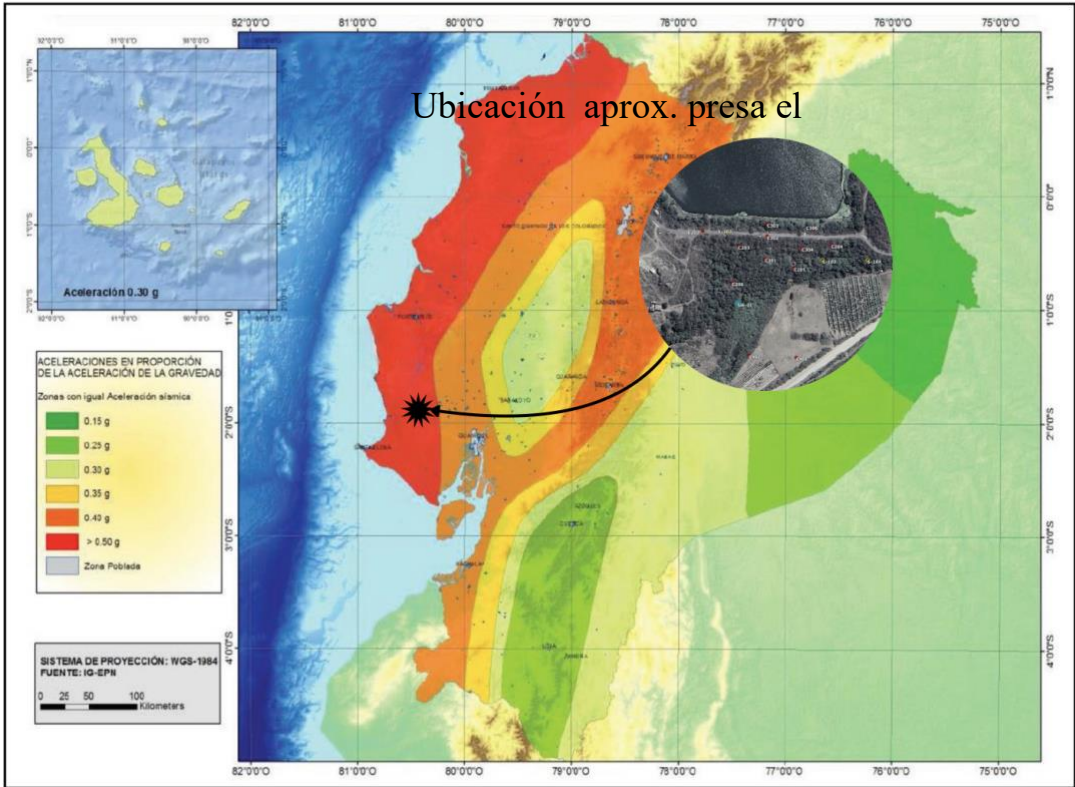
económico a riesgos inaceptables. Además, constituye un requisito para alinear la gestión hídrica del país con estándares internacionales de seguridad de presas.

**I. Análisis Pseudo-Estático de estabilidad de taludes:**

Para el análisis inicialmente se debe determinar los coeficientes  $K_h$  (Sísmico Horizontal) y  $K_v$  (Sísmico Vertical), para lo cual determinando el PGA de acuerdo a la ubicación de la represa en el mapa de zonificación sísmica de la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-15, se obtuvo el Z, que refiere a la aceleración máxima en roca esperada.

[Figura #22](#)

**Figura 22** Mapa de Riesgo Sísmico NEC-15



Como se puede observar en el mapa de peligro sísmico, la presa "El Azúcar se encuentra ubicada dentro de la coloración roja, la cual de acuerdo con la simbología representa un PGA de  $> 0,50$  g.

Obtención de las componentes:

- **Kh:**  $60\% A_{max} / g \longrightarrow$  siendo  $A_{max} = (Z * F_a (zona))$  Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (2014).

Z= Aceleración pico del suelo

Fa= Coeficiente de amplificación del suelo en la zona de periodo corto

- **Kv:**  $\frac{2}{3} Kh$  : puede ser despreciado para la mayoría de los propósitos prácticos

(DEPARTMENT OF THE ARMY \*EM 1110-2-2502 U.S. Army Corps of Engineers, 2022)

Cabe recalcar que en otros estudios este coeficiente debe considerarse dependiendo de si la estructura a analizar se ubica cerca de la falla (Shukha & Baker, 2008), (Agency, 2005).

## II. Perfil de Suelo:

De acuerdo con los resultados de la exploración geotécnica, los primeros 6m corresponden a depósitos aluviales con resistencia relativamente alta sobre los que se apoyan los espaldones de la presa. Los 24 restantes hasta los 30 m superiores del subsuelo corresponden a la Formación Azúcar, compuesta predominantemente por areniscas competentes. Para la estimación de la velocidad de propagación de ondas de corte ( $V_s$ ) en la Formación el Azúcar, se optó por emplear las fórmulas de Imai & Tonuchi (1982) y Ohta & Goto (1978) (Guzel, 2024). La primera se seleccionó por su carácter general y por ser una de

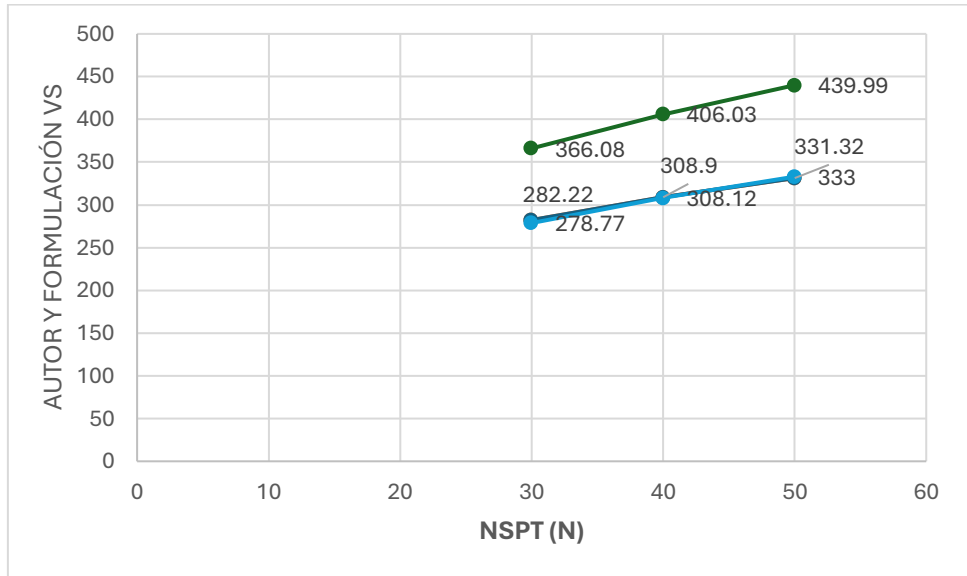
las correlaciones más utilizadas en la literatura internacional, y en estudios regionales, mientras que la segunda incorpora la influencia de la profundidad en la estimación de la  $V_s$ , punto importante ya que la formación se ubica a 6 m por debajo de suelo aluvial y se extiende hasta 24m aproximadamente de profundidad. Asimismo, se consideró como contraste la fórmula de Athanasopoulos (1980) para suelos granulares, con el fin de acotar la diferencia estando en un rango de valores realista, ni el más bajo ni el más alto. En contexto se aclara que la NEC-15 no cita formula alguna para el VS, pero si permite la estimación del  $V_{s30}$  mediante correlaciones con parámetros como el SPT, lo que respalda el uso de referencias internacionales en el contexto ecuatoriano. Con ello, se obtuvo un rango de  $V_s$  entre 450y 700m/s, consistente con suelos muy densos o roca blanda, clasificando el sitio entre perfiles C-B según la NEC-15. [Tabla#27](#)

**Tabla 27** Fórmulas de correlación entre el SPT y EL  $V_s$

Nombre	Fórmula	Tipo de suelo	30	40	50
Athanasopoulos	$V_s = 107.6N^{0.36}$	Todo Tipo de suelos	366.07	406.02	439.98
Imai & Tonuchi (1982)	$V_s = 97N^{0.314}$	Todo Tipo de suelos	282.22	308.90	331.32
y Ohta & Goto (1978)	$V_s = 85.35N^{0.348}$	Todo Tipo de suelos	278.767	308.12	333.00

Las correlaciones de Imai & Tonouchi (1982) y Ohta (1978) entregan valores similares (280-333 m/s), mientras que Athanasopoulos (1980) da un rango algo mayor (366-440 m/s) [Figura #23](#). En conjunto estos resultados ubican a la formación el Azúcar dentro de los perfiles tipo C de la NEC-15 Suelos densos o roca blanda.

**Figura 23** Ecuaciones de SPT y Vs



Para efectos de este trabajo, por la escasez de datos y estimaciones conservadoras de diseño y evaluación de seguridad, se adopta el perfil tipo C de la NEC-15 [Tabla#28](#), considerando que una caracterización detallada de la formación Azúcar mediante ensayos sísmicos ( $V_{s30}$ ) podría confirmar una condición de suelo Tipo B.

**Tabla 28** Correlación Tipo de Suelo y Vs NEC-15

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$V_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez media	$1500$ m/s > $V_s \geq 760$ m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante	$760$ m/s > $V_s \geq 360$ m/s
	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$N \geq 50.0$ ; $S_u \geq 100$ kPa

D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante	$360 \text{ m/s} > V_s \geq 180 \text{ m/s}$
	Perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > N \geq 15.0$ ; $100 \text{ kPa} > S_u \geq 50 \text{ kPa}$
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante	$V_s < 180 \text{ m/s}$
	Perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	$IP > 20$ ; $w \geq 40\%$ ; $S_u < 50 \text{ kPa}$
F	Perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación específica realizada en el sitio. Subclases:	
	F1	Suelos susceptibles a falla o colapso causado por la excitación sísmica (licuables, sensitivos, dispersivos, débilmente cementados)
	F2	Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas ( $H > 3 \text{ m}$ )
	F3	Arcillas de muy alta plasticidad ( $H > 7.5 \text{ m}$ , $IP > 75$ )
	F4	Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda ( $H > 30 \text{ m}$ )
	F5	Suelos con contrastes de impedancia $\alpha$ en los primeros 30 m (suelos blandos-roca, variaciones bruscas de $V_s$ )
	F6	Rellenos colocados sin control ingenieril

### III. Fa Coeficiente de amplificación de suelo en la zona de periodo corto:

Habiendo identificado que la presa se localiza en la zona VI del mapa de zonificación sísmica de la NEC-15, correspondiente a un valor de aceleración máxima esperada de 0,5g y considerando la caracterización geotécnica del emplazamiento que permite clasificar el sitio como un perfil de suelo Tipo C ( perfiles de suelos muy densos o roca blanda con velocidad de onda de corte en el rango 360-760 m/s) , se procedió a la determinación del coeficiente sísmico Z de acuerdo con los lineamientos normativos. Para ello se empleó la tabla de

factores de zonificación del la NEC-15, [Figura # 24](#), que establece la relación entre la aceleración máxima efectiva y la clase de perfil de suelo, obteniéndose el valor de z.

- **Perfil de Suelo: C**
- **Zona VI:  $\geq 0.5$**

**Figura 24** Tabla de correlación tipo o perfil de suelo y Factor de amplificación Fa, (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2014)

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	$\geq 0.5$
A	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B	1	1	1	1	1	1
<b>C</b>	<b>1.4</b>	<b>1.3</b>	<b>1.25</b>	<b>1.23</b>	<b>1.2</b>	<b>1.18</b>
D	1.6	1.4	1.3	1.25	1.2	1.12
E	1.8	1.4	1.25	1.1	1.0	0.85
F	Véase <a href="#">Tabla 2</a> : Clasificación de los perfiles de suelo y la sección <a href="#">10.5.4</a>					

- **Fa: 1.18**

#### IV. Obtención factores Fuerza sísmica Horizontal y Vertical, Kh y Kv:

$$K_h: 60\% A_{max} / g \quad A_{max} = (Z * F_a (\text{zona}))$$

$$K_h: 0.6 \times 0.5 \times 1.18 = 0,354$$

$$K_v: \frac{2}{3} K_h:$$

$$K_v: \frac{2}{3} (0,354) = 0.236$$

Aunque la aceleración pico en el sitio es de 0.35 g, no se usa directamente como coeficiente sísmico horizontal en el análisis pseudoestático. Esto se debe a que ese valor máximo ocurre en un instante muy corto y con frecuencia que la presa no llega a sentir por un gran masa y amortiguamiento. Por eso organismos como ICOLD, USACE, FEMA, CEDEX recomiendan emplear valores reducidos, generalmente entre 0.1 y 0.2 g que representan mejor la acción sísmica real sobre presas de materiales sueltos. (Tabla# 29).

**Tabla 29** *Análisis Bibliográfico diversos autores sobre el Kh.* (Vázquez-Ballester & Beira-Fontaine, 2018)

<b>Autor / Institución</b>	<b>Rango / Valor de Kh</b>	<b>Justificación / Condiciones</b>
<b>Terzaghi (1950)</b>	0.1 (sismos severos); 0.2 (severos y destructivos); 0.5 (catastróficos)	Relaciona el valor de Kh con la severidad del sismo.
<b>Japón</b>	0.15 – 0.25	Exige FS > 1.0; valores moderados para garantizar seguridad sísmica.
<b>Estado de California</b>	0.05 – 0.15	Valores bajos para análisis pseudoestáticos locales.
<b>Noda y Uwave (1979)</b>	kh = amax/g si amax ≤ 2 m/s <sup>2</sup> ; kh = 0.33(amax/g) <sup>0.33</sup> si amax > 2 m/s <sup>2</sup>	Relación directa con aceleración máxima esperada.
<b>Seed (1979)</b>	0.10 para FS ≥ 1.15; 0.15 con reducción del 20% en resistencia	Considera deformaciones en grandes deslizamientos y cercanía a fuentes sísmicas (M 6.5 – 8.5).
<b>Seed (1980)</b>	0.15, FS ≥ 1.15	Válido si no hay pérdida de resistencia significativa; suelos densos o drenados. Recomienda verificar deformaciones con método de Newmark.
<b>Marcuson (1981)</b>	0.33 amax/g – 0.5 amax/g	Considera posible amplificación o amortiguamiento en la respuesta.
<b>USACE (1982)</b>	0.10 (sismo importante, FS > 1.0); 0.15 (sismo de gran magnitud, FS > 1.0)	Relaciona Kh con la magnitud del sismo y FS mínimo aceptable.

<b>Krinitzsky et al. (1993); Taniguchi y Sasaki (1996)</b>	0.65 $a_{max}/g$	Para deslizamientos de magnitud intermedia.
<b>Seed y Martin (1966); Dakoukas y Gazetas (1986)</b>	$kh = a_{max}/g$ (talud pequeño); 0.65 $a_{max}/g$ (deslizamientos intermedios)	Diferencia según la escala del deslizamiento.
<b>Hynes-Griffing y Franklin (1984)</b>	0.5 $a_{max}/g$	Para presas; con FS = 1 y 20% reducción de resistencia, la presa no presenta deformaciones importantes.
<b>Saragoni (1993)</b>	$kh = 0.3 a_{max}/g$ si $a_{max} \leq 6.7 m/s^2$ ; $kh = 0.22 (a_{max}/g)^{0.2}$ si $a_{max} > 6.7 m/s^2$	Ajusta Kh en función de la aceleración máxima registrada.
<b>Kramer (1996)</b>	0.5 $a_{max}/g$	Propone este valor como representativo para muchos taludes, pero aclara que no es regla general.
<b>California Division of Mines and Geology (1997)</b>	0.15	Valor fijo recomendado para estudios regionales.

Para efectos de la modelación de la presa de 1976, y de acuerdo a los archivos del libro de obra se optó por un Kh: 0.15.

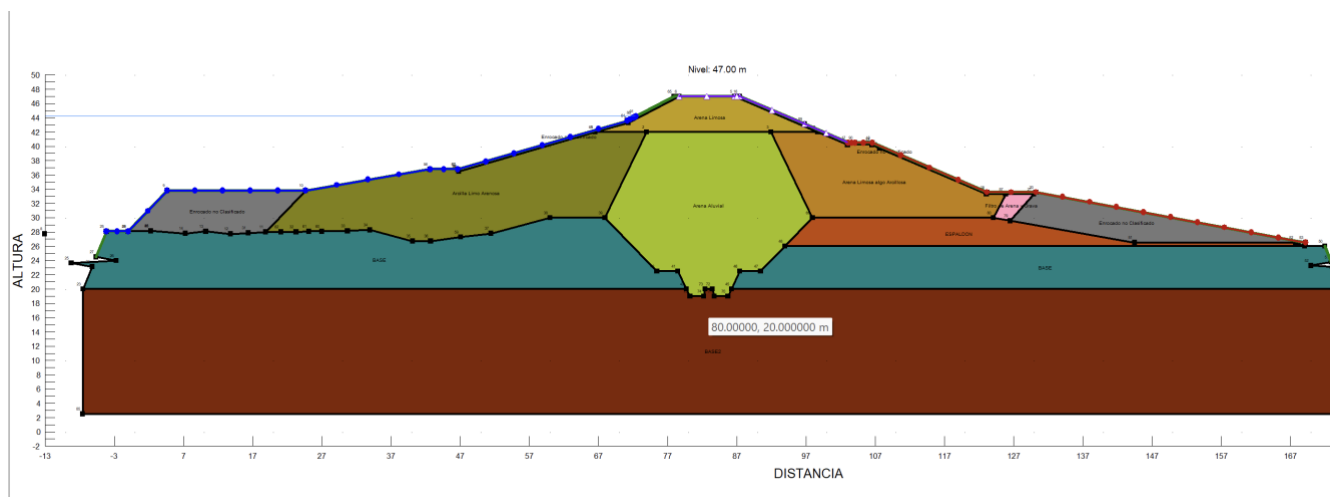
#### **4.3.2.1.2 Modelaciones realizadas en El software geotécnico.**

Para la modelación de la situación de la presa "El Azúcar", se realizó como primer paso el análisis Estático [Figura #25](#), considerando los criterios de Equilibrio Límite, según Jambu, Bishop y Spencer, también luego de haber obtenido los coeficientes sísmicos horizontal y vertical, Kh y Kv, se procedió a realizar el análisis Pseudoestáticos bajo los mismos criterios, y considerando los Factores de seguridad establecidos por la NEC-15 y la USACE.

Para la modelación se realizó mediante el *software* geotécnico versión 2012, iniciando con el análisis de filtración mediante SEEP/W Analysis Steady-State, el análisis estático mediante Sope W y el análisis pseudoestático considerando el Kh propuesto de 0.15 y la herramienta Keylin Seismic Load, del software geotécnico.

## I. Caso Análisis Estático 1976

**Figura 25** Modelación geotécnica de la estructura Represa "El Azucar" 1976

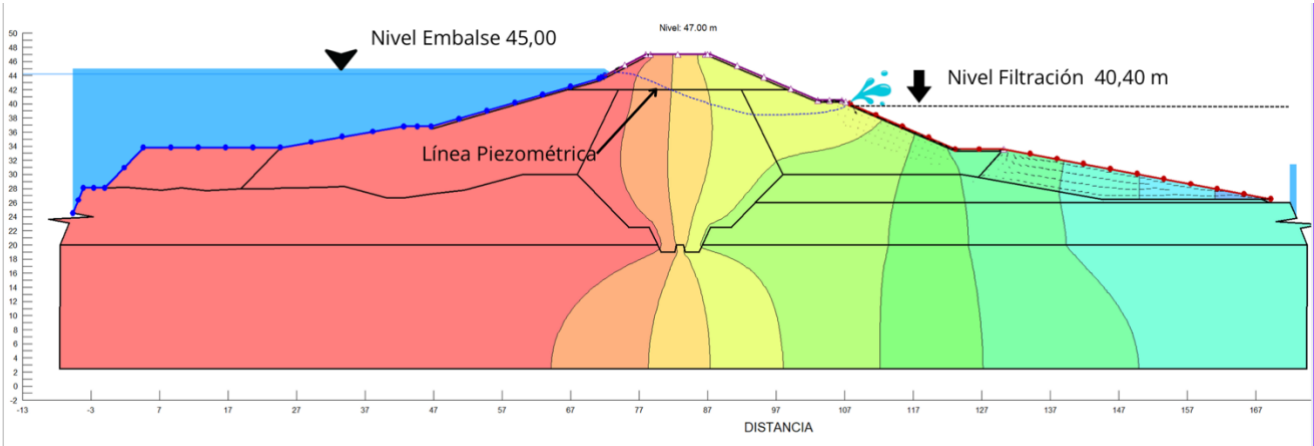


### Filtraciones: SEEP/W

En la modelación realizada con seep/W, para evaluar la condición de filtración, se observa que la línea piezométrica emerge en la cota 40,40 lo que constituye un factor de inestabilidad para la presa. Este comportamiento coincide con lo señalado en los registros históricos, donde se recalca la presencia de capas horizontales de arcilla de alta plasticidad a partir de la berma en dicha cota y hacia niveles inferiores. La discontinuidad en el flujo, al no

lograr alcanzar el dren de pie existente, provoca la salida de agua de filtración en el paramento aguas abajo, generando una saturación del macizo y comprometiendo la estabilidad estructural de la presa. Además, estos estratos de arcilla representan planos potenciales de falla, aumentando el riesgo de deslizamiento y deterioro progresivo de la obra. [Figura # 26](#)

**Figura 26** Modelación Geotécnica Seep/w Filtraciones



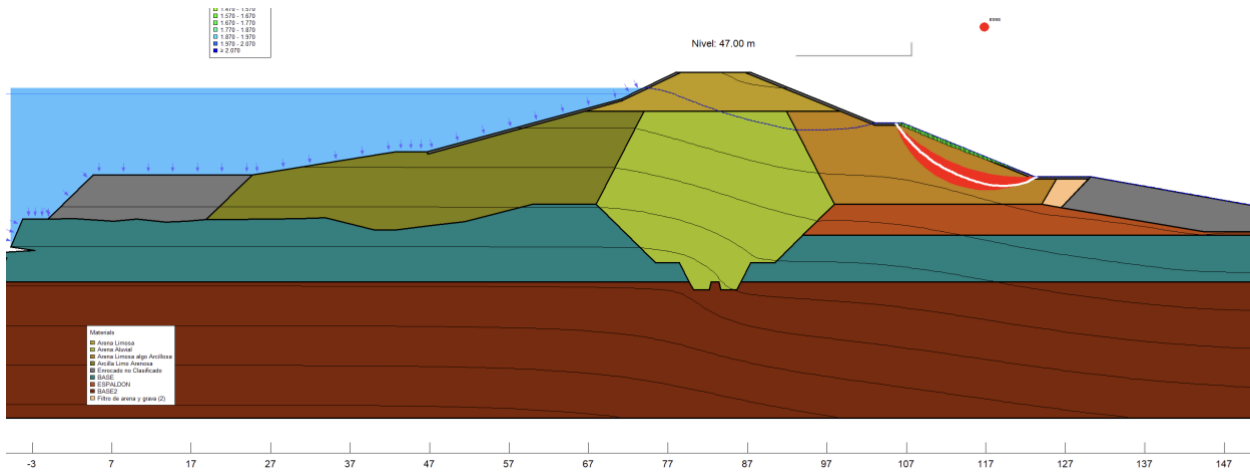
## Estabilidad de Taludes:

### CONDICIÓN ESTÁTICA

Aguas abajo falla circular, nivel del embalse +44,00 msnm falla superficial del talud.

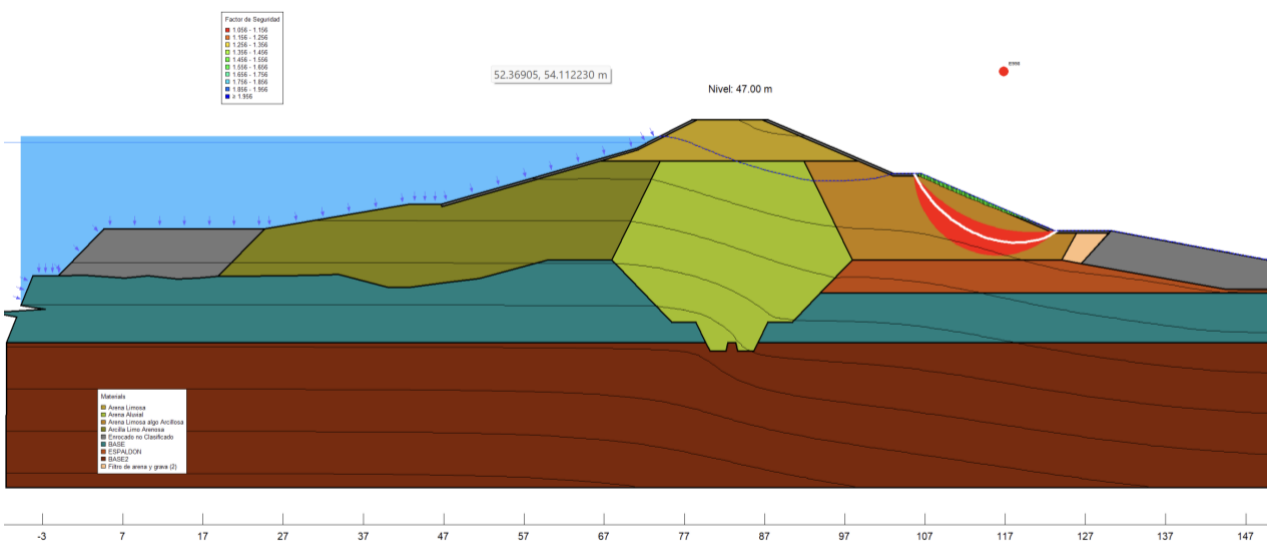
### Bishop u Obispo:

- Aguas Abajo Fs 1.17



### Jambu:

- Aguas Abajo Fs 1.057



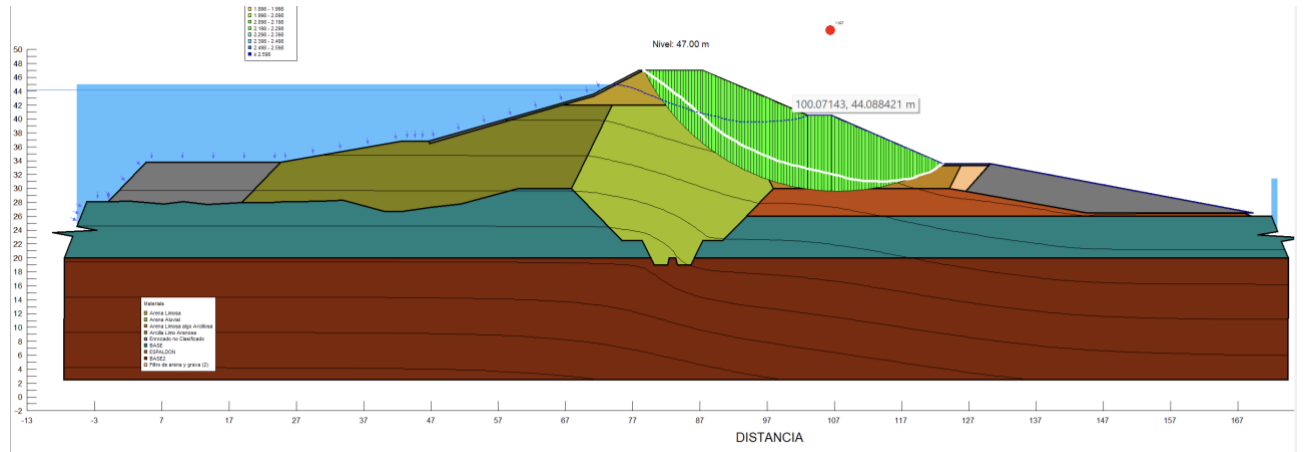






**Spencer:**

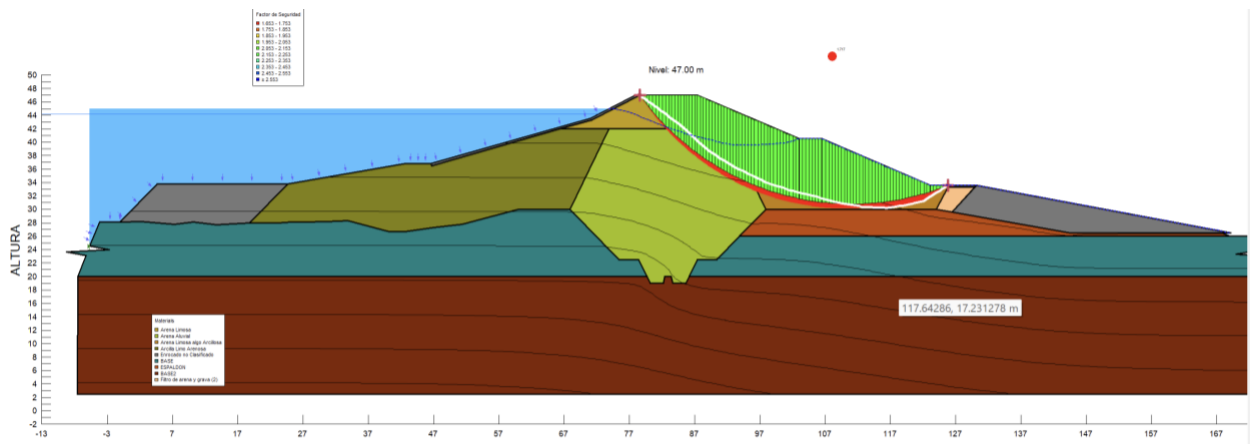
- **Aguas Abajo Fs.: 1.92**



Aguas abajo falla plana, nivel del embalse +44,00 msnm falla cimentación, nivel aprox. +28.0 msnm.

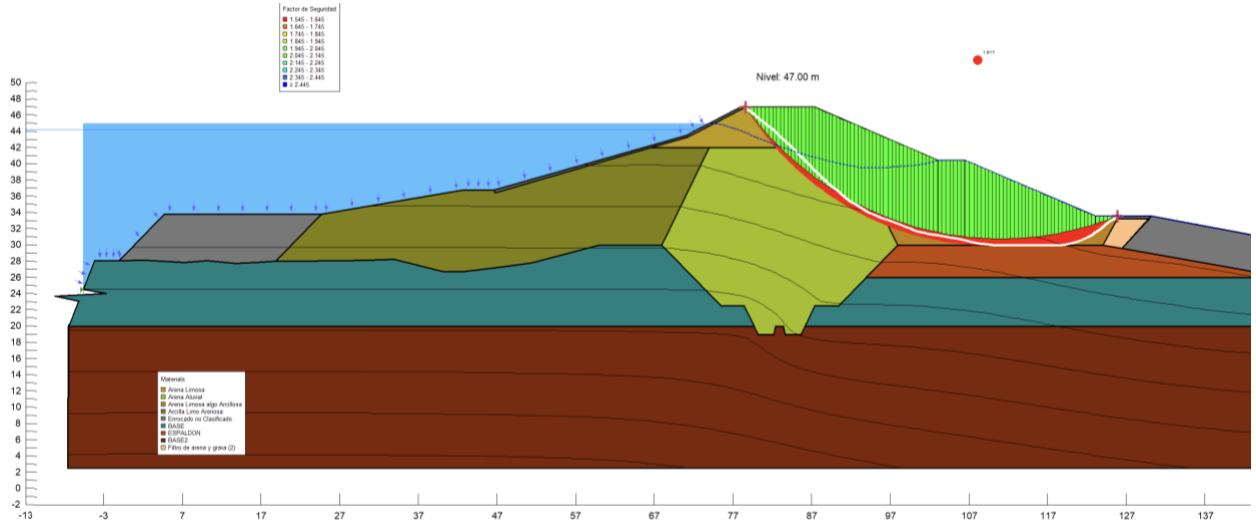
**Bishop u Obispo:**

- **Aguas Abajo Fs.:1.70**



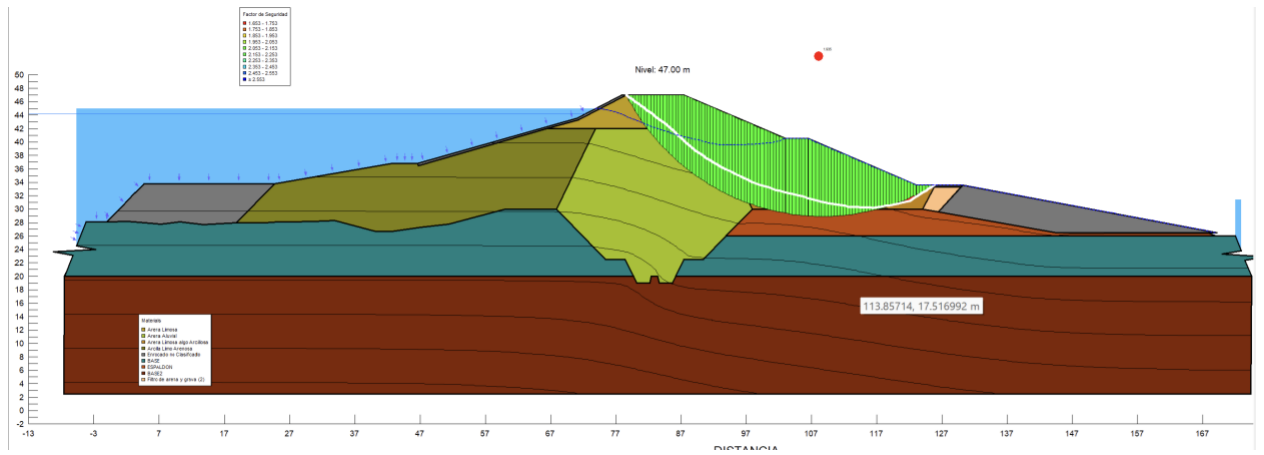
**Jambu:**

- Aguas Abajo Fs: 1.43



**Spencer:**

- Aguas Abajo Fs: 1.935

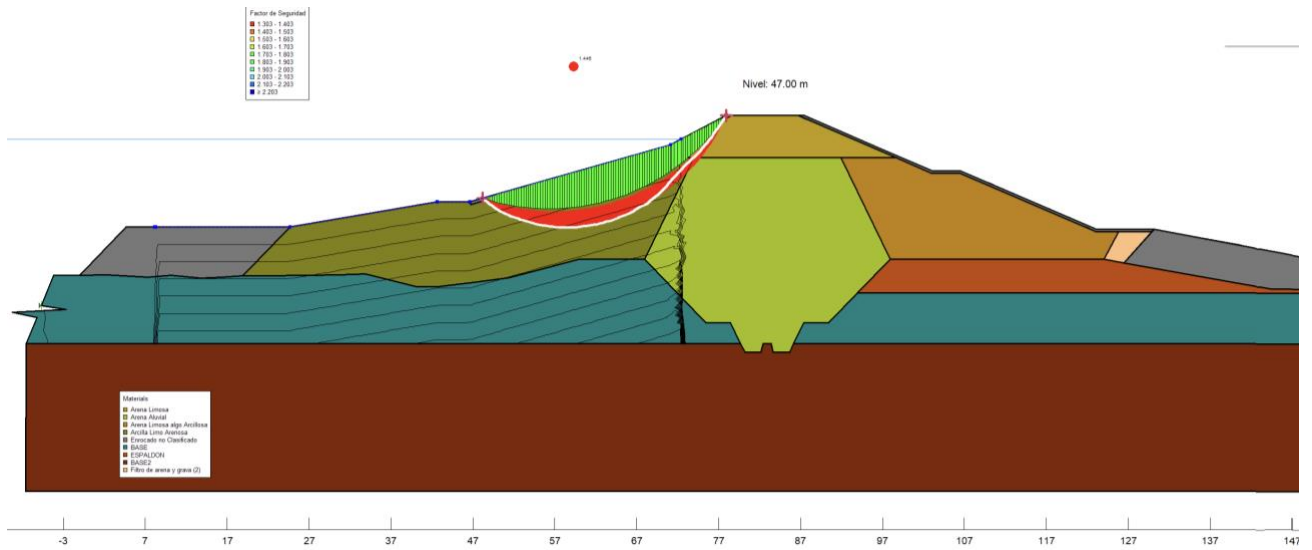


Aguas arriba falla circular, nivel del embalse +44,00 msnm condición talud sumergido



**Spencer:**

- **Aguas Abajo Fs: 1.52**

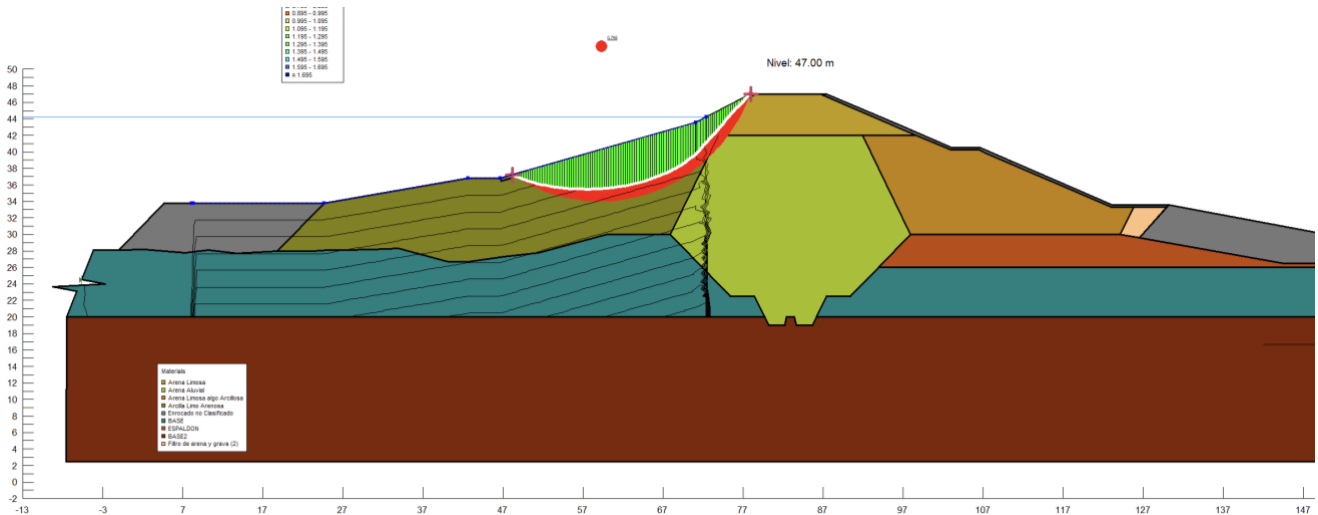


Aguas arriba falla circular, nivel del embalse +44,00 msnm condición de talud sumergido + sismo



## Spencer:

- Aguas Abajo Fs: 0.795



### **4.3.2.1.3 Análisis Sismicidad:**

Considerando los datos obtenidos en la exploración geotécnica determinando la resistencia y compacidad de los materiales que componen el cuerpo de la presa, se procedió a realizar los análisis de estabilidad de la presa en condiciones de llenado en régimen operacional del embalse, considerando superficies de falla circulares y bloques deslizantes en superficies planas a lo largo de los estratos débiles de la cimentación.

Los análisis de estabilidad se basaron en la aplicación de los criterios de Bishop, Jambu y Spencer, para la evaluación de los factores de seguridad de los taludes al deslizamiento [Tabla#30](#). Para el talud del espaldón aguas arriba se consideró únicamente la condición sumergida.

**Tabla 30** Factores de seguridad obtenidos en caracterización geotécnica

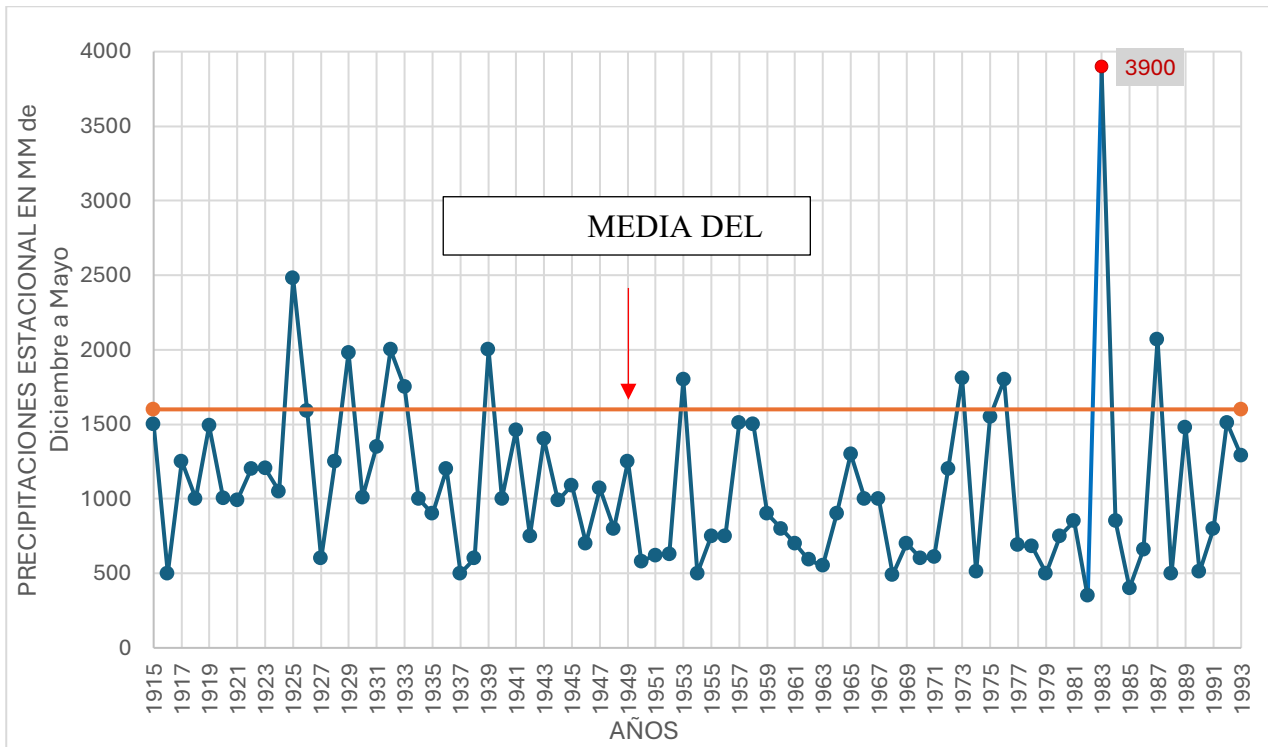
PARAMENTO	TIPO DE FALLA	DESCRIPCIÓN	FACTOR DE SEGURIDAD MÍNIMO OBTENIDO
Aguas Abajo	Circular	Nivel de embalse +44.0 msnm.	1.01
		Falla superficial del talud	
Aguas Abajo	Circular	Nivel de embalse +44.0 msnm.	1.22
		Falla del cuerpo del talud	
Aguas Abajo	Plana	Nivel de embalse +44.0 msnm.	1.97
		Falla cimentación, nivel aprox. +26.0 msnm	
Aguas Abajo	Plana	Nivel de embalse +44.0 msnm.	1.9
		Falla cimentación, nivel aprox. +28.0 msnm	
Aguas Arriba	Circular	Nivel de embalse +44.0 msnm.	1.5
		Condición de talud sumergido	
Aguas Arriba	Circular	Nivel de embalse +44.0 msnm.	0.78
		Condición de talud sumergido con sismo	

La vulnerabilidad principal se concentra en el talud aguas abajo por la baja compactación y fisuración en los 0 a 3 metros próximos al paramento, y en el talud de aguas arriba bajo acción sísmica con embalse lleno. En cambio, las superficies planas en la cimentación muestran márgenes con mayor fiabilidad en condición estática. La presa no cumple con factores de seguridad mínimos aceptables para operar de forma confiable; por lo que no se podría garantizar un uso previsto sin realizar refuerzos.

#### **4.3.2.2 Hidrología:**

Considerando que el Ecuador es un país que posee regímenes extremos de precipitaciones debido a las perturbaciones ocasionadas por el Fenómeno del Niño donde los niveles pueden llegar a ser excepcionales como lo fue el periodo de 1982 a 1983, calificado como el más fuerte del siglo, puesto que durante este lapso se produjo en el océano Pacífico un evento excepcional el cual se tradujo en precipitaciones históricas sobre la vertiente de la cordillera Andina, cuyos aumentos significaron entre el 50 al 1000% de la media de precipitaciones normales (CORPORACIÓN ANDINA DEL FOMENTO, 1997). [Figura #27](#)

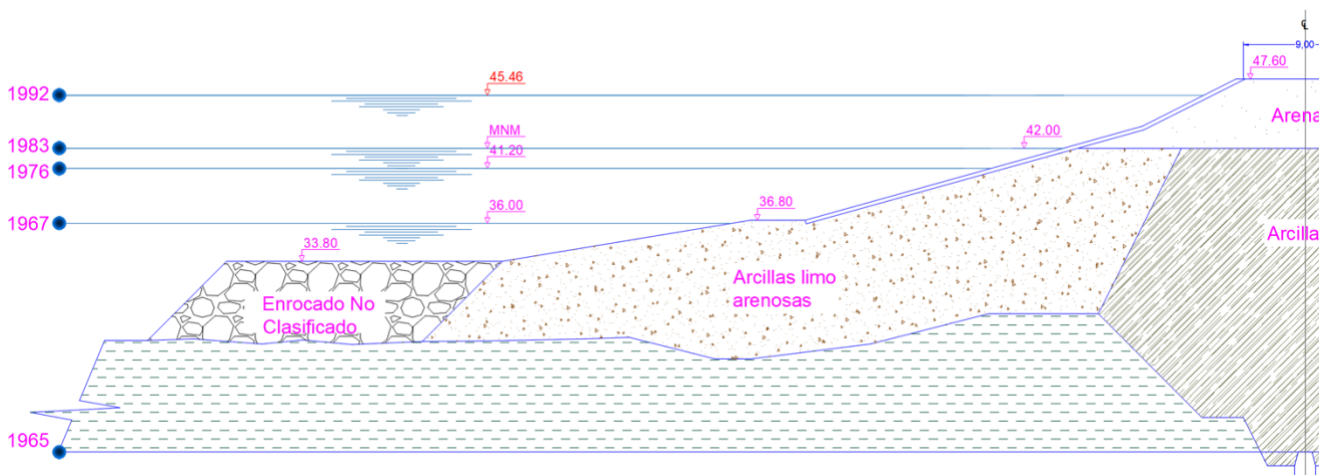
**Figura 27** Histórico precipitaciones observadas en Guayaquil de 1915 a 1983, comparadas con la ocurrencia de El Niño según Quinn (1993), (Energía Y Minas & Rossel, 1997)



Desde 1966, cuando el primer llenado 36 m. sobre el nivel del mar, la presa mostró sensibilidad a la compactación seca de los espaldones; en 1966 el embalse llegó a 41.20 m y se decidió recrecer la coronación, que quedó en 47.60 metros en 1977. Ese mismo año aparecieron filtraciones en el estribo izquierdo, se instalaron piezómetros y se ejecutó una trinchera de impermeabilización. El umbral operativo que gatilla filtraciones se reconoce en 42 m: cuando el embalse supera esa cota, las salidas en el estribo izquierdo tienden a activarse. Durante el episodio de El Niño de 1982 a 1983, sin necesidad de llegar a máximos históricos, el piezómetro del estribo izquierdo comenzó a drenar alrededor de 7.2 l/m y se observó filtración superficial de 10 l/m, evidenciando que la trinchera de 1977 no fue efectiva y situando al estribo en condición crítica; por ello se realizaron investigaciones e inyecciones. Años después,

en 1992, el nivel llegó a 45.46 metros, alrededor de un metro por debajo de la coronación, y reaparecieron las filtraciones en el estribo izquierdo. En paralelo, se ha propuesto un nuevo recrecimiento que llevaría la coronación a 49.10 metros, junto con drenes y filtros para controlar la percolación por encima de la cota crítica de cuarenta y dos metros. (Figura#28)

**Figura 28** Gráfico niveles de cota alcanzados en la presa el Azúcar



3.2.3 PHA (Preliminary Hazard Anaylisis) para identificar modos de falla y niveles de riesgo en presa El Azúcar. [\(Tabla#31\)](#).

**Tabla 31** PHA para identificación de modos de falla y niveles de riesgo en presa El Azúcar

Modo de falla	Causas/condiciones activantes	Evidencia/indicadores	Consecuencia	Riesgo antes	Medidas de control propuestas	Riesgo residual (esperado)
<b>Inestabilidad superficial en talud de aguas abajo</b>	Baja compactación en 0–3 m; capas de arcilla cercanas a cota 40,4; dren de pie inoperante; sin dren interno	Factores de seguridad circulares 1,01 Y 1,22 a nivel del embalse a los 44 m	Deslizamientos locales y progresivos del talud	Alto	Dren chimenea + dren de pie continuo; berma en aguas abajo; recompacción 0–3 m; rehabilitar enrocados	Medio–Bajo
<b>Percolación concentrada / tubificación en estribo izquierdo</b>	Núcleo superior de 0–6 m no impermeable; falta de dren en estribos >33 m; contactos roca–relleno	Filtraciones con nivel de embalse +42 msnm (0,6 l/min en 1977; 7,2 l/min por piezómetro y 10 l/min superficiales en 1983; reaparición en 1992)	Erosión interna y socavones	Alto–Muy alto	Trinchera/pantalla de cimentación en estribo izquierdo; prolongar filtro hacia el estribo; conectar a dren de pie; umbral operativo nivel 42 m	Medio
<b>Inestabilidad de talud de aguas arriba bajo sismo</b>	Talud sumergido; resistencia movilizada insuficiente	Factor de seguridad con sismo 0,78 a nivel alto	Retroceso del talud y pérdida de resguardo libre	Alto	Reconformar 5–7 m con núcleo y compactación controlada; drenes	Medio
<b>Falla plana en cimentación (aguas abajo)</b>	Estratos débiles en aluvial (valores bajos de SPT)	Factores de seguridad planos 1,90 y 1,97 en estático	Deslizamiento basal	Medio	Berma en aguas abajo y drenes para reducir presiones	Bajo–Medio

<b>Rebase por oleaje/crecidas</b>	Resguardo libre limitado con coronación +46,7 msnm; máximos históricos +45,46 msnm	Deterioro de enrocados; episodios lluviosos intensos	Erosión del talud de aguas abajo y daños a la coronación	Medio	Recrecimiento +1,50 m (coronación 48,2 m), mejorar protección aguas arriba/aguas abajo,	Bajo
-----------------------------------	--	--	--	-------	---	------

El riesgo preponderante proviene por la filtración y la erosión interna (piping) en el estribo izquierdo cuando el embalse supera los +42.00msnm, y la inestabilidad del talud aguas abajo en condición estática, mientras que el talud aguas arriba en condiciones de sismo.

### 3.3 Fase 3: Aplicación de la Metodología propuesta al caso de estudio: Presa El Azúcar.

La aplicación de la metodología propuesta requiere, en primer lugar, verificar su factibilidad en función del comportamiento actual de la presa El Azúcar, los umbrales operativos establecidos y los modos de falla identificados. Posteriormente, se plantea una secuencia operativa abreviada que permite ejecutar la intervención en estado activo, garantizando la estabilidad global del embalse durante el proceso.

#### 3.3.1 Escenarios de emergencias con base en umbrales.

Se desarrollaron los escenarios de emergencia alineados con la Guía Técnica para la elaboración de Planes de Emergencia de Presas (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Gobierno de España), contextualizado al caso de la Presa el Azúcar. Considerando eventos históricos tales como:

- a) Estabilidad aguas abajo crítica: FS: 1.01 (Falla Superficial) y 1.22 (Cuerpo del talud);  
Insuficientes para operación segura continuada.

- b) Filtraciones reactivadas en el estribo izquierdo por encima de los 42.00 metros de Nivel del agua en 1983 (Después del ENSO), piezómetro con Q; 7.2 L/min + filtración superficial 10 L/min, nivel crítico del embalse a 45.60 m, en 1992.
- c) Vulnerabilidad sísmica aguas arriba FS: 0.78 Nivel del embalse 44.0 condición de talud sumergido con sismo.

**Tabla 32** Escenarios de emergencias con base en umbrales.

Umbral o Escenario	Descripción del Escenario	Condiciones de Activación
Escenario 0 - Control de la seguridad	No hay peligro inminente, pero se requiere vigilancia reforzada.	Nivel o caudal máximo registrado se alcanza o se prevé alcanzar sin riesgos para la presa. No se superan los resguardos. Aviso por activación del Escenario 1 en una presa aguas arriba.
Escenario 1 - Aplicación de medidas correctoras	Situación de riesgo moderado. Se requiere aplicar medidas técnicas o de explotación para evitar daño.	Se prevé que el nivel del embalse supere la capacidad segura sin agotar resguardos. Vertido sobre compuertas previsto, pero sin rotura. Activación de Escenario 2 en presa aguas arriba.
Escenario 2 - Situación excepcional	Hay riesgo alto de rotura o avería grave. Las medidas disponibles podrían no ser suficientes.	Es posible el rebose de la presa si se agotan los resguardos. Fallo en compuertas con posible rotura. Activación del Escenario 3 en presa aguas arriba.
Escenario 3 - Situación límite	Rotura de presa inminente o ya iniciada. La situación es crítica.	Rebose incontrolado y rotura previsible o en curso. Las medidas implementadas no son suficientes para evitar el colapso.

Con base en estos antecedentes y realizando una contextualización de la represa el Azúcar, nos encontraríamos en el escenario 2, situación excepcional, con riesgo de rotura o avería grave, si se mantiene el nivel a 45.60 m con una corona de 47.60m, las medidas convencionales podrían no bastar si se agotan resguardos o se desencadenan eventos forzantes (ENSO, Sismo).

### **3.3.2 Indicadores y variables basadas en instrumentación de la presa.**

La instrumentación es obligatoria para vigilar la seguridad de presas, permite comprobar y validar el desempeño real, apoyando o respaldando decisiones con base en datos confiables, medibles, en todas las partes críticas de la obra como se muestra en la. [Tabla#33](#).

**Tabla 33** Variables para considerar de acuerdo con escenarios en instrumentación.

NORMA	Indicador	Cómo medirlo	Frecuencia de lectura	Escenario 1 — Umbral	Escenario 2 — Umbral	Escenario 3 — Umbral
USACE EM 1110-2-1908	Nivel piezométrico (diferencia entre nivel en piezómetro y nivel de embalse)	Regla piezométrica o sensor continuo; registrar respecto a la cota del embalse	Cada seis horas (incrementar según escenario)	Diferencia mayor de 0,5 m o aumento mayor de 0,3 m en 24 h	Diferencia mayor de 1,0 m, gradiente alto o surgencia incipiente	Ebullición o sifonamiento en el pie del talud
FEMA FILTERS FOR EMBANKMENTS DAMS						
USACE SLOPE STABILITY	Deformaciones (asentamientos en coronación y movimientos de talud) y grietas	Topografía de precisión, fisurómetros, inclinómetros, bitácora fotográfica	Cada doce horas (incrementar según escenario)	Tasa mayor de 5 mm/día o grieta nueva/reapertura mayor de 5 mm/día	Tasa mayor de 10 mm/día o grieta mayor de 10 mm en 24 h; escarpa local	Deslizamiento en progreso (escarpa continua o desplazamiento rápido)
ICOLD (DAM SURVILLANCE GUIDE)	Filtraciones (caudal y calidad)	Vertedero triangular de 90° para caudal; ensayos para turbidez y registro fotográfico	Cada dos a cuatro horas (incrementar según escenario)	Aumento mayor de 30% en 24 h o reaparición donde no había	Aumento mayor de 50% en 6–12 h; surgencia; agua turbia con finos	Ebullición/piping, caudal muy turbio y creciente
ORSEP						
USACE EM 1110-2-1902	Estabilidad general (factor de seguridad estimado)	Cálculo geotécnico actualizado o estimación operativa basada en condiciones observadas	Revisión diaria cuando el nivel del embalse sube	Factor de seguridad en 1,30–1,50 o caída mayor o igual a 0,10 respecto al valor de diseño	Factor de seguridad en 1,00–1,20 (condición límite)	Factor de seguridad menor de 1,00 o falla manifiesta
EM 1110-2-1908						
FEMA	Movimiento sísmico con embalse alto	Acelerógrafo (si existe) y reporte de percepción	Activación inmediata cuando ocurra	Sismo leve con nivel del embalse mayor de 42,0 m	Sismo moderado con nivel mayor de 42,0 m	Sismo fuerte con indicios de inestabilidad
EM 1110-2-1902						

### **3.3.3 Matriz de decisiones para seleccionar la intervención adecuada según el daño, componente afectado y factibilidad de operación sin vaciado.**

Este paso es fundamental, cuando se trata de seguridad de presas, la ICOLD considera a las presas como estructuras como potencial riesgo, cuya seguridad depende de un buen diseño, monitoreo constante y mantenimiento. En este contexto es necesario crear la matriz de decisiones puesto que convierte todas las variables (niveles, piezometría, filtraciones, deformaciones) en acciones ejecutables y concretas, esta puede ser la línea delgada entre controlar un episodio o permitir una tragedia, dejando que dichos episodios vayan escalando en el tiempo, las presas de materiales sueltos no son, por sí mismas un peligro, pero pueden evolucionar en un peligro si no se instrumenta o no se actúa a tiempo.

Las presas de materiales sueltos poseen mecanismos de falla dominantes como la erosión o el sobrevertido, que una vez iniciado el flujo concentrado posee auto aceleración, creando una brecha que crece rápidamente en minutos u horas. Por ello es importante una detección temprana una respuesta sistemática y bien definida para lo cual se utilizó la matriz de decisión [Tabla#34](#).

**Tabla 34** Matriz de decisión abordando los escenarios y la acción inmediata a tomar

Escenario	Color	Indicador	Umbral numérico	Cómo medirlo	Frecuencia de lectura	Acción inmediata	Alternativas cuando no se puede bajar el nivel del agua
<b>Escenario 0</b>  <b>Control de la seguridad</b>	Verde	Altura del nivel del agua en el embalse (metros)	Menor o igual a 42,0 metros	Regla limnimétrica o sensor de nivel	Una vez al día	Vigilancia reforzada. Inspecciones visuales semanales de taludes y coronación. Mantener cunetas limpias. Aforos de filtración semanales.	Mantener el nivel dentro del rango seguro. Preparar materiales y equipos por si es necesario instalar drenaje provisional o filtros de protección.
		Filtración en el estribo izquierdo (litros por minuto)	Estable (variación menor o igual a 10 por ciento en siete días) y agua clara	Vertedero triangular de 90 grados con lectura de caudal	Una vez por semana	Registrar la línea base de caudal y turbidez. Sellado superficial temporal de grietas abiertas. Mantener desagües sin obstrucciones.	Construir pequeñas cajas de medición con sacos de arena y geotextil para confinar la salida y proteger contra arrastre de finos, sin modificar el nivel del embalse.
		Grietas en taludes y coronación	Sin aparición de grietas nuevas ni crecimiento medible	Regla y fisurómetro manual	Una vez por semana	Bitácora fotográfica y control dimensional. Protección contra lluvia en la cresta si es necesario.	Sellar con tapón de arcilla compactada y una lámina plástica temporal para impedir la entrada directa de lluvia.
<b>Escenario 1</b>  <b>Aplicación de medidas correctoras</b>	Amarillo	Altura del nivel del agua en el embalse (metros)	Mayor de 42,0 y menor o igual a 44,0 metros	Regla limnimétrica o sensor de nivel	Cada 6 horas	Bajar el nivel objetivo por debajo de 42,0 metros con alivio controlado (si fuera viable).	Si no es viable bajar el nivel: reducir el gradiente hidráulico en el pie del talud con zanja drenante hacia un punto de descarga seguro; instalar bombas portátiles para evacuar el agua de la zanja.
		Filtración en el estribo izquierdo (litros por minuto)	Aumento mayor de 30 por ciento en 24 horas, o reaparición de filtración	Vertedero triangular de 90 grados con lectura de caudal	Cada 2 a 4 horas	Vigilancia presencial continua. Registrar caudal, turbidez y temperatura. Preparar protección provisional del talud aguas arriba (lámina impermeable y geotextil con lastre).	Instalar anillos de sacos de arena con geotextil (filtro inverso improvisado) en las bocas de salida; colocar una segunda capa con grava graduada para evitar el arrastre de finos. Implementar drenaje superficial en el estribo para interceptar escorrentía.
		Grietas en taludes y coronación	Grietas nuevas o reapertura superior a 5 milímetros por día	Puntos de control con fisurómetro manual	Cada 12 horas	Sellado superficial temporal y protección contra lluvia. Revisar drenajes superficiales y ejecutar bombeo si hay encharcamientos en el pie del talud.	Colocar una manta de impermeabilización temporal en el talud aguas arriba (geomembrana o geosintético bentonítico) anclada en la coronación para reducir infiltración sin vaciar el embalse.
<b>Escenario 2</b>  <b>Situación excepcional</b>	Naranja	Altura del nivel del agua en el embalse (metros)	Mayor o igual a 44,0 metros o tendencia firme a superarlo en veinticuatro horas	Regla limnimétrica o sensor de nivel	Cada una a dos horas	Descenso acelerado y controlado del embalse hasta menos de 42,0 metros (si fuera posible), con vigilancia del talud aguas arriba durante el vaciado.	Si no se puede bajar: instalar pozos de alivio o hincar puntas filtrantes (wellpoints) alineados a lo largo del pie del talud aguas abajo conectados a bombeo continuo; construir una berma de pie de enrocado de 6 a 10 metros de ancho con filtro granular para incrementar estabilidad del talud.
		Estabilidad del talud aguas abajo (factor de seguridad)	Valores cercanos a 1 (1,0 a 1.2) como los obtenidos a 44,0 metros de nivel del embalse	Cálculo geotécnico o estimación operativa basada en condiciones observadas	Revisión diaria mientras dure el episodio	Tomar decisiones conservadoras y reforzar zonas blandas.	Construir un contrafuerte con material granular (berma de pie) en los tramos críticos; instalar drenaje longitudinal con tubería perforada envuelta en filtro geotextil y grava, descargando a un punto seguro.

		Filtración en el estribo izquierdo (litros por minuto)	Aumento mayor de 50 por ciento en 6 a 12 horas, surgencia en el pie del talud o filtración turbia con posible arrastre de finos	Vertedero triangular de 90 grados, inspección visual y recipiente transparente para turbidez	Cada 1 a 2 horas	Filtro de emergencia con sacos de arena y geotextil en la salida; zanja drenante con material granular; perímetro de seguridad aguas abajo y aviso preventivo a protección civil.	Ejecutar drenaje subhorizontal en el estribo (perforaciones inclinadas que descarguen hacia aguas abajo) para aliviar presiones; combinar con una trinchera drenante en la unión presa-roca. De ser viable, realizar inyecciones selectivas de consolidación solo después de mejorar el drenaje.
		Deformaciones y asentamientos	Asentamiento visible o deformación en taludes o coronación; grietas que superen 10 milímetros en 24 horas	Replanteo con nivel, regla y fisurómetro manual; bitácora fotográfica	Cada 1 a 2 horas	Cerrar la coronación al tránsito. Preparar berma de pie temporal donde se identifique reblandecimiento.	Reforzar localmente con relleno granular y compactación dinámica ligera en la base del talud aguas abajo; añadir colchón drenante superficial bajo una capa protectora.
		Sismo con embalse alto	Movimiento sísmico perceptible con nivel del embalse mayor de 42,0 metros	Acelerógrafo (si existe) y reporte de percepción	Activación inmediata	Aumentar la frecuencia de inspecciones, controlar filtraciones y deformaciones.	Colocar elementos de protección adicionales en el talud aguas arriba y revisar las salidas de filtración con filtros inversos improvisados.
<b>Escenario 3 Situación límite</b>	Rojo	Aproximación a rebose por coronación	Resguardo agotado o vertido incontrolado por la coronación	Observación directa del resguardo (distancia entre lámina de agua y coronación)	Continuo	Ejecutar evacuación aguas abajo y mantener el máximo alivio posible sin agravar la inestabilidad.	Si no se puede bajar el nivel con compuertas: instalar sifones de emergencia o bombas flotantes para transferir parte del volumen hacia cauces seguros o depósitos temporales; proteger el talud aguas arriba contra oleaje con refuerzo de enrocado y geotextil.
		Filtración en el pie del talud	Aumento súbito y muy turbio; aparición de ebullición o sifonamiento en el pie del talud	Observación directa, recipientes transparentes y pruebas de ebullición	Continuo	Proteger puntos de salida con filtros inversos improvisados. Coordinar intervención de emergencia con maquinaria y materiales.	Construir drenaje de alivio profundo o una zanja de alivio escalonada con varias capas de grava y arena; ampliar la berma de pie para repartir esfuerzos.
		Deslizamiento en progreso	Fisura de tracción en la cresta, formación de escarpa o desplazamiento rápido del talud	Inspección visual, replanteo rápido con estacas y nivel	Continuo	Evacuación y corte de accesos. Mantener comunicación con autoridades.	Aportar rápidamente material granular para conformar un apoyo en el pie del talud y reducir movimientos, mientras se mantiene protegido cada punto de salida con filtros inversos improvisados.

### **3.4 Fase 4: Diseño técnico de la intervención y plan de reparación inmediata**

El objetivo de esta fase es definir e implementar una intervención que restablezca y eleve los márgenes de seguridad de la presa, El Azúcar, frente a sus modos de falla más probables (erosión interna, filtraciones por estribo, inestabilidad del talud aguas abajo y sobrevertido), minimizando el riesgo operativo durante la obra y sin necesidad de vaciar totalmente el embalse.

#### **3.4.1 F4.1 Criterio Hidráulico:**

De acuerdo con el estudio Hidrológico e Hidráulico, se adopta el recrecimiento de coronación desde 47.6 metros sobre el nivel del mar a 49.1 metros sobre el nivel del mar:

- a. Se asegura un resguardo de 1.30m frente a la avenida con periodo de retorno de 500 años.
- b. La presa es capaz de laminar la avenida de 10.000 años manteniendo 0.20 m de resguardo respecto a la coronación.

#### **3.4.2 F4.2 Criterio Geotécnico de diseño:**

Se adoptan los siguientes factores de seguridad, para verificar la estabilidad en condiciones relevantes de operación y eventos extremos: [Tabla#35](#).

**Tabla 35** Factores de Seguridad adoptados para verificación de estabilidad para rediseño

SITUACIÓN	SOLICITACIÓN	FACTOR MÍNIMO DE SEGURIDAD
<b>Aguas abajo</b>	Régimen operacional con NA del embalse en la cota 45 msnm (solera de aliviadero)	1.5
<b>Aguas abajo</b>	Régimen operacional con NA del embalse en la cota 45.0 msnm (Solera de aliviadero) con sismo	1.2
<b>Aguas abajo</b>	NA del embalse en la cota 47.8 msnm (Avenida con TR 500 años)	1.4
<b>Aguas abajo</b>	NA del embalse en la cota 47.8 msnm (Avenida con TR 500 años)	1.1
<b>Aguas abajo</b>	NA del embalse en la cota 48.9 msnm (avenida máxima probable)	1.3
<b>Aguas arriba</b>	Rebajamiento rápido del nivel del embalse	1.3
<b>Aguas arriba</b>	Rebajamiento rápido del nivel del embalse con sismo	1.1

### 3.4.3 F4.3 Soluciones de ingeniería seleccionadas

#### **Zona Superior De La Presa (Reconstrucción Y Recrecimiento):**

Retiro entre 5 y 7 metros superiores del terraplén y reconstrucción compactada.

Recrecimiento de un 1.50 centímetros; ancho de coronación de 9 metros; taludes exteriores con inclinación de uno vertical a dos horizontales:

- Núcleo impermeable de arcilla plástica: 8 metros de base y 3 metros en la parte superior.
- Espaldones de arenas finas limosas de baja a nula plasticidad con fragmentos de arenisca.

- Protección con enrocado: 50 en el talud del lado aguas arriba y 30 en el talud del lado aguas abajo, sobre transición de enrocado fino de 50 centímetros.
- Filtro de arena limpia de 60 centímetros entre el núcleo y el espaldón del lado aguas abajo, prolongado hasta el pie; transición de gravilla de un 1.50 centímetros en el extremo aguas abajo.

Restituir un núcleo impermeable continuo, aumentar la estabilidad global y proteger los taludes frente a erosión y oleaje.

#### **Tratamiento del Estribo Izquierdo (Impermeabilización Y Drenaje):**

Trinchera de impermeabilización en arenisca meteorizada: aproximadamente 8 metros de longitud, 6 metros de ancho y 2,50 m de profundidad, con prolongación de 5 metros hacia el estribo.

- Regularización de la superficie rocosa; donde sea necesario, colocación de arcilla plástica compactada.
- Prolongación del filtro hacia el estribo para interceptar y conducir la percolación sobre la superficie rocosa inclinada.

Cortar caminos de filtración en el estribo izquierdo y conducir el agua de forma segura hacia los drenes.

#### **Dren de pie bajo la cota de treinta y tres metros (nuevo):**

Sustitución del dren original (inoperante) por un dren longitudinal nuevo de ciento diez metros, ubicado aproximadamente a cinco metros del anterior.

- Zanja de 0.80 metros de ancho y hasta cuatro metros de profundidad; relleno con grava gruesa y geotextil no tejido como transición.
- Evacuación de las aguas mediante un dren transversal con las mismas dimensiones hasta el cauce del río.

El objetivo es reducir presiones internas, recoger filtraciones y evitar saturación del talud del lado aguas abajo.

**Enrocado de protección y limpieza:**

- Reparación localizada del enrocado del talud del lado aguas abajo entre las cotas de 33 y 40 metros sobre el nivel del mar.
- Retiro de vegetación en la superficie del talud y en una franja de 10 metros aguas abajo del pie de la presa.

El objetivo es restituir la protección superficial y eliminar vías de erosión y obstrucciones.

**3.4.4 F4.5 Diagnóstico de estabilidad de la propuesta preliminar (No cumplía con FS mínimo)**

Pese a la propuesta elaborada inicial y a los factores de seguridad propuestos para cada condición del paramento aguas arriba y aguas abajo de la presa, no cumplió con los mínimos requeridos, debido a que en este diseño el filtro propuesto no captaba las filtraciones profundas, por debajo de la cota 40.60, quedando gradientes altos, lo que podría desembocar en erosión interna. Faltaba un peso estabilizador que aumente la resistencia en el talud del lado del valle. Por lo cual se debe replantear criterios para cumplir con los FS sugeridos, de tal manera que se propone o añade las siguientes mejoras:

**3.4.5 F4.6 Mejoras incorporadas en la sección revisada.**

**Núcleo Impermeable continuo hasta la coronación:** cerrando la heterogeneidad de los primeros metros.

**Filtro de arena prolongado hasta el pie del talud del lado del valle:** Con transiciones granulares, y conectado a 2 drenes transversales:

- Uno exclusivo para el estribo izquierdo (Zona problemática de acuerdo con el historial de la presa)
- Otro para el resto de la presa

**Dren de pie nuevo:** Longitud 110m, zanja de 0.80 ancho, profundidad de 4.00 m, que incluya grava y geotextil con descarga transversal del cauce.

Berma estabilizadora: Desde la cota 38.00 en el talud del lado del valle, usando material de excavación.

**Reparación de enrocados y limpieza:** de vegetación en talud y en una franja de 10 m aguas abajo del pie.



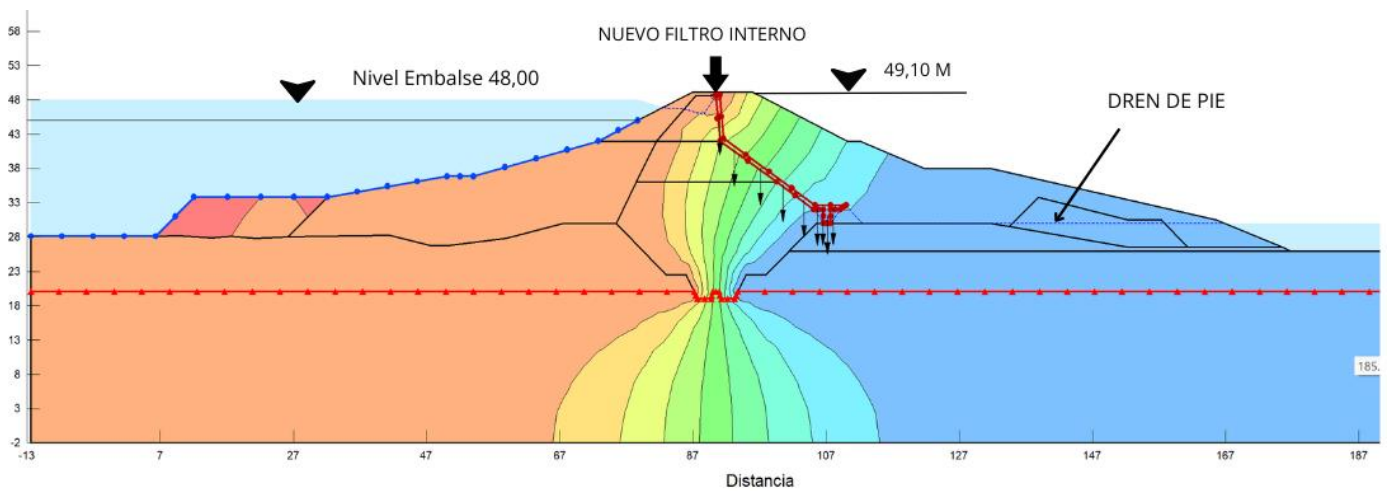


### 3.4.6 Modelación de Sección de presa en nuevas condiciones

#### Filtraciones: SEEP/W

La nueva modelación con SEEP/W, aplicada a la sección mejorada con filtro integrado y dren de pie, evidenció una disminución de filtraciones y mayor estabilidad hidráulica. Como resultado, se definió elevar la cota de coronación de 47,6 a 49,10 msnm, asegurando un borde libre de 1,30 m para TR= 500 años y la capacidad de laminar avenidas de TR= 10,000 años con un resguardo de 0.20 m. [Figura #30.](#)

**Figura 30** Modelación SEEP/W Represa 'El Azúcar' 199

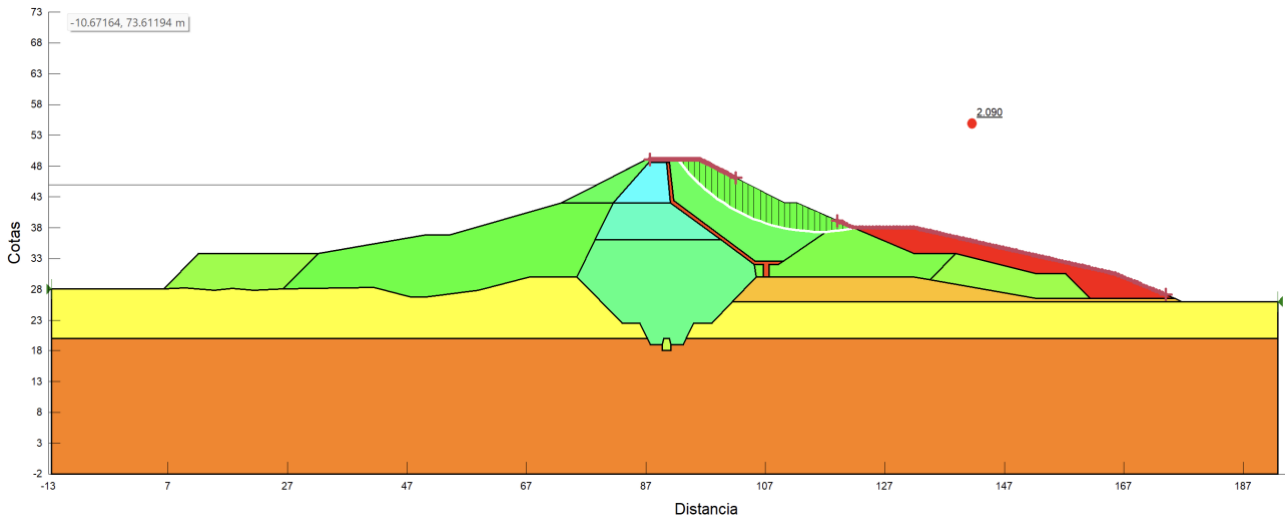


**Estabilidad de Taludes:**

**CONDICIÓN ESTÁTICA**

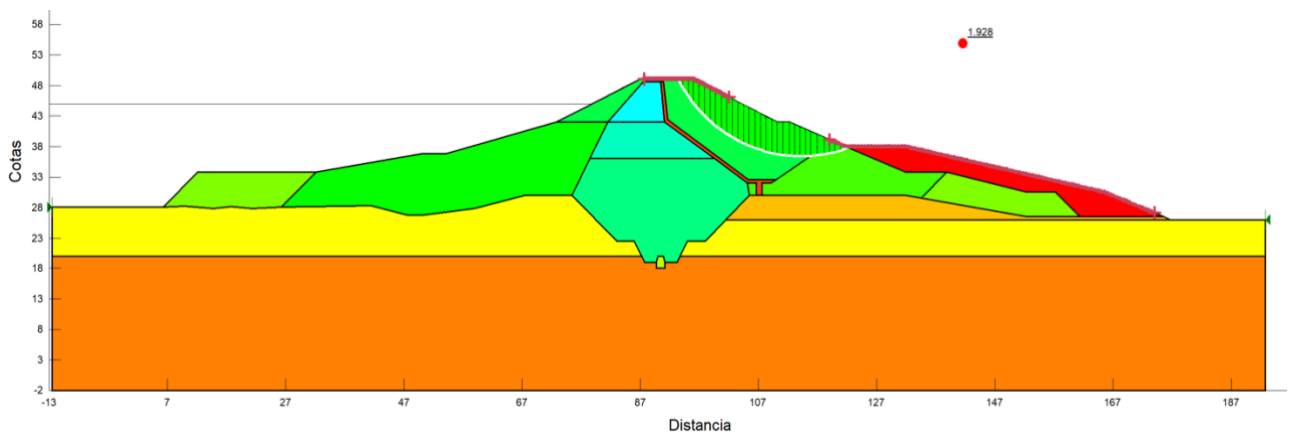
**Bishop u Obispo:**

- **Aguas Abajo Fs 2.09**



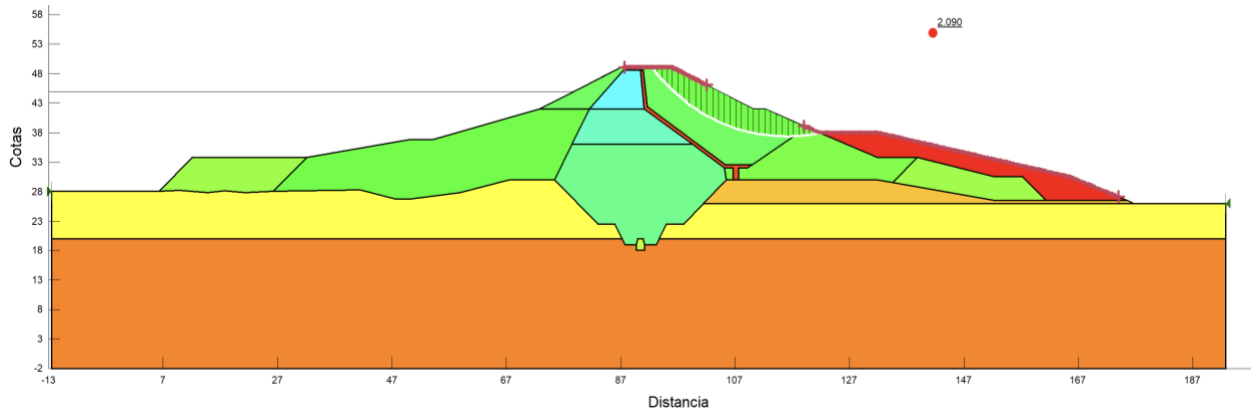
**Jambu:**

- **Aguas Abajo Fs 1.93**



**Spencer:**

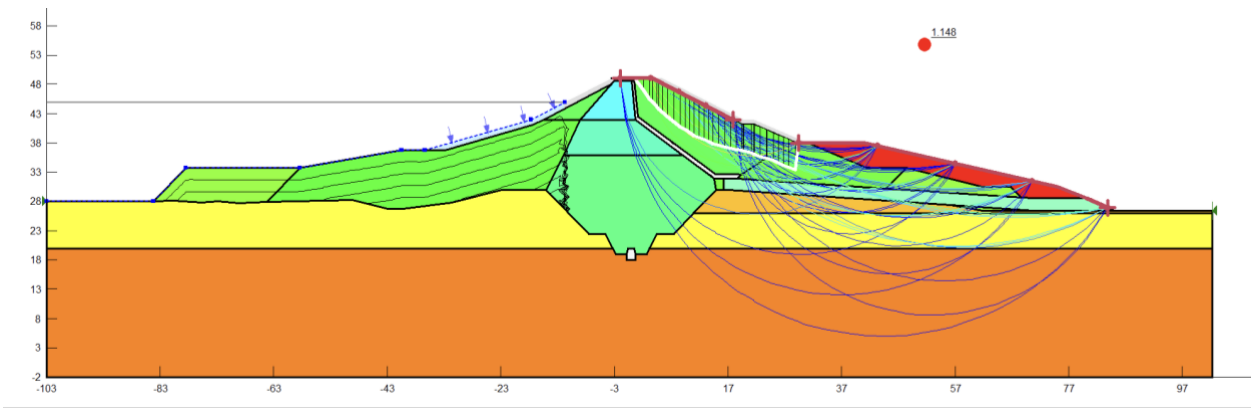
- Aguas Abajo Fs: 2.09



**ANÁLISIS PSEUDOESTÁTICO AGUAS ABAJO:**

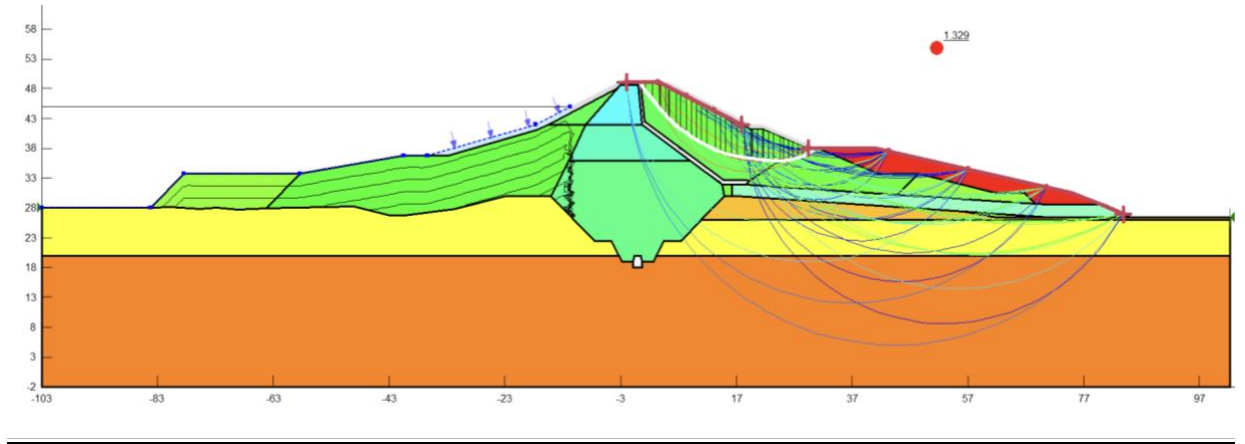
**Bishop u Obispo:**

- Aguas Abajo Fs:1.148



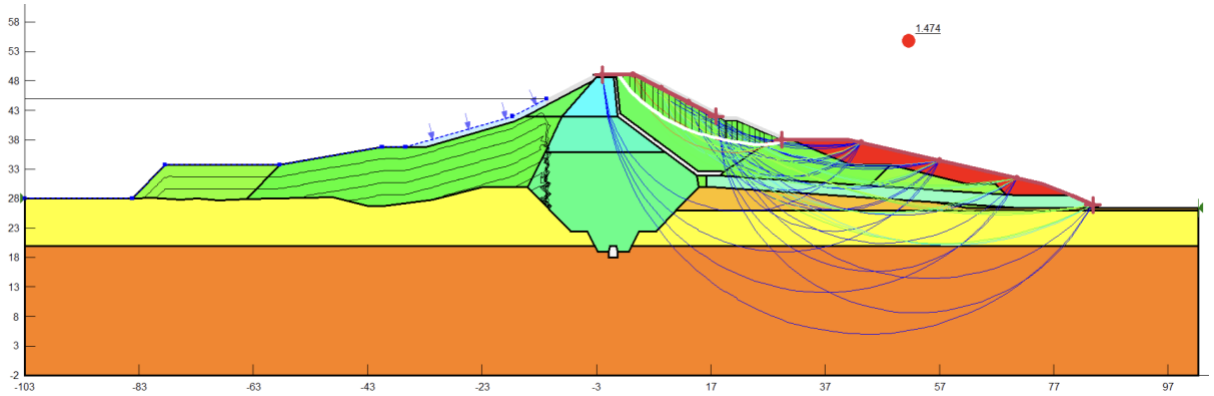
**Jambu:**

- Aguas Abajo Fs. 1.329



**Spencer:**

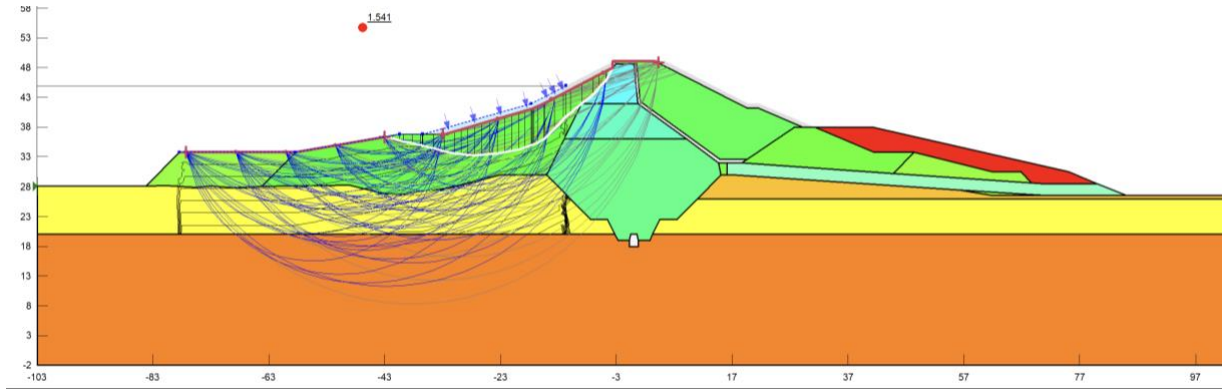
- Aguas Abajo Fs: 1.474



**Análisis Estático Aguas Arriba**

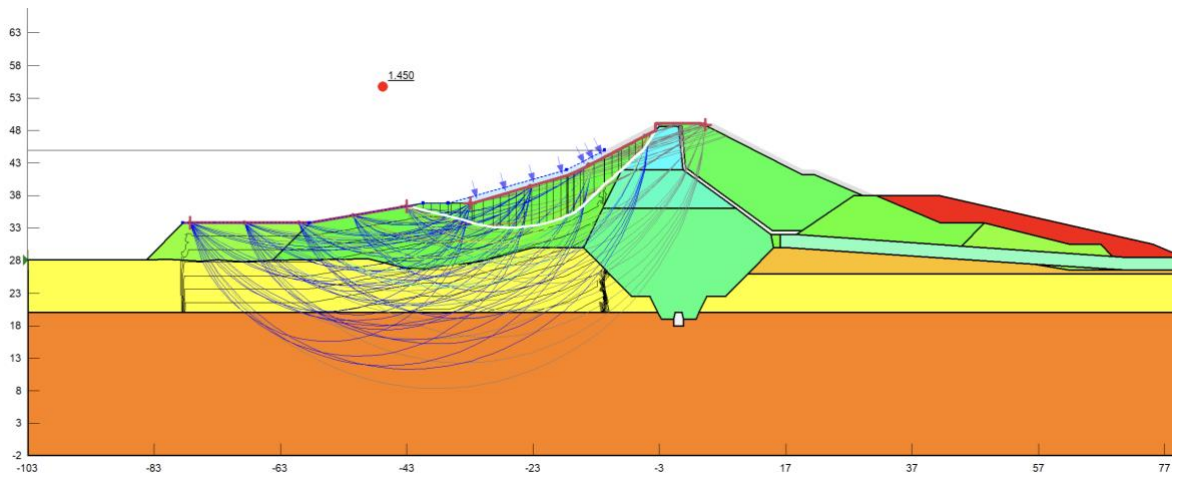
**Bishop u Obispo:**

- **Aguas Arriba Fs:1.54**



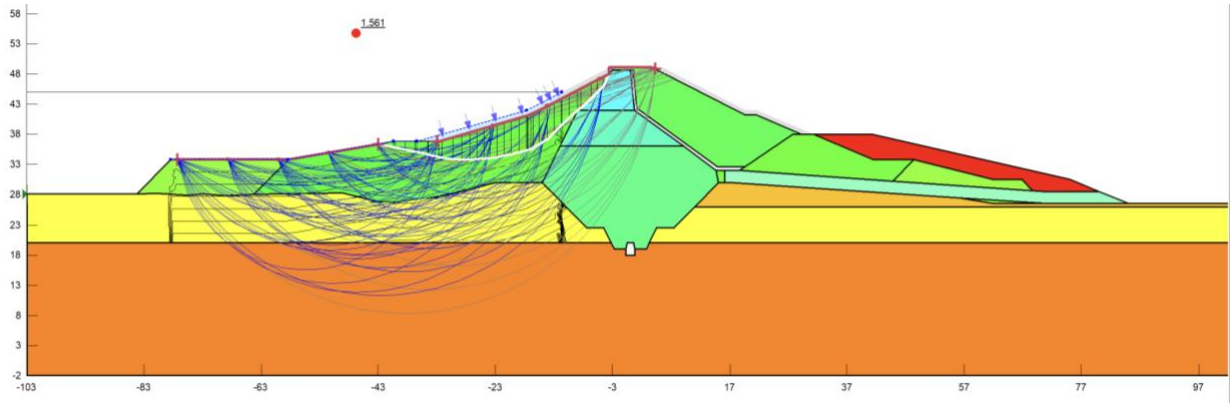
**Jambu:**

- **Aguas Arriba Fs: 1.45**



**Spencer:**

- **Aguas Arriba Fs: 1.56**

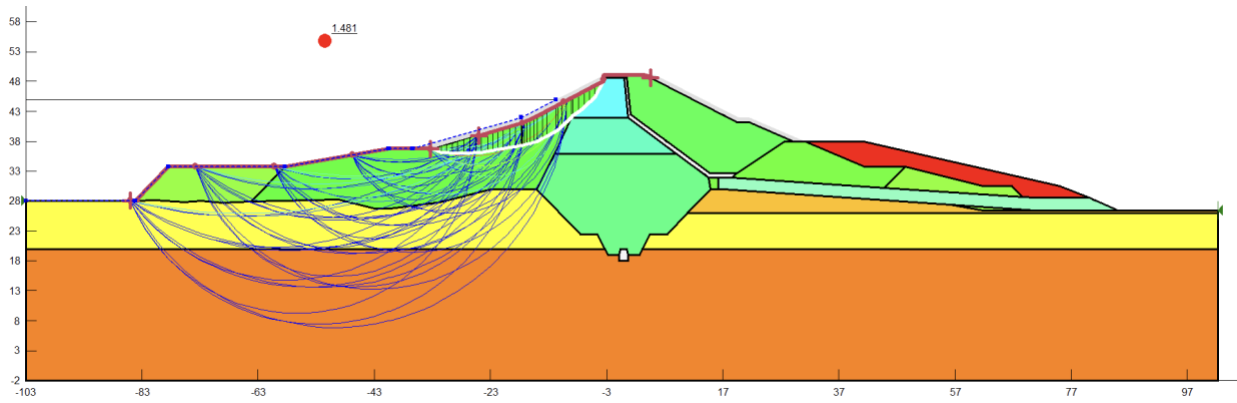


**Análisis Pseudoestático Aguas Arriba**

**Kh. 0.15**

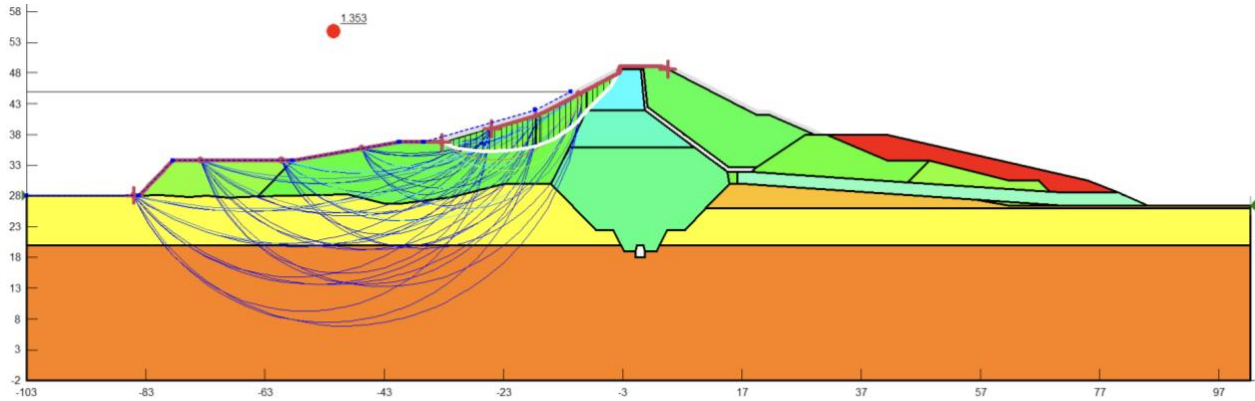
**Bishop u Obispo:**

- **Aguas Arriba Fs:1.481**



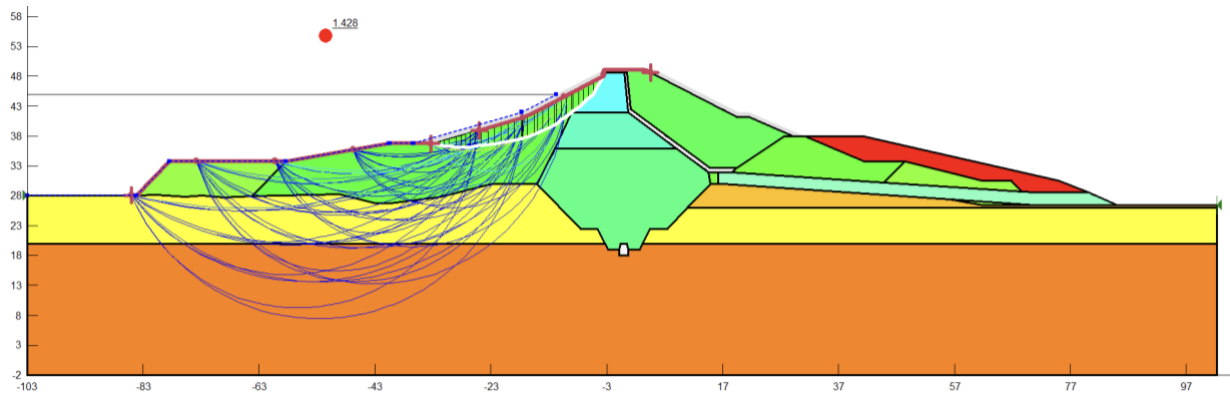
### Jambu:

- Aguas Arriba Fs:1.353



### Spencer:

- Aguas Arriba Fs: 1.428



### **3.4.7 F4.7 Resultado de estabilidad con la sección revisada.**

Mediante las mejoras especificadas, el Talud del lado del valle, cumple con los factores de seguridad mínimos para operación y para la avenida de 500 y 10000 años con y sin sismo, mientras que, el talud del lado del embalse cumple sin sismo; con sismo y embalse

alto cumple si se usan parámetros en términos de esfuerzos efectivos  $C: 0.7 \text{ t/m}^2$  y  $27^\circ$ ,

[Tabla#36 y 37.](#)

**Tabla 36** Factores de seguridad Análisis Estático nueva sección

ANÁLISIS ESTÁTICO					
MÉTODO DE EQUILIBRIO LÍMITE					
Análisis	Aguas Arriba	Aguas abajo	NE C-15 ESTÁTICO	USACE (EE. UU.) EM 1110-2-1902 Slope Stability	Cumple
<b>BISHOP</b>	1.54	2 .09	1.5 0	1.50	SÍ
<b>JAMBU</b>	1.45	1 .928	1.5 0	1.50	SÍ
<b>SPENCER</b>	1.56	2 .09	1.5 0	1.50	SÍ

**Tabla 37** Factores de seguridad Análisis Pseudo - Estático nueva sección

ANÁLISIS PSEUDO-ESTÁTICO							
TALUD	COEFICIENTE SÍSMICOS		FACTORES DE SEGURIDAD			NEC 15	USACE ER 1110-2-1806
	Kh (g)	Kv (g)	BISHOP	JAMBU	SPENCER		
AGUAS ABAJO	0.15	-0.10	1.148	1.329	1.474	1.05	1.00 + Más análisis de desempeño y desplazamientos
AGUAS ARRIBA	0.15	-0.10	1.481	1.353	1.428	1.05	1.00 + Más análisis de desempeño y desplazamientos

### **3.5 Fase 5: Aplicación al caso de estudio: Represa El Azúcar**

La presa requiere para su utilización de varias medidas de refuerzo, a fin de garantizar las condiciones de seguridad indispensables para este tipo de estructura. Principalmente se consideran la seguridad en relación a los riesgos de erosión interna y en relación con los niveles de agua del embalse (resguardo y protección de talud). En cuanto a la estabilidad de los taludes en los diversos tipos de sollicitación, fueron establecidos los factores de seguridad conforme al cuadro siguiente:

#### **3.5.1 Aplicación práctica de la metodología diseñada el caso de la represa El Azúcar.**

- Anexo # 2:
  - a) Preparación Logística y de Seguridad:
    - Diseño del plan de trabajo en etapas: definir horarios, equipos, monitoreo, control de tráfico de maquinaria.
    - Establecer protocolo de emergencia y evacuación ante empeoramiento de condiciones.
      - a. Mediante el análisis realizado en la tesis de referencia (Carrasco Danna; & Campuzano Holger, 2024), se realizó la modelación ante una posible falla y rotura inminente en caso de que alguno de las operaciones se desvíe empeorando la situación. La rotura se modeló mediante un hidrograma equivalente aplicado como condición de frontera en la salida del embalse.
      - b. Parámetro clave: se adoptó un caudal pico de 12 000 m<sup>3</sup>/s según la tesis de referencia, para representar una envolvente conservadora de peligrosidad.

- c. Productos del modelo: caudales y niveles máximos, tiempos de llegada, profundidades y velocidades máximas, y extensión de la inundación para puntos y tramos críticos. [Tabla#38](#)

**Tabla 38** Caudal y extensión de inundación modelada

<b>Escenario</b>	<b>Caudal (m<sup>3</sup>/s)</b>
Periodo de retorno 1000 años	1000,74
Precipitación Máxima Probable	4603,94
Rotura de presa (dam-break)	12000,00

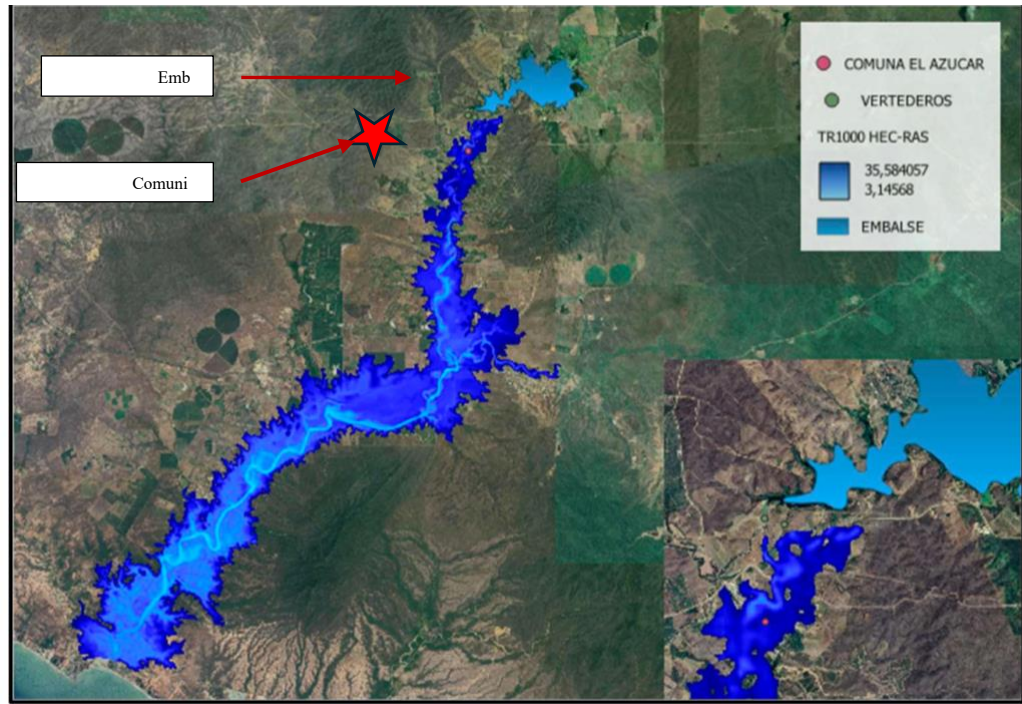
**Extensión de la inundación**

**modelada**

<b>Escenario</b>	<b>Área de inundación (km<sup>2</sup>)</b>
Periodo de retorno 1000 años	40,48
Rotura de presa	118,80

- Usos directos para el plan de evacuación
  - a. Zonificación de peligro: peligro alto cuando la profundidad esperada supera 1,0 m o cuando el producto velocidad × profundidad es  $\geq 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$ ; peligro medio y bajo por debajo de esos valores, priorizando siempre áreas con altas velocidades cercanas al cauce principal. [Figura#31](#)

**Figura 31** Mancha de inundación rotura de presa El Azúcar



- a) Tiempos de aviso: definir puntos de control aguas abajo y activar aviso público cuando el tiempo de llegada previsto sea menor que el tiempo mínimo de respuesta establecido por la autoridad.
  
- b) Rutas y zonas seguras: seleccionar itinerarios fuera de la planicie de inundación, evitar pasos bajos y puentes sobre el cauce principal, y predefinir puntos de reunión y albergues en cotas seguras. ([Figura#32](#))

**Figura 32** Zonas de encuentro ante rotura de presa



Tomada del trabajo de tesis (Carrasco Danna; & Campuzano Holger, 2024)

- c) Poblaciones prioritarias: identificar y registrar personas con movilidad reducida y establecimientos sensibles (centros de salud, escuelas, cárceles, grandes aforos).
- d) Mensajes y medios de alerta: preparar mensajes preaprobados con instrucciones claras de ruta y puntos seguros; emplear sirenas, mensajería móvil, radio y televisión local.
- e) Criterios de reingreso: permitir retorno cuando caudal y nivel desciendan a umbrales seguros, no existan represamientos ni obstrucciones, y la infraestructura crítica haya sido inspeccionada.

### **3.5.2 Instalación de instrumentación adicional (piezómetros, inclinómetros, medidores de caudal en drenajes).**

### **3.5.3 Capacitación del personal sobre riesgos y procedimientos geotécnicos en presas activas.**

La capacitación del personal es un componente esencial para garantizar la operación segura de una presa activa. Este proceso busca que los operadores, técnicos y responsables de una presa activa. Este proceso busca que los operadores, técnicos y responsables de la infraestructura comprendan los riesgos geotécnicos asociados al comportamiento del dique y sepan actuar adecuadamente ante señales tempranas de inestabilidad. Esta capacitación debe ser periódica, documentada y alineada con los estándares internacionales (ICOLD, FEMA, MITECO), asegurando que el personal cuente con las habilidades necesarias para reducir la probabilidad de fallas y responder de forma eficaz ante cualquier evento que comprometa la estabilidad de la presa.

### **3.5.4 Secuencia Operativa abreviada para la intervención en la Presa el Azúcar (Sin Vaciar embalse)**

Una vez establecida la factibilidad técnica, se propone una secuencia operativa abreviada que describe las etapas necesarias para ejecutar la intervención en condiciones de operación activa. Esta secuencia considera la evolución de las variables críticas, el monitoreo continuo, las medidas geotécnicas de estabilización y los protocolos de actuación frente a desviaciones o condiciones de alarma.

- Etapa 1: Sellado temporal del área de intervención (geotextiles, inyecciones superficiales, membranas).

- Etapa 2: Excavación controlada en zona afectada con maquinaria liviana, desde coronación o espaldón aguas abajo. (Tabla#39)

**Tabla 39** Excavación controlada

Etapa	Variable por controlar	Cómo medir	Frecuencia	Umbral de advertencia (amarillo)	Umbral de alarma (rojo)	Acción inmediata
2. Excavación controlada	Longitud de frente abierto simultáneo (m)	Cinta/topografía, tramo en obra activo	Cada inicio de turno y cambios de frente	> 25 m	> 35 m	Cerrar frentes adicionales; limitar a ventanas de 15–25 m
	Espesor de banco (m)	Regla/topografía por perfiles	Cada 10 m de avance	> 0,50 m	> 0,70 m	Reducir espesor y generar bermas de descanso
	Inclinación de talud temporal	Topografía (pendiente H:V)	Diaria	Más empinado que 1V:2H hasta 1V:1,75H	Más empinado que 1V:1,5H	Reconfigurar talud y/o colocar berma de pie temporal
	Distancia de maquinaria a la arista (m)	Topografía/señalización	Continuo	< 3 m	< 2 m	Retirar equipos, ampliar zona de seguridad
	Aumento de nivel piezométrico (m/h)	Lectura piezómetros	Cada 1–2 h en faena	$\geq 0,30$ m/h	$\geq 0,50$ m/h	Detener excavación, cubrir con geotextil y arena, evaluar alivio
	Aumento de caudal en drenes (% en 1 h)	Aforador / vertedero portátil	Cada 1–2 h	$\geq 10$ %	$\geq 20$ %	Detener, colocar filtro temporal, investigar causa

	Turbidez en drenes	Visual o turbidímetro (NTU)	Cada 1–2 h	25–100 NTU o leve turbidez	> 100 NTU por 30 min o finos visibles	Filtrar con arena, revisar transiciones y frentes
	Deformación en coronación (mm/24 h)	Regletas/topografía	Diaria	5–10 mm/24 h	> 10 mm/24 h	Detener, bermas de pie temporal, instrumentación adicional
	Grietas nuevas (apertura en mm)	Inspección / fisurómetros	Diaria	1–3 mm	> 3 mm	Detener, sellado temporal, evaluación geotécnica

- Etapa 3: Instalación de drenes de alivio (horizontal o vertical), filtros de arena y gravas según USACE/FEMA. ([Tabla#40](#))

**Tabla 40** *Instalación de drenes y filtros*

<b>Etapa</b>	<b>Variable a controlar</b>	<b>Cómo medir</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Umbral de advertencia (amarillo)</b>	<b>Umbral de alarma (rojo)</b>	<b>Acción inmediata</b>
3. Drenes y filtros	Criterio de retención del filtro (relación de diámetros)	Granulometría (D15 filtro / D85 suelo base)	Por lote	5–6	> 6 (no retiene)	Ajustar mezcla del filtro o rechazar lote
	Criterio de permeabilidad del filtro	Granulometría (D15 filtro / D15 suelo base)	Por lote	3–4	< 3 (no drena)	Ajustar curva granulométrica o espesor
	Continuidad del geotextil	Inspección continua	Continuo	Cortes menores puntuales	Roturas o faltantes	Reparar antes de cubrir

	Prueba de caudal tras instalación	Aforo en descarga	Al finalizar tramo	Aclaramiento > 60 min	Turbidez persistente con finos	Añadir arena, revisar transición y conexiones
	Geometría del dren longitudinal nuevo	Topografía (L=110 m, B=0,80 m, H=4,0 m)	Cada 20 m	Desviación $\pm 5\%$	Desviación > 10 %	Corregir geometría antes de cubrir

- Etapa 4: Relleno con materiales seleccionados compactados por capas (según el tipo de daño). ([Tabla#41](#)).

**Tabla 41** *Relleno y compactación*

Etapa	Variable a controlar	Cómo medir	Frecuencia	Umbral de advertencia (amarillo)	Umbral de alarma (rojo)	Acción inmediata
4. Relleno y compactación	Espesor de capa suelta (cm)	Regla/topografía	Cada capa	30–35 cm	> 35 cm	Reducir espesor y recompactar
	Compactación en núcleo y contactos (% Proctor Modificado)	Densidad in situ	Cada 400–500 m <sup>2</sup> por capa	96–98 %	< 96 %	Retrabajar capa y ajustar humedad
	Compactación en zonas generales (% Proctor Modificado)	Densidad in situ	Cada 600–800 m <sup>2</sup> por capa	93–95 %	< 93 %	Retrabajar capa y ajustar humedad
	Humedad respecto a la óptima ( $\pm$ %)	Ensayo de humedad	Cada capa	$\pm 2-4\%$	> $\pm 4\%$	Ajustar humedad (regar o airear) y recompactar

- Etapa 5: Integración de geosintéticos si es necesario (geomembranas, geodrenes). ([Tabla#42](#))

**Tabla 42** Consideraciones instalación de geosintéticos

Etapa	Variable a controlar	Cómo medir	Frecuencia	Umbral de advertencia (amarillo)	Umbral de alarma (rojo)	Acción inmediata
5. Geosintéticos	Velocidad del viento (km/h)	Anemómetro/pronóstico	Cada hora	20–30 km/h	> 30 km/h	Suspender despliegue y asegurar rollos
	Condición del sustrato	Inspección visual	Continuo	Humedad superficial leve	Mojado o con partículas sueltas	Secar/limpiar; no instalar hasta cumplir
	Pruebas de uniones/costuras	Vacuum-box/chispa/ultrasonido	100 % de costuras	Muestras límite	Fallas o sin probar	Reparar y reensayar antes de cubrir
	Defectos/punzonamientos (mm)	Inspección visual	Continuo	≤ 10 mm (reparar)	> 10 mm	Parche según especificación; investigar causa

- Etapa 6: Recubrimiento de protección superficial (con roca, césped, o suelo vegetal). ([Tabla#43](#))

**Tabla 43** Instalación recubrimiento

Etapa	Variable a controlar	Cómo medir	Frecuencia	Umbral de advertencia (amarillo)	Umbral de alarma (rojo)	Acción inmediata
6. Recubrimientos	Espesor de enrocado (lado embalse / lado valle)	Topografía/plantillas	Cada 20 m	-10 % del espesor de diseño (0,50 m / 0,30 m)	> -10 % sistemático	Reponer espesor; asegurar transición granular
	Transición granular bajo enrocado (espesor y continuidad)	Inspección/topografía	Cada 20 m	Huecos puntuales	Huecos o ausencia reiterada	Completar transición antes de continuar

	Vegetación retirada (talud y franja de 10 m aguas abajo)	Inspección	Diaria	Remanente $\leq 10\%$	Remanente $> 10\%$	Retiro completo antes de cerrar frente
--	--	------------	--------	-----------------------	--------------------	--

### 3.5.5 Durante toda la intervención:

#### 3.5.5.1 Se realiza monitoreo en tiempo real de piezómetros y asentamientos. [Tabla#44](#)

**Tabla 44** *Parámetros para monitoreo continuo*

Bloque	Variable a controlar	Cómo medir	Frecuencia	Umbral de advertencia (amarillo)	Umbral de alarma (rojo)	Acción inmediata
Monitoreo continuo	Piezometría (variación rápida)	Piezómetros	1–2 h	$\geq 0,30$ m/h	$\geq 0,50$ m/h	Parar, cubrir y aliviar presión (drenes)
	Caudal en drenes (variación)	Aforo	1–2 h	$\geq 10\%$ en 1 h	$\geq 20\%$ en 1 h	Parar, filtro temporal, investigar
	Turbidez en drenes	Visual/NTU	1–2 h	25–100 NTU o leve turbidez	$> 100$ NTU persistente	Filtrar con arena, revisar transiciones
	Deformación en coronación	Topografía/regletas	Diaria	5–10 mm/24 h	$> 10$ mm/24 h	Parar y estabilizar con berma provisional
	Factor de seguridad de taludes (obra)	Modelo actualizado (equilibrio límite)	Al cambiar geometría o condición	1,15–1,20	$< 1,15$	Reducir frente, añadir berma, aliviar presiones

- Se evalúa constantemente el FS por métodos numéricos (*software* geotécnico, etc.).
- Cualquier desviación → detención inmediata y activación de plan de contingencia.

### ***3.5.5.2 Verificación Post-Intervención***

- Verificación del comportamiento estructural mediante monitoreo.
- Control visual de filtraciones, deformaciones y estabilidad de taludes.

### ***3.5.5.3 Método de Newmark***

En el trabajo de titulación "Evaluación de la estabilidad de taludes de la presa el Azúcar mediante el método Pseudoestático y Newmark de desplazamiento en condición sísmica" (Cevallos Wong & Castro Suarez, 2016). Se evaluó la estabilidad de los taludes de la presa el Azúcar con embalse lleno (condición de flujo establecido) en escenarios estáticos y sísmicos, mediante el método de equilibrio límite y el método de Newmark para estimar los desplazamientos permanentes.

Los escenarios sísmicos considerados fueron:

- Terremoto del 16 de abril de 2016 (Pedernales)
- Sismo 'Severo' (Periodo de retorno 475 años)
- Sismo 'extremo' (Periodo de retorno 2500 años)

Procedimiento Newmark:

- Determinación de la aceleración crítica a partir del factor de seguridad Pseudoestático.

- Selección de aceleraciones de entrada (registro observado y acelerogramas sintéticos representativos de los escenarios).
- Cálculo de desplazamientos permanentes por integración de excedencias sobre la aceleración crítica.

Obteniendo los siguientes resultados, que se muestran en la siguiente [\(Tabla#45\)](#)

**Tabla 45** Factores de seguridad y desplazamientos

RESUMEN (FACTOR DE SEGURIDAD Y DESPLAZAMIENTOS)									
SISMOS	ANALISIS ESTÁTICOS			ANALISIS PSEUDO-ESTÁTICOS			DESPLAZAMIENTOS PERMANENTES (cm)		
	FELLEN IUS	BISH OP	JAM BU	FELLEN IUS	BISH OP	JAM BU	FELLEN IUS	BISH OP	JAM BU
PEDERNALES				2.022	2.165	1.987	0.000	0.000	0.000
SEVERO (RARO)	2.13	2.28	2.09	1.327	1.302	1.302	0.002	0.000	0.005
EXTREMO (MUY RARO)				0.970	1.053	0.958	1.799	1.166	1.950

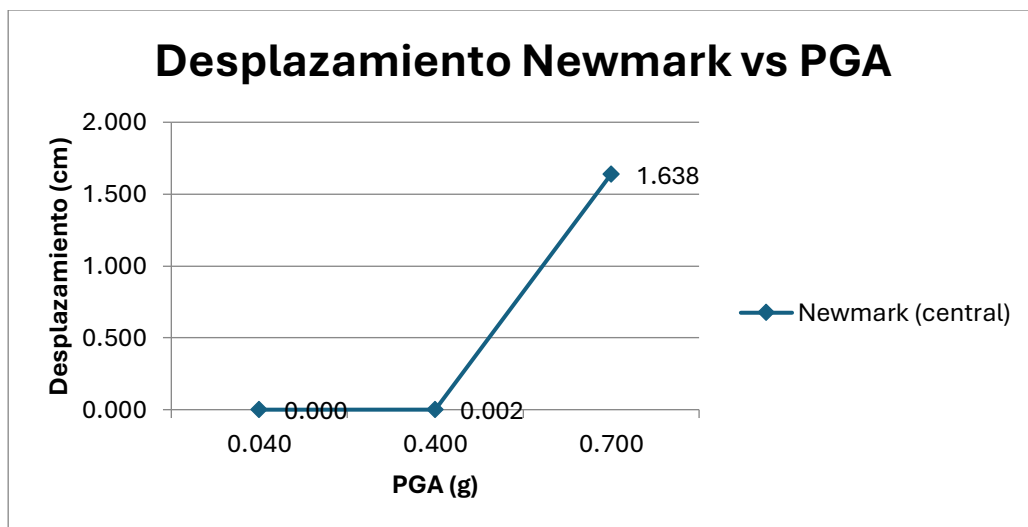
De todos los métodos contemplados, los valores más bajos fueron reportados mediante Jambu.

#### **3.5.5.4 Comparación de parámetros antes y después de la intervención (evaluación de mejora).**

Para justificar las medidas de refuerzo se evaluó la estabilidad sísmica con el método de Newmark (bloque deslizante), que estima el desplazamiento permanente del talud cuando la aceleración sísmica supera la aceleración de fluencia (umbral a partir del cual el factor de seguridad baja a uno). En la condición actual con embalse alto, los desplazamientos estimados son próximos a cero para sismos de demanda observada y “severa”; en un escenario extremo

el factor de seguridad Pseudoestático puede descender por debajo de uno y el desplazamiento es del orden de centímetros. Este resultado sustenta el recrecimiento de coronación, la berma estabilizadora y el sistema de drenaje y filtros propuestos, fijando como criterios de aceptación: no perder resguardo hidráulico, no dañar filtros/drenes y mantener la continuidad del núcleo.

**Figura 33** Desplazamientos de acuerdo a PGA



En la [Figura#33](#) se observa como crece el desplazamiento esperado del talud conforme aumenta la aceleración máxima en el sitio. Para PAG bajos (como el sismo de Pedernales) en comparación con el sismo severo y raro, el talud no desarrolla desplazamientos apreciables; con un sismo severo el desplazamiento sigue siendo nulo, pero si llegase a suscitarse un sismo extremo aparecen desplazamientos del orden de 1 a 2 cm, que son compatibles con el escenario 2 dentro de la matriz de decisiones que está ligada a los Umbrales de la Guía para Seguridad de presas de España (MITECO). [Tabla#46](#)

**Tabla 46** Desplazamientos y umbrales de seguridad

Sismo	FS Spencer (central)	Desplazamiento (cm)	Escenario	Acción sugerida
Pedernales (2016)	2,224	0	Escenario 0 - Control de la seguridad	Operación con monitoreo reforzado
Severo (raro)	1,458	0,002	Escenario 0 - Control de la seguridad	Operación con monitoreo reforzado
Extremo (muy raro)	1,076	1,638	Escenario 2 - Situación excepcional	Restringir operación; activar emergencia; reforzar drenaje/monitoreo

Los valores de aceleración máxima del terreno en sitio (PGA) utilizado en el análisis, fueron tomados de, Tabla 22 (Análisis de Newmark), los cuales corresponden a:

- Pedernales 2016: 0.04
- Sismo severo: (10% en 50 años): 0.40 g
- Sismo extremo (2% en 50 años): 0.70 g

Consistentemente los coeficientes Pseudoestático adoptados cumplen aproximadamente  $K_h: 0.5 \times \text{PGA}$

## **Capítulo 4**

#### 4.1 Conclusiones y recomendaciones

1. Ante la inexistencia de una metodología nacional unificada, esta tesis demuestra que es posible operacionalizar la seguridad de presas de materiales sueltos mediante una metodología aplicada mediante umbrales medibles, matriz de decisiones, intervención por etapas con embalse en servicio y verificación con instrumentación. La aplicación al caso de la presa El Azúcar muestra que, con la continuidad del núcleo impermeable hasta la coronación, el drenaje interno efectivo, el peso estabilizador añadido y la protección superficial, se recuperan márgenes adecuados en operación normal y avenidas severas. Ante un sismo extremo, el comportamiento se sitúa en el borde del equilibrio, con desplazamientos pequeños y reparables, lo que exige monitoreo continuo y protocolos de respuesta. Este enfoque ofrece una ruta realista para construir un estándar nacional, reducir la variabilidad de criterios entre operadores y evitar escalamiento silencioso de fallas que puedan derivar en emergencias mayores que vulneren las poblaciones aguas abajo. No existe un protocolo único, oficial y operativo que integre auscultación, umbrales, toma de decisiones por escenarios e intervención con el embalse en servicio para presas de materiales sueltos.
2. El diagnóstico del estado inicial, se comprobó discontinuidad del núcleo impermeable en los primeros metros de la coronación, dren de pie inoperante en el talud del lado del valle, presencia de capas arcillosas débiles y filtraciones recurrentes en el estribo izquierdo.
3. Solución técnica necesaria: se justifica la reconstrucción superior (cinco a siete metros), la continuidad del núcleo impermeable hasta la coronación, la instalación de filtro y transiciones conectadas a dos drenes transversales (uno dedicado al estribo

izquierdo), un nuevo dren de pie, una berma estabilizadora desde la cota treinta y ocho metros y la reparación del enrocado con limpieza de vegetación.

4. Estabilidad en condición estática: los factores de seguridad superan los mínimos habituales, confirmando desempeño satisfactorio en operación normal.
5. Estabilidad en condición sísmica: para un sismo severo de referencia, los factores de seguridad son aceptables y los desplazamientos por el método de Newmark son despreciables; para un sismo extremo, los factores de seguridad se aproximan al borde del equilibrio, pero los desplazamientos estimados se mantienen pequeños y reparables, lo que exige monitoreo y contingencias.
6. Considerando los eventos extremos que nuestro país puede presentar debido a las anomalías del ENSO, se eleva la coronación de 47.60 a 49.10 msnm, provee un resguardo de 1.30 m, para la avenida con periodo de retorno de quinientos años y mantiene resguardo frente a la avenida máxima probable. La viabilidad constructiva con embalse en servicio: la intervención por etapas (sellos temporales, excavación controlada, filtros y drenes, rellenos por capas, geosintéticos y protección superficial) es viable bajo monitoreo en tiempo real y umbrales de parada.
7. Como se planteó en el capítulo 4, es necesario realizar una matriz de decisiones efectiva: la vinculación de niveles piezométricos, caudales y turbidez en drenes, deformaciones y factores de seguridad con escenarios operativos convierte las lecturas en acciones concretas, reduciendo el riesgo de escalamiento silencioso.
8. Preparación para emergencias hidráulicas tomados del trabajo de tesis de (Carrasco Danna; & Campuzano Holger, 2024), los resultados de modelación de rotura respaldan la necesidad de rutas de evacuación, puntos de encuentro y protocolos de aviso integrados con la operación por umbrales. Con la sección revisada (núcleo continuo, drenaje interno efectivo, peso estabilizador y protección superficial), la presa

puede operar con márgenes adecuados en condiciones normales y de avenidas severas; para sismo extremo, el comportamiento exige vigilancia reforzada y procedimientos de respuesta previamente establecidos.

#### **4.2. Recomendaciones**

Las recomendaciones se presentan priorizadas y orientadas a la operación segura, la intervención por etapas y la consolidación de un estándar nacional para presas de materiales sueltos. Ejecutar la solución integral de ingeniería: reconstrucción superior, continuidad del núcleo impermeable hasta coronación, filtro y transiciones granulares conectadas a dos drenes transversales, nuevo dren de pie, berma estabilizadora y reparación de enrocados con limpieza de vegetación. Poner en servicio la auscultación: instalar piezómetros, inclinómetros, control topográfico de coronación y taludes, medidores de caudal y turbidez en drenes, y acelerógrafos en coronación y cimientos para eventos sísmicos.

Operar con umbrales por escenarios: definir rangos de activación para niveles piezométricos, gradientes, caudales y turbidez, deformaciones y factores de seguridad, vinculados a acciones (vigilancia reforzada, medidas correctoras, contingencia o evacuación).

Intervención con embalse en servicio: aplicar sellos temporales, excavación controlada con maquinaria liviana, instalación de drenes y filtros por tramos, rellenos compactados por capas, integración de geosintéticos y protección superficial, con paradas automáticas ante desviaciones.

Plan de emergencias actualizado: mantener mapas de inundación, rutas de evacuación y puntos de encuentro; integrar avisos con los umbrales operativos y realizar simulacros periódicos. Verificación de parámetros geotécnicos en obra: confirmar parámetros de

resistencia bajo esfuerzos efectivos en el talud del lado del embalse mediante perforaciones, ensayos triaxiales saturados y control del índice de penetración estándar continuo.

Capacitación y roles: establecer perfiles de competencias, entrenar al personal en lectura de instrumentación y respuesta por escenarios y realizar auditorías externas de seguridad a intervalos regulares.

Mirar hacia un estándar nacional es menester promover un protocolo unificado para presas de materiales sueltos que integre instrumentación obligatoria, umbrales, matriz de decisiones, intervención por etapas, gestión de emergencias y mecanismos de financiamiento y actualización periódica, al menos tener un inventario en las páginas de los organismos que deberían proporcionar información sobre las estructuras existentes en el .

## REFERENCIAS

- [1] Federal Emergency Management Agency, Federal Guidelines for Dam Safety: Earthquake Analyses and Design of Dams (FEMA P-65), 2005. [Online]. Available: [https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-08/fema\\_dam-safety\\_earthquake-analysis\\_P-65.pdf](https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-08/fema_dam-safety_earthquake-analysis_P-65.pdf)
- [2] A. Alvarado and C. Alvarado, “Néotectonique et cinématique de la déformation continentale en Equateur,” 2012. [Online]. Available: <https://theses.hal.science/tel-00870332v1>
- [3] American Society of Civil Engineers, Report Card for America’s Infrastructure: Dams, 2021. [Online]. Available: [www.infrastructurereportcard.org](http://www.infrastructurereportcard.org)
- [4] A. N. Angelakis et al., “Water Dams: From Ancient to Present Times and into the Future,” *Water*, vol. 16, no. 13, 2024, doi: 10.3390/w16131889.
- [5] Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA), 2024. [Online]. Available: <https://www.regulacionagua.gob.ec/nacional/>
- [6] R. Armas Novoa, “Criterios para diseñar presas de tierra: prioridad y secuencia,” 2002. [Online]. Available: [https://www.academia.edu/7663909/CRITERIOS\\_PARA\\_DISEÑAR\\_PRESAS\\_DE\\_TIERRA\\_PRIORIDAD\\_Y\\_SECUENCIA](https://www.academia.edu/7663909/CRITERIOS_PARA_DISEÑAR_PRESAS_DE_TIERRA_PRIORIDAD_Y_SECUENCIA)
- [7] F. Arreguín Cortés et al., *Memoria Seguridad de Presas y Cambio Climático*, 2020.
- [8] Association of State Dam Safety Officials, *Living with Dams: Know Your Risks*, 2012. [Online]. Available: [https://issuu.com/asdso/docs/livingwithdams\\_asdso2012/1?ff](https://issuu.com/asdso/docs/livingwithdams_asdso2012/1?ff)
- [9] H. Ayón, B. Zapata, and M. Fierro, *Grandes Rasgos Geomorfológicos de la Costa Ecuatoriana*, 1998.
- [10] Banco Interamericano de Desarrollo, *Análisis del Riesgo de Desastres y Cambio Climático en Proyectos de Infraestructura*. [Online]. Available: <https://cursos.iadb.org/es/indes/lisis-del-riesgo-de-desastres-y-cambio-clim-tico-en-proyectos-de-infraestructura-1>
- [11] Banco Interamericano de Desarrollo, *Perfil de Riesgo de Desastres por Evento Sísmico de Ecuador*, 2020. [Online]. Available: <http://www.iadb.org>
- [12] D. Carrasco and H. Campuzano, “Análisis de vulnerabilidad de la comuna El Azúcar por inundaciones provocadas por la rotura del dique de contención de la presa El Azúcar,” *Universidad de Guayaquil*, 2024.

- [13] C. E. Cepero, S. S. Hutsell, and D. J. Zeveney, Saving the Guajataca Dam Spillway: Emergency Actions and Interim Risk Reduction Measures (IRRM), 2020.
- [14] W. Cevallos Wong and K. Castro Suarez, “Evaluación de la estabilidad de taludes de la presa ‘El Azúcar’ mediante el método pseudoestático y Newmark de desplazamientos en condición sísmica,” Universidad de Guayaquil, 2016.
- [15] CIGB ICOLD, Internal Erosion of Existing Dams, Levees and Dikes, and Their Foundations, 2013.
- [16] COE Nacional, Resoluciones COE Nacional – 4 de octubre de 2024, 2024.
- [17] Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Ecuador: Evaluación de los efectos socioeconómicos del fenómeno El Niño en 1997–1998, 1998. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/11362/31104>
- [18] Comisión Internacional de Grandes Presas, Declaración de ICOLD sobre las Presas y el Medio Ambiente, 1997.
- [19] R. J. Contreras and I. Escuder-Bueno, “Dam Safety History and Practice: Is There Room for Improvement?” Infrastructures, vol. 8, no. 12, 2023, doi: 10.3390/infrastructures8120171.
- [20] Corporación Andina de Fomento, Memorias del Fenómeno El Niño 1997–1998: Retos y Propuestas para la Región Andina, 2000.
- [21] Corporación Andina de Fomento, El Fenómeno El Niño 1997–1998: Memorias, Retos y Soluciones, 1997.
- [22] Decreto Presidencial No. 310, 2014.
- [23] Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers, EM 1110-2-2502: Engineering and Design – Floodwalls and Other Hydraulic Retaining Walls, 2022.
- [24] Dirección de Monitoreo de Eventos Adversos, 2023. [Online]. Available: <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/reportes-de-monitoreo-de-amenazas-y-eventos-peligrosos/>
- [25] Federal Emergency Management Agency, Technical Manual: Conduits through Embankment Dams, 2005.
- [26] Ministerio de Energía y Minas and F. Rossel, “Influencia de ‘El Niño’ sobre los regímenes hidro-pluviométricos del Ecuador,” 1997.
- [27] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Guía técnica para la elaboración de planes de emergencia de balsas. Madrid, España: Centro de Publicaciones, 2012.

- [28] P. Everett W. Taylor, “Lección aprendida: Las presas de terraplén de alto y significativo peligro deben tener filtros internos y sistemas de recolección de filtraciones,” Association of State Dam Safety Officials. [Online]. Available: <https://damfailures.org/lessons-learned/internal-filter-and-seepage-collection-systems/>
- [29] Federal Emergency Management Agency, Federal Guidelines for Inundation Mapping of Flood Risks Associated with Dam Incidents and Failures, FEMA P-946, 1st ed., 2013.
- [30] Federal Emergency Management Agency, Filters for Embankment Dams: Best Practices for Design and Construction, 2011.
- [31] J. France et al., Independent Forensic Team Report: Oroville Dam Spillway Incident, 2018.
- [32] M. Fuller, “The Infamous Legacy of Upstream Tailings Dams ‘Because that’s the way we’ve always done it’,” The Mining Record, vol. 130, no. 2, 2019. [Online]. Available: [www.miningrecord.com](http://www.miningrecord.com)
- [33] Y. Glez Haramboure, O. Guedes Sosa, and S. Rodríguez Díaz, “Las fallas en presas de tierra, caso de estudio: Falla por estabilidad de taludes en función de las condiciones de drenaje,” 2017. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/321587038>
- [34] Gobierno de la República del Ecuador, Rendición de Cuentas 2021 Empresa Pública del Agua EPA EP, 2021.
- [35] W. J. Graham, The Teton Dam Failure – An Effective Warning and Evacuation, 2008.
- [36] Y. Guzel, “Correlating Measured SPT-N, Shear Wave Velocity and Liquid Limit Values in Melekli Region, Iğdır (Türkiye),” J. Adv. Res. Nat. Appl. Sci., vol. 10, no. 1, pp. 161–174, 2024, doi: 10.28979/jarnas.1393352.
- [37] E. Herbozo Alvarado, Reparación Represa “El Azúcar”, 2024.
- [38] ICOLD, Bulletin 168: Recommendations for Operation, Maintenance and Rehabilitation, 2017. [Online]. Available: <http://www.icold-cigb.org/>
- [39] Instituto Geofísico – Escuela Politécnica Nacional, “Peligro Sísmico.” [Online]. Available: <https://www.igepn.edu.ec/peligro-sismico>
- [40] International Commission on Large Dams, Bulletin 168: Recommendations for Operation, Maintenance and Rehabilitation, 2017.
- [41] A. A. Jovani et al., ICOLD Incident Database Bulletin 99 Update: Statistical Analysis of Dam Failures, 2019.
- [42] La FM, “Advierten que Hidroituango podría ser la segunda catástrofe mundial más grande de la ingeniería.”

- [43] L. Marin, “Presas del Ecuador: Introducción al estudio de su planeación y comportamiento,” *Rev. Cient. Univ. Guayaquil*, vol. 70, no. 3, 1987, doi: 10.53591/rug.v70i3.726.
- [44] Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, Peligro Sísmico Diseño Sismo Resistente – Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-15, 2014.
- [45] Ministerio de Medio Ambiente y Agua, Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego, Inventario Nacional de Presas, Bolivia 2010, 2010.
- [46] Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, Anteproyecto de Ley Orgánica de los Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamientos del Agua, 2023.
- [47] Ministerio para la Transformación Ecológica y el Reto Demográfico, Guía Técnica para la Elaboración de Planes de Emergencia de Presas, 2023.
- [48] K. A. Morin and N. M. Hutt, Internet Case Study #12: Dam Failure and Tailings Release at Aznalcóllar (Los Frailes), Spain – One Year Later, 1999.
- [49] R. Murillo, Presas de tierra y sus fallas: Earth dams and its ruptures.
- [50] Organismo Regulador de Seguridad de Presas, Más de 10 años fiscalizando la seguridad estructural y operativa de las presas, 2010. [Online]. Available: [www.orsep.gob.ar](http://www.orsep.gob.ar)
- [51] F. Pardo de Santayana and CEDEX, Las Presas de Materiales Suetos y sus Patologías, 2010.
- [52] H. A. Parra Cádenas, Desarrollos metodológicos y aplicaciones hacia el cálculo de..., Universidad Politécnica de Madrid, 2016.
- [53] D. S. V. W. S. N. T. C. A. Perera, Ageing Water Storage Infrastructure: An Emerging Global Risk, 2021.
- [54] Reglamento de Seguridad de Presas Públicas de Embalse de Agua, R.J. 272-2018-ANA, 2018.
- [55] Reglamento Ley Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua, 2015. [Online]. Available: [www.lexis.com.ec](http://www.lexis.com.ec)
- [56] R. Armas Novoa, “Criterios para diseñar presas de tierra: prioridad y secuencia,” 2002.
- [57] F. J. Sánchez Castro, Universidad Politécnica de Madrid [Geotecnia, Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno], 2007. [Online]. Available: [https://oa.upm.es/465/1/FRANCISCO\\_JAVIER\\_SANCHEZ\\_CARO.pdf](https://oa.upm.es/465/1/FRANCISCO_JAVIER_SANCHEZ_CARO.pdf)
- [58] A. Schleiss and H. Pougatsch, Les Barrages: Du projet à la mise en service, vol. 17, 2011.
- [59] Secretaría de Gestión de Riesgos, Plan de Acción ante el Fenómeno “El Niño” en Ecuador 2023–2024, 2023.

- [60] Secretaría de Gestión de Riesgos and Gobierno del Ecuador, Introducción y Alcance del Plan de Acción ante el Fenómeno “El Niño” en Ecuador, 2023.
- [61] R. Shukha and R. Baker, “Design implications of the vertical pseudo-static coefficient in slope analysis,” *Computers and Geotechnics*, vol. 35, no. 1, pp. 86–96, 2008, doi: 10.1016/j.compgeo.2007.01.005.
- [62] Y. Si, “The World’s Most Catastrophic Dam Failures: Banqiao,” 1999. [Online]. Available: <https://damfailures.org/case-study/banqiao-dam-china-1975/>
- [63] L. Souza, T. Prakash Chanekar, and G. S. Pandit, “Case Study and Forensic Investigation of Failure of Dam Above Kedarnath,” *International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. [Online]. Available: <https://www.issmge.org/publications/online-library>
- [64] L. M. Suárez, V. Diego, and S. Barrera, “Lecciones aprendidas de los incidentes y fallas en las presas de Venezuela.” [Online]. Available: [www.proyectoshidraulicos.com](http://www.proyectoshidraulicos.com)
- [65] C. Suplemento, “Año III, No. 511, Quito, martes 5 de marzo de 2024, Sumario.” [Online]. Available: [www.ambiente.gob.ec](http://www.ambiente.gob.ec)
- [66] M. Á. Toledo and R. Morán, “Dam Safety Overtopping and Geostructural Risks,” 2022. [Online]. Available: [www.mdpi.com/journal/water](http://www.mdpi.com/journal/water)
- [67] U.S. Army Corps of Engineers, Slope Stability, Engineering and Design, Engineer Manual, 2003. [Online]. Available: <http://www.usace.army.mil/inet/usace-docs/>
- [68] U.S. Army Corps of Engineers, Slope Stability, Engineer Manual EM 1110-2-1902, 2003. [Online]. Available: <http://www.usace.army.mil/inet/usace-docs/>
- [69] U.S. Army Corps of Engineers, General Design and Construction Considerations for Earth and Rock-Fill Dams, Engineer Manual, 2004. [Online]. Available: <http://www.usace.army.mil/inet/usace-docs/>
- [70] U.S. Department of Homeland Security, FEMA P-956: Living with Dams, Know Your Risks, 2013.
- [71] U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, RCEM – Reclamation Consequence Estimating Methodology Interim Draft: Dam Failure and Flood Event Case History Compilation, 2014.
- [72] U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Embankment Dams, Chapter 1: General Design Standards, Phase 4 (Final), 2011.
- [73] Y. Vázquez-Ballester and E. Beira-Fontaine, “Propuesta de pendiente de talud de presas de colas para asegurar la disminución de riesgos de desastres,” 2018.
- [74] S. G. Vick, Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams. BiTech, 1990.

[75] T. L. Wahl, Prediction of Embankment Dam Breach Parameters: A Literature Review and Needs Assessment, Dam Safety Research Report, Bureau of Reclamation Dam Safety Office, 1998.