



COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUPERFICIALES E INGENIERÍA DE RÍOS

INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA COORDINACIÓN DE HIDRÁULICA

SUBCOORDINACIÓN DE OBRAS Y EQUIPOS HIDRÁULICOS

CONVENIO DE COLABORACIÓN NO: 2016-B08-B08-GC-09-RF-AD-A-CC-0001

**“ESTUDIOS ESPECIALIZADOS A CINCO PRESAS DE
ALMACENAMIENTO, DERIVADORAS Y BORDOS EN ALTO
RIESGO DEL NORESTE DEL PAÍS, AÑO 2016”**

Octubre 2016



NOMBRE OFICIAL: LA ESTRELLA

NOMBRE COMÚN: LA ESTRELLA



ID 2617

MUNICIPIO DE LINARES
ESTADO DE NUEVO LEÓN

INFORME FINAL



ÍNDICE DE CONTENIDO

INGENIERÍA BÁSICA.....	1
ANTECEDENTES.....	1
OBJETIVO.....	1
ALCANCE	2
METODOLOGÍA.....	2
ACTIVIDADES	2
I. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN	2
I.1 Datos generales.....	2
I.2 Inspecciones reportadas en el SISP.....	5
II. VISITAS DE INSPECCIÓN.....	7
II.1 CONDICIONES DURANTE LA VISITA.....	7
II.2 Embalse	8
II.3 Cortina.....	9
II.4 Obra de excedencias.....	17
II.5 Obra de toma	20
II.6 Cauce	22
III. TRABAJOS DE CAMPO Y LABORATORIO.....	24
III.1 Levantamiento topográfico de la cortina de la presa.....	24
III.2 Levantamiento topográfico del cauce aguas abajo	30
III.3 Exploración, muestreo y pruebas de laboratorio	35
IV. ESTUDIOS DE PELIGRO SÍSMICO.....	53
V. REVISIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA	59
V.1 Actualización hidrológica.....	59
V.2 Características fisiográficas de la cuenca	59
V.2.1 Delimitación de la cuenca.....	60
V.2.2 Longitud, pendiente del cauce principal y tiempo de concentración.....	61
V.2.3 Uso y tipo de suelo, número de curva y coeficiente de escurrimiento	64
V.3 Hidrometría y climatología.....	68
V.3.1 Análisis de información hidrométrica	68
V.3.2 Análisis de información climatológica	68
V.4 Precipitación para diferentes periodos de retorno	82
V.4.1 Precipitación media para diferentes duraciones y periodos de retorno	84
V.5 Hietograma de Diseño.....	89
V.6 Cálculo de avenidas	90
V.6.1 Cálculo de avenidas con información hidrométrica	90
V.6.2 Cálculo de avenidas con información climatológica	91
V.6.3 Hidrogramas de entrada aplicando el software HEC-HMS.....	93
V.6.4 Tránsito de la avenida.....	94
VI. REVISIÓN DE LA ESTABILIDAD DE LA CORTINA.....	98

VI.1	Recopilación y revisión de la información disponible.....	98
VI.2	Descripción estructural de la cortina.....	99
VI.3	Geología del sitio.....	100
VI.4	Parámetros para análisis en condiciones extremas.....	101
VI.5	Modelo geométrico de la cortina.....	103
VI.6	Marco de referencia para el análisis estructural.....	106
VI.7	Integración de la información del análisis de estabilidad.....	110
VI.8	Problemas de seguridad geotécnica y estructural de la cortina.....	117
VI.9	Análisis del flujo de agua en la cortina.....	123
VI.10	Análisis de estabilidad de la cortina.....	142
VI.11	Resumen de resultados de estabilidad de la cortina.....	167
VI.12	Dictamen de seguridad geotécnica y estructural.....	168
VII.	REVISIÓN FUNCIONAL Y OPERACIONAL.....	169
VII.1	Revisión del vertedor de excedencias.....	169
VII.2	Revisión de la obra de toma.....	172
VII.3	Revisión del vaso, el cauce y los accesos.....	175
VIII.	DELIMITACIÓN DE ZONAS DE PELIGRO POR DESCARGAS CONTROLADAS Y NO CONTROLADAS.....	179
VIII.1	Modelo digital de elevaciones del terreno.....	179
VIII.2	Coeficiente de rugosidad.....	180
VIII.3	Modelación bidimensional con FLO- 2D.....	181
VIII.3.1	Bases teóricas del modelo hidrodinámico bidimensional.....	181
VIII.3.2	Delimitación de la zona federal.....	184
VIII.3.3	Delimitación de zonas de peligro para una descarga controlada.....	185
IX.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	187
IX.1	Conclusiones.....	187
IX.2	Recomendaciones.....	189
IX.2.1	Conservación de la cortina.....	189
IX.2.2	Mantenimiento del vertedor.....	189
IX.2.3	Rehabilitación de la obra de toma.....	190
	REFERENCIAS.....	191
	ANEXOS.....	191
	ANEXO 1 INFORMACIÓN RECOPIADA.....	191
	ANEXO 2 INFORME DE INSPECCIÓN.....	191
	ANEXO 2.1 ÁLBUM FOTOGRÁFICO.....	191
	ANEXO 3 RESULTADOS DE CAMPO Y LABORATORIO.....	191
	ANEXO 3.1 TOPOGRAFÍA DE LA CORTINA.....	191
	ANEXO 3.2 TOPOGRAFÍA DE CAUCE AGUAS ABAJO.....	191
	ANEXO 3.3 EXPLORACIÓN DE CAMPO Y LABORATORIO.....	191
	ANEXO 4 ANÁLISIS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS.....	191
	ANEXO 5 ANÁLISIS DE PELIGRO SÍSMICO.....	191

ANEXO 6 REVISIÓN DE ESTABILIDAD DE LA CORTINA.....	191
ANEXO 7 REVISIÓN FUNCIONAL Y OPERACIONAL DE LA PRESA	191
ANEXO 8 ZONAS DE PELIGRO.....	191
ANEXO 9 MEMORIAS DE CÁLCULO DE LOS ANÁLISIS ESTADÍSTICOS.....	191
ANEXO 10 DISEÑO CONCEPTUAL DE MITIGACIÓN DE RIESGOS.....	191



INGENIERÍA BÁSICA

Antecedentes

En el marco del Pacto por México en el compromiso No. 51 de la Administración Pública Federal 2012 – 2018, la Gerencia del Consultivo Técnico (GCT) de la Subdirección General Técnica (SGT) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Órgano Desconcentrado de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), del Gobierno Federal de los Estados Unidos Mexicanos, solicitó al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) la participación de expertos en seguridad de presas para brindar asistencia técnica, con la finalidad de efectuar trabajos especializados en apoyo a la GCT, para determinar las opciones de solución que permitan reducir el nivel de riesgo que guardan las 8 presas clasificadas como de “**alto riesgo**”, mediante el estudio de las condiciones que conducen a la situación de peligro o mal funcionamiento de las presas, con base en la inspección *in situ* y de analizar las condiciones de seguridad estructural, funcional y operativa de la cortina y las obras auxiliares de las presas. Con base en este trabajo que es encomendado al IMTA, se podrá desarrollar por parte de la CONAGUA o de los usuarios, el Proyecto Ejecutivo necesario para la contratación de los trabajos que permitan la rehabilitación de las estructuras de la presa para con ello reducir el nivel de riesgo.

Para estos trabajos especializados, el IMTA desarrolló los “**Estudios especializados a cinco presas de almacenamiento, derivadoras y bordos en alto riesgo del Noreste del país, año 2016**”, con el fin de conocer el estado físico, funcional y operativo de los componentes de las presas, así como de cualquier otra condición que pueda representar peligro de afectación a la propia presa, a la población, sus bienes o a la infraestructura ubicada aguas abajo de la cortina, con base en inspecciones directas a las presas, en trabajos de ingeniería especializada mediante análisis hidrológicos, estructurales, geotécnicos, hidráulicos y, en su caso, de otros campos como mecánicos, electromecánicos o ambientales.

Objetivo

Determinar la probabilidad de falla, las consecuencias hacia aguas abajo y la evaluación del riesgo correspondiente para los modos de falla.

Tabla 0.1 Datos de la presa

ID	Entidad Federativa	Nombre	Altura máxima cortina (m)	Volumen al NAMO (hm ³)
2617	Nuevo León	La Estrella	19.4	2.68

Alcance

Los estudios se enfocarán en evaluar el riesgo y proponer alternativas de adecuación para la reducción del mismo en el caso de que éste sea inaceptable. Además del estudio de evaluación del riesgo, se deberá entregar el anteproyecto de una de las adecuaciones propuestas en las presas para atenuar el riesgo.

Para alcanzar el objetivo del trabajo, es necesario considerar cuatro aspectos fundamentales de la Ingeniería en Presas y la Seguridad de Presas:

- a) Recopilación de información en archivos y mediante inspecciones físicas, topografía, batimetría y estudios de campo especializados de la obra de cabeza.
- b) Análisis determinista de Ingeniería en Presas.
- c) Análisis probabilista de la seguridad y evaluación del riesgo.
- d) Propuesta de opciones de solución para reducir el peligro y riesgo.

Metodología

A continuación se describe la metodología que se utilizará para la prestación del servicio, describiendo clara y detalladamente las acciones a realizar.

Para la presa considerada en alto riesgo, se realizarán las siguientes actividades:

Actividades

I. RECOPILOCIÓN DE INFORMACIÓN

I.1 Datos generales

La presa está ubicada geográficamente en las coordenadas 24° 56' 43.20" Latitud Norte y 99° 47' 22.90" Longitud Oeste, en la Región Hidrológica N° 25 San Fernando – Soto la Marina. Se localiza partiendo de Monterrey N.L. se dirige uno por la carretera federal No.85 con dirección a Linares N.L. en el kilómetro 177 de la carretera se ubica una desviación con rumbo (Sur-Oeste) en camino de terracería, que nos lleva al ejido La Estrella ubicada a 8 km de la carretera, y ahí se ubica la presa.

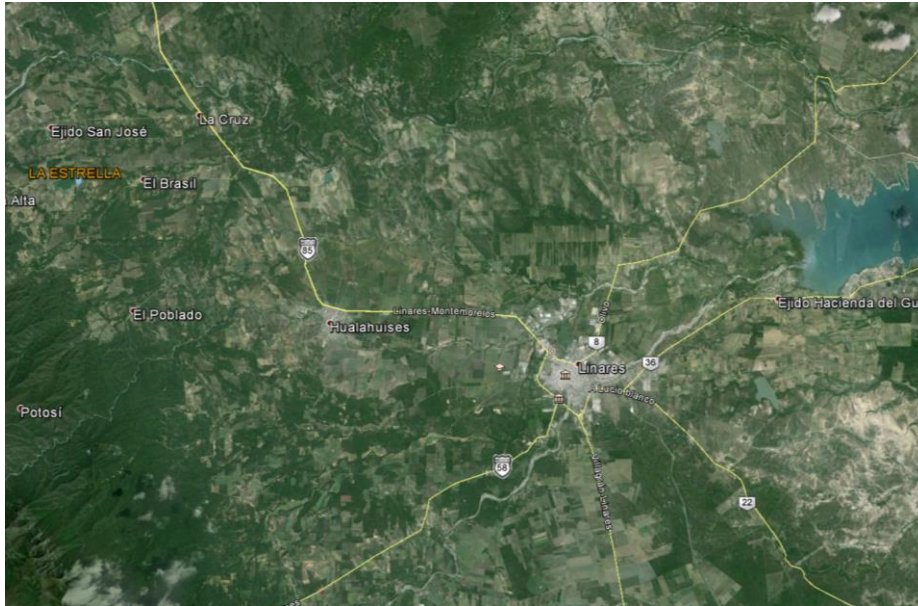


Figura I.1 Ubicación presa La Estrella.

La presa La Estrella, fue construida por la Secretaría de Recursos Hidráulicos en 1969, tiene una cortina homogénea de tierra, el talud aguas arriba está protegido con una chapa de enrocamiento y el talud aguas abajo con conglomerado Reynosa, ambos con inclinación 2h:1v, su propósito original es para riego, con una capacidad de almacenamiento de 3.00 hm^3 a la elevación 518.90 m . La corona está a la elevación 522.00 msnm , con ancho de 4.00 m , longitud de 907.50 m y altura máxima de 19.40 m . Las descargas eventuales se realizan por la obra de excedencias tipo lavadero a la cota 518.90 m localizado en el extremo derecho de la cortina, con ancho de cresta de 100.00 m de longitud.

Las características generales de la presa se indican en la Tabla I.1.

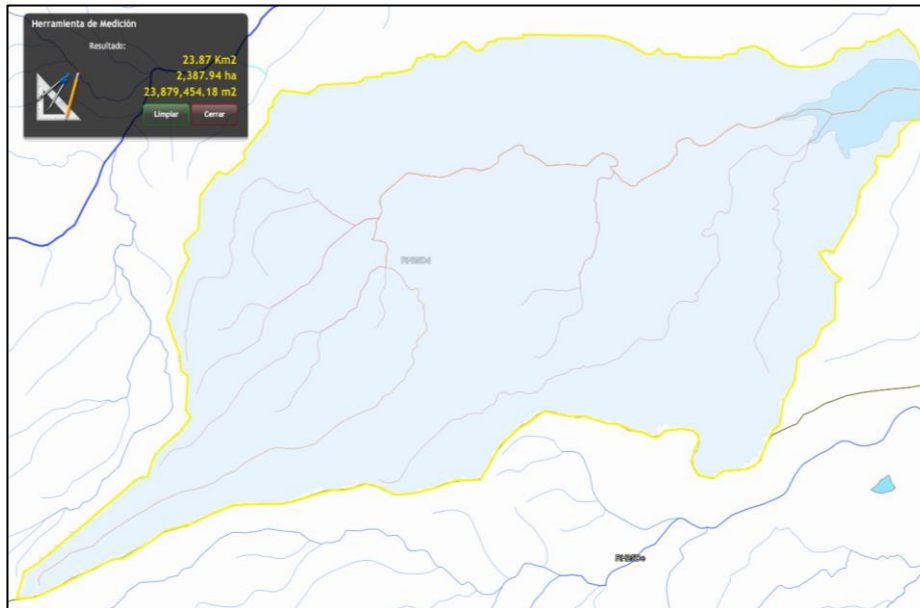


Figura I.2 Vista de la cuenca de la presa La Estrella.

Tabla I.1 Características generales de la presa La Estrella.

Tipo de cortina	flexible
Material de la cortina	Homogénea con protección de enrocamiento
Longitud de la corona	907.50 m
Ancho de la corona	4.00 m
Altura máxima desde el desplante	19.40 m
Altura sobre el cauce	19.00 m
Talud de aguas arriba	2h:1v
Talud de aguas abajo	2h:1v
Capacidad al NAME	4.70 hm ³
Capacidad al NAMO	3.00 hm ³
Tipo de obra de excedencias	Lavadero
Longitud total del vertedor	100.00 m
Gasto de diseño de la obra de excedencias	540.00 m ³ /s
Tipo de obra de toma	Tubería a presión
Material y dimensiones	Tubería de acero 0.61m de diámetro
Gasto de diseño de la obra de toma	0.6 m ³ /s
Elevación de la corona	522.00 msnm
Bordo libre	2.20 m
Elevación del NAME	521.10 msnm
Elevación del NAMO	518.90 msnm
Elevación del NAMINO	512.00 msnm

Fuente: Información tomada del SISP-CONAGUA

Se inició la recopilación de información bibliográfica en diversas dependencias tanto académicas e institucionales así de como de entidades en el tema del agua para el estudio de la presa La Estrella, para ello se desarrolló el siguiente procedimiento que a continuación se describe.

Parte básica y fundamental de la presa en estudio, es la información de diseño y construcción, los objetivos de la obra, eventos históricos importantes principalmente aquellos que han puesto en riesgo la estructura, así como la obtención de la información geográfica, topográfica, hidrológica, cartográfica, batimétrica, relieve, geológica, y finalmente, los datos de escurrimiento y precipitación. Estos serán los elementos que ayudarán a evaluar el riesgo de la obra.

1.2 Inspecciones reportadas en el SISP

A continuación se presenta el listado de la información revisada y las conclusiones de dichos documentos:

1. SISP (2010). Informe de Inspección de Seguridad de Presas N-I. Instituto del Agua de Nuevo León. Fecha 12 de octubre de 2010. Archivo: 26170619R06M1010.doc.

Para el caso de la presa La Estrella, la obra se encuentra en condiciones de riesgo Alto. La falla es muy probable, y en caso de suscitarse, las afectaciones podrían incluir pérdidas humanas.

- Dar mantenimiento al bordo de la cortina, colocando material para reforzar la estructura.
- Desazolvar el vaso de la presa.
- Retiro de vegetación (matorrales y árboles) en ambos taludes del bordo de la cortina.
- Dar mantenimiento y reactivar la obra de toma existente que se encuentra clausurada.

2. SISP (2011). Informe de Inspección de Seguridad de Presas N-I. Gerencia del Consultivo Técnico y El Organismo de Cuenca Río Bravo. Fecha 27 de mayo de 2011. Archivo 26170619CT5M1105.pdf.

Personal de la Gerencia del Consultivo Técnico y El Organismo de Cuenca Río Bravo realizaron la inspección el día 27 de mayo de 2011 concluyendo lo siguiente:

Por la deficiente colocación del material de relleno en el sitio de la erosión y falta de protección superficial en el talud en aguas abajo, esa parte de la cortina puede volver a dañarse en caso de ocurrir lluvias intensas como las del ciclón Alex, por lo

que por la presencia del poblado inmediatamente aguas abajo la presa, ésta debe considerarse en riesgo alto.

3. SISP (2013). Informe de Inspección de Seguridad de Presas N-I. Gerencia del Consultivo Técnico y El Organismo de Cuenca Río Bravo. Fecha 13 de febrero de 2014. Archivo 26170619CT5M1402.pdf.

Personal de la Gerencia del Consultivo Técnico y El Organismo de Cuenca Río Bravo realizaron la inspección el día 13 de febrero de 2014 concluyendo que: La presa se encuentra en riesgo hidrológico y funcional debido a que no se extrae el agua en forma sistemática para riego y esta condición ocasiona almacenamientos mayores que los normales.

La restitución de la erosión principal de la cortina con material arcilloso compactado redujo la posibilidad de rotura de la cortina en ese sitio. Sin embargo, la presencia de oquedades, vegetación excesiva y zonas adicionales de erosión incipiente en el cuerpo de la cortina son factores que aumentan la vulnerabilidad de la obra.

Las condiciones observadas en la presa después de la restitución de la erosión principal en el talud de aguas abajo de la cortina confirman su vulnerabilidad, por lo cual debe rehabilitarse adecuadamente la cortina y obra de toma.

Existe población aguas abajo de la cortina que resultaría afectada en caso de una eventual rotura de la misma.

II. VISITAS DE INSPECCIÓN

II.1 CONDICIONES DURANTE LA VISITA

La visita se realizó el 22 de septiembre de 2016, con cielo despejado y soleado, participando ingenieros por parte del IMTA, acompañados por el ingeniero de la Dirección Local de CONAGUA en Torreón, Coahuila. La visita inició con un recorrido por toda la presa, con el fin de obtener un panorama general de su estado y para conocer la ubicación de sus distintas estructuras, posteriormente se revisaron cada uno de los elementos que conforman la estructura, con los hallazgos que a continuación se describen.



Fotografía II.1. Panorámica de la presa La Estrella.

II.2 Embalse

El día de la visita el nivel del embalse se encontró en la cota de 532.58 *msnm*. El agua se apreció casi transparente lo que permitió visualizar peces que habitan el embalse. No se detectaron restos de basura, ni malos olores, ni vegetación acuática. Solo se observó una especie de espuma en las orillas del embalse en las cercanías al vertedor, producto muy posiblemente de restos de detergente por las actividades de las personas que habitan alrededor o visitan el embalse y que deben monitorearse para evitar que se genere a futuro un problema de tipo ambiental,



Fotografía II.2 Panorámica del embalse tomada desde la cortina.



Fotografía II.3 Embalse desde margen izquierda.



Fotografía II.4 Aspecto del agua del embalse.



Fotografía II.5 Espuma en las orillas del embalse.

Durante la visita se midió también la profundidad del azolve al pie del talud aguas arriba, encontrándose a una profundidad de aproximadamente 15.00 *m* respecto al nivel de la corona. De acuerdo con el estudio topobatimétrico, la profundidad máxima del embalse el día de la inspección fue de un poco más de 10 metros, aproximadamente 2.3 *m* por debajo de la cresta del vertedor.

Esta presa se localiza en una depresión topográfica en una zona sensiblemente plana, por lo que no está confinada por litorales o cerros; de hecho, el embalse de la presa está rodeado de predios de uso agrícola.

II.3 Cortina

La cortina se ubica a pocos metros de la carretera estatal que comunica los ejidos La Estrella y Loma Alta, el primero ubicado frente a la cortina y el segundo, en la parte posterior del embalse. El eje de la cortina en planta muestra una zona curvada en la margen izquierda, que cierra con la topografía del terreno natural; por el lado derecho la cortina remata con un muro de mampostería, donde comienza el vertedor. De acuerdo con los trabajos de topografía realizados, la longitud de la presa es de aproximadamente 889 m.



Fotografía II.6 Panorámica de la presa desde margen derecha.



Fotografía II.7 Aspecto de la corona.

La cortina es homogénea de tierra y actualmente se encuentra totalmente invadida por arbustos, cactáceas y árboles de dimensiones considerables (huizaches y mezquites, principalmente), cuya eliminación representaría prácticamente la reconstrucción de la cortina. El ancho de la corona es de aproximadamente 4 m y sobre ella se detectaron algunas oquedades o dolinas, de dimensiones de hasta 2 m de largo por 0.5 m de ancho, que probablemente se deben a la presencia de roedores y que se agravan con los escurrimientos y por el tipo de material presente. Estas oquedades tienen profundidades de hasta 0.4 m y de acuerdo con el ingeniero de CONAGUA que acompañó la visita, muchos de ellos han sido tapados y los que se detectaron en la visita son recientes, manifestando que esta situación se ha presentado desde hace muchos años atrás. En la revisión documental se constató que en el informe de inspección más viejo, que data de octubre del 2010, ya se reportan estos agujeros; se comenta también que tanto la corona como el talud

aguas abajo originalmente se protegieron con una capa de material gravo arenoso, denominado material Reynosa, de la que actualmente se aprecian restos. Se observaron también algunas deformaciones y baches sobre la corona generada principalmente por la rodada de automotores, así como rasgos de erosión en los hombros por el paso del ganado vacuno hacia el embalse.



Fotografía II.8 Oquedad sobre la corona.



Fotografía II.9 Agujeros o dolinas sobre la corona.



Fotografía II.10 Deformaciones de la corona por el paso de vehículos automotores.



Fotografía II.11 Baches sobre la corona.

El talud aguas arriba tiene una pendiente 2H:1V y está protegido por una chapa de enrocamiento, que se encontró corrido en algunas zonas debido a la presencia de árboles y por caminos sobre este talud para el acceso al embalse, pero en términos generales se aprecia en buen estado. En la parte central se encontró la escala para medir el nivel del embalse, en estado deteriorado.



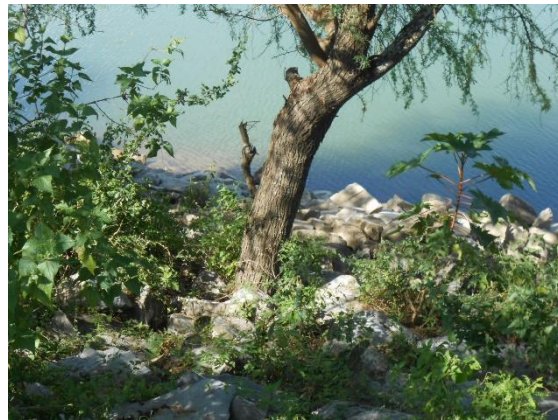
Fotografía II.12 Aspecto del enrocamiento de protección del talud aguas arriba.



Fotografía II.13 Camino sobre el taludaguas arriba, en donde se ha quitado el enrocamiento.



Fotografía II.14 Escala sobre el taludaguas arriba para medir el nivel del embalse .



Fotografía II.15 Árbol de mezquite sobre el talud aguas arriba.

El talud aguas abajo también fue construido con pendiente 2H:1V y actualmente se aprecia con excesiva vegetación arbustiva y con árboles de dimensiones considerables, sobre todo en la parte del extremo derecho donde incluso, se ha deslindado toda la zona con cercas construidas a base de postes de madera y alambre de púas que impiden el acceso a dicha parte del talud. Se detectaron también sobre el talud postes del tendido eléctrico entre los árboles y arbustos. Al pie del talud corre un camino de terracería sobre el que circulan vehículos automotores, que en cierta parte se apreció muy deformado y con baches, que contrastaba con el resto de la terracería en buen estado. Esta zona coincide con la ubicación del cauce original y al frente, a pocos metros de la cortina, se hallaron lagunas que corresponden a filtraciones por la cimentación, ya que sobre la cortina

no se tienen reportadas filtraciones y durante la visita no fue posible acceder al talud debido a la cerca y espesa vegetación.



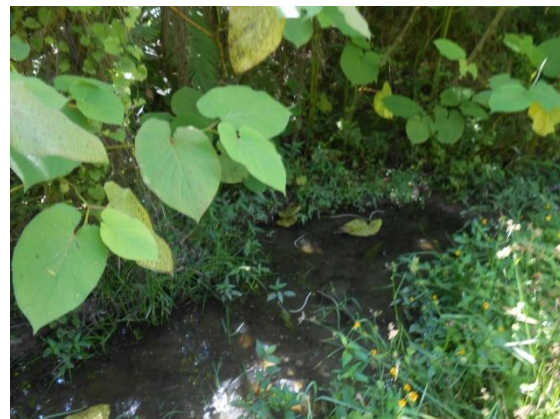
Fotografía II.16 Aspecto del talud aguas abajo, en el extremo izquierda de la cortina.



Fotografía II.17 Postes del tendido eléctrico sobre el talud aguas arriba.



Fotografía II.18 Zona deformada y con baches del camino de terracería al pie del talud.



Fotografía II.19 Laguna al pie del talud aguas abajo.

Asimismo, en una imagen satelital tomada de Google Earth[®], se aprecia una laguna de aproximadamente 1500 m², ubicada a 200 m de la cortina. De acuerdo con el ingeniero de la CONAGUA, estas filtraciones existen desde hace mucho tiempo y no han aumentado su volumen ni se han observado arrastre de finos, que indicaran un problema de erosión interna, sin embargo, no se tienen reportes de estas filtraciones en los informes de inspección anteriores. En la laguna detectada durante la visita, tampoco se apreció presencia de material fino.



Figura II.1 Ubicación de lagunas al pie de la cortina.

En la parte del extremo izquierdo, en las proximidades a la parte curva de la cortina, se ubica frente a la presa el ejido La Estrella, conformado por casas habitación de una sola planta, construidas rústicamente a base de maderas con techos de lámina y algunas con ladrillos y castillos y losa de concreto.



Figura II.2 Ubicación del ejido La Estrella al pie de la cortina, en el extremo izquierdo.

Este hecho ha generado que, al pie del talud aguas abajo de la cortina en esa zona, se ubiquen algunas edificaciones rústicas que se utilizan como caballerizas y corrales y en donde también se estacionan las plataformas para transportar a los caballos. Se observó también sobre el talud aguas abajo, un cerdo amarrado a un árbol que ha deteriorado toda la zona por los huecos que el animal ha hecho sobre el material Reynosa, dejando expuesto el material de la cortina a la erosión por los escurrimientos. Además de lo anterior se observaron también cortes sobre dicho talud que se utilizan como paso para las personas, que también han deteriorado la cortina.



Fotografía II.20 Corrales y caballerizas al pie del talud aguas abajo.



Fotografía II.21 Cerdo amarrado a un árbol sobre el talud aguas abajo.



Fotografía II.22 Material del talud aguas abajo expuesto y erosionado.



Fotografía II.23 Corte sobre el talud aguas abajo, para el paso de personas.

En ese mismo extremo, se realizó un corte para la subida de los vehículos automotores a la corona y para el paso hacia el embalse sobre todo en los fines de semana, cuando asisten visitantes a la presa. Lo anterior ha generado que se

deteriore, además de los taludes, la corona que no fue diseñada para la circulación de vehículos. Esta zona es susceptible de erosión por los escurrimientos pluviales, por lo que se recomienda rehabilitar e impedir el paso de los vehículos, que pueden acceder al embalse por la carretera, algunos metros más delante de la cortina.



Fotografía II.24 Corte para subir a la corona y para pasar al embalse.



Fotografía II.25 Aspecto del talud aguas arriba por donde bajan los autos al embalse.

Un aspecto muy importante que decidió tratarse específicamente en este informe, se refiere a la zona de la cortina que se erosionó por las intensas lluvias del huracán Alex en julio del 2010. Esta zona se ubica en la parte alta de la cortina, alineada con el cruce de la obra de toma y afectó la corona en una longitud de 10 m y el talud aguas abajo hasta 2 m por debajo del nivel de la corona. La zona fue reparada de inmediato mediante la restitución del material perdido con material arcilloso compactado.



Fotografía II.26 Aspecto de la erosión del talud aguas abajo ocurrida en julio de 2010.



Fotografía II.27 Aspecto de la corona en la zona reparada, foto del 2010.

Durante la visita de inspección se revisó la parte reparada y se observó que se encuentra estable, sin grietas ni rasgos de erosión, aunque no está cubierta con vegetación por lo que está expuesta a la acción directa de los escurrimientos pluviales, sin embargo se puede decir que está en buen estado en términos generales. Cabe mencionar que esta erosión, asociada al hecho de que el ejido La Estrella se encuentra ubicada frente a la cortina, hizo que la presa se considerara como de riesgo alto, por los daños que causaría ante una eventual rotura de la misma.



Fotografía II.28 Aspecto actual del talud aguas abajo en la zona reparada.



Fotografía II.29 Zona reparada tomada desde la salida de la obra de toma.



Fotografía II.30 Detalle del material en la zona reparada.



Fotografía II.31 Detalle del material en la zona reparada.

II.4 Obra de excedencias

El vertedor es de tipo lavadero, de aproximadamente 107 m de longitud y se ubica en el extremo derecho de la cortina, confinado entre un muro de mampostería en el lado izquierdo que sirve de apoyo a la cortina y remata por el lado derecho contra una pequeña ladera que fue cortada para ubicar un muro de mampostería.



Fotografía II.32 Panorámica del vertedor tipo lavadero desde el muro izquierdo.



Fotografía II.33 Canal de llamada del vertedor.

El vertedor cuenta con una sección de control formado por un espigón de concreto de 0.85 m de ancho, que se observó con el desgaste propio de sus casi 50 años de operación, pero en buen estado en términos generales. El vertedor se ubica sobre lutitas y margas finamente estratificadas que definen la formación Méndez, mismas que se observaron con rasgos mínimos de erosión y que no representan ningún problema para el funcionamiento del vertedor. Se observó también a unos metros aguas abajo de la sección de control algunos arbustos y ramas que, por su tamaño, no representan obstrucción alguna las descargas.



Fotografía II.34 Espigón de concreto en la sección de control del vertedor.



Fotografía II.35 Aspecto del terreno aguas abajo de la sección de control.



Fotografía II.36 Aspecto de las lutitas y margas finamente estratificadas (formación Méndez).



Fotografía II.37 Aspecto del terreno a 75 m de la sección de control del vertedor.

El muro de mampostería del lado izquierdo, que también sirve como respaldo de la cortina, se encontró con cierto nivel de deterioro, con algunas piezas de mampostería de la parte superior dislocadas, pero estable, sin grietas ni rasgos de asentamientos o desplomes, solo se recomienda eliminar los árboles ubicados en la parte posterior del muro cuyas raíces pueden afectarlo.



Fotografía II.38 Panorámica del muro izquierdo del vertedor.



Fotografía II.39 Zona de la mampostería deteriorada en la parte superior.

El muro del lado derecho se alojó en un corte que se realizó a una pequeña ladera. En términos generales el muro se encuentra en buen estado sin grietas ni rasgos de inestabilidad. Sin embargo, en la zona inmediatamente aguas abajo del muro, se observaron sobre la ladera rasgos de erosión que sin embargo no se consideran peligrosos para el muro o el funcionamiento del vertedor, pero que se recomienda darle seguimiento.



Fotografía II.40 Panorámica del muro izquierdo del vertedor.



Fotografía II.41 Rasgos de erosión sobre la ladera derecha .

II.5 Obra de toma

La obra de toma es de tipo tubería a presión y está formada por un ducto de acero de 0.61 m (24 pulgadas) de diámetro y se localiza a 440 m del extremo izquierdo de la cortina. Esta obra de toma está fuera de servicio desde hace más de 20 años, debido a, según la autoridad ejidal, la emigración de la gente joven que ha dejado los terrenos ociosos y a la falta de organización de la gente que todavía siembra y que, de acuerdo con informes de inspección anteriores, extrae el agua de riego por medio de pozos.



Fotografía II.42 Estructura de salida de la obra de toma, desde la corona de la presa.



Fotografía II.43 Caja de válvulas de la obra de toma.

La entrada de la obra de toma no se pudo apreciar debido al nivel del embalse. La salida está formada por una estructura de mampostería al pie de la cortina, en cuyo interior se ubica una caja de válvulas con rejilla de protección. La caja se encuentra en evidente estado de abandono, inundada y la rejilla metálica se encuentra oxidada. En su interior se ubican dos válvulas de compuerta, una de emergencia y otra de servicio, que también están fuera de operación y con evidente deterioro por falta de mantenimiento.

La obra de toma descarga a un canal de distribución de sección trapezoidal, que se observó azolvado, con excesiva vegetación formada por tule y arbustos. Este canal atraviesa el ejido La Estrella y algunos metros delante de la descarga se observó que ha sido obstruido e invadido por los usuarios, que serían afectados en el caso de algún eventual desfogue. Se recomienda realizar un análisis para evaluar la posibilidad de rehabilitación de la obra de toma o en su caso, realizar las obras necesarias para su adecuado sellado. Cabe mencionar que esta estructura es el único medio para bajar el nivel de la presa ante una eventual emergencia.



Fotografía II.44 Válvula tipo compuerta, de emergencia.



Fotografía II.45 Válvulas tipo compuerta, de servicio.



Fotografía II.46 Canal de distribución aguas abajo de la caja de válvulas.



Fotografía II.47 Canal obstruido e invadido por lugareños.

II.6 Cauce

El cauce aguas abajo de la presa corresponde al arroyo El Chocolate, que pasa aledaño al ejido La Estrella, que se ubica inmediatamente aguas abajo de la presa y sigue por aproximadamente 4 km hasta el ejido El Brasil, que se ubica en su margen derecha. Posteriormente el cauce recorre por 5 km y cruza con la carretera Federal 85, Linares-Montemorelos y sigue por 3 km hasta desembocar en el río Potosí o Cabezones.

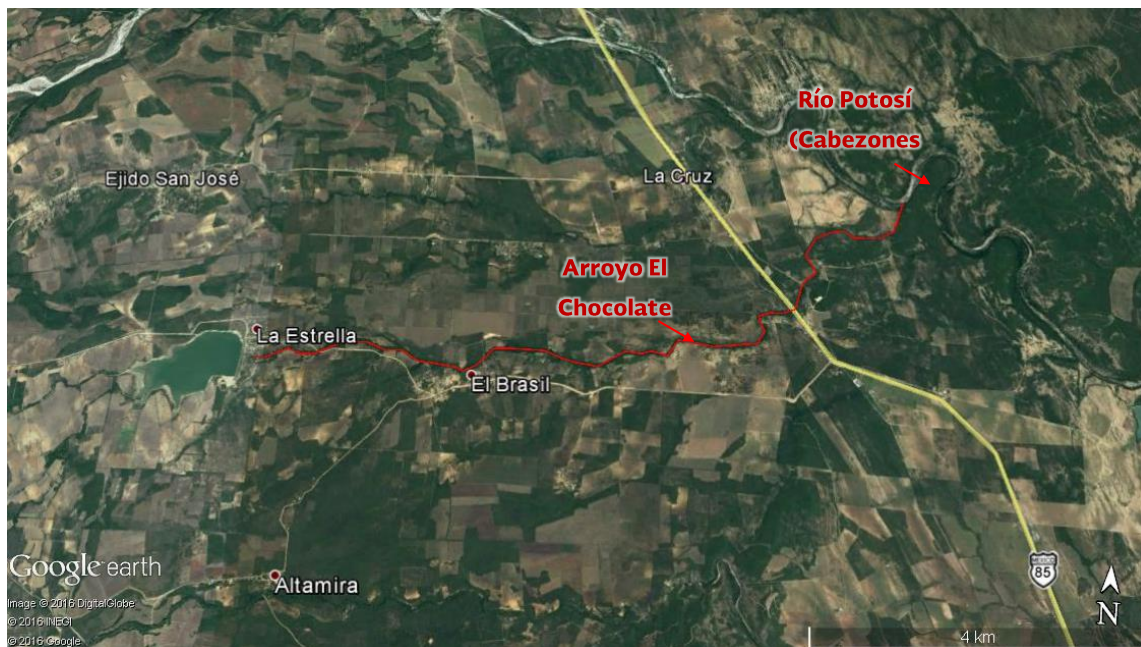


Figura II.3 Cauce aguas abajo de la presa La Estrella.

El ejido La Estrella cuenta con 269 habitantes y 80 viviendas mientras que el ejido El Brasil cuenta con 164 habitantes distribuidos en 58 viviendas, de acuerdo con el censo del 2010 del INEGI, las cuales en su mayor parte son de una planta, construidas con madera y techos de lámina y algunas con ladrillo y losa de concreto. Ambas comunidades cuentan con servicios de energía eléctrica y no se tienen reportados problemas de inundación debido a que se encuentra a una elevación mayor que la del cauce.



Fotografía II.48 Cauce aguas abajo en el cadenamiento 0+310.



Fotografía II.49 Puente El Chocolate en el cadenamiento 1+450.



Fotografía II.50 Cauce aguas abajo en el cadenamiento 2+000.



Fotografía II.51 Cauce aguas abajo en el cadenamiento 3+730, ejido El Brasil.

III. TRABAJOS DE CAMPO Y LABORATORIO

III.1 Levantamiento topográfico de la cortina de la presa

Para las actividades del levantamiento topográfico de la cortina de la presa La Estrella, se utilizaron los más modernos sistemas topográficos satelitales RTK GPS, de marca TOPCON. Los equipos RTK GPS TOPCON GR-5 utilizados para hacer la topografía de la cortina y estructuras complementarias, son capaces de ligarse a la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA), que se define como el conjunto de estaciones de monitoreo continuo de datos del GPS, distribuidas estratégicamente en el territorio nacional, que materializan el Sistema Geodésico Nacional en su vertiente horizontal, y proporcionan servicios de posicionamiento geodésico a los usuarios mediante datos en línea y coordenadas en el marco oficial. Cada estación de la RGNA a que se liga un levantamiento geodésico desempeña un papel activo, al funcionar como puntos de referencia para determinar las diferencias entre sus posiciones altamente precisas y las posiciones de nuevos puntos derivadas directamente de los datos transmitidos por el sistema de satélites de navegación global (GNSS); así, mediante la técnica del posicionamiento diferencial, la RGNA ofrece información geodésica acorde a las altas precisiones que proporcionan los equipos del sistema de posicionamiento global bajando los datos a través de un programa llamado TOPCON TOOL, con esto se generan estaciones semejantes a los de la Red Geodésica Nacional Pasiva (RGNP) en cualquier lugar que se requiera, así que puede iniciarse el levantamiento ya sea en una estación de la RGNP o con una generada por el GPS con una marca puesta a tal efecto. A partir de aquí se puede usar el equipo que se tenga disponible ya sea GPS, estación total o teodolito.

Con el GPS se pueden propagar puntos con coordenadas x, y, z a varios kilómetros manteniendo una gran precisión los cuales se pueden usar como base para seguir propagando otros más. Los equipos RTK utilizados permitieron el levantamiento simple, real, efectivo y rápido de un gran número de puntos para construir las poligonales y de éstas trazar las curvas de nivel con gran resolución.

Para los trabajos en campo se utilizaron hasta cuatro equipos RTK GPS marca Topcon modelo GR-5, utilizando uno de ellos como base. Las características técnicas de estos equipos se presentan a continuación.

- Precisión RTK: Horizontal: $10mm + 1.0ppm$ y Vertical: $15mm + 1.0ppm$
- Precisión estática: Horizontal: $3mm + 0.5ppm$ y Vertical: $5mm + 0.5ppm$
- Recepción de Señales: GPS, GLONASS, QZSS, SBAS, Galileo and Beidou (BDS).
- Número de canales: 226 Channel Vanguard Technology con canales universales de seguimiento.
- Tipo de antena: Integrated Fence Antenna.

- Comunicaciones: Radio integrado UHF TX/RX, o 915MHz Spread Spectrum; Base Radio Output 1.0W, user selectable; comunicaciones por celular integrado HSPA o CDMA; comunicaciones I/O de clase 2 Bluetooth®; así como USB and Serie RS-232 y otras.
- Memoria: Removable SD/SDHC con tarjeta de memoria de 32GB.
- Data Update/Output Rate: 1Hz – 100Hz Seleccionable; con capacidad de salida de datos en tiempo real con tecnologías TPS, RTCM SC104, CMR, CMR+, con salida en código ASCII, NMEA 0183 versión 2.x y 3.0.

El sistema RTK GPS Topcon GR-5 representa la más avanzada generación en tecnología de receptores GPS. Este nuevo sistema incorpora la tecnología de seguimiento Topcon capaz de rastrear todos los sistemas de posicionamiento global por satélite existentes. El rover Topcon GR-5 cuenta con la tecnología patentada de una antena Topcon de alta precisión y capacidad para la recepción de señales, para lograr un seguimiento de señal más robusto y limpio, logrando resultados de muy alta calidad.



Fotografía III.1 Equipo utilizado para el levantamiento topográfico de la presa.

Inicialmente se estableció un vértice de referencia (GPS1), que también sirvió de referencia para los estudios de topografía del cauce aguas abajo y para la topobatimetría. Las coordenadas de este vértice se establecieron con base en la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA) y el monumento se ubicó físicamente en el extremo izquierdo de la cortina, con las coordenadas $x=420290.650$, $y=2759393.971$, $z=537.840$.

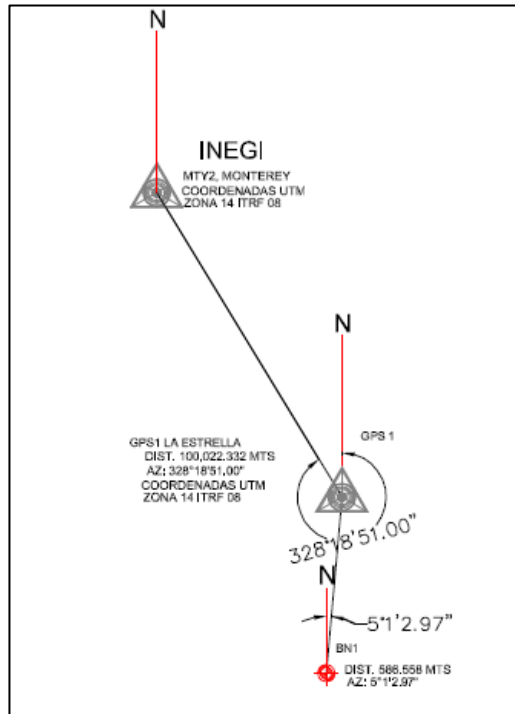


Figura III.1 Detalle de liga del GPS con la RGNA, en La Estrella.



Fotografía III.2 Banco de Nivel BN1 en el extremo derecho de la presa La Estrella.



Fotografía III.3 Coordenadas del vértice de referencia GPS1 en la presa La Estrella.

El levantamiento topográfico se realizó tomando puntos sobre la cortina y estructuras auxiliares, caracterizando de manera detallada cada una de ellas, sobre todo en los sitios donde la geometría era complicada tal como las obras de toma y excedencias. Como parte de los trabajos se realizó también el levantamiento de una franja adyacente a la cortina, de aproximadamente 50 m sobre el embalse, para definir el nivel y distribución de los azolves.

Este levantamiento proporciona la información necesaria para realizar los estudios de seguridad geotécnica estructural de la cortina, así como para la revisión de la capacidad hidráulica del vertedor.



Fotografía III.4 Levantamiento topográfico de la cortina de la presa La Estrella.



Fotografía III.5 Levantamiento topográfico de la obra de toma.



Fotografía III.6 Levantamiento topográfico de la obra de excedencias



Fotografía III.7 Medición del nivel del azolve en el embalse de la presa La Estrella.

A continuación se muestran imágenes de los planos generados en esta actividad. Los planos en formato 60 x 90 cm elaborados a partir de la información obtenida en campo de la cortina y las obras auxiliares de la presa La Estrella se incluyen en los anexos.

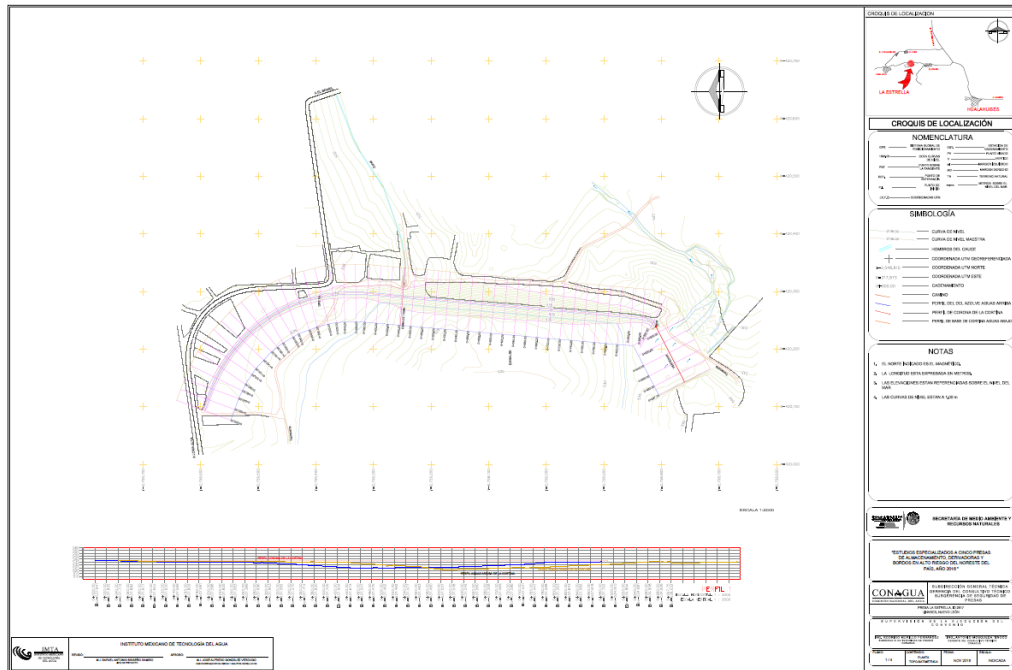


Figura III.2 Plano topo batimétrico de la presa La Estrella.

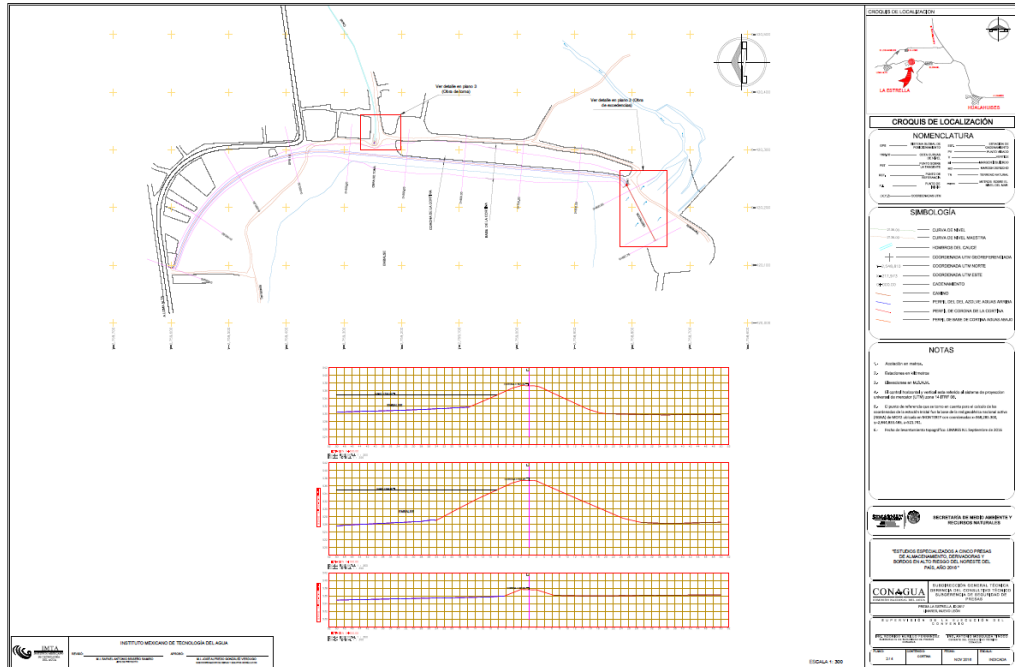


Figura III.3 Plano de la cortina de la presa La Estrella.

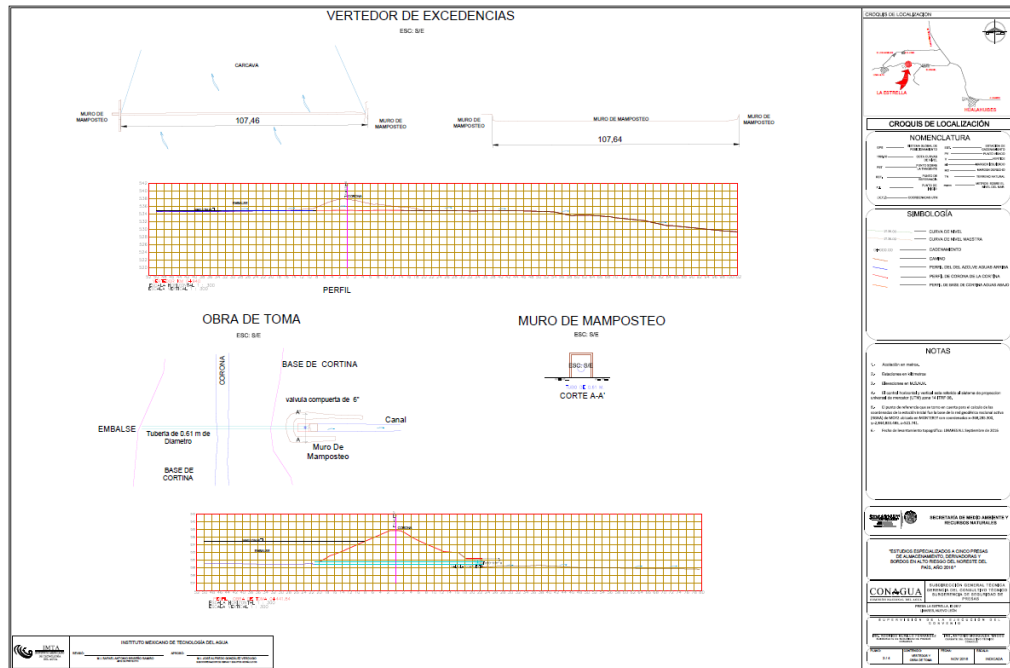


Figura III.4 Plano de la obra de excedencias y de toma de la presa La Estrella.

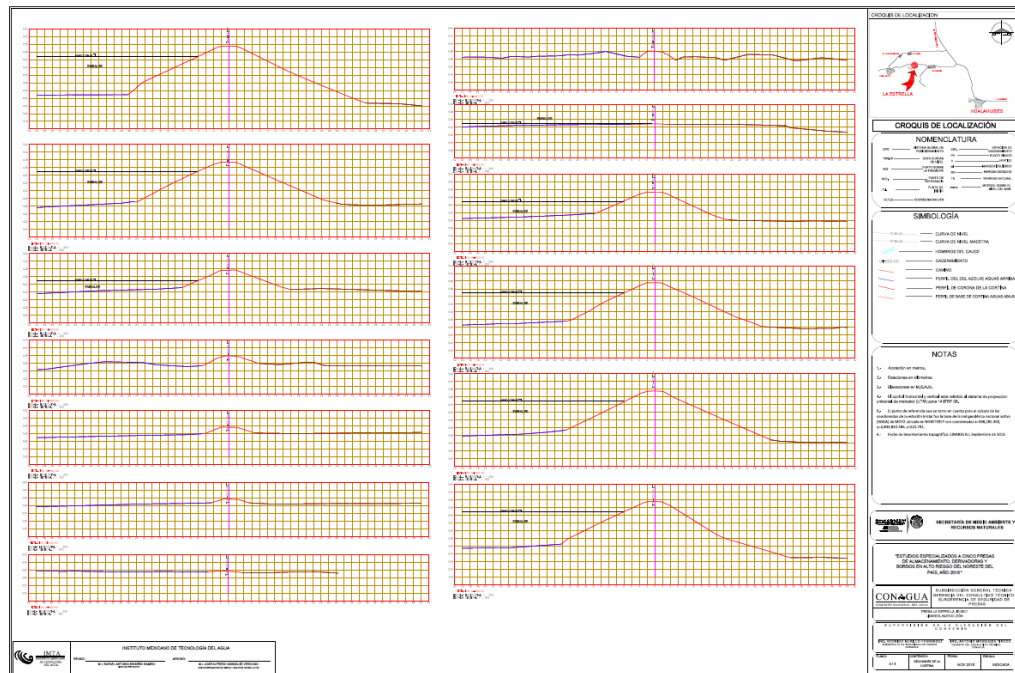


Figura III.5 Plano de secciones de la cortina de la presa La Estrella.

III.2 Levantamiento topográfico del cauce aguas abajo

El levantamiento topográfico del cauce aguas abajo de la presa La Estrella, se realizó con la finalidad de obtener la información necesaria para la delimitación de zonas de peligro por descargas del vertedor. Para este caso específico se realizó el levantamiento de 4 km de cauce, del cual se obtuvieron secciones a cada 20 m.

El equipo y los materiales que se utilizaron en el levantamiento fueron los siguientes:

- Estación total marca SOKKIA CX105
- Prisma y bastón.
- Cinta métrica y flexómetro.
- Plomada
- Pintura y estacas.
- Chalecos reflectivos.
- Conos de señalización.
- Radios de comunicación marca MIDLAND SERIE LXT600.

Así mismo se utilizaron los programas AutoCAD, CivilCAD, Excel, para el proceso de la información y dibujo de planos.

La referencia topográfica que se tomó para el levantamiento del cauce fue el vértice GPS1, localizado en el extremo derecho de la presa y que fue ubicada por la brigada que realizó el levantamiento de la presa y sus obras auxiliares.

Posteriormente se detectaron los puntos estratégicos de observación y se reconocieron detalles del terreno a lo largo del cauce con lo que se determinó el plan de trabajo. El equipo se situó inicialmente sobre el muro de encauzamiento derecho de la obra de excedencias por ser un punto desde donde se pueden observar la mayoría de los vértices y puntos importantes que se deben marcar. Ubicar este punto es importante ya que el levantamiento topográfico se llevó a cabo por el método de radiaciones con el levantamiento de varios detalles sobre el cauce. El método de radiaciones es el método comúnmente empleando en levantamientos de superficies de mediana y gran extensión. Este método se apoya en una poligonal base previamente levantada a partir de cuyos vértices se hacen radiaciones a fin de determinar la ubicación de los puntos requeridos, en el caso de levantamiento del cauce aguas abajo de la presa La Estrella, se utilizó el método con el apoyo de una poligonal abierta; en este caso lo que se hace es dividir la obra en tramos rectos y definir la alineación de cada uno, midiendo el azimut y su distancia para ir construyendo la poligonal abierta.



Fotografía III.8 Cadenamiento inicial (0+000) sobre la estructura de control.



Fotografía III.9 Aspecto del cauce aguas abajo de la obra de excedencias(0+125).

Dentro de los detalles observados en este levantamiento se puede mencionar que, tomando como inicio el vertedor, en los primeros metros el cauce está labrado en las intercalaciones de lutitas y margas; ya en el cadenamiento 0+300 el cauce está formado en suelo. En el cadenamiento 1+450 se ubica el cruce de la carretera que comunica los ejidos La Estrella y El Brasil y en el 1+770 se detectó un pequeño paso vehicular que se está construyendo sobre el cauce. Siguiendo sobre el cauce, en el cadenamiento 3+089, en las inmediaciones con el ejido El Brasil, se localizó un dique de mampostería que antiguamente se utilizaba como derivadora para riego en ese ejido y que actualmente está fuera de operación. En el cadenamiento 3+189 se detectó en la margen derecha del cauce, una obra de captación de agua y en el cadenamiento 3+360, ya en el ejido El Brasil, se observó un paso a base de terracerías construido de manera rústica por los pobladores, que reduce el cauce al hacerlo pasar por una alcantarilla hecha con un tubo de concreto de 0.61 m (24 pulgadas).

El levantamiento concluyó después de pasar el ejido El Brasil, 4 km aguas abajo del vertedor.



Fotografía III.10 Cadenamiento 1+770, cruce de cauce en construcción.



Fotografía III.11 Cadenamiento 3+089, antiguo dique de mampostería para riego.



Fotografía III.12 Cadenamiento 3+189, obra de captación.



Fotografía III.13 Cadenamiento 3+360, alcantarilla sobre el cauce.

En la Figura III.6 se presenta la imagen con el trazo del levantamiento realizado sobre el cauce aguas abajo de la presa La Estrella, hasta el ejido El Brasil.



Figura III.6 Trazo del levantamiento sobre el cauce aguas abajo de la presa La Estrella.

A continuación se muestran imágenes de algunos planos generados en esta actividad. Los planos completos, en formato 60 x 90 cm, elaborados a partir de la información obtenida en campo del cauce aguas abajo de la presa La Estrella se incluyen en los anexos.

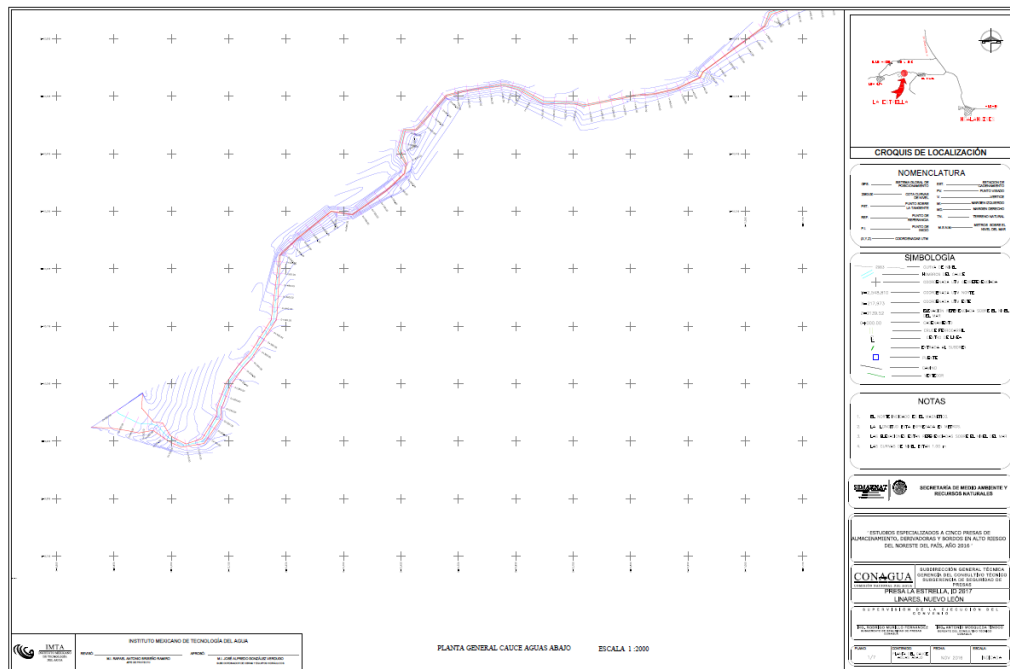


Figura III.7 Planta del cauce aguas abajo de la presa La Estrella.

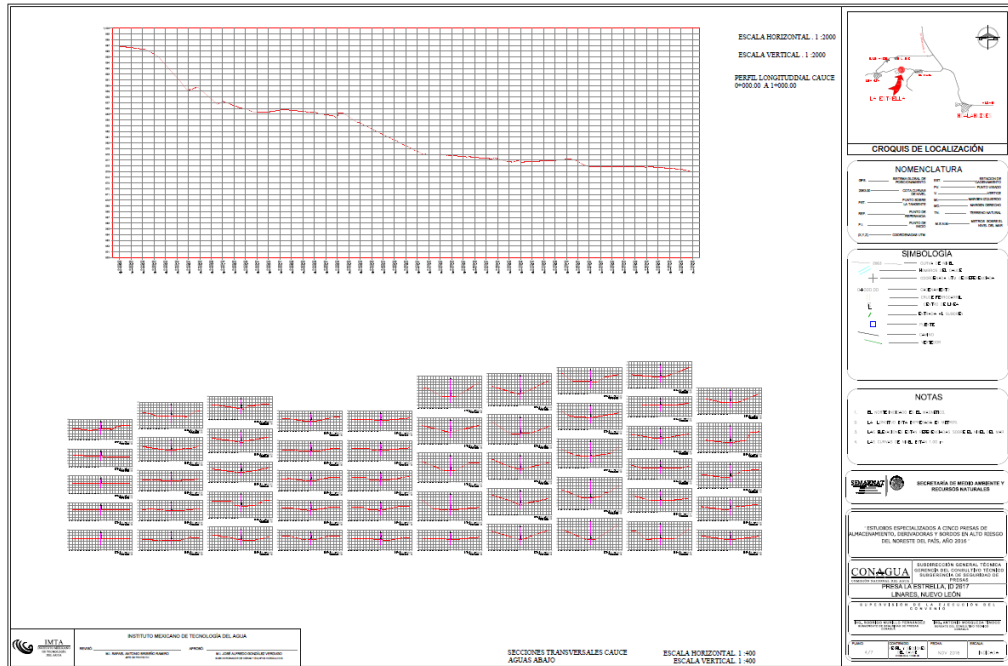


Figura III.8 Secciones del cauce aguas abajo de la presa La Estrella.

III.3 Exploración, muestreo y pruebas de laboratorio

Durante la visita de inspección se realizaron también los sondeos sobre la cortina con la finalidad de tomar muestras para su caracterización geotécnica en laboratorio y se efectuaron las pruebas de campo para determinar el peso volumétrico y contenido de agua naturales que sirvieron para determinar el grado de compactación de los materiales que conforman la cortina.

Los sondeos se realizaron de manera superficial, mediante pozos a cielo abierto (PCA) de dimensiones reducidas para evitar daños innecesarios a la cortina y sondeos de penetración estándar (SPT). En el caso de la presa La Estrella se realizaron seis PCA y tres SPT sobre la cortina y terreno de cimentación de los que se obtuvieron muestras alteradas en cantidad suficiente para su caracterización geotécnica en laboratorio.

Los sondeos se ubicaron en los puntos siguientes:

Tabla III.1 Ubicación de los puntos de muestreo.

SONDEO	UBICACIÓN	UTM	
		X	Y
PCA-1	En la corona	420273	2759020
PCA-2	En la corona	420288	2759205
PCA-3	En el terreno de cimentación	420292	2758907
PCA-4	En el talud aguas abajo	420305	2759271
PCA-5	En el terreno de cimentación	420312	2759220
PCA-6	En el talud aguas abajo	420286	2758998
SPT-1	En la zona de la falla	420262	2758918
SPT-2	En la sección central	420280	2759117
SPT-3	En el lado derecho	420291	2759249

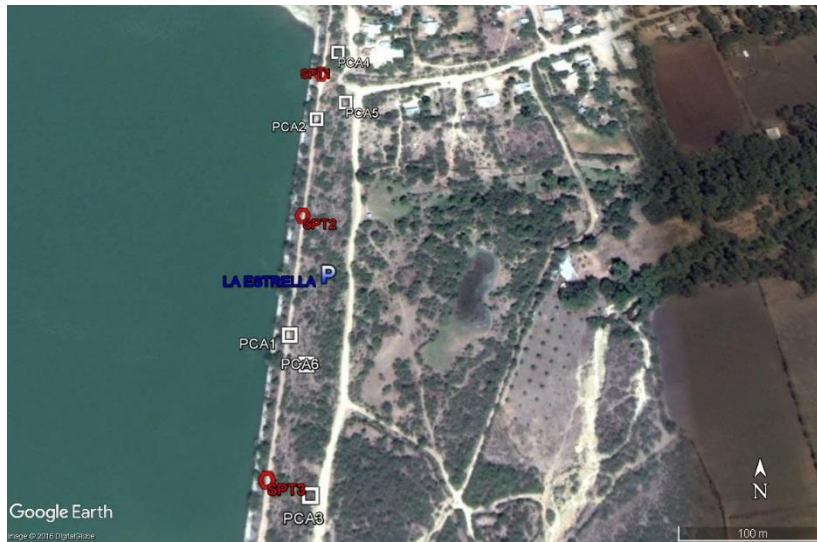


Figura III.9 Ubicación de los puntos donde se realizaron los sondeos.



Fotografía III.14 Excavación del PCA-1 en la corona de la cortina.



Fotografía III.15 Labrado de muestra cubica inalterada en el PCA-1.



Fotografía III.16 Excavación del PCA-2 en la



Fotografía III.17 Labrado de muestra

corona de la cortina.



Fotografía III.18 Excavación del PCA-3 en el terreno de cimentación.

cubica inalterada en el PCA-2.



Fotografía III.19 Toma de muestra alterada de suelo en el PCA-3.



Fotografía III.20 Excavación del PCA-4 en el talud aguas abajo.



Fotografía III.21 Toma de muestra inalterada de suelo en el PCA-4.



Fotografía III.22 Excavación del PCA-5 en el terreno de cimentación.



Fotografía III.23 Toma de muestra inalterada de suelo en el PCA-5.



Fotografía III.24 Excavación del PCA-6 en el talud aguas abajo.



Fotografía III.25 Toma de muestra inalterada de suelo en el PCA-6.



Fotografía III.26 Perforación del SPT-01 en la zona de la falla.



Fotografía III.27 Muestra de suelo recuperada del SPT-01.



Fotografía III.28 Perforación del SPT-02 en la sección central de la cortina.



Fotografía III.29 Muestra de suelo recuperada del SPT-02.



Fotografía III.30 Perforación del SPT-03 en el extremo derecho de la cortina.



Fotografía III.31 Muestra de suelo recuperada del SPT-03.

Todas las muestras tomadas fueron empacadas e identificadas para su envío al laboratorio de mecánica de suelos, para su caracterización geotécnica.

Las pruebas para la caracterización geotécnica en laboratorio de los materiales muestreados se desarrollaron de acuerdo con los lineamientos establecidos por la CONAGUA, mismos que se encuentran contenidos en el Manual de Mecánica de Suelos, editado por la extinta Secretaría de Recursos Hidráulicos, edición 1970. De acuerdo con los criterios convencionales, a las muestras de suelo se les practicaron las pruebas siguientes:

- Contenido de agua
- Peso volumétrico natural
- Análisis granulométrico
- Densidad de sólidos
- Límites de consistencia o Atterberg (líquido y plástico)

Los datos obtenidos de las pruebas se utilizaron para la clasificación SUCS (Sistema unificado de clasificación de suelos) de los materiales encontrados y para la determinación de las relaciones volumétrico-gravimétricas.

Además se realizó a las muestras obtenidas de los pozos, la prueba de compactación Proctor estándar que sirvió como referencia para determinar el grado de compactación de la presa en los distintos puntos donde se excavaron los pozos. Para la determinación de los parámetros mecánicos se realizaron las siguientes pruebas a las probetas labradas de las muestras cúbicas inalteradas:

- Compresión Triaxial No Consolidada-No Drenada (UU)
- Compresión Triaxial Consolidada-No Drenada (CU)

Finalmente se realizaron pruebas para determinar el potencial de dispersividad de los suelos encontrados mediante la realización de las pruebas siguientes:

- Prueba del grumo
- Prueba del doble hidrómetro

En las tablas siguientes se presenta el resumen con los resultados de las pruebas de laboratorio realizadas a las muestras tomadas de la presa La Estrella, los registros de cada una de las pruebas realizadas se incluyen en un anexo de este informe.

Cabe comentar que en el PCA-3, bajo la materia vegetal se detectó inmediatamente las lajas de lutitas y margas de la formación Méndez, por lo que no se les realizaron pruebas de mecánica de suelos.

Tabla III.2 Resultados de pruebas de campo y porcentaje de compactación de la presa La Estrella.

SONDEO	UTM		W _{nat} (%)	γ _{m nat} (t/m ³)	γ _{d nat} (t/m ³)	W _{op} (%)	γ _{d op} (t/m ³)	Compactación (%)
	X	Y						
PCA-1	420273	2759020	15.16	1.80	1.56	18.10	1.81	86
PCA-2	420288	2759205	16.16	2.00	1.72	17.80	1.80	96
PCA-4	420305	2759271	19.85	1.93	1.61	18.50	1.81	89
PCA-5	420312	2759220	19.26	1.92	1.61	19.50	1.75	92
PCA-6	420286	2758998	19.39	1.89	1.58	19.00	1.79	88

Tabla III.3 Propiedades índice de los materiales muestreados en la presa La Estrella.

SONDEO	S _s	LL	LP	IP	CL (%)	G (%)	S (%)	F (%)	Clasificación SUCS
PCA-1	2.59	50	30	20	3	13	20	67	Limo arcilloso de baja compresibilidad, color café claro, con 20% de arenas finas y 13% de gravas de hasta ¾", ML.
PCA-2	2.55	50	32	18	3	1	17	82	Limo arcilloso de baja compresibilidad, color café claro, con 17% de arenas finas y 1% de gravas de

									hasta 4.25 m, ML.
PCA-4	2.71	62	29	33	7	0	3	97	Arcilla limosa de alta compresibilidad, color café, con 3% de arena fina, CH.
PCA-5	2.57	60	30	30	7	0	3	97	Arcilla limosa de alta compresibilidad, color café, con 3% de arena fina, CH.
PCA-6	2.60	51	28	23	7	0	5	95	Arcilla limosa de alta compresibilidad, color café, con 5% de arena fina, CH.

Tabla III.4 Propiedades mecánicas de los materiales muestreados en la presa La Estrella.

SONDEO	TRIAxIAL UU				TRIAxIAL CU			
	c (kg/cm ²)	φ (°)	S _r (%)	e	Esfuerzos totales		Esfuerzos efectivos	
					c (kg/cm ²)	φ (°)	c (kg/cm ²)	φ (°)
PCA-1	3.50	46	57.40	0.71	1.00	26	1.00	29
PCA-2	1.99	51	82.01	0.51	0.76	28	0.74	32
PCA-4	1.64	47	80.58	0.64	0.14	17	0.15	22
PCA-5	1.26	48	79.70	0.63	0.22	15	0.23	20
PCA-6	0.21	45	80.00	0.67	0.18	16	0.22	21

NOTAS: Los valores de S_r y e reportados corresponden al promedio de las tres probetas de compresión triaxial UU.

Tabla III.5 Resultados de las pruebas de grumo a los materiales muestreados en la presa La Estrella.





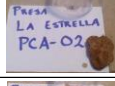











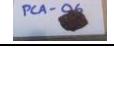



SONDEO	TARA	MUESTRA	2 MINUTOS			1 HORA			6 - 24 HORAS			RESULTADO
			Grado	°C	Muestra	Grado	°C	Muestra	Grado	°C	Muestra	
PCA-1	A		2	22		2	24		3	22		DISPERSIVO
PCA-2	B		3	22		3	24		3	22		DISPERSIVO
PCA-4	D		3	22		3	24		3	22		DISPERSIVO
PCA-5	E		2	22		3	24		3	22		DISPERSIVO
PCA-6	F		3	22		3	24		3	22		DISPERSIVO

Tabla III.5 Resultados de las pruebas de doble hidrómetro a los materiales muestreados en la presa La Estrella.

SONDEO	% menor que 5 μm		DISPERSIÓN (%)
	con dispersante	sin dispersante	
PCA-1	57.8	1.9	3.2
PCA-2	57.8	1.9	3.2
PCA-4	55.0	1.8	3.3
PCA-5	58.0	1.8	3.1
PCA-6	57.2	2.5	4.4

Simbología			
UTM	Sistema de coordenadas Universal Transverse Mercator	G	Gravas
w_{nat}	Contenido de agua natural	S	Arenas
$\gamma_{\text{m nat}}$	Peso volumétrico natural	F	Finos
γ_{d}	Peso volumétrico seco	SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
w_{op}	Contenido de agua óptimo	q_u	Resistencia a la compresión simple
$\gamma_{\text{d op}}$	Peso volumétrico seco óptimo	c	Cohesión
Ss	Densidad de sólidos		Ángulo de fricción interna
LL	Límite líquido	S_r	Grado de saturación

LP	Límite plástico		e	Relación de vacíos
Ip	Índice plástico			
CL	Contracción lineal			

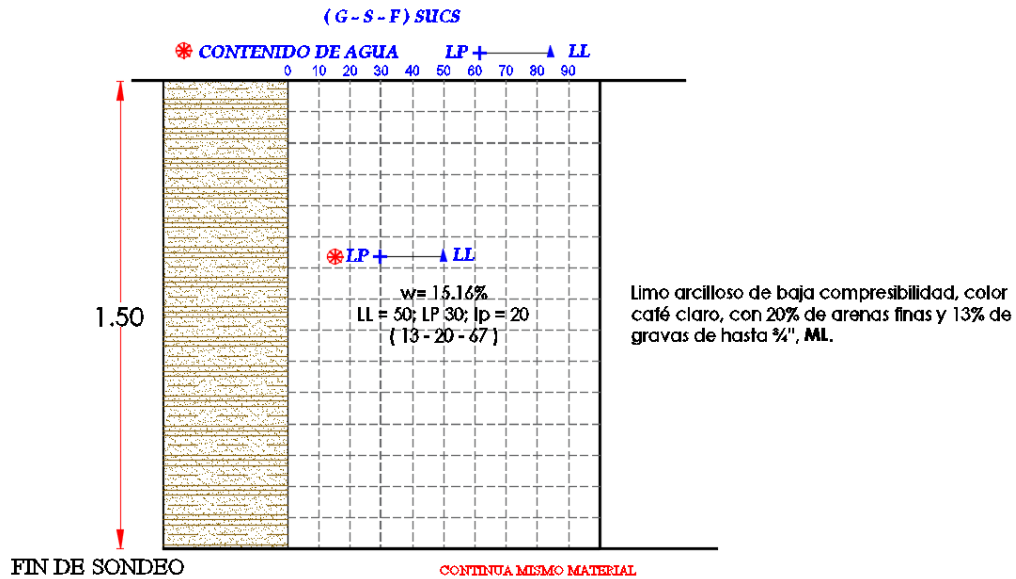


Figura III.10 Perfil estratigráfico de PCA-1, en la corona.

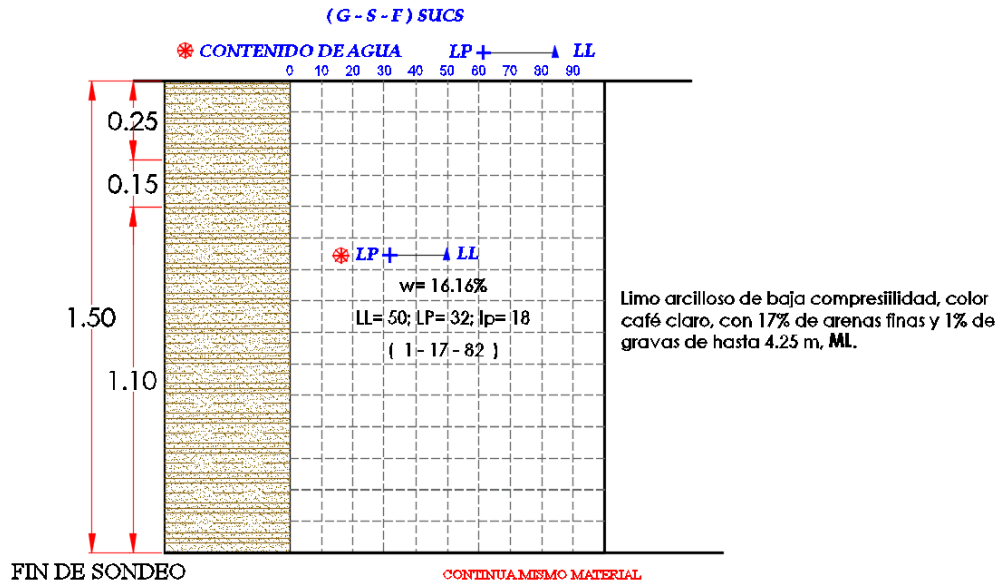


Figura III.11 Perfil estratigráfico de PCA-2, en la corona.

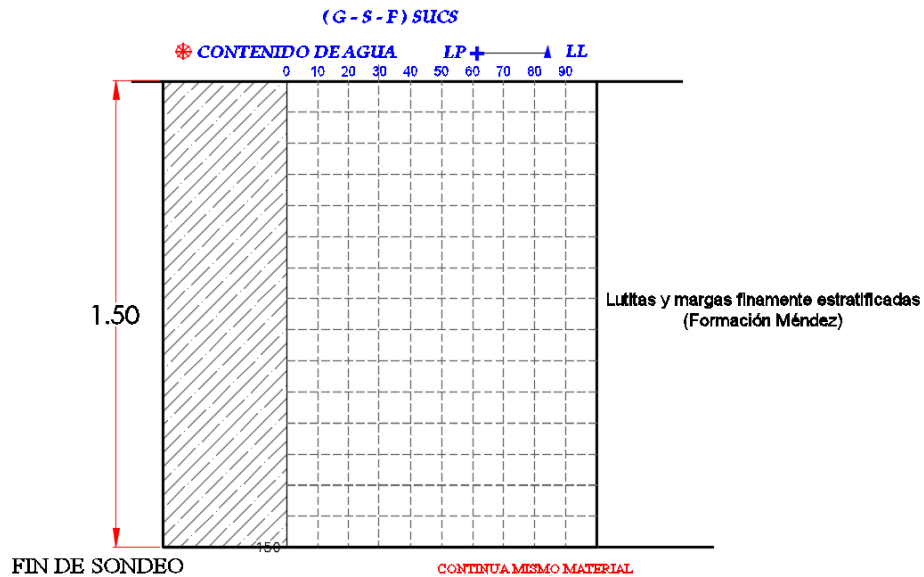


Figura III.12 Perfil estratigráfico de PCA-3, terreno de cimentación.

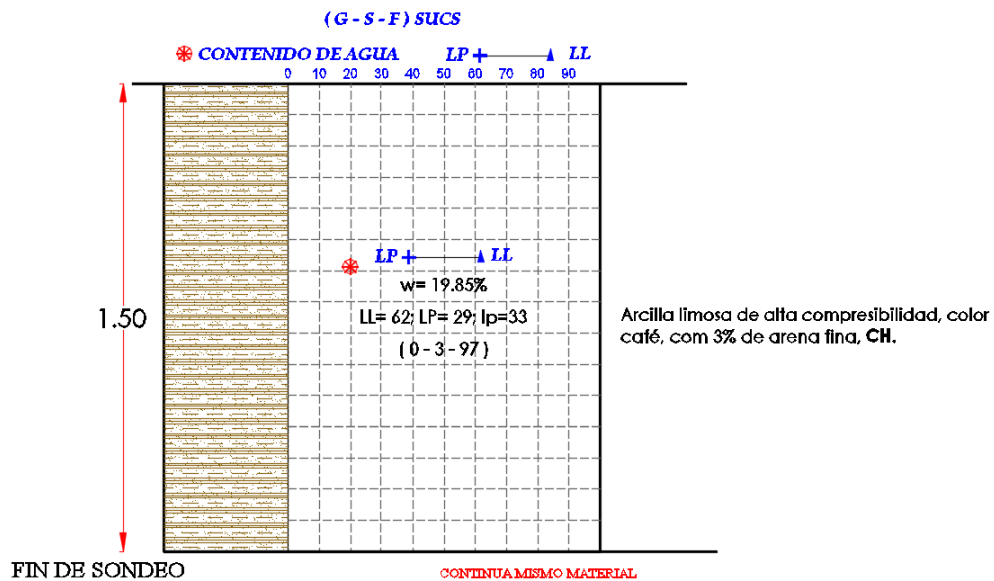


Figura III.13 Perfil estratigráfico de PCA-4, talud aguas abajo.

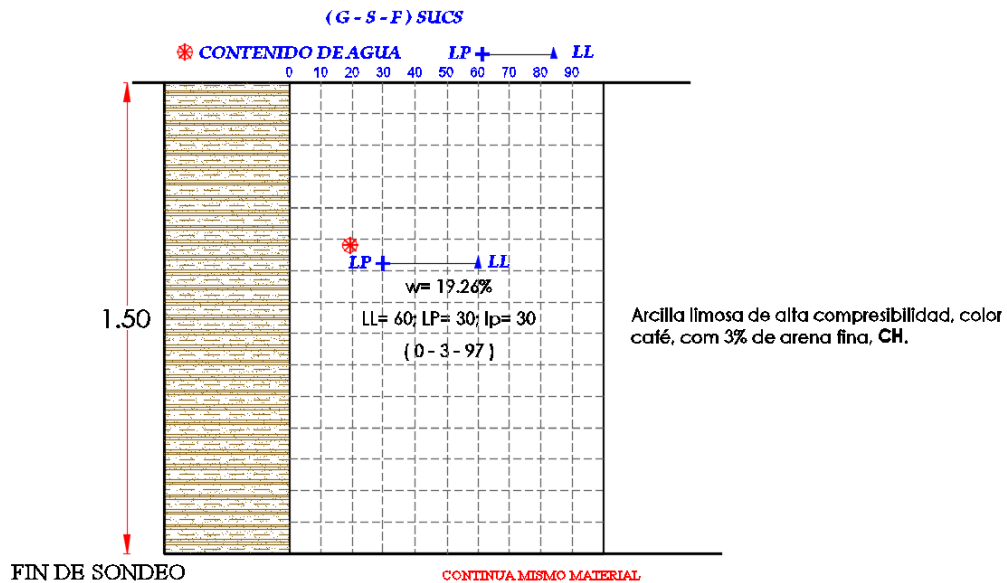


Figura III.14 Perfil estratigráfico de PCA-5, terreno de cimentación.

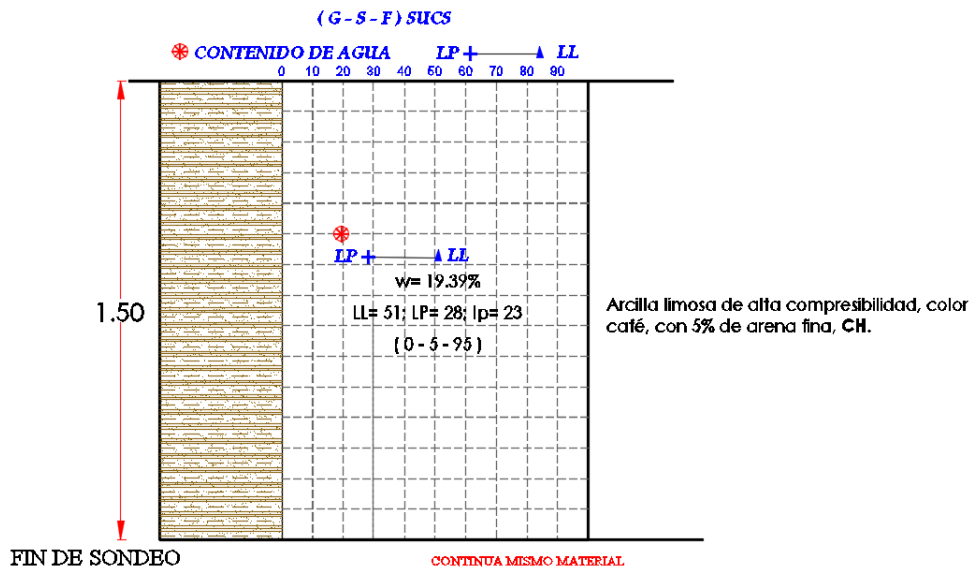


Figura III.15 Perfil estratigráfico de PCA-6, talud aguas abajo.



REGISTRO DE EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA

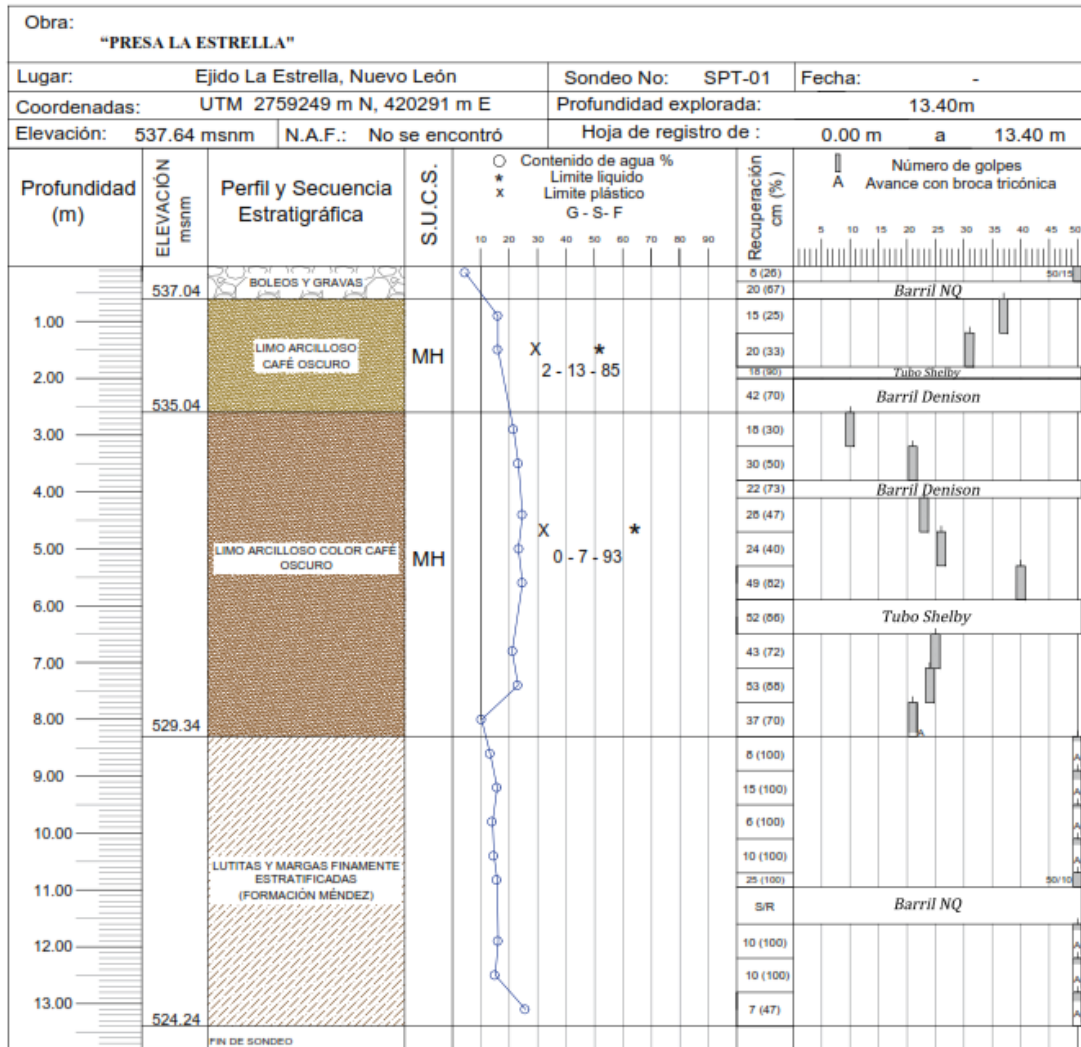


Figura III.16 Registro de exploración del sondeo STP-1.



REGISTRO DE EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA

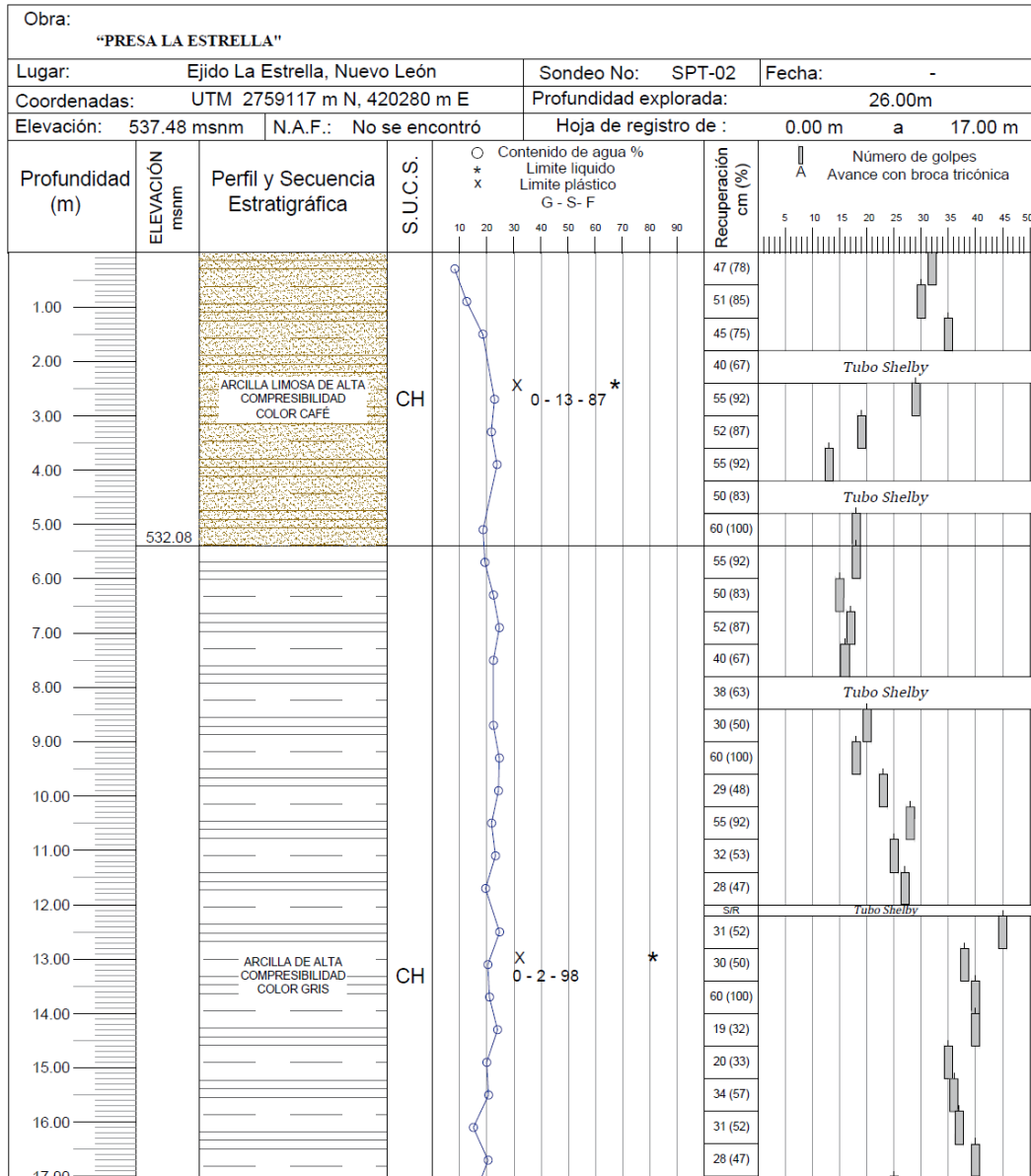


Figura III.17 Registro de exploración del sondeo SPT-2.



REGISTRO DE EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA

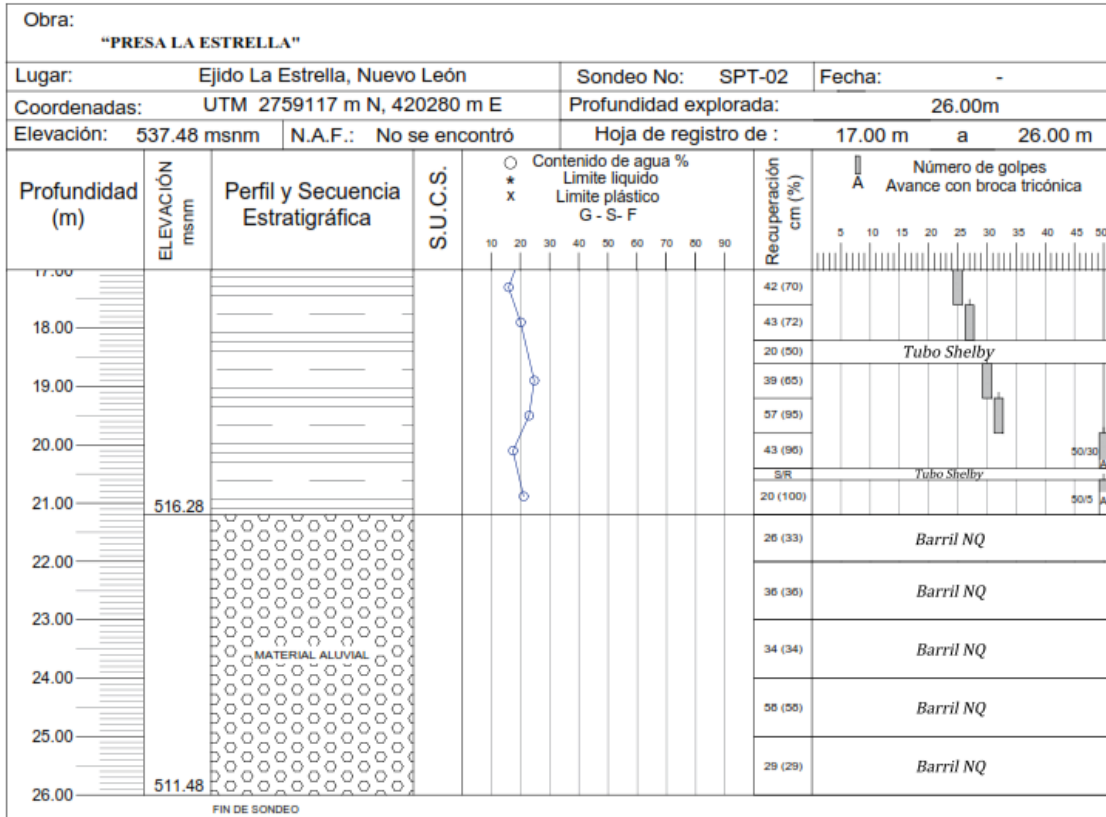


Figura III.18 Registro de exploración del sondeo SPT-2.



REGISTRO DE EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA

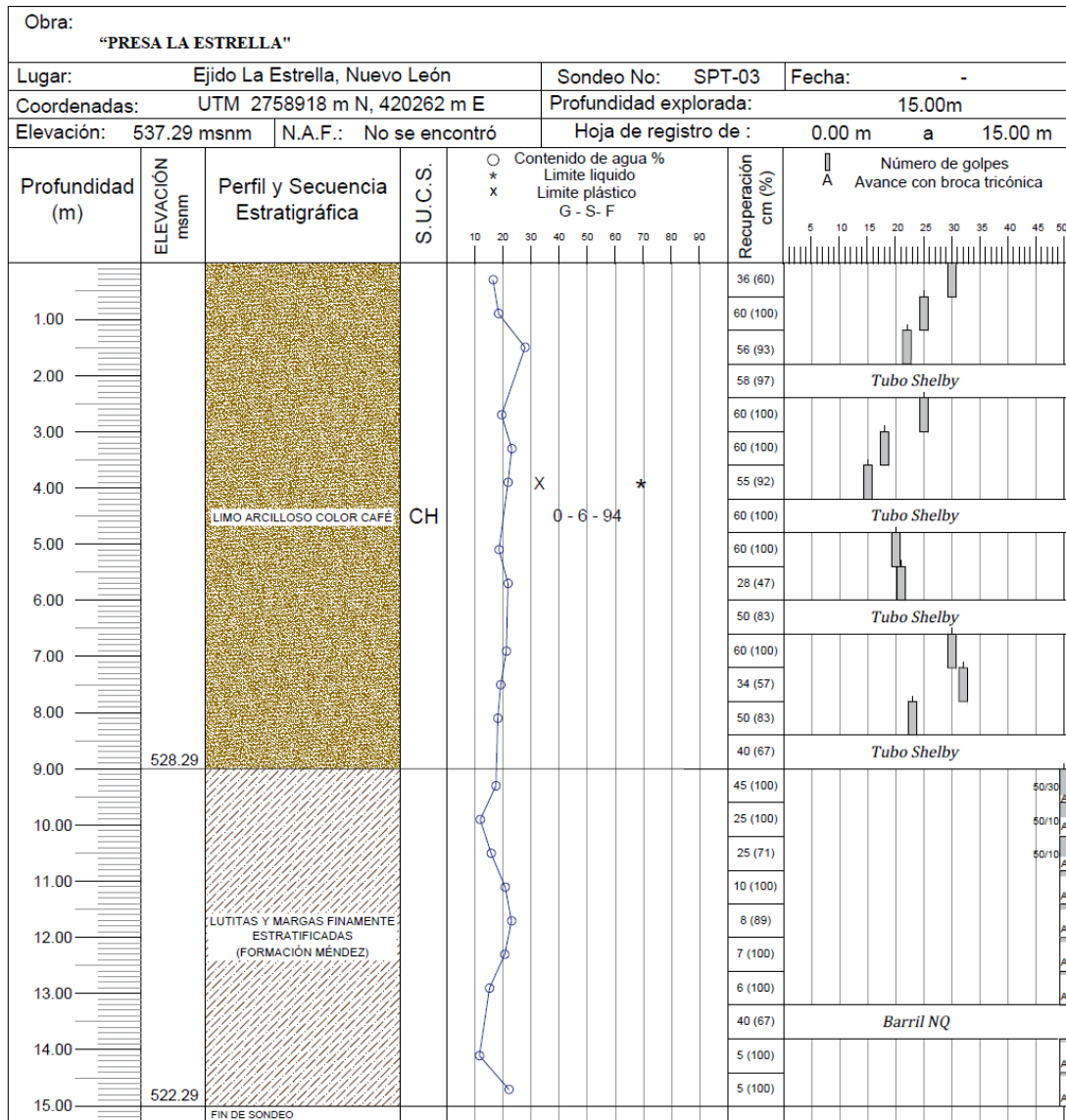


Figura III.19 Registro de exploración del sondeo SPT-3.



Fotografía III.32 Material del PCA-1 después de granulometría por mallas.



Fotografía III.33 Preparación del material para los límites de consistencia.



Fotografía III.34 Prueba de límite líquido en copa de Casagrande.



Fotografía III.35 Prueba de límite plástico con técnica de rolado.



Fotografía III.36 Preparación del material para la prueba de compactación Proctor estándar.



Fotografía III.37 Prueba de compactación Proctor estándar.



Fotografía III.38 Muestras labradas para la prueba de compresión triaxial.



Fotografía III.39. Muestra antes de prueba de compresión triaxial.



Fotografía III.40. Prueba de compresión triaxial



Fotografía III.41 Prueba después de la prueba de compresión triaxial.

IV. ESTUDIOS DE PELIGRO SÍSMICO

Para estudiar y caracterizar el peligro sísmico en el sitio de la presa, se determinaron los parámetros sísmicos requeridos para la revisión de la seguridad estructural de la presa, ante la eventual ocurrencia de los temblores máximos especificados en el Manual de Diseño por Sismo de la Comisión Federal de Electricidad (MDS-CFE, 2010).

Se evaluó el peligro sísmico en un sitio representativo de forma probabilista y determinista. El temblor probabilista se especifica para 10% de probabilidad de excedencia en 50 o 100 años de vida útil de la obra, que corresponde a 475 y 950 años de periodo de retorno, respectivamente. En tanto que el temblor determinista representa el sismo máximo creíble que razonablemente puede esperarse basado en evidencias sismológica y geológica, sin importar el periodo de recurrencia.

Específicamente se determinaron los parámetros sísmicos que son requeridos para análisis modal espectral y/o paso a paso de la cortina y estructuras anexas de una presa, tales como:

Espectros de aceleración en roca para excitación horizontal, mostrados en las Figura III.20 y Figura III.21 para 475 y 950 años de periodo de retorno, respectivamente, y definidos con los parámetros característicos de la Tabla III.5.

Tabla III.5 Parámetros de los espectros de diseño horizontales para $T_r= 475$ y 950 años.

Temblor	a_0	c	$T_a(s)$	$T_b(s)$	r
475 años	0.03	0.07	0.1	0.25	0.85
950 años	0.045	0.11	0.1	0.25	0.90

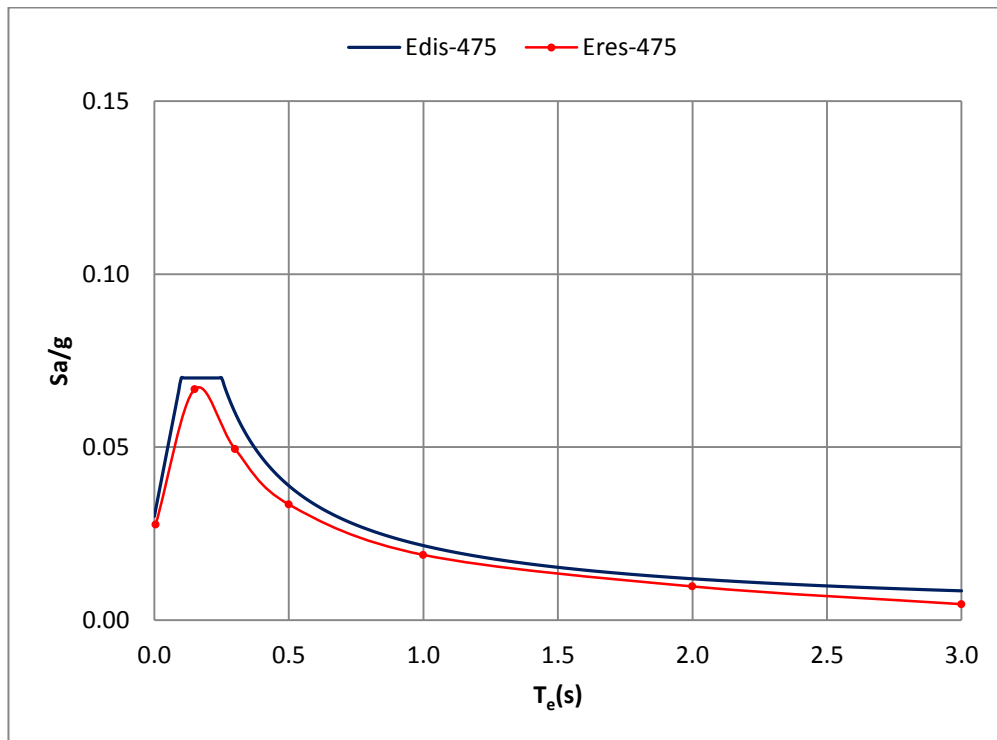


Figura III.20 Espectro de diseño vs espectro de respuesta horizontal para $T_r= 475$ años.

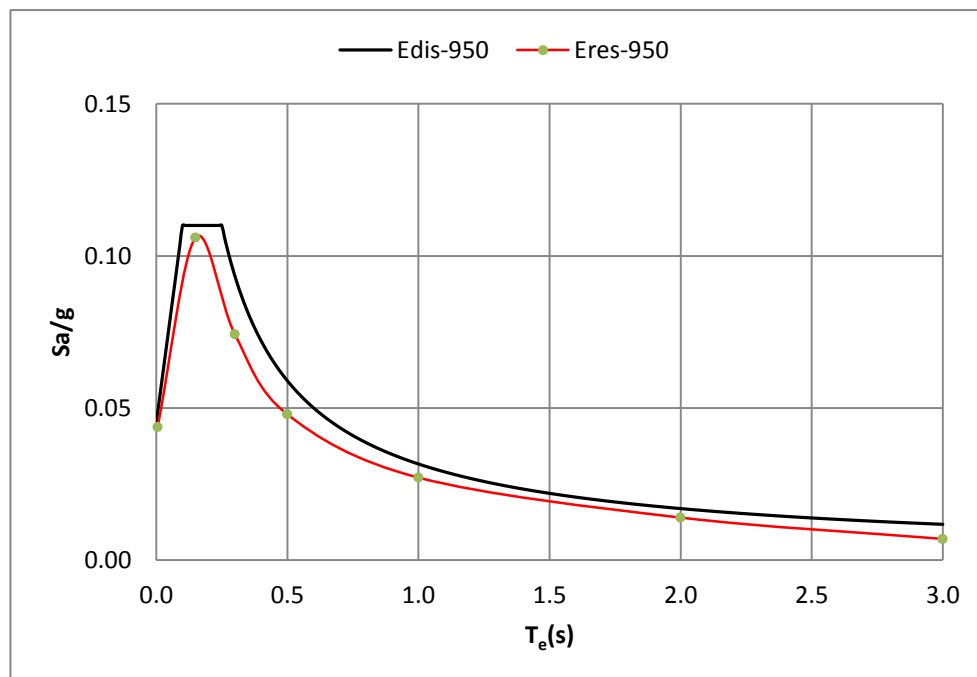


Figura III.21 Espectro de diseño vs espectro de respuesta horizontal para $T_r= 950$ años.

1. Acelerogramas sintéticos horizontales compatibles con espectros de aceleración en roca, mostrados en las Figura III.22 y Figura III.23 para 475 y 950 años de periodo de retorno, respectivamente.

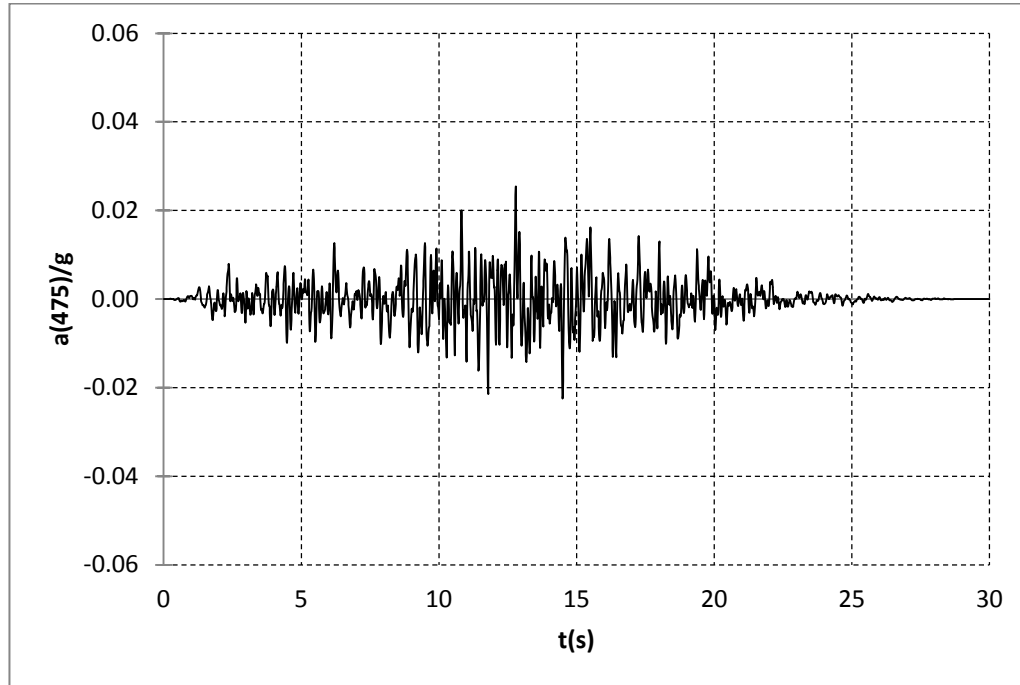


Figura III.22 Acelerograma sintético horizontal para $T_r= 475$ años.

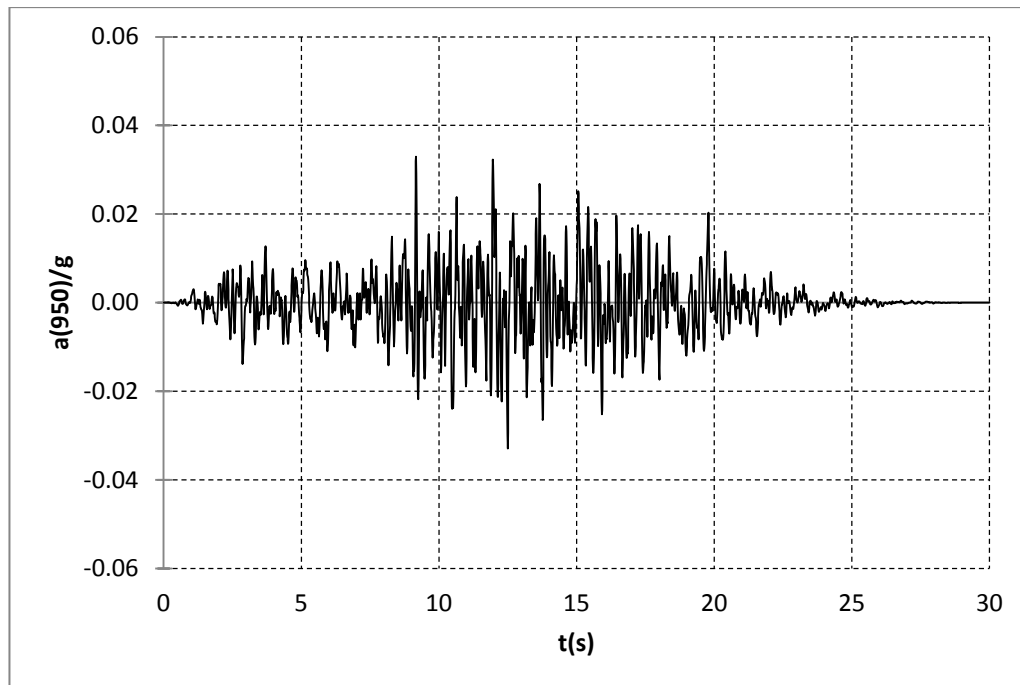


Figura III.23 Acelerograma sintético horizontal para $t_r= 950$ años.

2. Espectros de aceleración en roca para excitación vertical, mostrados en las Figura III.24 y Figura III.25 para 475 y 950 años de periodo de retorno, respectivamente, y definidos con los parámetros característicos de la Tabla III.6.

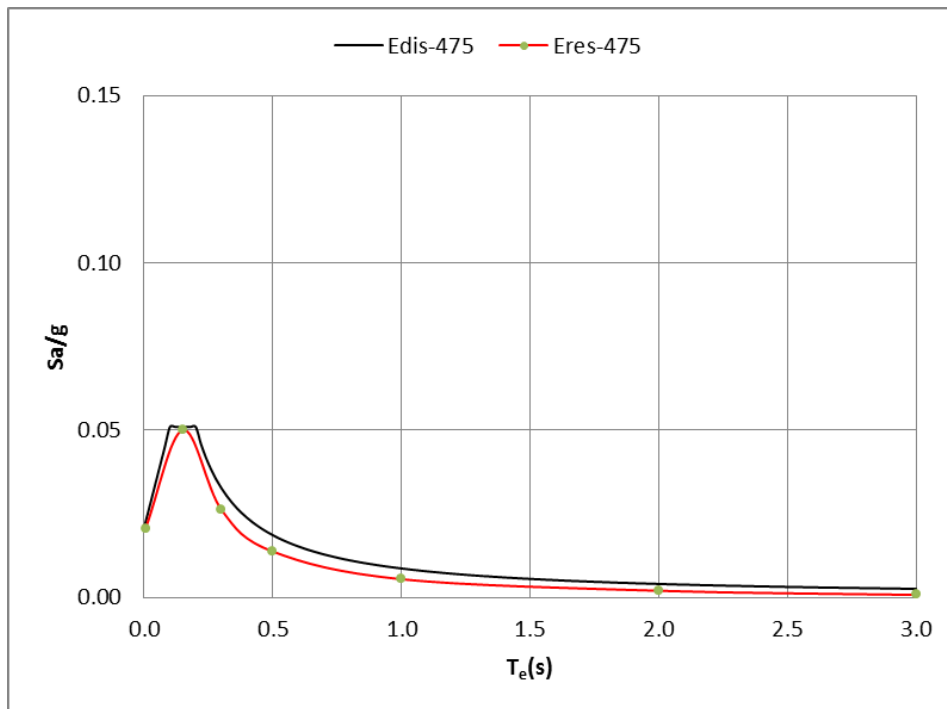


Figura III.24 Espectro de diseño vs espectro de respuesta vertical para $T_r= 475$ años.

Tabla III.6 Parámetros de los espectros de diseño verticales.

Temblor	a_0	c	$T_a(s)$	$T_b(s)$	r
475 años	0.021	0.051	0.1	0.2	1.1
950 años	0.033	0.081	0.1	0.2	1.2

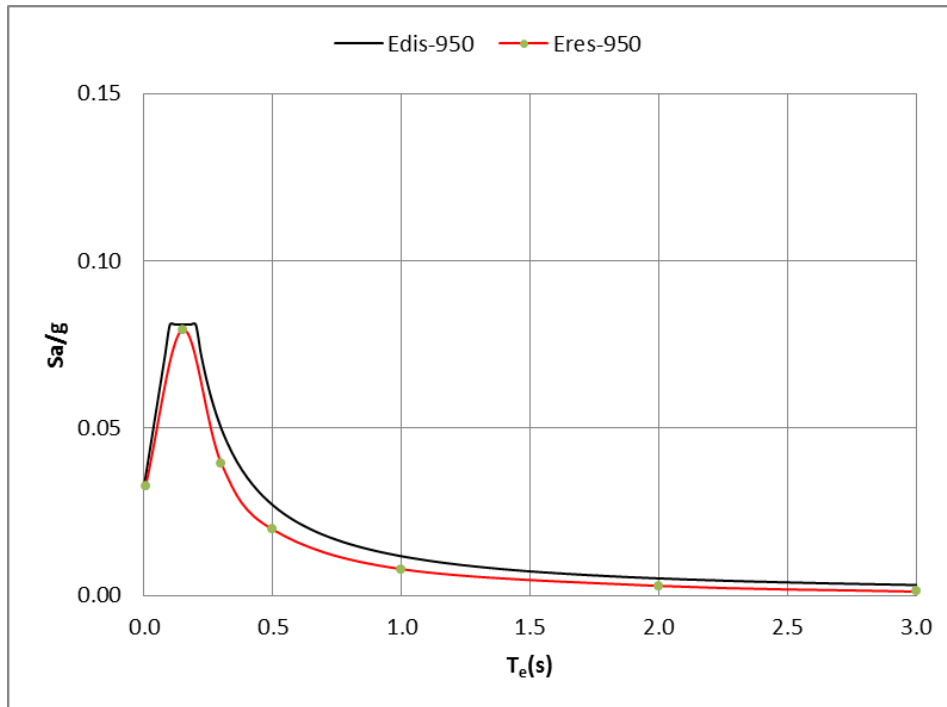


Figura III.25 Espectro de diseño vs espectro de respuesta vertical para $T_r= 950$ años.

3. Acelerogramas sintéticos verticales compatibles con espectros de aceleración en roca, mostrados en las Figura III.26 y Figura III.27 para 475 y 950 años de periodo de retorno, respectivamente.

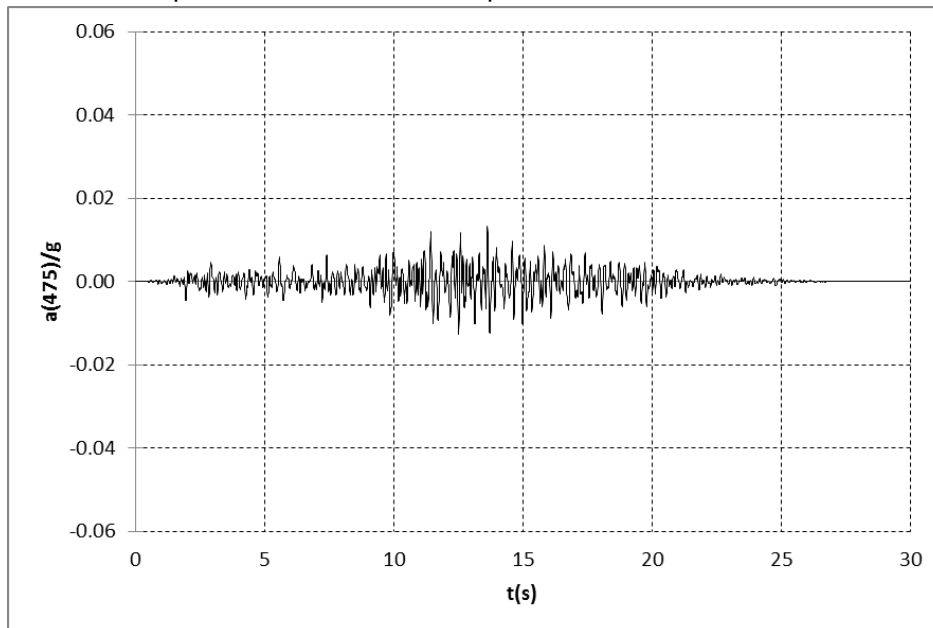


Figura III.26 Acelerograma sintético vertical para $T_r= 475$ años.

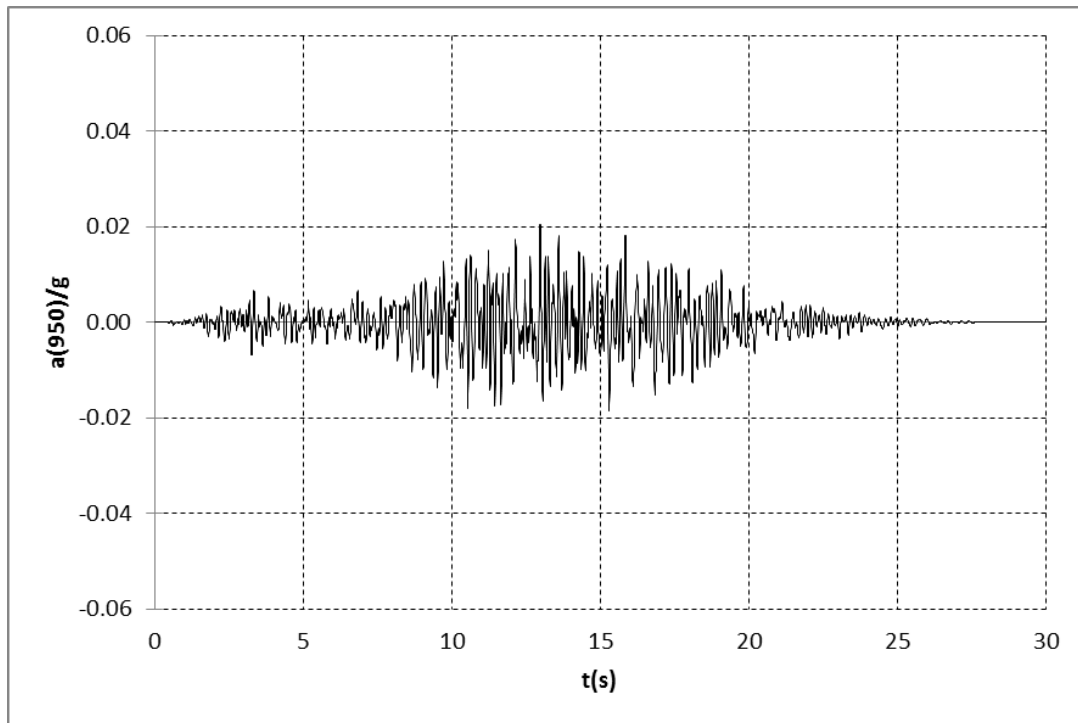


Figura III.27 Acelerograma sintético vertical para $T_r = 950$ años.

El estudio de peligro sísmico completo se presenta en el Anexo 5

V. REVISIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA

V.1 Actualización hidrológica

La actualización hidrológica de la cuenca de aportación de la presa La Estrella con clave 2617 incluyó las siguientes actividades:

- Delimitación de la cuenca de aportación.
- Determinar las características fisiográficas necesarias para aplicar un modelo lluvia-escurrimiento.
- Cálculo de la avenida de diseño con información climatológica.

En los apartados siguientes se describen con detalle los cálculos y la metodología seguida para tales fines.

V.2 Características fisiográficas de la cuenca

La cuenca de la presa La Estrella tiene una superficie de 22.547 km^2 , su centroide se localiza en las coordenadas geográficas $24^\circ 56' 42.0''$ Latitud Norte y $99^\circ 47' 20.0''$ Longitud Oeste, tiene una pendiente de 0.0003 y es de orden 4.

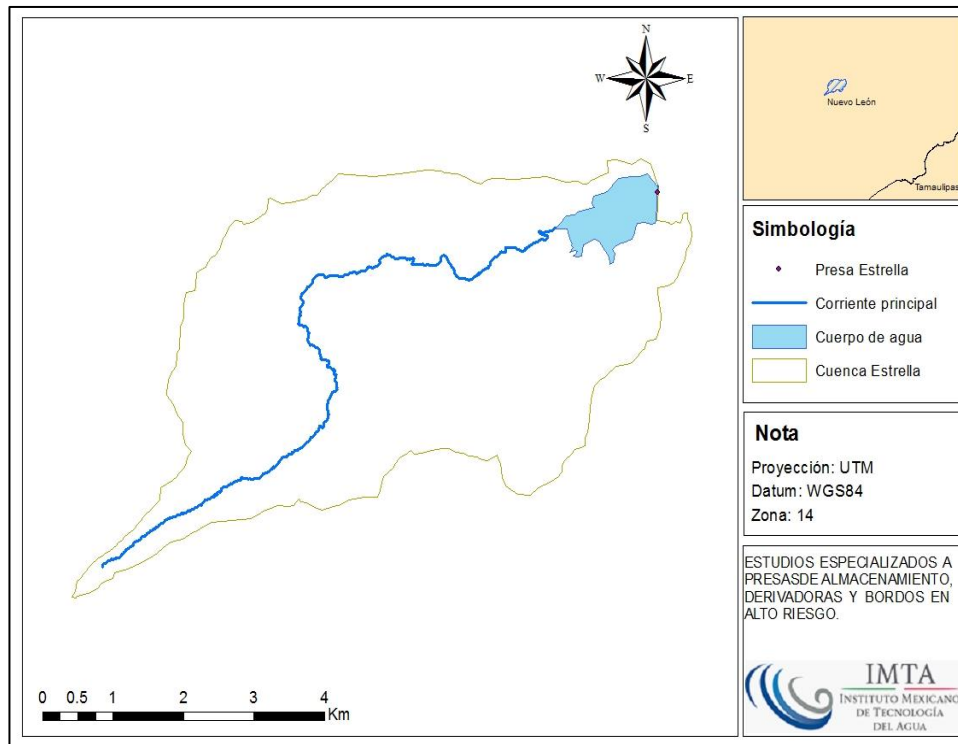


Figura V.1 Cuenca y corriente principal.

V.2.1 Delimitación de la cuenca

La cuenca de la presa La Estrella tiene una superficie de 22.547 km^2 , se localiza dentro del municipio de Linares, en el estado de Nuevo León. la corriente que la alimenta son los arroyos Loma alta y los Cristales, afluente del Arroyo Chocolate, su principal objetivo de la presa es para almacenamiento y para riego, cuenta con una cortina de materiales térreos (Flexible) de una longitud de 880.00 m , con un ancho de corona de 4.0 m y una altura de 12.85 m , tiene una capacidad de almacenamiento de 2.68 hm^3 ; cuenta con un vertedor libre de cresta recta con un longitud de 100 m , cuenta con obra de toma del tipo de tubería a presión de $24''$ de diámetro.

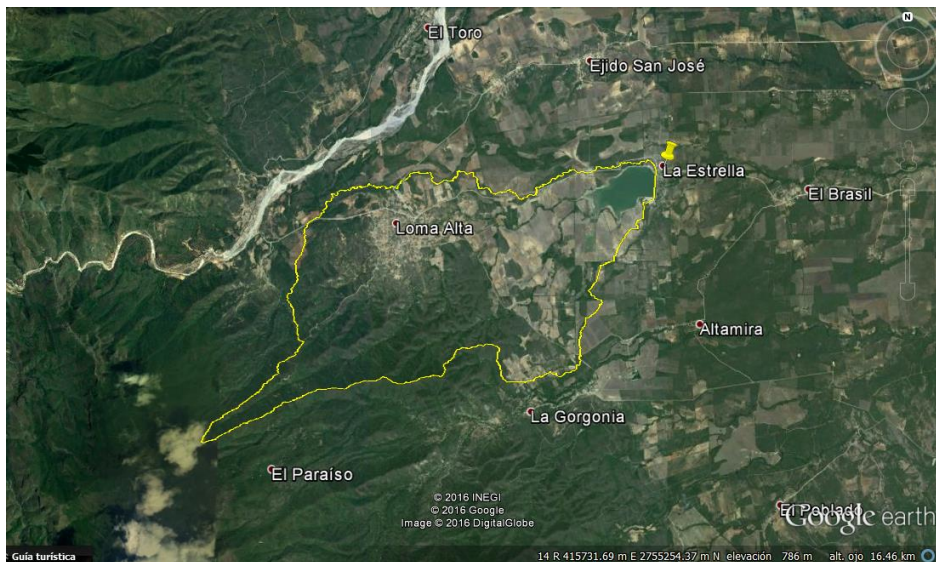


Figura V.2 Imagen satelital de la cuenca de la presa La Estrella (Google Earth).

La delimitación de la cuenca se realizó aplicando técnicas de interpretación asistida por computadora que tuvieron como insumos la siguiente información:

- Modelo digital del terreno
- Mapa de curvas de nivel escala 1:50,000
- Red hidrográfica interconectada
- Mapa de ubicación de la cortina de la presa.
- Imagen de satélite de alta resolución.

La corriente principal se determinó utilizando el criterio de orden de corriente (Figura V.3), siendo este de orden 4.

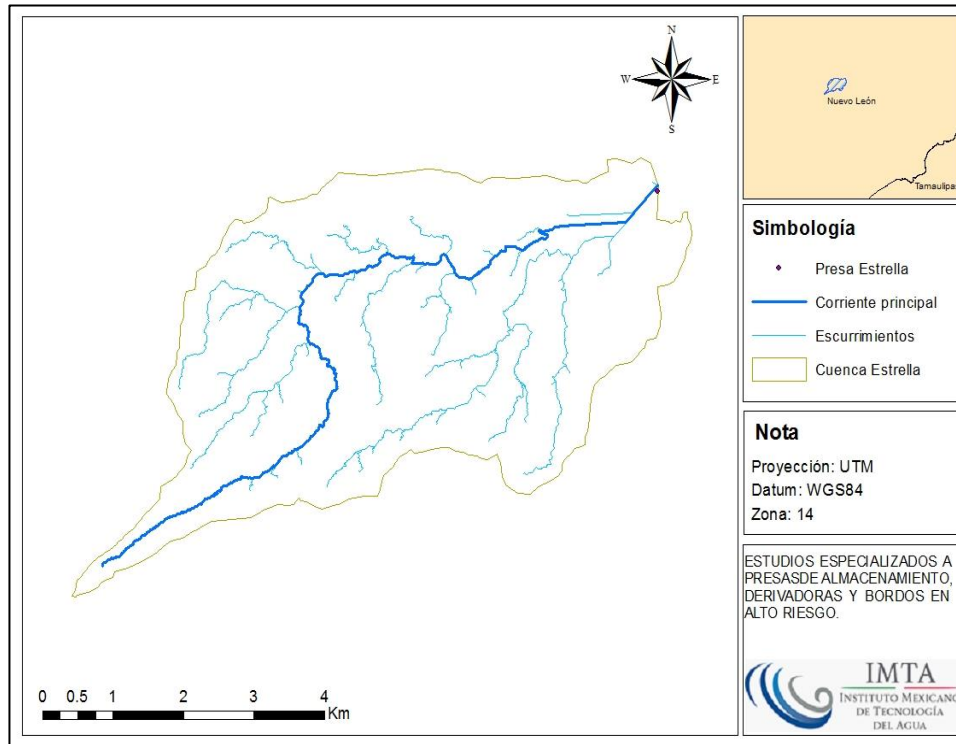


Figura V.3 Cuenca y ríos en la cuenca de la presa La Estrella.

V.2.2 Longitud, pendiente del cauce principal y tiempo de concentración.

El cauce principal tiene una longitud hasta el sitio de la obra en estudio de 13.540 km, la pendiente media del cauce principal se determinó con el método de Taylor y Schwarz, el cual propone calcular la pendiente media como la de un canal de sección transversal uniforme, entonces dividiendo el cauce principal del río en “m” tramos iguales de longitud Δx , se obtiene:

$$S = \left[\frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{l_m}{\sqrt{S_m}}} \right]^2 \quad (V.1)$$

Dónde:

S es la pendiente media del cauce adimensional

L es la longitud medida en planta del cauce en metros

l_m es la longitud del tramo m .

S_m es la pendiente media del tramo m .

$$S = \left[\frac{13540.218}{758514.40} \right]^2 = 0.00032 \quad (V.2)$$

En la Figura V.4 se muestra el perfil del cauce principal y, aplicando la ecuación (V.1) se tiene como resultado la ecuación (V.2) con una pendiente media de 0.00032.

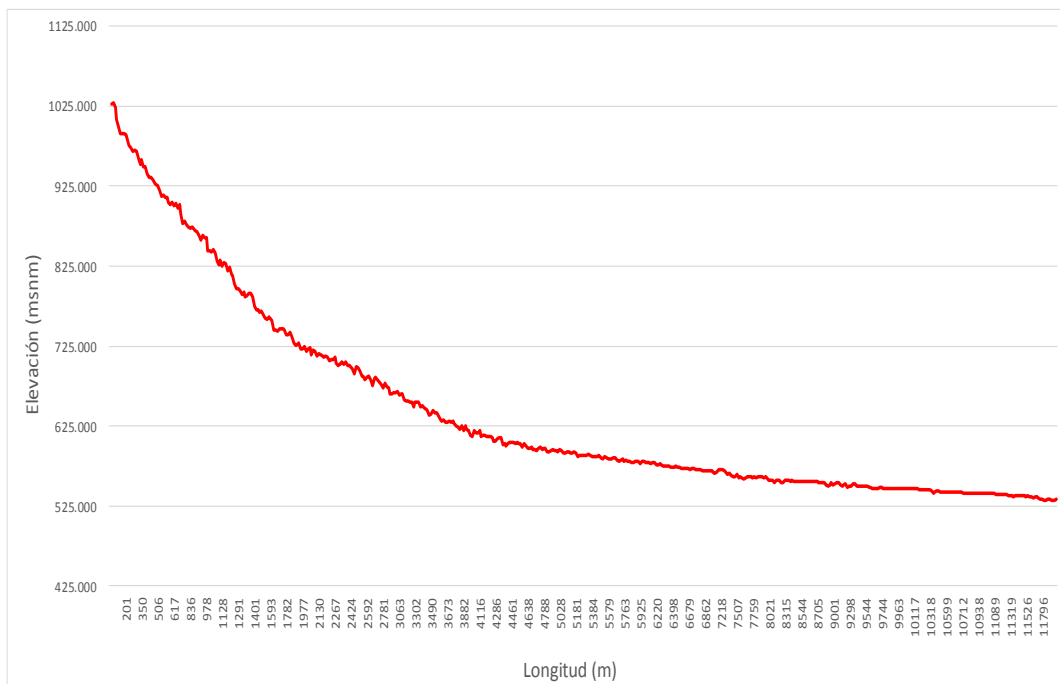


Figura V.4 Perfil del cauce principal km 0+000 al km 13+540.22.

Para el cálculo del tiempo de concentración se utilizó el método de Kirpich, cuya fórmula es:

$$t_c = 0.0003245 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (V.3)$$

Donde:

S es la pendiente del cauce principal adimensional

L es la longitud del cauce principal en metros

t_c tiempo de concentración en horas

Sustituyendo en la ecuación (V.3) se tiene:

$$t_c = 0.0003245 \frac{(13540.218)^{0.77}}{(0.00032)^{0.385}} = 10.934 \quad (\text{V.4})$$

Por lo que el tiempo de concentración es 10.934 horas, con una velocidad media de 2.907 m/s calculada con el método sección-pendiente. Posteriormente se calcula el tiempo de retraso con la ecuación (V.5):

$$t_r = 0.6t_c \quad (\text{V.5})$$

Al sustituir los valores da como resultado:

$$t_r = 0.6(10.934) = 6.560 \quad (\text{V.6})$$

Por lo que se tiene un tiempo de retraso de 6.560 horas.

V.2.3 Uso y tipo de suelo, número de curva y coeficiente de escurrimiento

Tomando como referencia la metodología y la carta de INEGI de uso de suelo y vegetación (escala 1:15,000), se realizó la clasificación de las imágenes de satélite y el mapa detallado de edafología y vegetación (Figura V.5).

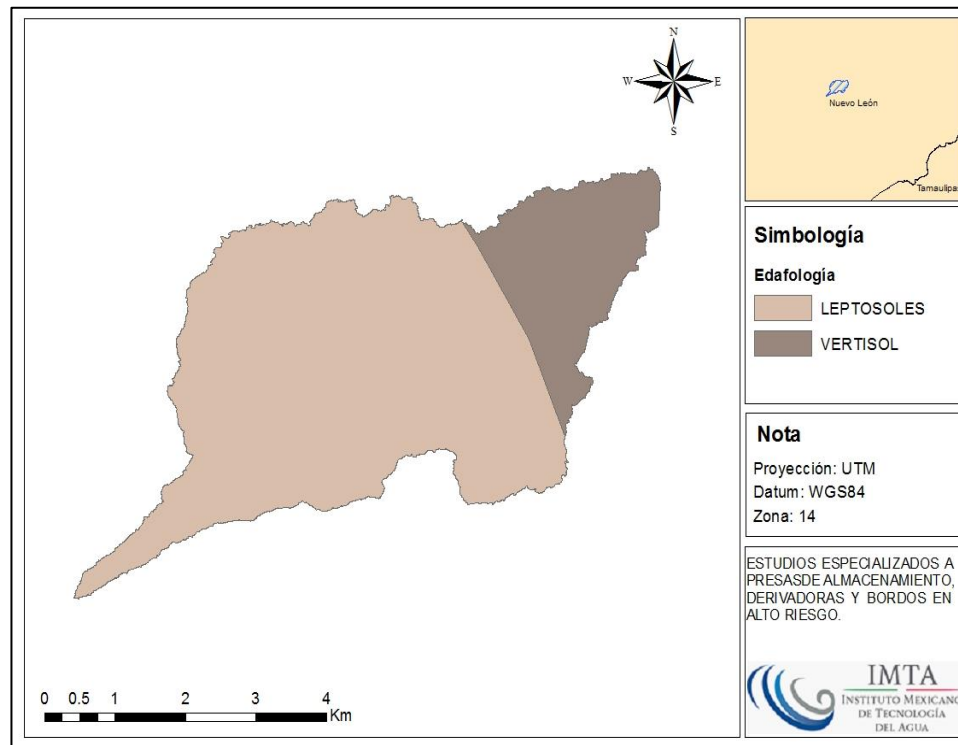


Figura V.5 Distribución de uso de suelo en la cuenca de acuerdo con INEGI.

En la cuenca se presentan dos tipos de suelo de acuerdo a su clasificación edafológica que presenta la carta de INEGI escala 1:250,000, los cuales son: Leptosol y Vertisol Eutricto. En la Tabla V.1 se resumen los datos principales correspondientes a la clasificación hidrológica de acuerdo al tipo de suelo.

Tabla V.1 Clasificación hidrológica de acuerdo a la edafología.

Tipo	Área km ²	Tipo hidrológico de suelo	Permeabilidad	%
Leptosoles	18.22	D	Alta	80.83
Vertisol Eutricto	4.32	D	Alta	19.17

Las características de los tipos de suelo dentro de la cuenca son:

- Leptosoles: el término leptosol deriva del vocablo griego "leptos" que significa delgado, haciendo alusión a su espesor reducido. El material original puede ser cualquiera tanto rocas como materiales no consolidados con menos del 10 % de tierra fina. Aparecen fundamentalmente en zonas altas o medias con una topografía escarpada y elevadas pendientes. Se encuentran en todas las zonas climáticas y, particularmente, en áreas fuertemente erosionadas. Son suelos poco o nada atractivos para cultivos; presentan una potencialidad muy limitada para cultivos arbóreos o para pastos. Lo mejor es mantenerlos bajo bosque.
- Vertisol Eutricto: del latín vertere, voltear, literalmente, suelo que se revuelve o que se voltea. Suelos de climas templados y cálidos, especialmente de zonas con una marcada estación seca y otra lluviosa. La vegetación natural va de selvas bajas a pastizales y matorrales. Se caracterizan por su estructura masiva y su alto contenido de arcilla, la cual es expandible en húmedo formando superficies de deslizamiento llamadas facetas, y que por ser colapsables en seco pueden formar grietas en la superficie o a determinada profundidad. Su color más común es el negro o gris oscuro en la zona centro a oriente de México y de color café rojizo hacia el norte del país. Su uso agrícola es muy extenso, variado y productivo.

Por otro lado, de acuerdo con información del uso de suelo de INEGI escala 1:50,000 en la cuenca predominan: Agricultura de temporal Anual y Permanente (40.65%), Bosque Pino-Encino (36.43%), Matorral Submontano (13.70 %) y Asentamientos Humanos (5.40 %), el resto de la cuenca queda integrado de pequeñas fracciones tal y como se presenta en la Figura V.6.

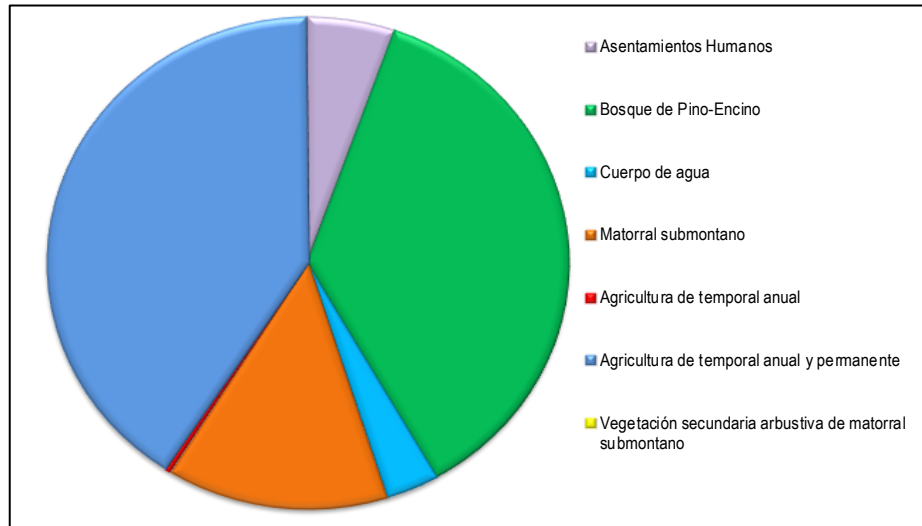


Figura V.6 Cobertura de suelo en la cuenca.

En la Tabla V.2 se muestra el Número de Curva (CN) según la cobertura para el cálculo del escurrimiento, con lo que se obtiene el CN ponderado para la presa Estrella que es 83.47.

Tabla V.2 Número de curva según la cobertura de suelo.

Uso de suelo	Tipo de suelo	Área (km ²)	CN
Asentamientos Humanos	Leptosol	1.22	98
Bosque de Pino-Encino	Leptosol	8.21	79
Matorral submontano	Leptosol	3.09	78
Agricultura de temporal anual	Leptosol	0.08	86
Agricultura de temporal anual y permanente	Leptosol	5.58	86
Agricultura de temporal anual y permanente	Vertisol Eutrico	3.58	86
Vegetación secundaria arbustiva de matorral submontano	Leptosol	0.04	89
Cuerpo de Agua	Vertisol Eutrico	0.74	100

Para la determinación del coeficiente de escurrimiento en la cuenca de estudio se utiliza la metodología propuesta por el *Natural Resources Conservation Service* (NRCS, antes *Soil Conservation Service* (SCS)) llamado Números de Escurrimiento, el cual propone que la lluvia total P se relaciona con la altura de lluvia efectiva P_e , a través de la ecuación (V.7):

$$P_e = \frac{\left[P - \frac{508}{CN} + 5.08 \right]^2}{P + \frac{2032}{CN} - 20.32} \quad (V.7)$$

Dónde:

P Altura de lluvia total en *cm*.

P_e Lluvia efectiva en *cm*.

CN Número de curva

Por otra parte, el coeficiente de escurrimiento C_e se calcula con la ecuación (V.8)

$$C_e = \frac{P_e}{P} \quad (V.8)$$

Dónde:

C_e = Coeficiente de escurrimiento.

P_e = Lluvia efectiva en *mm*

P = Altura de lluvia total en *mm*

En la Tabla V.3 se muestran los coeficientes de escurrimiento calculados para diferentes periodos de retorno.

Tabla V.3 Coeficientes de escurrimiento medio para cada período de retorno.

Tr (años)	P(mm)	Pe (mm)	Ce
2	93.78	52.30	0.56
5	149.95	102.89	0.69
10	194.64	145.05	0.75
20	240.91	189.55	0.79
50	304.28	251.26	0.83
100	353.74	299.80	0.85
200	404.44	349.77	0.86
500	473.26	417.82	0.88
1,000	526.60	470.70	0.89
2,000	580.99	524.70	0.90
5,000	654.47	597.75	0.91
10,000	711.16	654.16	0.92

V.3 Hidrometría y climatología

Para poder llevar a cabo la caracterización climática de la zona de estudio, así como la construcción del modelo hidrológico para la determinación de la avenida de diseño, es necesario contar con la información de precipitación, por lo que se recabó la información de precipitación de las estaciones cercanas a la zona de estudio.

V.3.1 Análisis de información hidrométrica

Debido a la falta de datos por la no existencia de estaciones hidrométricas en la cuenca, el cálculo de la avenida de diseño no se llevó a cabo por métodos directos.

V.3.2 Análisis de información climatológica

Para la determinación de las avenidas de diseño se consideraron el análisis de frecuencia de lluvias y las relaciones lluvia-escurrimiento, por lo que en este apartado se realiza el análisis de la información climatológica disponible.

Estaciones climatológicas

Dentro de la cuenca no se encuentran estaciones climatológicas o hidrométricas; no obstante, alrededor de ésta se localizan doce estaciones climatológicas que se enlistan en la Tabla V.4 y se muestra en la Figura V.7.

Tabla V.4 Estaciones climatológicas cercanas a la presa Estrella.

Clave	Tipo	Nombre	Coordenadas		
			Latitud	Longitud	Altitud
19007	Climatológica	Cabezones	24.99111111	-	460
19126	Climatológica	La Laja	24.91083333	-	410
19147	Climatológica	Las Crucitas	24.78111111	-	500
19185	Climatológica	El Canada	25.04666667	-	788

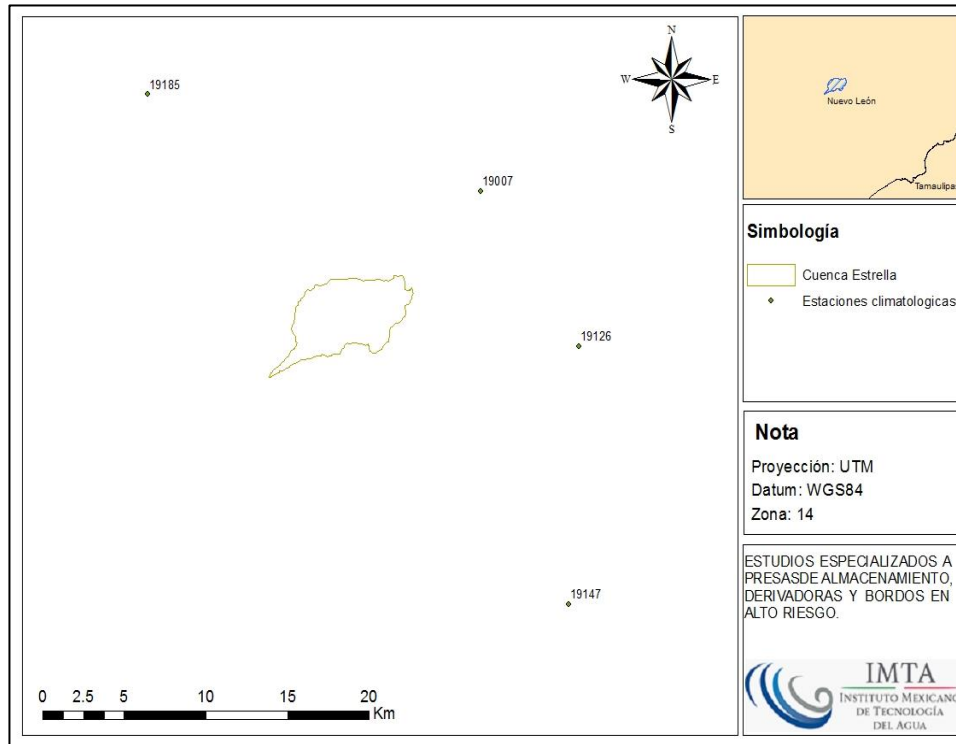


Figura V.7 Ubicación de las estaciones climatológicas.

Ya con las estaciones climatológicas ubicadas, se obtuvo la información de la base de datos climatológica Nacional CLICOM (Climate Computing Project), la cual presenta la precipitación máxima anual en 24 horas y es indispensable para el análisis de los diferentes periodos de retorno. La información disponible de las estaciones climatológicas alrededor de la cuenca muestran un periodo de observación variable de datos; la estación con más datos es la 19007 con un período continuo de 46 años y la de menor cantidad de datos es la 19185 con solo 14 años de registro (Tabla V.5).

Es importante considerar que para poder realizar una deducción con una interpolación polinomial por mínimos cuadrados se necesitan más de dos estaciones con registros continuos.

Tabla V.5 Precipitación máxima anual en las estaciones, con una duración de 24 horas.

Año	19007	19126	19147	19185
1961	390.0			
1962	75.0			
1963	63.5			
1964	61.5			
1965	42.0			
1966	69.5			
1967	119.4			
1968	90.5			
1969	73.0			
1970	103.5			
1971	74.0			
1972	147.0			
1973	86.0			
1974	140.0			
1975	88.0			
1976	114.0			
1977	123.0			
1978	201.5			
1979	75.0	55.0		
1980	54.0	47.0		
1981	101.5	62.5	73.0	
1982	32.0	60.0	39.5	
1983	80.3	80.5	60.0	
1984	55.0	90.0		
1985	160.0	47.0	100.0	
1986	105.0	89.0	38.0	
1987	100.0	45.0		
1988	296.0	301.8		
1989	104.5	60.0		
1990	168.0	56.0		
1991	92.7	65.0		
1992	51.6	55.0		
1993	107.2	80.5		
1994	63.0	66.5		
1995	150.5	140.0		
1996	65.0	62.5		
1997	162.5	57.5	83.0	38.0
1998	90.0	80.0	102.0	46.0
1999	145.5	72.0	122.5	98.0
2000	138.5	155.0	129.0	41.5
2001	148.6	120.0	113.0	43.0
2002	107.2		131.0	34.0

Año	19007	19126	19147	19185
2003	90.4		141.0	40.0
2004	132.5		94.5	32.0
2005	213.9		172.0	31.0
2006	75.0		53.0	38.0
2007				
2008	105.0	127.0	91.0	103.5
2009	79.3	61.7	186.5	42.0
2010	242.4	204.0	126.5	151.0
2011	82.2	80.0	73.0	65.2
2012	86.3			
2013	139.0			

Homogeneidad e Independencia

Se realizaron las pruebas de independencia y homogeneidad, para asegurar que no existan inconsistencias en el registro de los datos, en la serie de datos las estaciones 19007,19126,19147 y 19185, que son las estaciones climatológicas que tienen mayor influencia en la zona de estudio de acuerdo al análisis realizado con el método de los polígonos de Thiessen (Figura V.12).

Homogeneidad

La prueba de homogeneidad asegura que la tendencia en la media o en la varianza de la serie de tiempo no presente inconsistencias. Las pruebas aplicadas fueron: Helmert, t de Student y Cramer que se desarrollan a continuación.

Prueba de Helmert

Esta prueba consiste en analizar el signo de las desviaciones de cada evento X_i de la serie con respecto a su valor medio. Si una desviación de un cierto signo es seguida de otra del mismo signo, entonces se dice que se forma una secuencia S, en caso contrario se considera como un cambio C.

La serie se considera homogénea si se cumple:

$$-\sqrt{n_j - 1} \leq (\bar{S} - \bar{C}) \leq \sqrt{n_j - 1} \quad (V.9)$$

Donde:

n_j : Número de datos

S: Secuencia

C: Cambio

Resultados de la prueba de cada estación analizada

Estación 19007

Número de datos de la prueba n_j : 52

Número de secuencias S: 25

Número de cambios C: 26

(S-C): -1

$-7.14 \leq (-1) \leq 7.14$La muestra es homogénea

Estación 19126

Número de datos de la prueba n_j : 27

Número de secuencias S: 16

Número de cambios C: 10

(S-C): 6

$-5.10 \leq (6) \leq 5.10$La muestra es no homogénea

Estación 19147

Número de datos de la prueba n_j : 19

Número de secuencias S: 12

Número de cambios C: 6

(S-C): 12

$4.24 \leq (12) \leq 4.24$La muestra es no homogénea

Estación 19185

Número de datos de la prueba n_j : 14

Número de secuencias S: 8

Número de cambios C: 5

(S-C): 3

$-3.61 \leq (3) \leq 3.61$La muestra es homogénea

Prueba t de Student

Si se considera una serie x_i para $i=1, 2,3,\dots,n$ de un sitio, la cual se divide en 2 conjuntos de tamaño $n_1=n_2=n/2$, entonces la prueba se define con la expresión:

$$t_d = \frac{x_1 - x_2}{\left[\frac{n_1 S_1^2 + n_2 S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (V.10)$$

Donde:

x_1, S_1 : Media y varianza del primer conjunto de registro n_1 .

x_2, S_2 : Media y varianza del primer conjunto de registro n_2 .

Si y solo si el valor absoluto de t_d es mayor que el valor de la distribución t de Student, se concluye que la diferencia entre las medias es evidencia de inconsistencia y, por lo tanto, la serie se considera no homogénea.

Resultado de la prueba de cada estación analizada

Estación 19007

Conjunto 1:

$n_1=26$

$X_1=104.777$

$S_1=69.773$

Conjunto 2:

$n_2=26$

$X_2=124.492$

$S_2=57.457$

Valor del estadístico de prueba $t_d=-1.091$

Grados de libertad=50

Valor t de Student: 2.009

Como $t_d < t$ de Student la muestra es homogénea

Estación 19126

Conjunto 1:

$n_1=13$

$X_1=81.446$

$S_1=67.875$

Conjunto 2:

$n_2=14$

$X_2=97.264$

$S_2=44.941$

Valor del estadístico de prueba $t_d=-0.692$

Grados de libertad=25

Valor t de Student: 2.060

Como $t_d < t$ de Student la muestra es homogénea

Estación 19147

Conjunto 1:

$n_1=9$

$X_1=83.000$

$S_1=33.303$

Conjunto 2:

$n_2=10$

$X_2=118.150$

$S_2=42.077$

Valor del estadístico de prueba $t_d=-1.896$

Grados de libertad=17

Valor t de Student: 2.110 Como $t_d < t$ de Student la muestra es homogénea
Estación 19185

Conjunto 1:	Conjunto 2:
$n_1=7$	$n_2=7$
$X_1=48.6436$	$X_2=66.100$
$S_1=22.092$	$S_2=45.411$

Valor del estadístico de prueba $t_d = -0.847$ Grados de libertad=12

Valor t de Student: 2.179 Como $t_d < t$ de Student la muestra es homogénea

Prueba de Cramer

Esta prueba se utiliza con el propósito de verificar la homogeneidad en el registro x_i de la muestra y también para determinar si el valor medio no varía significativamente de un periodo de tiempo a otro. Con este propósito se consideran 3 bloques, el primero del tamaño total de la muestra n ; el segundo de tamaño n_{60} (el 60% de los últimos valores de la muestra n) y el tercero del tamaño n_{30} (el 30% de los últimos valores de la muestra n). La prueba compara el valor de \bar{x} del registro total con la media de cada uno de los bloques. Para que se considere la serie como estacionaria, se deberá cumplir que no existe una diferencia significativa entre la media de los bloques.

$$t_w = \left(\frac{n_w(n_j - 2)}{n_j - n_w[1 + (\tau_w^j)^2]} \right)^{\frac{1}{2}} |\tau_w^j| \quad (V.11)$$

$$\tau_{60}^j = \frac{\bar{x}_{60} - \bar{x}}{S_x} \quad (V.12)$$

$$\tau_{30}^j = \frac{\bar{x}_{30} - \bar{x}}{S_x} \quad (V.13)$$

Donde:

\bar{x} : Media de la muestra completa

S_x : Desviación estándar de la muestra completa

\bar{x}_{60} : Media del bloque 1

\bar{x}_{30} : Media del bloque 2

El estadístico t_w tiene distribución t de Student si y solo si el valor absoluto de t_w , para $w=60$ y $w=30$, es mayor que la correspondiente t de Student, se concluye que la diferencia entre las medias es evidencia de inconsistencia y, por tanto, la muestra x_i se considera no homogénea; en caso contrario la serie es homogénea.

Resultado de la prueba de cada estación analizada

Estación 19007

Conjunto 1 (60% de la muestra):

$$n_1=31$$

$$X_1=118.36$$

$$\tau_{60}=0.05812$$

$$t_{60}=4.31160$$

Valor t de Student: 2.01

Como $t_{60} < t$ de Student la muestra es no homogénea

Como $t_{30} < t$ de Student la muestra es no homogénea

homogénea

Conjunto 2: (30% de la muestra)

$$n_2=16$$

$$X_2=127.39$$

$$\tau_{30}=0.19917$$

$$t_{30}=4.50552$$

La muestra es no

Estación 19126

Conjunto 1 (60% de la muestra):

$$n_1=16$$

$$X_1=92.669$$

$$\tau_{60}=0.05339$$

$$t_{60}=1.94948$$

Valor t de Student: 2.07

Como $t_{60} < t$ de Student la muestra es homogénea

Como $t_{30} < t$ de Student la muestra es no homogénea

homogénea

Conjunto 2: (30% de la muestra)

$$n_2=8$$

$$X_2=112.463$$

$$\tau_{30}=0.40324$$

$$t_{30}=4.55658$$

La muestra es no

Estación 19147

Conjunto 1 (60% de la muestra):

$$n_1=11$$

$$X_1=119.3136$$

$$\tau_{60}=0.42733$$

$$t_{60}=13.33780$$

Valor t de Student: 2.13

Como $t_{60} > t$ de Student la muestra es no homogénea

Como $t_{30} < t$ de Student la muestra es no homogénea

homogénea

Conjunto 2: (30% de la muestra)

$$n_2=6$$

$$X_2=117.000$$

$$\tau_{30}=0.37557$$

$$t_{30}=3.15193$$

La muestra no es

Estación 19185

Conjunto 1 (60% de la muestra):

$$n_1=8$$

$$X_1=62.838$$

$$\tau_{60}=0.15405$$

$$t_{60}=2.54528$$

Valor t de Student: 2.23

Conjunto 2: (30% de la muestra)

$$n_2=4$$

$$X_2=90.425$$

$$\tau_{30}=0.93153$$

$$t_{30}=6.84836$$

Como $t_{60} > t$ de Student la muestra es no homogénea

Como $t_{30} < t$ de Student la muestra es no homogénea
homogénea

La muestra no es

Resumen de las pruebas de homogeneidad

Para que la serie se considere homogénea tiene que cumplir al menos con dos pruebas, por lo que en este caso las tres estaciones cumplen con la homogeneidad.

Tabla V.6 Resumen de las pruebas de homogeneidad para las estaciones analizadas.

Clave de estación	Helmert	t de Student	Cramer	Resultados de homogeneidad
19007	Homogénea	Homogénea	No homogénea	Homogénea
19126	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Homogénea
19147	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Homogénea
19185	Homogénea	Homogénea	No homogénea	Homogénea

Independencia

La independencia asegura que el evento presentado en un año cualquiera no tiene nada que ver con el año o años que le anteceden.

Para poder realizar el análisis de frecuencias se requiere que la muestra x_i de la serie de datos esté compuesta por variables aleatorias, es decir, los elementos de la muestra deben de ser independientes entre sí. Para probarlo se aplicará la prueba de Anderson, la cual hace uso del coeficiente de autocorrelación serial r_k para diferentes tiempos de retraso k . La expresión para obtener el coeficiente de autocorrelación serial de retraso k es:

$$r_k = \frac{\sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x})}{\sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2}, \text{ para } r_0 = 1 \text{ y } k = 1, 2, \dots, \frac{n}{3} \quad (\text{V.14})$$

Donde

r_k : Coeficiente de autocorrelación serial

x, x_i : Elementos de la muestra de la serie de datos independientes entre sí

k : tiempo de retraso = $\frac{n}{3}$

n : número de datos

Además, los límites al 95% de confianza para r_k se puede obtener como:

$$r_k(95\%) = \frac{-1 \pm 1.96\sqrt{n-k-1}}{n-k} \quad (V.15)$$

La gráfica de los valores estimados para r_k (ordenadas) contra los tiempos de retraso k (abscisas), junto con sus correspondientes límites de confianza, se llama correlograma de la muestra. Si solo el 10% o menos de los valores de r_k sobrepasan los límites de confianza se dice que la serie es independiente.

A continuación se muestra el desarrollo del análisis de independencia para las estaciones:

Tabla V.7 Valores de Correlograma de la estación 19007.

K	r_k	Límite inferior r	Límite superior
1	-0.088	-0.291	0.252
2	0.046	-0.294	0.254
3	-0.067	-0.298	0.257
4	-0.074	-0.301	0.259
5	-0.063	-0.304	0.262
6	-0.163	-0.308	0.264
7	0.007	-0.311	0.267
8	-0.132	-0.315	0.269
9	-0.014	-0.319	0.272
10	0.06	-0.323	0.275
11	0.071	-0.327	0.278
12	0.089	-0.331	0.281
13	-0.031	-0.335	0.284
14	0.041	-0.34	0.287
15	-0.047	-0.345	0.291
16	0.076	-0.35	0.294
17	0.179	-0.355	0.298

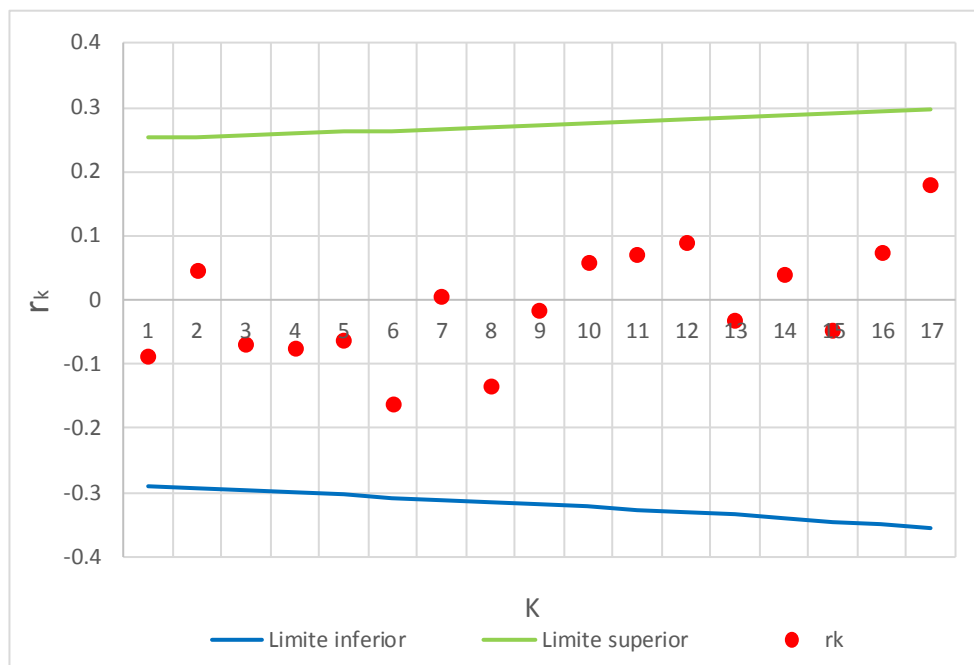


Figura V.8 Correlograma de la estación 19007.

Tabla V.8 Valores de Correlograma de la estación 19126.

K	r_k	Límite inferior	Límite superior
1	-0.161	-0.415	0.338
2	0.073	-0.424	0.344
3	-0.129	-0.433	0.35
4	0.023	-0.443	0.356
5	0.029	-0.454	0.363
6	-0.085	-0.465	0.37
7	0.133	-0.477	0.377
8	-0.228	-0.49	0.385
9	-0.051	-0.505	0.393

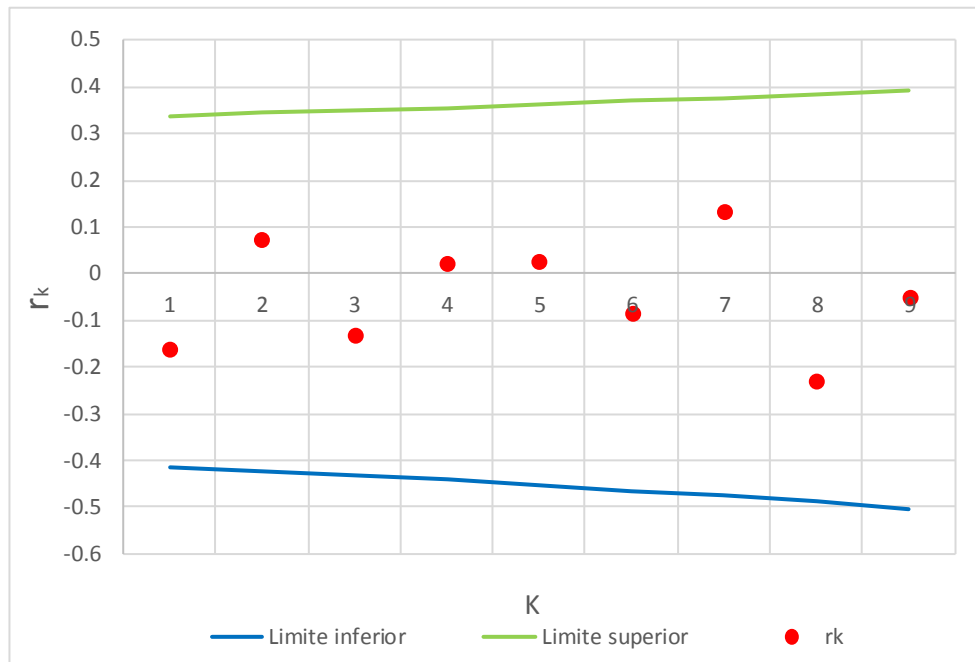


Figura V.9 Correlograma de la estación 19126.

Tabla V.9 Valores de Correlograma de la estación 19147.

K	r_k	Límite inferior	Límite superior
1	0.16	-0.505	0.393
2	0.013	-0.52	0.402
3	0.321	-0.537	0.412
4	0.102	-0.556	0.422
5	0.014	-0.576	0.433
6	-0.044	-0.599	0.445

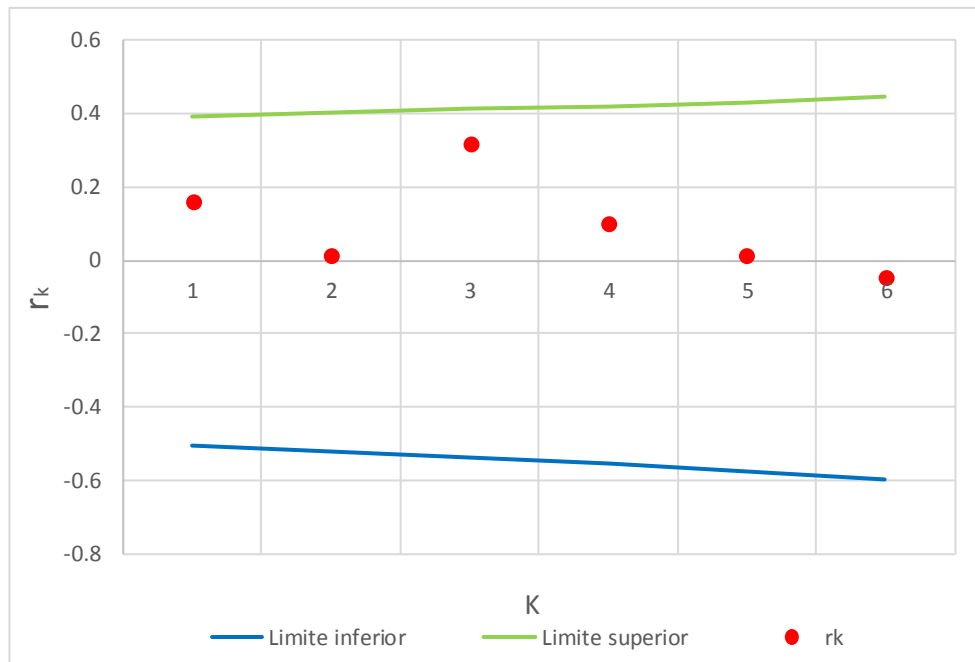


Figura V.10 Correlograma de la estación 19147.

Tabla V.10 Valores de Correlograma de la estación 19185.

K	r_k	Límite inferior	Límite superior
1	-0.037	-0.599	0.445
2	0.26	-0.625	0.458
3	-0.067	-0.654	0.473
4	-0.12	-0.688	0.488
5	-0.188	-0.727	0.505

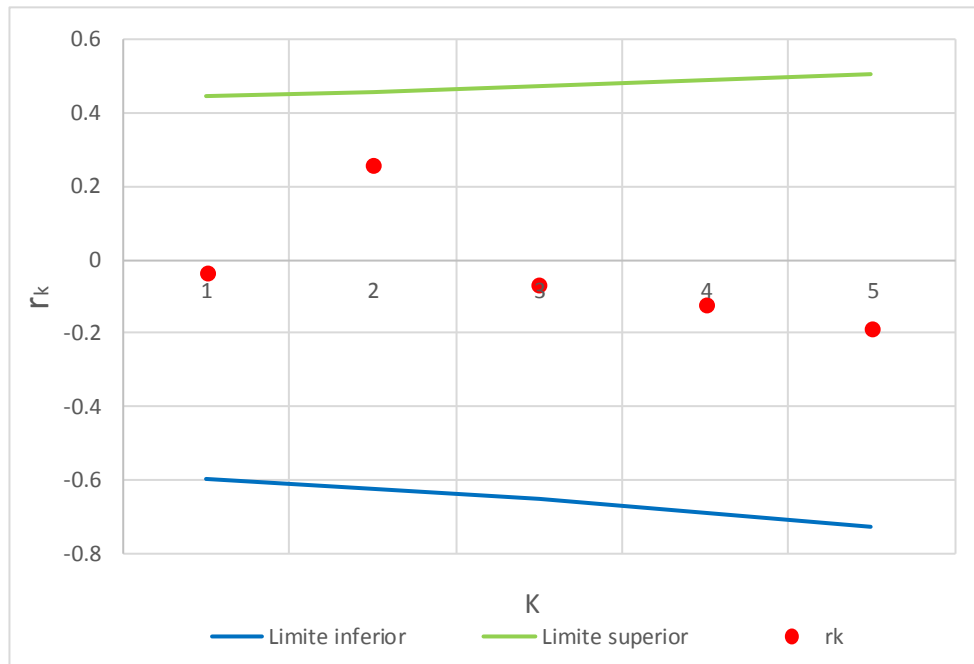


Figura V.11 Correlograma de la estación 19185.

Como se muestra en la Tabla V.11, las tres estaciones analizadas muestran una serie de datos independiente.

Tabla V.11 Resultados de la prueba de Independencia.

Estación	19007	19126	19147	19185
Figura	Figura V.8	Figura V.9	Figura V.10	Figura V.11
Resultados de Independencia	Independiente	Independiente	Independiente	Independiente

Conclusiones de homogeneidad e Independencia

Como se muestra en la Tabla V.12, los resultados indican que las tres estaciones cumplen con la independencia y homogeneidad, por lo que pueden utilizarse para el cálculo de la avenida de diseño.

Tabla V.12 Estaciones con independencia y homogeneidad.

Estación	Independencia	Homogeneidad
19007	Si	Si
19126	Si	No
19147	Si	No
19185	Si	Si

V.4 Precipitación para diferentes periodos de retorno

El cálculo de la tormenta para diferentes periodos de retorno requirió la extrapolación de los datos, para ello se utilizó la estimación de la función de distribución de probabilidad de mejor ajuste con el programa A.F.A. (Análisis de Frecuencias Automatizada) para el análisis de Frecuencia de Datos Hidrológicos (IMTA, 2012). De acuerdo con este método, la distribución que presente el menor error cuadrático se selecciona para estimar los datos de precipitación para diferentes periodos de retorno. Con los valores de la precipitación máxima anual en 24 horas de las estaciones analizadas se llevó a cabo el análisis de frecuencias, para lo cual se utilizaron las funciones de distribución de probabilidad siguientes:

- Normal
- Lognormal 2 y 3 parámetros,
- Gumbel,
- Exponencial,
- Gamma 2 y 3 parámetros
- Log Pearson III

- Valores extremos

Los resultados de dicho análisis se presentan en las Tabla V.13 y Tabla V.14.

Tabla V.13 Error Estándar de Ajuste 19007.

Función	Momentos		Máxima Verosimilitud	
	2 Parámetros	3 Parámetros	2 Parámetros	3 Parámetros
Normal	29.94311	-	29.94311	-
Lognormal	19.5599	15.24475	19.5599	17.97326
Gumbel	19.61641	-	24.45455	-
Exponencial	14.84995	-	18.79385	-
Gamma	19.66409	14.70158	23.11608	20.40483
LogPearson III	16.00032	-	16.95169	-
Valores Extremos	16.02179	-	-	-

De acuerdo a la Tabla V.13, para la estación 19007 se concluye que la mejor función de distribución para la serie de datos es la Gamma tres parámetros por el método de momentos, seguida por la Gamma tres parámetros por el método de momentos; mientras que las funciones que menos se ajustan a los datos son la Normal dos parámetros por el método de momentos y Normal dos parámetros por el método de máxima verosimilitud.

Tabla V.14 Error Estándar de Ajuste 19185.

Función	Momentos		Máxima Verosimilitud	
	2 Parámetros	3 Parámetros	2 Parámetros	3 Parámetros
Normal	20.01722	-	20.01722	-
Lognormal	17.98789	15.31513	17.98789	12.61192
Gumbel	15.83738	-	20.56038	-
Exponencial	13.19589	-	16.73551	-
Gamma	15.12477	14.09198	17.78946	20.44779
LogPearson III	16.00371	-	18.87625	-
Valores Extremos	15.89768	-	-	-

De acuerdo a la Tabla V.14, para la estación 19185 se concluye que la mejor función de distribución para la serie de datos es la Lognormal tres parámetros por el método de máxima verosimilitud, seguida por la Exponencial dos parámetros por el método de momentos; mientras que las funciones que menos se ajustan a los datos son la Gumbel dos parámetros por el método de máxima verosimilitud y Gamma tres parámetros por el método de máxima verosimilitud.

La Tabla V.15 contiene los valores extrapolados de la lluvia máxima en 24 h para distintos periodos de retorno, para las funciones de mejor ajuste de la estación 19007, que son las que se usara en análisis posteriores debido a que es la que tienen mayor influencia dentro de la cuenca.

Tabla V.15 Precipitaciones máximas para diferentes periodos de retorno (tr) y una duración de 24 h.

Tr (años)	Hp (mm)
2	93.778
5	149.948
10	194.639
20	240.913
50	304.276
100	353.742
200	404.443
500	473.257
1,000	526.598
2,000	580.992
5,000	654.473
10,000	711.156

V.4.1 Precipitación media para diferentes duraciones y periodos de retorno

Para la obtención de la precipitación media en la cuenca de estudio, se utilizó el método de los polígonos de Thiessen (Figura V.12).

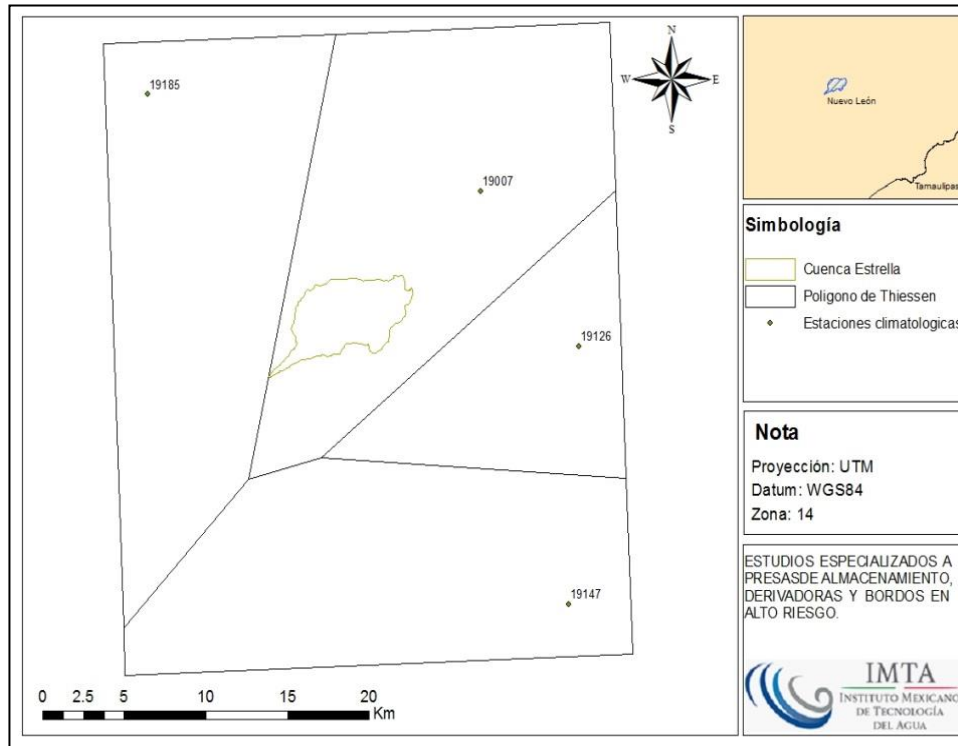


Figura V.12 Polígonos de Thiessen para la zona de estudio.

La tormenta o lluvia media se calculó como el promedio pesado de las precipitaciones registradas en cada estación para el T_r dado, usando como peso el área de influencia correspondiente.

$$\bar{h}_p = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^n A_i h_{pi} \quad (V.16)$$

Dónde:

- h_p Precipitación media total en mm .
- A_T Área total del polígono en km^2 .
- h_{pi} Precipitación media en la estación i en mm .
- A_i Área de influencia de la estación i en km^2 .

Para obtener la precipitación para duraciones distintas a $24 h$, éstas se afectan por un factor de reducción por duración, en la Tabla V.16 se presentan algunos factores de reducción determinados por el Instituto de Ingeniería de la UNAM con el análisis de más de 1,000 estaciones climatológicas del país (Atlas Nacional de Riesgos, 2010).

Tabla V.16 Factores de reducción de duración.

Factor_1h	Factor_2h	Factor_3h	Factor_4h	Factor_5h	Factor_6h	Factor_7h	Factor_8h
0.65	0.76	0.81	0.86	0.89	0.91	0.93	0.95

Al afectar a la precipitación con duración de 24 h, obtenida para distintos periodos de retorno, por el factor de reducción, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla V.17

Tabla V.17 Precipitación media en mm para diferentes duraciones y periodos de retorno.

Tr (años)	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h	7 h	8 h	24 h
2	60.96	71.27	75.96	80.65	83.46	85.34	87.21	89.09	93.78
5	97.47	113.96	121.46	128.96	133.45	136.45	139.45	142.45	149.95
10	126.52	147.93	157.66	167.39	173.23	177.12	181.01	184.91	194.64
20	156.59	183.09	195.14	207.19	214.41	219.23	224.05	228.87	240.91
50	197.78	231.25	246.46	261.68	270.81	276.89	282.98	289.06	304.28
100	229.93	268.84	286.53	304.22	314.83	321.91	328.98	336.05	353.74
200	262.89	307.38	327.60	347.82	359.95	368.04	376.13	384.22	404.44
500	307.62	359.68	383.34	407.00	421.20	430.66	440.13	449.59	473.26
1,000	342.29	400.21	426.54	452.87	468.67	479.20	489.74	500.27	526.60
2,000	377.64	441.55	470.60	499.65	517.08	528.70	540.32	551.94	580.99
5,000	425.41	497.40	530.12	562.85	582.48	595.57	608.66	621.75	654.47
10,000	462.25	540.48	576.04	611.59	632.93	647.15	661.38	675.60	711.16

Intensidades para diferentes duraciones y periodos de retorno

Se obtuvo la intensidad para cada duración y periodo de retorno con el fin de obtener las curvas intensidad, duración, periodo de retorno (i-d-Tr) como se muestra en la

Tabla V.18

Tabla V.18 Intensidades (mm/h) para diferentes duraciones y periodos de retorno.

Tr (años)	Intensidades (mm/h) para diferentes duraciones y periodos de retorno.								
	60	120	180	240	300	360	420	480	1440
2	60.96	35.64	25.32	20.16	16.69	14.22	12.46	11.14	3.91
5	97.47	56.98	40.49	32.24	26.69	22.74	19.92	17.81	6.25
10	126.52	73.96	52.55	41.85	34.65	29.52	25.86	23.11	8.11
20	156.59	91.55	65.05	51.80	42.88	36.54	32.01	28.61	10.04

Tr (años)	Intensidades (mm/h) para diferentes duraciones y periodos de retorno.								
	60	120	180	240	300	360	420	480	1440
50	197.78	115.62	82.15	65.42	54.16	46.15	40.43	36.13	12.68
100	229.93	134.42	95.51	76.05	62.97	53.65	47.00	42.01	14.74
200	262.89	153.69	109.20	86.96	71.99	61.34	53.73	48.03	16.85
500	307.62	179.84	127.78	101.75	84.24	71.78	62.88	56.20	19.72
1,000	342.29	200.11	142.18	113.22	93.73	79.87	69.96	62.53	21.94
2,000	377.64	220.78	156.87	124.91	103.42	88.12	77.19	68.99	24.21
5,000	425.41	248.70	176.71	140.71	116.50	99.26	86.95	77.72	27.27
10,000	462.25	270.24	192.01	152.90	126.59	107.86	94.48	84.45	29.63

Con los datos de la Tabla V.18

Tabla V.18, el sistema de ecuaciones se ajusta con:

$$\begin{aligned}
 Na_0 + a_1 \sum x_1 + a_2 \sum x_2 &= \sum y \\
 a_0 \sum x_1 + a_1 \sum (x_1)^2 + a_2 \sum (x_1 x_2) &= \sum (x_1 y) \\
 a_0 \sum x_2 + a_1 \sum (x_1 x_2) + a_2 \sum (x_2)^2 &= \sum (x_2 y)
 \end{aligned}
 \tag{V.17}$$

Dónde:

- N Número de datos
- x_1 Logaritmo de los tr para cada duración.
- x_2 Logaritmo de las duraciones para cada Tr.
- y Logaritmo de las intensidades.
- a_0 Incógnita a determinar
- a_1 Incógnita a determinar
- a_2 Incógnita a determinar

Por tanto el sistema de ecuaciones queda como:

$$\begin{aligned}
 108.0 \cdot a_0 + 234.000 \cdot a_1 + 263.869 \cdot a_2 &= 134.67 \\
 234.000 \cdot a_0 + 650.850 \cdot a_1 + 571.716 \cdot a_2 &= 311.40 \\
 263.869 \cdot a_0 + 571.716 \cdot a_1 + 659.436 \cdot a_2 &= 316.35
 \end{aligned}
 \tag{V.18}$$

Obteniendo así lo siguiente:

- $\therefore a_0 = 3.414$
- $\therefore a_1 = 0.221$
- $\therefore a_2 = -0.860$

El cálculo de las curvas de intensidad – duración – periodo (i-d-Tr) se realiza con la ecuación siguiente:

$$i = \frac{kTr^m}{d^n} \quad (V.19)$$

Donde:

- i* Intensidad de lluvia en *mm/h*.
- Tr* Periodo de retorno en años.
- d* Duración en minutos.
- n* Es el valor absoluto de $a_2=0.860$
- m* Es el valor de $a_1=0.221$
- k* Es el antilogaritmo de $a_0=2,595.67$

Las constantes *k*, *m* y *n* provienen de la correlación lineal múltiple realizada previamente, por lo tanto la ecuación de las curvas i-d-Tr queda como sigue:

$$i = \frac{1,129.82 Tr^{0.0732}}{d^{0.8601}} \quad (V.20)$$

Con estos parámetros se obtienen las familias de curvas de las i-d-Tr que se muestran en la Figura V.13. Cada una de las curvas se interpreta como una curva masa de precipitación para un periodo de retorno dado, por lo que se puede obtener un hietograma que puede utilizarse como tormenta de diseño para alimentar algún modelo lluvia-escurrimiento (Hidrograma unitario).

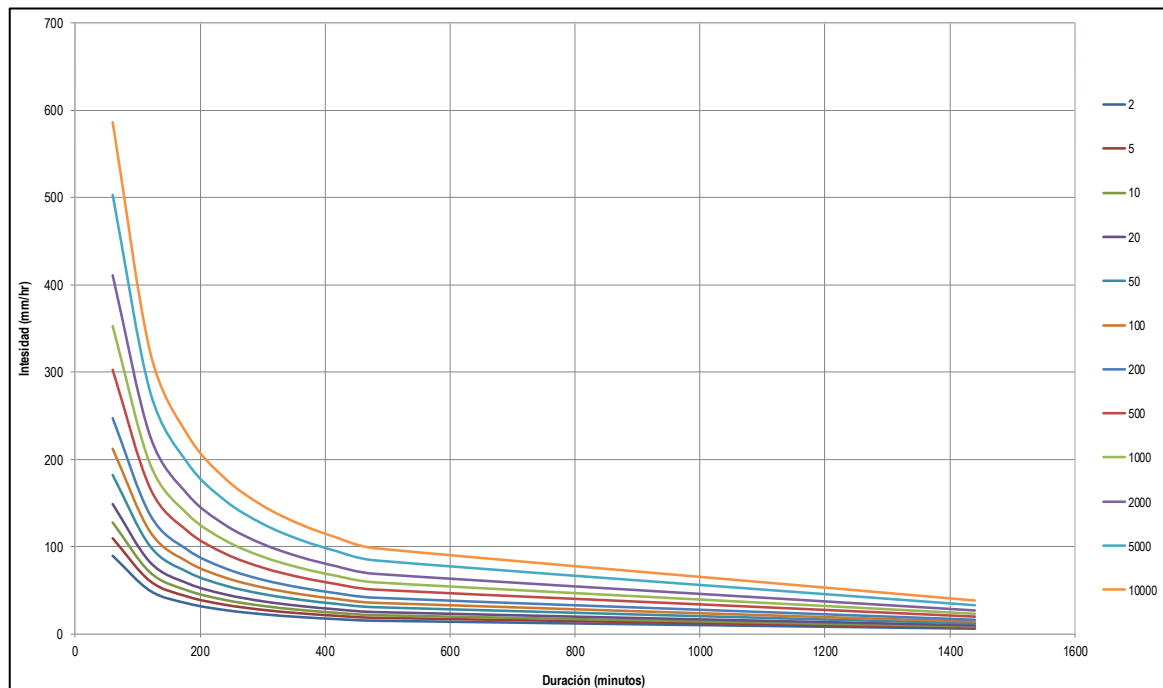


Figura V.13 Curvas i-d-Tr.

V.5 Hietograma de Diseño

Para la obtención del hietograma se hace uso de las curvas i-d-Tr y su configuración se lleva a cabo de acuerdo al “Instructivo de Hidrología para determinar la Avenida Máxima Ordinaria asociada a la delimitación de la Zona Federal” (CONAGUA 1988), en el cual se recomienda dividir el hietograma en 8 intervalos de acuerdo a la Tabla V.19.

Tabla V.19 Intervalos del hietograma.

Intervalo	%
1er intervalo	4.00
2do intervalo	4.8
3er intervalo	8.8
4to intervalo	22.2
5to intervalo	37.8
6to intervalo	12.2
7mo intervalo	5.7
8vo intervalo	4.5

En la Figura V.14 se muestra un hietograma para un periodo de retorno de 10,000 años para la cuenca de la presa Estrella, cuya duración se eligió de acuerdo a la información disponible, es decir, precipitación a 1 hora.

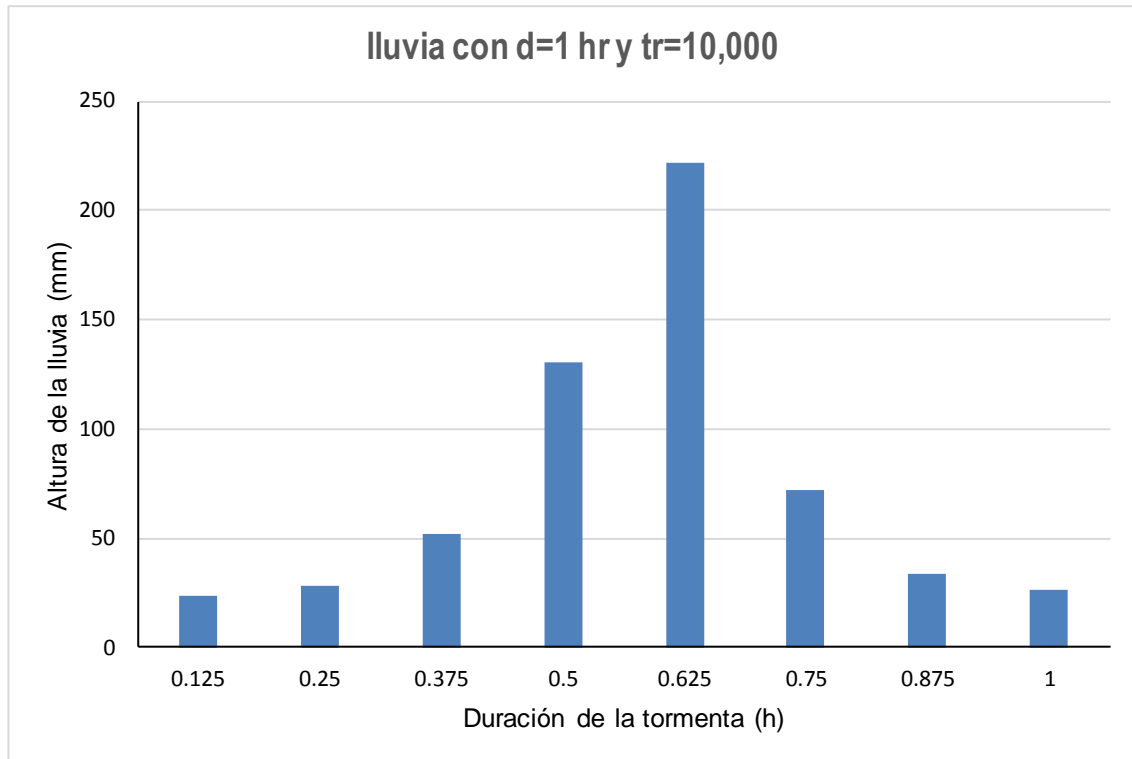


Figura V.14 Hietograma para un periodo de retorno de 10,000 años para la duración de 1 hora para la cuenca de la presa Estrella.

Con las curvas i-d-Tr, se pueden configurar distintos hietogramas para distintas duraciones y periodos de retorno (Detalle en Anexo 3).

V.6 Cálculo de avenidas

V.6.1 Cálculo de avenidas con información hidrométrica

Debido a la falta de datos por la no existencia de estaciones hidrométricas en la cuenca, el cálculo de la avenida de diseño no se llevó a cabo por éste método.

V.6.2 Cálculo de avenidas con información climatológica

Este análisis considera la información climatológica disponible y un modelo lluvia-escorrentamiento por medio del hidrograma unitario. Para la determinación de las avenidas de diseño se consideraron el análisis de frecuencia de avenida y las relaciones lluvia-escorrentamiento. A continuación, se muestran la metodología empleada y los resultados obtenidos.

Hidrograma unitario sintéticos triangular y curvilíneo de la SCS

Para obtener el hidrograma triangular se calcula el gasto pico con su respectivo tiempo pico y tiempo base. Para el cálculo del gasto y los tiempos respectivos se hacen uso de las fórmulas siguientes:

$$q_p = \frac{0.208A}{t_p} \quad (V.21)$$

Donde:

- q_p Gasto pico en $m^3/s/mm$.
- A Área de la cuenca en km^2 .
- t_p Tiempo pico en horas.

$$t_p = \frac{d_e}{2} + t_r$$

$$d_e = 2\sqrt{t_c} \text{ ó bien } d_e = t_c \text{ para cuencas pequeñas} \quad (V.22)$$

$$t_r = 0.6t_c$$

Donde:

- d_e Duración en exceso en horas.
- t_r Tiempo de retraso en horas.
- t_c Tiempo de concentración en horas.
- t_b Tiempo base en horas.

El tiempo de concentración se calcula con la fórmula de Kirpich, que está en función de la longitud del cauce principal y su pendiente.

$$t_c = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (V.23)$$

Donde:

- t_c Tiempo de concentración en horas.
- L Longitud del cauce en *km*.
- S Pendiente adimensional

De acuerdo con Mockus se tiene que el tiempo base se relaciona con el tiempo pico con la expresión:

$$t_b = 2.67 t_p \quad (V.24)$$

Se considera que el t_c es igual a la d_e , ya que la cuenca es pequeña.

Sustituyendo en las ecuaciones (V.21), (V.22), (V.23) y (V.24) se tiene que las características del hidrograma unitario triangular mostrado en la Figura V.15, éstas son:

$$q_p = 0.3899; t_p = 12.03 ; t_c = 10.93 ; t_r = 6.56 ; t_b = 32.11 \quad (V.25)$$

Para encontrar el hidrograma unitario curvilíneo del SCS (utilizado para aplicar el método hidrograma unitario del SCS) basta con multiplicar las abscisas del hidrograma adimensional del SCS por el tiempo pico (t_p) y las ordenadas del mismo hidrograma por el gasto pico (q_p); el hidrograma unitario curvilíneo (Figura V.15).

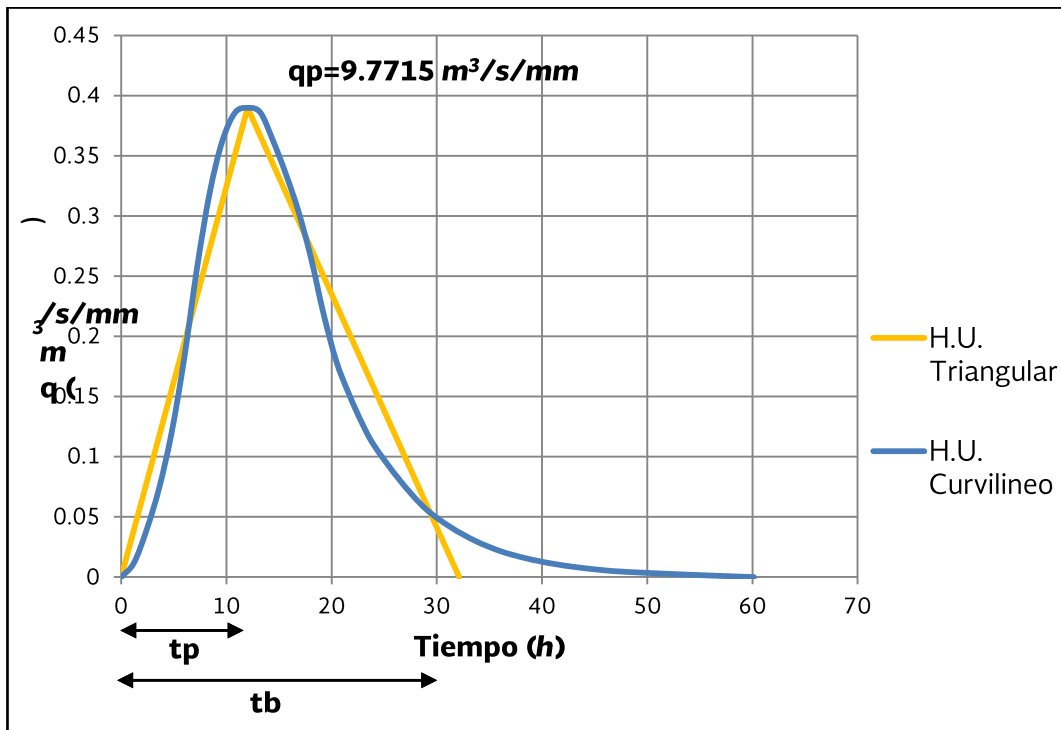


Figura V.15 Hidrograma unitario triangular y curvilíneo.

V.6.3 Hidrogramas de entrada aplicando el software HEC-HMS

Se construyó el modelo hidrológico en el software HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System); para calcular la precipitación efectiva se utilizó el método del número de curva de la SCS (Soil Conservation Service,).

Se hizo el análisis de los datos de las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA's) más cercanas facilitada por el Servicio Meteorológico Nacional que se muestran en la Tabla V.20

Tabla V.20 EMA's cercanas.

Estación	Estado	Operada por	Longitud (norte)	Latitud (Oeste)	Altitud
Saltillo	Coahuila	ESIME	101°01'00"	25°22'35"	1789
Cumbre de MTY I	Nuevo León	SMN EMAS	100°23'22"	25°33'34"	1455
Villagrán	Tamaulipas	SMN EMAS	99°29'18"	24°28'14"	390

Dicho análisis dio como resultado que la duración ideal para realizar los hietogramas de entrada es de 1 hora, ya que éstas presentaban la mayor cantidad de datos.

Para la elaboración de los hidrogramas de entrada necesarios para el tránsito de avenidas, el software HEC-HMS requiere el tiempo de retardo (t_r) obtenido en la ecuación (V.25), el Número de Curva (CN) obtenido mediante la Tabla V.2 y los hietogramas de diseño obtenidos en el tema V.5; para aplicar el método de transformación (modelo lluvia-escorrimento) del hidrograma unitario de la SCS, dando como resultados los hidrogramas para los periodos de retorno analizados (Figura V.16).

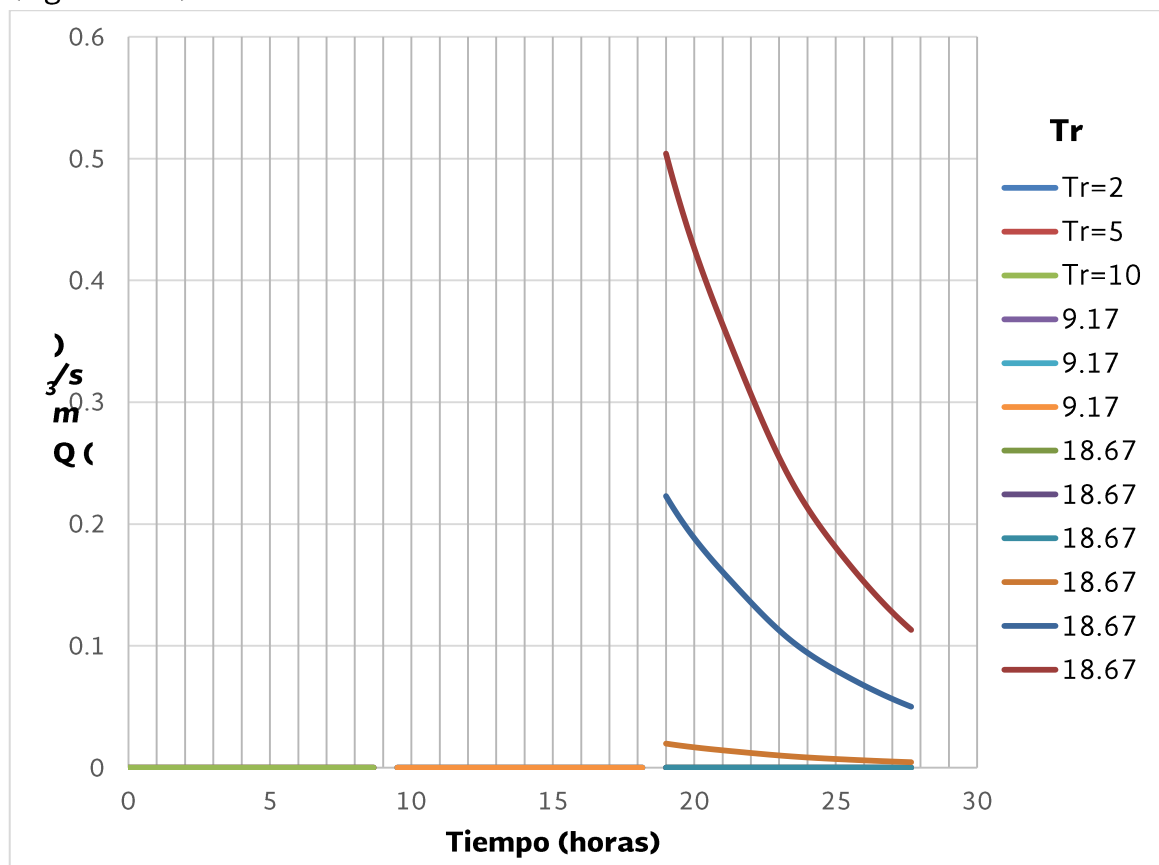


Figura V.16 Hidrogramas de entrada para diferentes periodos de retorno con duración de 1 hora para la presa La Estrella.

V.6.4 Tránsito de la avenida

Un tránsito de avenidas es un procedimiento que se utiliza para determinar un hidrograma de salida, a partir de un hidrograma de entrada.

Resultado del tránsito de la avenida

Con los hidrogramas de entrada y la curva Elevaciones-Capacidades, se realizaron los tránsitos de la avenida en la presa La Estrella para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1,000, 2,000, 5,000 y 10,000 años. En la Figura V.17 se muestran los hidrogramas de salida resultantes en el tránsito del vaso para los diferentes hidrogramas de entrada.

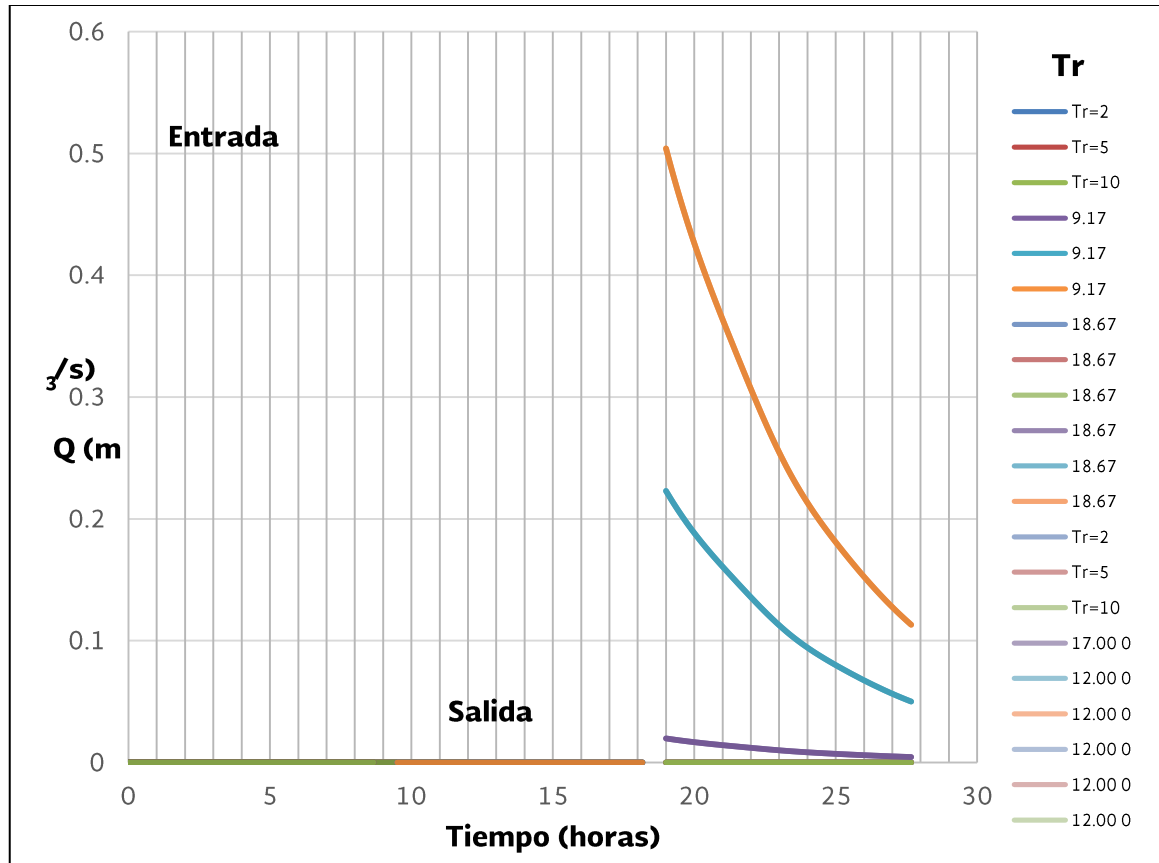


Figura V.17 Tránsito del vaso. Hidrogramas de entrada y salida.

En la Tabla V.21 se despliegan los niveles máximos alcanzados al realizar el tránsito de la avenida para los periodos de retorno analizados los cuales se representan gráficamente en la Figura V.18 comparados con el Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias (NAME), Nivel de Aguas Máximas Ordinarias (NAMO) y la elevación de la corona de la presa, facilitando observar el comportamiento del tránsito de la avenida.

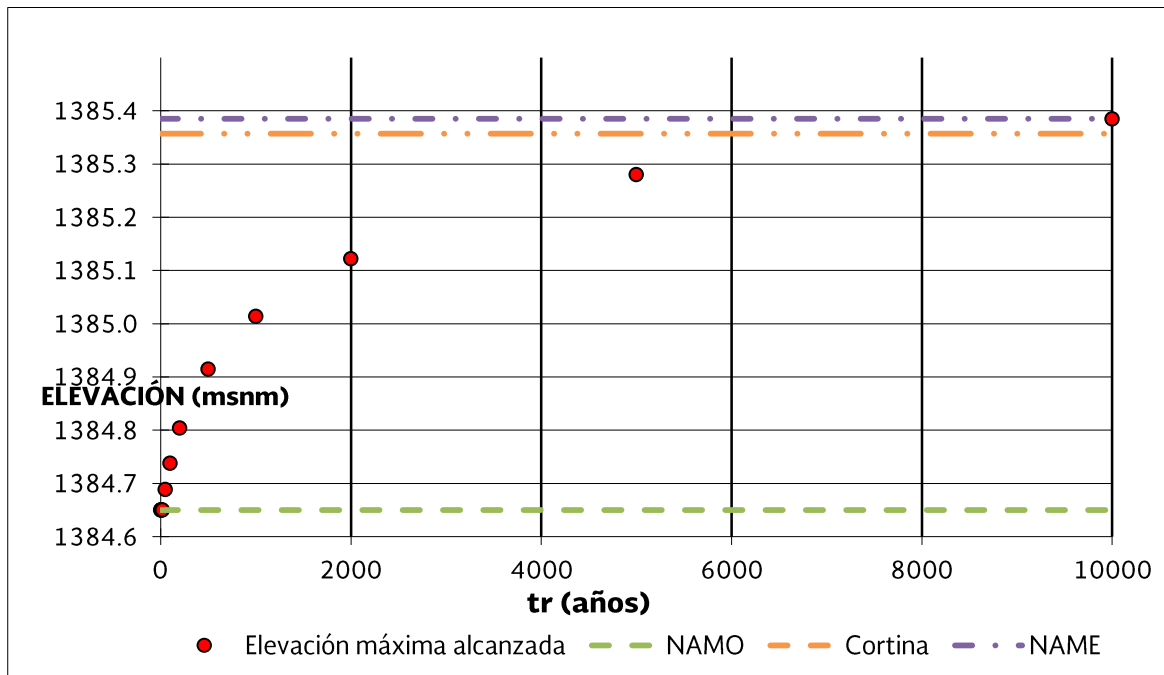


Figura V.18 Elevaciones máximas alcanzadas para distintos periodos de retorno, presa La Estrella.

Tabla V.21 Niveles máximos alcanzados para cada periodo de retorno.

tr	Gasto máximo de entrada (m ³ /s)	Elevación (msnm)	Gasto máximo de salida (m ³ /s)
2	2.38	532.994	0.00
5	7.67	533.195	0.23
10	13.00	533.397	5.17
20	19.18	533.624	10.89
50	28.36	533.952	17.64
100	35.91	534.209	25.45
200	43.90	534.477	30.12
500	63.86	534.831	35.12
1000	63.86	535.104	48.07
2000	72.97	535.334	52.70
5000	85.42	535.465	72.71
10000	95.11	535.544	87.92

Ya con los resultados del tránsito de la avenida se procedió a verificar la obra de excedencias de la presa que, al ser una presa existente, se revisó de acuerdo a las características actuales, con una longitud de cresta de 106.38 m, coeficiente de descarga de 1.6 por el tipo de cimacio y considerando el NAMO actual de 534.9 msnm, para no restarle capacidad de almacenamiento al vaso y, a su vez, tenga la capacidad para no desbordar en caso de una avenida extraordinaria para un periodo de retorno de 10,000 años, dando como resultado una capacidad máxima de almacenamiento de 3.90 hm³. En la Tabla V.22, se muestran los parámetros utilizados y los resultados obtenidos. Asimismo, en la Figura V.18 se puede apreciar que las elevaciones máximas alcanzadas para todos los periodos de retorno analizados están por debajo del NAME, comprobando que la presa es hidrológicamente SEGURA.

Tabla V.22 Revisión de la obra de excedencias de la presa La Estrella.

Concepto	Cantidad	Unidad
Elevación del NAMO	534.90	msnm
Elevación del NAME	535.54	msnm
Elevación de la corona de la cortina	537.29	msnm
Vertedor		
Gasto máximo del vertedor Q	87.92	m ³ /s
Longitud del vertedor L	106.38	m
Carga máxima H para tr de 10,000 años	0.64	m
Coeficiente de descarga C	1.6	
Periodo de retorno	10,000	años

VI. REVISIÓN DE LA ESTABILIDAD DE LA CORTINA.

VI.1 Recopilación y revisión de la información disponible.

Con base en la información consultada en el SISP por Internet, en la presa La Estrella se requiere evaluar la seguridad estructural de la cortina en su sección máxima o crítica, por métodos del estado de la práctica de Ingeniería de Presas; en particular, se requiere estudiar la localización de la obra de control de excedencias que permita funcionar a la estructura de manera completamente segura estructural e hidrológicamente. En la Fotografía VI.1, se muestra el estado actual de la presa.



Fotografía VI.1 La cortina de la presa La Estrella.

Asimismo, se reportan daños por oleaje sobre el suelo del respaldo aguas arriba de la cortina, generándose escarpes por ese efecto, por lo que se requiere hacer un cuidadoso análisis, diseño y definición de los procedimientos y especificaciones constructivas para hacer la reposición o reconstrucción de dicho respaldo, con el fin de evitar mayores daños en el futuro que pudieran poner en riesgo de falla a la cortina. En la Fotografía VI.1 se muestra una panorámica de la cortina tomada desde la margen derecha.

VI.2 Descripción estructural de la cortina

La presa La Estrella se clasifica como una presa pequeña; es una cortina de comportamiento flexible, construido en 1969 por la extinta Secretaría de Recursos Hidráulicos, y tiene una cortina de tierra con sección homogénea, de eje recto. Para fines del análisis de estabilidad y de acuerdo con el estudio topográfico, se considera la cortina con 14.8 m de altura máxima sobre el desplante (estimada) y de 14.8 m sobre el cauce (topografía), ya que no se hizo trabajo de desplante de la cimentación ni dentellón o delantal; tiene 4.0 m de ancho en la corona, con una longitud de 521.60 m, y con capacidad para almacenar un volumen de 3.0 hm³ de almacenamiento original al NAMO en la elevación 518.90 msnm; un volumen de 4.70 hm³ al NAME a la elevación 521.10 msnm; y la corona está en la elevación 907.50 msnm. Recibe las descargas del Arroyo El Chocolate.



Fotografía VI.2 La cortina de la presa La Estrella.

El talud del respaldo aguas arriba está inclinado 25° o sea 2.15H:1V medido en varios puntos. El talud del respaldo aguas abajo de la cortina tiene una inclinación de 31.5° o sea 1.63H:1V, desde la corona hasta el pie del talud. El talud mojado está protegido por enrocamiento, y el talud seco no tiene protección especial. La cortina está muy enmontada, con árboles y numerosos arbustos. Para el análisis dinámico (sísmico) de la cortina, se hizo un estudio de peligro sísmico, cuyos resultados se reportan en el capítulo VI.

VI.3 Geología del sitio

En la Figura VI.1, se presenta una composición geológica del sitio tomada del Servicio Geológico Mexicano (SGM), a nivel de la zona de estudio.

A nivel del sitio donde está la presa La Estrella, y en la boquilla donde se aloja la cortina, se tienen esas rocas mesozoicas, afloran las lutitas (KcmLu-Mg) de la Formación Méndez, sobre las cuales se encuentra desplantada la cortina de la presa La Estrella, y destaca que las lutitas tienen sus planos de foliación o estratigrafía en el sentido paralelo al eje de la cortina, pero están fracturadas en la parte superficial, lo cual aumenta el caudal y las velocidades del flujo en el terreno de cimentación, y la concentración de mayores velocidades en la cimentación está afectando a la cortina en su base.

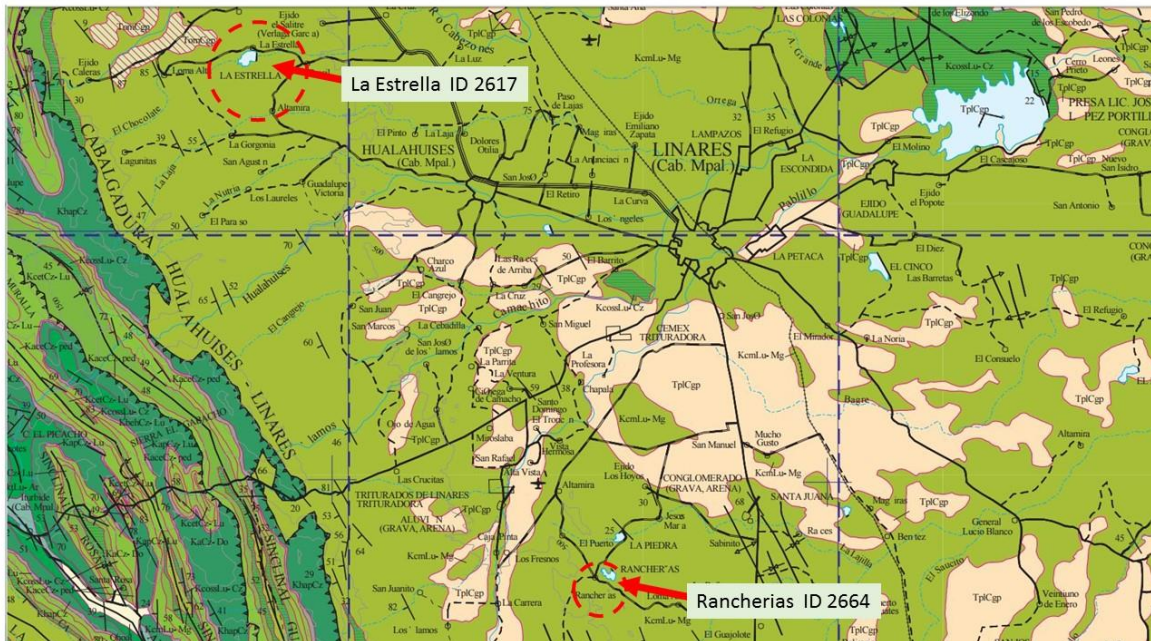


Figura VI.1 Marco Geológico de la zona de la presa La Estrella (SGM).

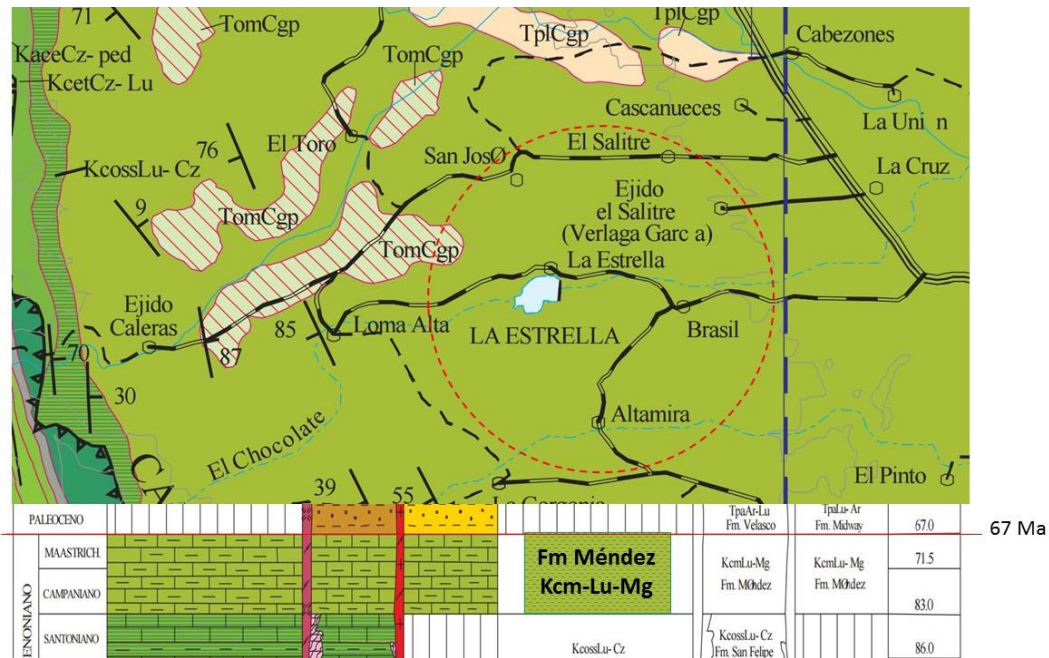


Figura VI.2 Geología del sitio en donde está la presa La Estrella.

VI.4 Parámetros para análisis en condiciones extremas

Del estudio de peligro sísmico en el sitio de la presa, que se presenta en este informe, se consideraron los parámetros sísmicos requeridos para la revisión de la seguridad estructural de la presa, ante la eventual ocurrencia de los temblores máximos especificados en el Manual de Diseño por Sismo de la Comisión Federal de Electricidad (MDS-CFE, 2008). En la Tabla VI.1 se listan los valores de los coeficientes sísmicos para $T_r = 475$ y 950 años. Debido a que la presa está desplantada en roca, el factor de amplificación es de 1.0.

Tabla VI.1 Coeficientes sísmicos para análisis pseudoestático de estabilidad.

Temblor	Horizontal		Vertical	
	a_o^h	k_h	a_o^v	k_v
475 años	0.030	0.028	0.021	0.02
950 años	0.045	0.040	0.033	0.03

Para considerar el efecto del tipo de suelo, los parámetros sísmicos en roca pueden amplificarse por los factores de sitio de la Tabla VI.2.

Tabla VI.2 Factores de amplificación por efecto del tipo de suelo.

Velocidad efectiva	Factor de sitio
$V_s^{30} > 760 \text{ m/s}$	1
$360 < V_s^{30} \leq 760 \text{ m/s}$	1.2
$180 \leq V_s^{30} \leq 360 \text{ m/s}$	1.5
$V_s^{30} < 180 \text{ m/s}$	2

Donde V_s^{30} es la velocidad efectiva, definida como la velocidad promedio de ondas de cortante en los 30 m superficiales del perfil de suelo bajo consideración. Dicha velocidad puede estimarse como

$$V_s^{30} = \frac{\sum h_i}{\sum h_i/V_i} \quad (\text{VI.1})$$

Donde V_i es la velocidad de onda de corte y h_i el espesor del i -ésimo estrato del subsuelo. Para fines prácticos, se consideraron las aceleraciones del terreno calculadas como ya se expuso antes, las cuales resultan en los siguientes coeficientes sísmicos:

$$k_h = 0.030 \text{ o sea } \text{PGA} = 0.030g, \text{ para } T_r = 475 \text{ años}$$

$$k_h = 0.045 \text{ o sea } \text{PGA} = 0.080g, \text{ para } T_r = 950 \text{ años}$$

Específicamente, k_h es el coeficiente sísmico de diseño en la roca basal normalizado por g la aceleración de la gravedad, PGA (siglas de Peak Ground Acceleration) es la aceleración máxima del terreno y T_r es el período de retorno, que para una presa del Grupo A con decenas de años de vida útil transcurrida (al 2016) convendría considerar el de 475 años. No obstante, con la finalidad de acercarse al Sismo Máximo Creíble, se consideró el sismo con $T_r = 950$ años

Los espectros de diseño y los acelerogramas sintéticos producto del estudio de peligro sísmico se utilizan como datos fundamentales para hacer análisis sísmicos dinámicos de la cortina, los acelerogramas se presentan en la Figura VI.3.

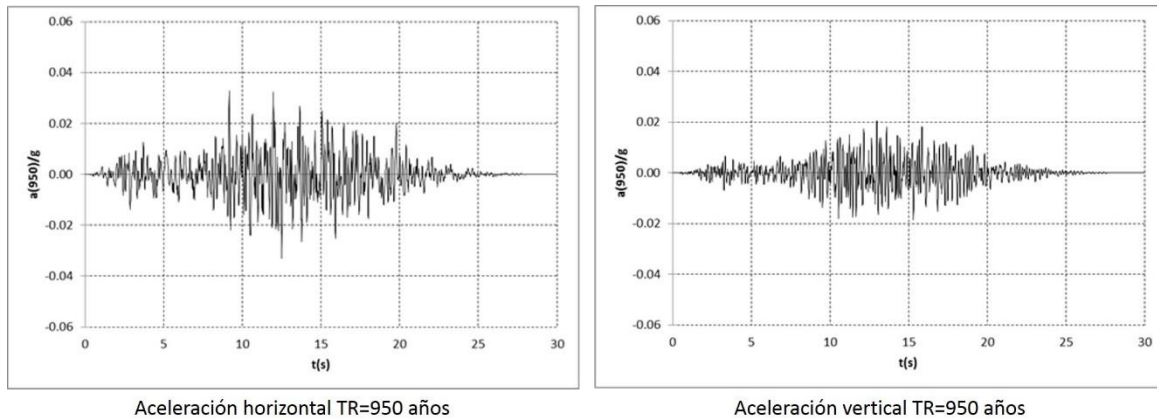


Figura VI.3 Acelerogramas sintéticos para $Tr = 950$ años.

VI.5 Modelo geométrico de la cortina

En la Figura VI.4, se reproduce la información de la topografía obtenida en campo y en la tabla VII.3, se reportan los valores considerados de los parámetros de importancia para los análisis de flujo de agua y estabilidad de los modelos de la cortina.



Figura VI.4 Topografía de la cortina.

La sección tipo de la cortina corresponde al estado actual de la misma, de acuerdo con los trabajos de topografía, se considerará para fines de análisis de estabilidad, solamente como una sección estratificada, hipotética para componer la sección máxima a partir de las secciones entre los cadenamientos 0+540 y 0+640, con una altura máxima sobre el cauce de 14.8 m, ancho de corona de $B=4.0$ m, con taludes

inclinados de 24.9° (2.15:1V) aguas arriba y 31.5° (1.63H:1V) aguas abajo, que corresponden a las máximas inclinaciones medidas en la cortina por la topografía hecha en 2016. Los parámetros de las elevaciones importantes se reportan en la Tabla VI.3. En la Figura VI.5 y la Figura VI.6, se muestran datos de la cortina del SISP de la CONAGUA. En la Tabla VI.3, se muestran las principales secciones en la zona más alta de la cortina, que coincide con la posición el antiguo cauce.

Tabla VI.3 Parámetros hidrológicos de la presa La Estrella para revisión estructural en una sección máxima hipotética (en el cauce) entre 0+540 y 0+640.

	Elevación (msnm)
Corona	537.46
NAME	536.90
NAMO	534.90
NAMIN	527.80
Pie de talud aguas arriba	522.66
Pie de talud aguas abajo	522.66

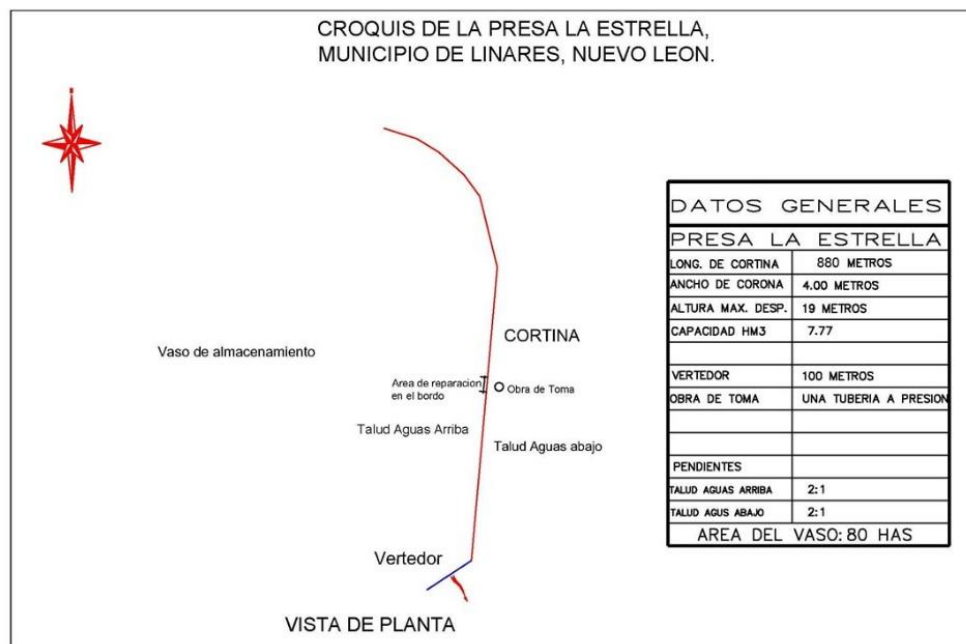


Figura VI.5 Datos de la cortina.

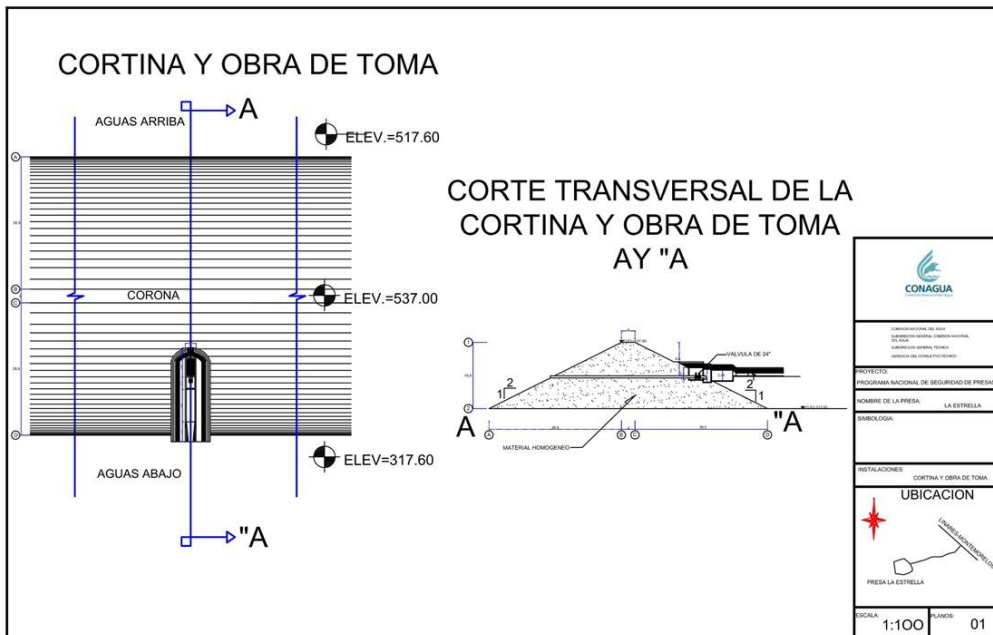


Figura VI.6 La sección máxima de la cortina.

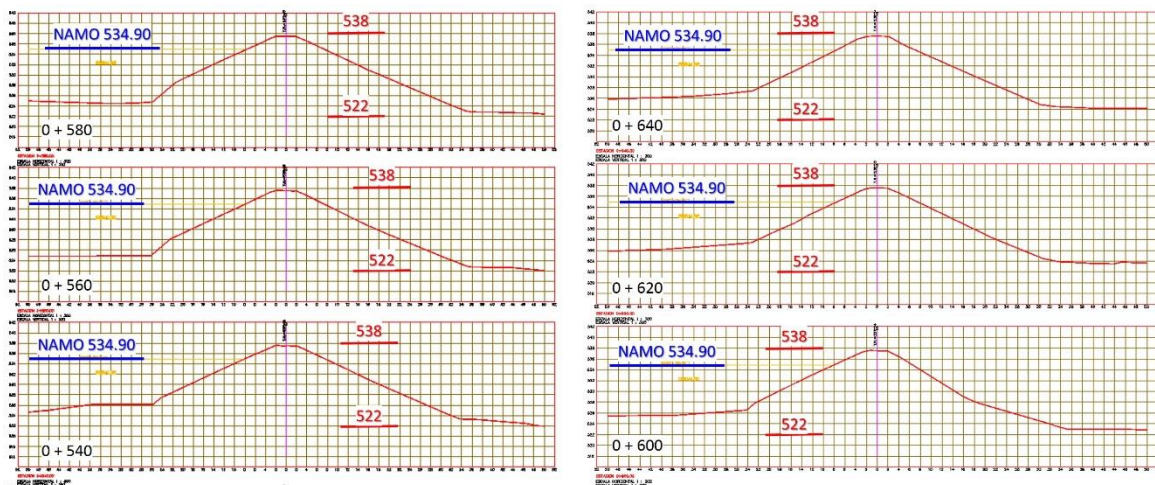


Figura VI.7 Secciones más altas de la cortina.

VI.6 Marco de referencia para el análisis estructural

El marco de referencia para hacer los análisis estructurales y poder determinar, tanto las condiciones actuales de seguridad de la cortina como las condiciones de seguridad con las soluciones propuestas, requiere que primero se presenten y analicen los problemas estructurales y geotécnicos que tiene la cortina de la presa. En la Fotografía VI-1, se puede apreciar el estado actual de la cortina. En la Fotografía VI-1, se muestra una vista de la cortina en octubre de 2016, completamente enmontada.



Fotografía VI-1. Aspecto de la cortina.

Del punto de vista estructural, la cortina presenta un estado aparentemente bueno en lo general. Ya en el detalle, la cortina muestra presencia de madrigueras de roedores, muy probablemente tuzas, como se observa en la Fotografía VI-2, en donde el suelo se hundió debido a la presencia de la cavidad de una madriguera. Esto mismo se detectó durante la ejecución de los sondeos, pues como se reporta en el capítulo correspondiente al campo y laboratorio, en todos los sondeos se tuvieron problemas de pérdida del fluido de perforación, primero de agua y luego de lodo bentonítico para perforación, el cual se tuvo que hacer muy espeso para poder avanzar en los sondeos. Sin embargo, llama la atención que en la penetración estándar no se observa la presencia de las cavidades de las madrigueras que se iban atravesando en los sondeos.



Fotografía VI-2. Hundimiento relacionado con conductos subterráneos en la cortina.

En los PCA se reporta un agrietamiento transversal en la cortina, lo cual lo hace peligroso en caso de evolucionar en un llenado rápido del vaso, como ya sucedió en 2010, cuando se presentó una falla en una zona en las secciones situada en la estación topográfica 0+440 de la cortina, afortunadamente sólo causó alarma y también ocurrió en una parte relativamente baja de la cortina, con una altura de 8.60 m, pero que sería catastrófico en el caso de que las fallas por invasión del agua en las madrigueras de la cortina se generalizaran durante un evento de llenado del vaso por encima del NAMO.

En la Fotografía VI-3, se muestra una vista en julio de 2010 cuando ocurrió el deslizamiento o la erosión que causó el agua a consecuencias de las lluvias torrenciales y la subida por encima del NAMO del embalse de la presa por el huracán Alex hacia el 30 de junio de 2010; y en la Figura VI.8, se muestra la sección topográfica de la misma estación 0+440 en octubre del año 2016.



Fotografía VI.3

Fotografía VI-3. Deslizamiento o erosión causado con embalse encima del NAMO y lluvias del huracán Alex en 2010.

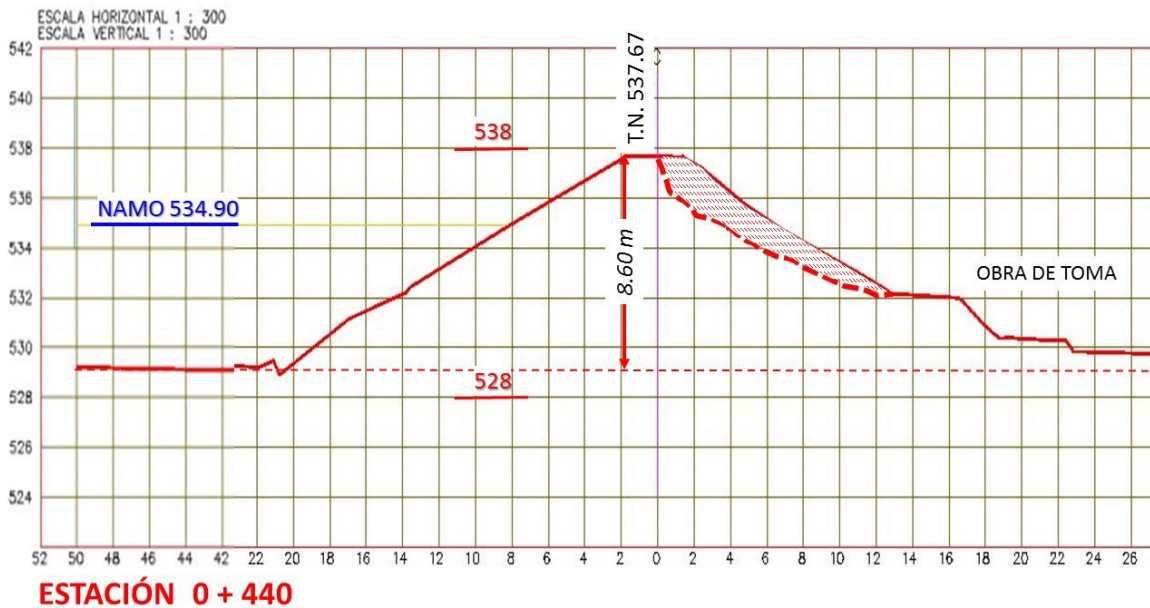


Figura VI.8 Estación 0+440 donde ocurrió la erosión o deslizamiento en 2010.



Fotografía VI-4. Zona del deslizamiento o erosión causado con embalse encima del NAMO y lluvias del huracán Alex en 2010 ya rellenado en 2011.



Fotografía VI-5. Vista del talud aguas arriba en la estación 0+440 en 20111.

En la Fotografía VI-4, se aprecia cómo se veía el talud aguas abajo de la cortina, aproximadamente un año después de que se colocó el relleno para tapar el hueco

que dejó el deslizamiento o erosión del respaldo seco de la cortina en 2010, y como puede verse por comparación con la foto de la fecha en que ocurrió el problema, ya no se distingue la zona rellenada hacia el pie del talud, pues hasta allí afectó el problema en 2010, es decir, prácticamente hasta la obra de toma como se ve en la Fotografía VI-2. En la Fotografía VI-5, se aprecia el talud del respaldo aguas arriba en 2011, a un año de que se rellenó la zona del respaldo seco.

VI.7 Integración de la información del análisis de estabilidad

Con la finalidad de conocer las propiedades índice, hidráulicas y mecánicas de los suelos de la cortina original y del cuerpo de azolve, se llevó a cabo una campaña exploratoria en campo.

Esta campaña consistió en hacer tres sondeos mixtos combinando el método de penetración estándar con el muestreo con tubo de pared delgada tipo Shelby, hincado a presión y también empleando barril Denison. También se hicieron algunos pozos a cielo abierto mediante métodos manuales, es decir, a pico y pala, en el cuerpo de la cortina sobre el talud aguas arriba y al pie de éste, para identificar y correlacionar las propiedades que son necesarias para fundamentar los análisis del estudio geotécnico de su seguridad estructural. EN el capítulo correspondiente se presentan los resultados de campo y laboratorio en forma extensa.

A las muestras de suelo obtenidas durante la campaña de exploración, se les realizaron las pruebas de laboratorio siguientes:

Pruebas índice

Estos resultados permitieron determinar la clasificación de los suelos de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

- Contenido natural de agua (ASTM D 2216) y clasificación visual y al tacto.
- Límites líquido por el método multipunto, límite plástico e índice plástico (ASTM D4318).
- Análisis granulométrico por mallas (ASTM D6913-04), incluyendo la determinación de finos por lavado(ASTM-D-1140-00)
- Densidad relativa de los sólidos (ASTM D854).
- Identificación y clasificación de los suelos de acuerdo a la norma ASTM D 2487 y D2488.
- Límite de contracción lineal (ASTM D 4943-08).

Pruebas Mecánicas

Con la finalidad de estudiar la deformabilidad en compresión y consolidación unidimensional, las propiedades de compactación y el comportamiento bajo desviador de esfuerzos y la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos de la cortina, a muestras alteradas representativas debidamente seleccionadas, se les efectuaron pruebas orientadas a determinar los parámetros que definen la compactabilidad, la resistencia al esfuerzo cortante y compresibilidad de los materiales, con base en probetas de suelo labradas de las muestras obtenidas en los seis PCA. Dichos ensayos comprendieron:

- Ensayes de compactación Proctor estándar (ASTM D698).
- Resistencia a la compresión simple (ASTM D2166-06), incluyendo las gráficas de esfuerzo - deformación.
- Determinación de los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante mediante pruebas de compresión triaxial consolidadas no drenadas (CU) (ASTM D2850), en juego de tres probetas por prueba con medición de presión de poro.
- Determinación de parámetros de consolidación primaria en suelos blandos o compresibles, mediante pruebas de consolidación unidimensional utilizando un programa de presiones adecuado. Las cargas se dejaron actuar el tiempo suficiente para definir claramente el tramo de la curva de consolidación secundaria. Para cada una de las pruebas, se graficaron curvas de consolidación (deformación vs tiempo), de compresibilidad, y curvas de los parámetros de consolidación primaria, y se determinó el valor del esfuerzo de pre consolidación.

En el caso de las pruebas de resistencia al esfuerzo cortante en compresión triaxial y de compresibilidad en consolidación; los niveles de esfuerzo a que se efectuaron los ensayos corresponden a rangos que incluyen los niveles de esfuerzos a que estaría á trabajando el respaldo de tierra de la cortina de la presa.

En el capítulo V se muestran completos y en detalle los resultados obtenidos en las pruebas realizadas a las muestras obtenidas. En la Figura VI.9, se reproduce el sondeo SPT-2 (mixto), situado en la estación 0+492 aproximadamente, en el centro del antiguo cauce. En la Figura VI.9, se muestra la ubicación del sondeo con respecto a la cortina y al cauce principal (antiguo).



Figura VI.9 Ubicación del sondeo SPT-2 en la Estación 0+492.

Como puede observarse en el perfil estratigráfico del sondeo SPT-2, la profundidad de los suelos arcillosos (CH) de plasticidad media a alta, que conforman la mayor parte de la estratigrafía en ese sondeo, se prolonga hasta 21.20 m, en donde se reporta que se detectó suelo aluvial, que sería del antiguo cauce, el cual no se retiró ni se inyectó para desplantar la cortina en un suelo impermeabilizado. Esto explicaría la presencia de una ciénega aguas abajo de la cortina, como una zona de resurgencia del embalse, alimentada por filtraciones que ocurren en el subsuelo, por los depósitos aluviales del antiguo cauce. Las arcillas que constituyen la cortina presentaron una resistencia a la penetración estándar muy importante, que va de 13 hasta 40 golpes para penetrar los 30 cm intermedios de la prueba. En la se reportan los círculos de Mohr de los suelos ensayados en triaxial consolidado no drenado con medición de presión de poro de los suelos de los taludes de la cortina obtenidos en PCA someros, en muestras cúbicas inalteradas obtenidas a una profundidad media de 1 m.

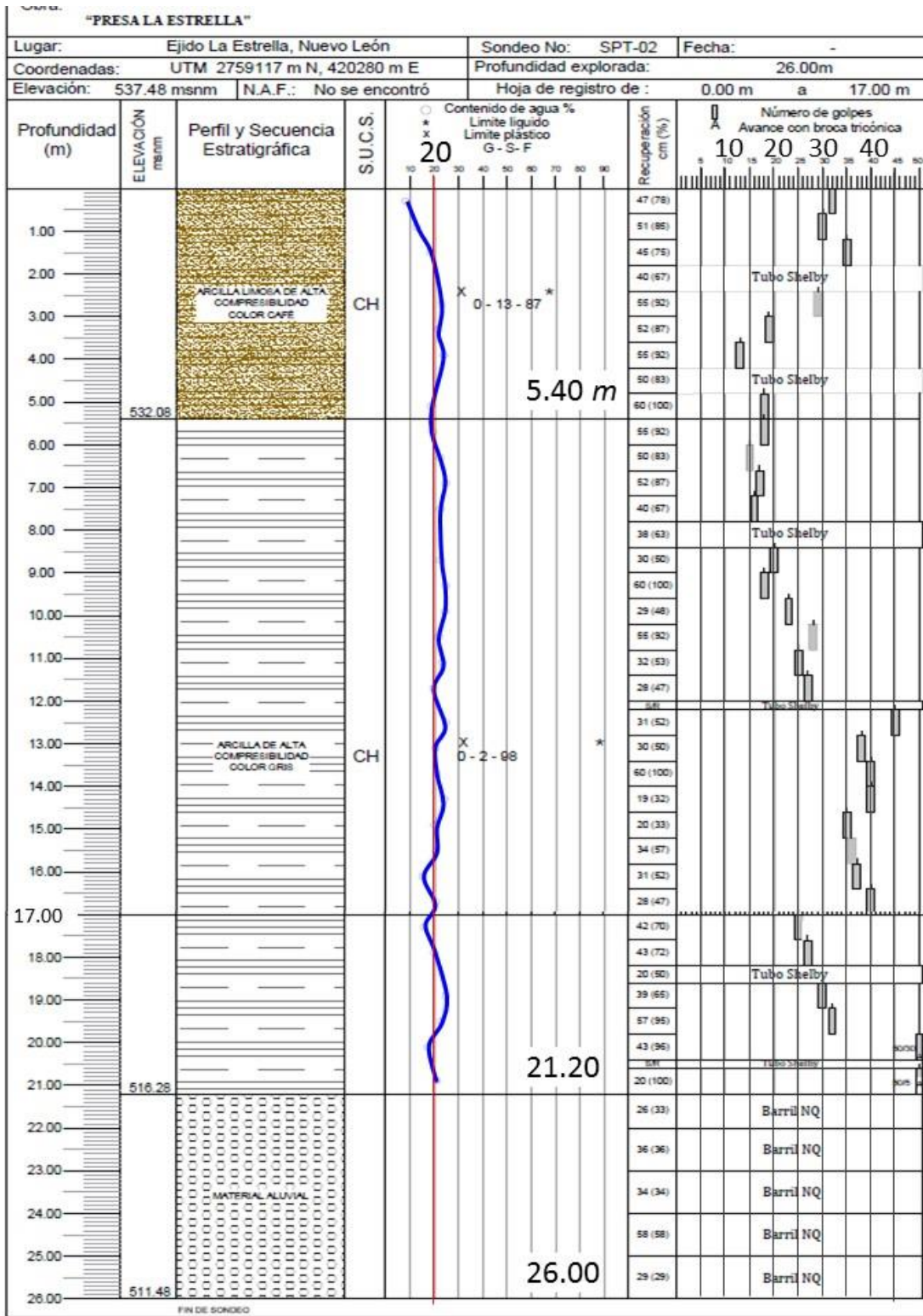


Figura VI.10 Sondeo SPT-2 al centro del antiguo cauce en la Estación 0+492.

Para fines prácticos, se tiene una resistencia a la penetración estándar promedio como se reporta en la Tabla VI.4, las cuales se correlacionan con las aceptadas en el estado de la práctica internacional, que se reportan en la Tabla VI.5, establecida a partir de Terzaghi & Peck (1968)¹ y Bowles (1997)².

Tabla VI.4. Resistencias promedio en el sondeo SPT-2 al centro de la cortina.

N_{30}	de (m)	a (m)	
32	0.00	3.00	0.00 a 5.40 m
17	3.00	9.50	Arcilla limosa, plástica (CH) café, de consistencia dura; %F=87%; $q_u=400$ kPa
25	9.50	12.00	
40	12.00	14.50	
37	14.50	17.00	
27	17.00	18.50	5.40 a 21.20 m Arcilla plástica (CH) gris claro, de consistencia muy firme a dura; %F=98%; $q_u=200$ kPa
30	18.50	20.00	
>50	20.00	26.00	Suelo aluvial

Tabla VI.5. Correlación entre la resistencia a la penetración estándar y la consistencia y resistencia a la compresión simple de arcillas.

Consistencia	SPT N_{30}	q_u (kN/m ²)
Muy blanda	0 — 2	< 25
Blanda	2 — 4	25 — 50
Media	4 — 8	50 — 100
Firme	8 — 15	100 — 200
Muy firme	15 — 30	200 — 400
Dura	> 30	> 400

¹ Soil mechanics in engineering practice. Front Cover. Karl Terzaghi, Ralph B. Peck. Wiley, Jan 1, 1968. Technology & Engineering - 729 pages

² Foundation analysis and design.. Joseph E. Bowles. 5th edition. International Ed 1997. The McGraw-Hill Co- Inc.

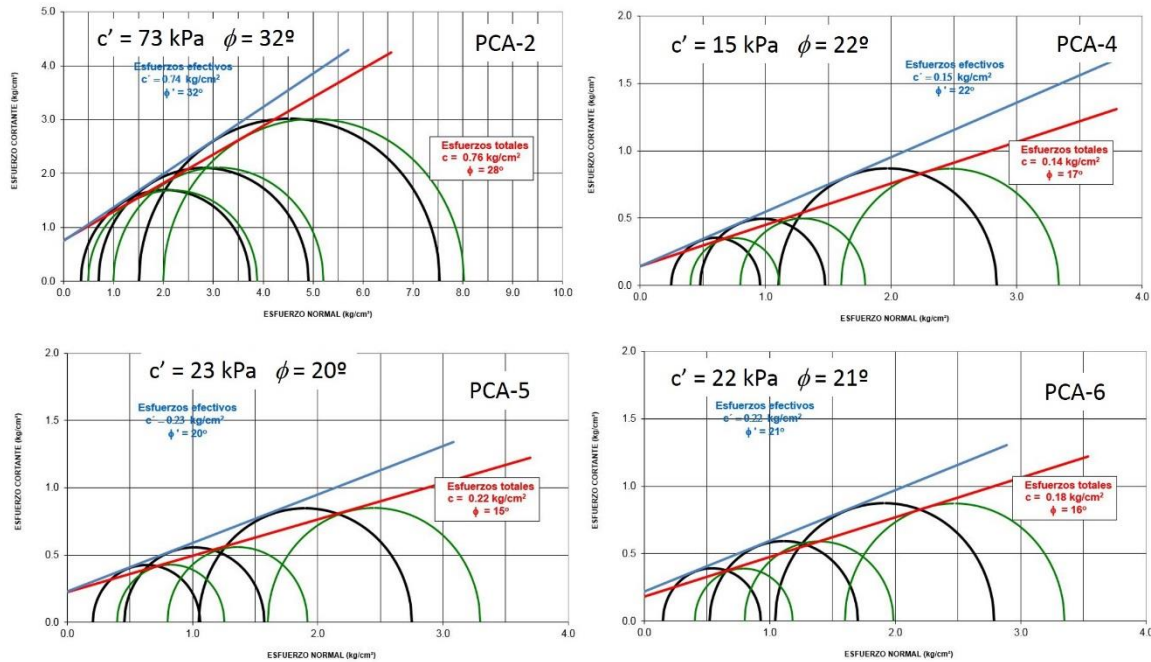


Figura VI.11 Círculos de Mohr de los suelos superficiales en taludes de la cortina.

Con esas resistencia al esfuerzo cortante, que dan cohesiones muy altas, la presa que tiene taludes de 2.15:1 y 1.63:1 en los taludes de los respaldos aguas arriba y aguas abajo, respectivamente, difícilmente fallaría. Una manera de considerar el debilitamiento estructural de la cortina por los efectos de los agrietamientos y cavidades u oquedades observados durante la exploración, y como causa raíz de la falla ocurrida en 2010, sería considerar propiedades reducidas, como las que se muestran en la Tabla VI.6 y la Tabla VI.7.

Tabla VI.6. Propiedades índices del suelo de la cortina.

No.	w_{nat} (%)	γ_m (kN/m^3)	S_s	LL %	LP %	IP %	LCL %	% Finos	% Arena	% Grava	SUCS
1	16.2	19.62	2.65	50	32	19	3.0	83	16	1	CH
2	19.9	18.93	2.65	62	29	33	7.0	97	3	0	CH
3	15.2	17.66	2.65	50	30	20	3.0	67	20	13	CH

Tabla VI.7. Propiedades mecánicas e hidráulicas del suelo de la cortina.

PCA	w_{nat} (%)	$\gamma_{m \text{ nat}}$ (kN/m^3)	c (kPa)	ϕ (°)	k (m/s)	E_t ($p=1/1.5$) (kPa)
2	22.3	20.20	73	32	1.67E-08	37630.
4	14.1	18.14	15	22	1.67E-08	9975.
5	26.7	18.73	23	20	1.67E-08	21913.

PCA	w_{nat} (%)	$\gamma_{m\ nat}$ (kN/m^3)	c (kPa)	ϕ ($^\circ$)	k (m/s)	E_t ($p=1/1.5$) (kPa)
6	28.3	18.36	22	21	1.67E-08	12463.
MED	91.4	18.86	20	21	1.67E-06	14785.

Modelo geomecánico estructural de la cortina

De acuerdo con los resultados de los trabajos de campo y ensayos de laboratorio ejecutados en la campaña de exploración, se realizó la interpretación geotécnica de la cortina y contacto de suelo o roca de cimentación hasta la profundidad explorada. Con base en esa información, se definieron tres estratos de la parte superior y dos de la parte inferior para la cortina y dos estratos para el terreno de cimentación, tal como se muestra en el modelo estratigráfico que se presenta en la Figura VI.12.

Para fines de análisis de estabilidad en condiciones de operación normal o extrema, es decir, con el nivel del embalse al NAMO o al NAME, respectivamente, para caracterizar la masa térrea de la cortina, el estado de la práctica recomienda considerar la resistencia al esfuerzo cortante efectiva de los suelos obtenida en prueba triaxial drenada (CD), pero también se pueden tomar esfuerzos totales a partir de pruebas triaxiales consolidadas o no consolidadas y no drenadas (UU o CU). En este trabajo se contó con pruebas no consolidadas no drenadas (UU).

Para las condiciones de vaciado rápido se considera la resistencia mínima al esfuerzo cortante de los suelos que resulte de un estudio sobre la resistencia al esfuerzo cortante obtenida en los triaxiales UU pero por la comparación entre la interpretación en esfuerzos totales. En la parte superior se consideraron suelos menos competentes que en la parte inferior, de acuerdo con los resultados obtenidos en los trabajos exploratorios de campo y con base en el conocimiento de probables rellenos recientes para paliar el problema de azolvamiento y el peligro de desbordamiento o falla de la cortina. De esta manera, se obtuvo el modelo de la Figura VI.12.

Tabla VI.8. Propiedades índices, mecánicas e hidráulicas del suelo de la cortina.

ESTRATA	w (%)	γ_m (kN/m^3)	c (kPa)	ϕ ($^\circ$)	k (m/s)	E_t ($p=1/1.5$) (kPa)
ALTA	20	16.19	45	28	1.67E-006	6975.
MEDIA	20	15.79	39	26	6.67e-006	8975.
BAJA	20	15.21	36	24	3.67e-005	10975.
LUTITA	5	17.17	825	0	5.33e-005	29975.

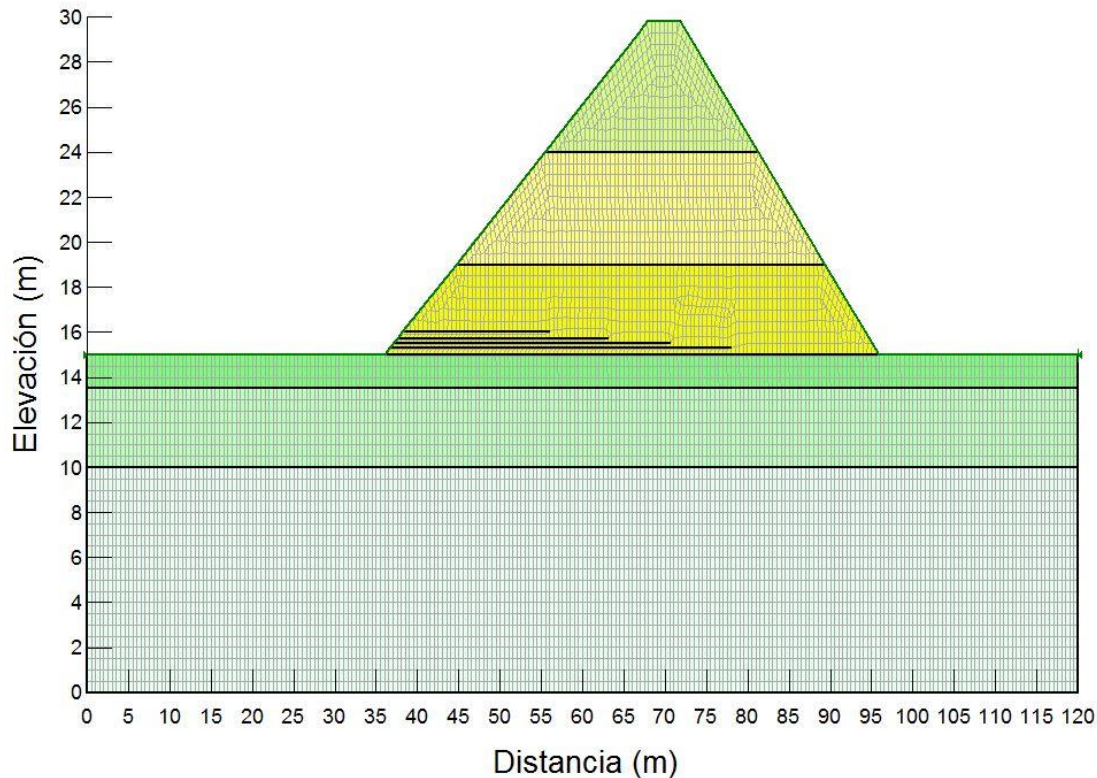


Figura VI.12 Modelo estratificado de la cortina y del subsuelo de cimentación.

Para las condiciones de carga sísmica con nivel del embalse al NAMO, se considera la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos mínima que resulte de un estudio de la resistencia al esfuerzo cortante obtenida en prueba triaxial UU o Rápida (no consolidada no drenada). Los parámetros de la cortina se determinan del promedio de los resultados obtenidos en las pruebas de compresión triaxial no consolidadas no drenada, interpretadas con base en correlaciones y el estudio de geotecnia realizado.

VI.8 Problemas de seguridad geotécnica y estructural de la cortina

La revisión de la seguridad geotécnica y estructural de la cortina de la presa requiere que se analicen diferentes mecanismos de falla (o deterioro) de la estructura térrea de contención. La revisión de las condiciones de la cortina ante esos mecanismos de falla permite identificar, analizar, evaluar e interrelacionar los problemas que pueden ser causa de peligro o mal comportamiento de la cortina. En general, esta revisión

requiere tomar en cuenta los siguientes aspectos, que deberán adecuarse dependiendo del tipo de presa que se analice:

Deficiencias exteriores de la cortina

- Desbordamiento
- Erosión por oleaje del talud aguas arriba
- Erosión por lluvia de taludes aguas arriba o abajo
- Erosión por otras causas de respaldos aguas arriba o abajo
- Árboles en los respaldos aguas arriba y abajo

Deficiencias de las condiciones geométricas

- Revisión del bordo libre (asentamientos, sismo, oleaje, y erosión)
- Sedimentación y acumulación de azolves
- Otros problemas

Deficiencias de control de flujo de agua

- Erosión interna de la cortina
- Filtraciones excesivas por el terreno natural o cimentación
- Filtraciones no controladas en el respaldo aguas abajo
- Infiltración por grietas o raíces vegetales

Inestabilidad de la cortina o su cimentación

- Capacidad de carga o deformación excesiva de la cimentación
- Revisión del agrietamiento

Análisis del flujo de agua en la cortina

- Consideraciones para el análisis de flujo de agua
- Estudio de las condiciones de flujo de agua establecido
- Comportamiento del flujo de agua en condiciones de vaciado rápido

Análisis de estabilidad de la cortina

- Revisión de la estabilidad en condiciones de operación normal
- Revisión de la estabilidad en condiciones de operación inusual
- Revisión de la estabilidad en condiciones de operación extrema
- Deformaciones y pérdida de bordo libre por sismo

Deficiencias exteriores de la cortina

Se revisaron las condiciones de la cortina ante la acción de mecanismos de falla por defectos exteriores de la estructura térrea, para considerar las deficiencias observadas en el marco de este trabajo, con la finalidad de identificar, analizar y elaborar la propuesta de rehabilitación de la cortina que dé solución de los

problemas observados, lo cual se presenta en el capítulo correspondiente a las propuestas de solución para esta presa.

Desbordamiento

La cortina de la presa La Estrella no ha tenido problemas de desbordamiento, o al menos no se reportan y los habitantes entrevistados dicen que jamás se ha desbordado desde que se construyó. Asimismo, el nivel de peligro hidrológico es bajo, ya que de acuerdo con el estudio hidrológico, aun para la avenida de 10,000 años, tiene un bordo libre suficiente.

Erosión por oleaje del talud aguas arriba

El talud aguas arriba tiene algunos problemas de erosión por efectos del oleaje, debido a que no cuenta con un adecuado enrocamiento de protección. Asimismo, el bordo libre entre el NAME y la corona es suficiente para evitar el problema, y más aun considerando que el NAMO está 2.56 m por debajo de la corona, por lo que el fetch no alcanza a sobrepasar la cortina. Sin embargo, debido a los problemas de la presencia de roedores, es importante colocar un enrocamiento adecuado para la protección del talud.

Erosión por lluvia de taludes aguas arriba o abajo

El talud aguas arriba presenta ligeros problemas de erosión por lluvia, pero esto también se debería a la abundante vegetación. Sin embargo, debido a los problemas de la presencia de roedores, se recomienda colocar un enrocamiento adecuado para la protección del talud.

Árboles y vegetación en los respaldos aguas arriba y abajo

La cortina tiene una abundante vegetación con árboles, arbustos y pequeñas plantas. Dentro de los trabajos de conservación, se recomienda evaluar el dejar la vegetación ya que la presa no tiene ya un objetivo de riego agrícola como fue concebida, y solamente cumple con una función de recarga de acuífero somero para alimentar las numerosas norias que existen en la zona.

Deficiencias de las condiciones geométricas

Revisión del bordo libre (asentamientos, sismo, oleaje, y erosión)

El bordo libre de la presa La Estrella se revisó considerando que la presa tiene decenas de años de haber iniciado su operación, con lo cual se tiene una sedimentación de largo plazo en el vaso. La revisión del funcionamiento del vaso para una prolongación de vida de la obra de cabeza, así como considerando la

creciente con un período de retorno de 10,000 años, dan los valores del NAMO y NAME que se presentan en la Tabla VI.8.

Tabla VI.9 Distancias y elevaciones de la sección máxima de la cortina de la presa.

Elemento	Elevación (msnm)	Distancia desde la corona (m)
Corona	537.46	0.00
NAME para el análisis de estabilidad	536.96	0.50
NAME	536.76	0.50
NAMO	534.90	2.56
Pie del talud aguas arriba	522.66	14.8
Pie del talud aguas abajo	522.66	14.8

De acuerdo con el estado de la práctica, se considera que el bordo libre mínimo con el nivel del embalse en el caso más desfavorable considerado para análisis debe ser de 0.50 m y para la presa La Estrella, de acuerdo con el NAME hidrológico calculado es de 0.70 m.

Revisión del bordo libre.

La altura de la ola H_w (metros) con base para valores de fetch menores que 20 km como es el caso, se obtuvo mediante la ecuación de Stevenson

$$H_w = 0.032(UF)^{0.5} + 0.76 - 0.24(F)^{0.25} \quad (VI.2)$$

Como aquí se trata de un embalse con un vaso de tamaño medio o pequeño ($F < 20$ km) el bordo libre debido a la onda del agua por efecto del viento se puede calcular considerando que la velocidad de propagación del agua se puede aproximar por

$$c = 1.5 + 2H_w \quad (VI.3)$$

Entonces la altura significativa del oleaje del embalse agitado por el viento será

$$H_s = 0.75H_w + (1.5 + 2H_w)^2 (2g)^{-1} \quad (VI.4)$$

Este valor para las condiciones dadas con un fetch efectivo igual o menor que 1600 m, como es el caso de la presa La Estrella, considerando una velocidad de viento de 35 m/s (126 km/h), la altura significativa del oleaje es de 0.32 m (32 cm). El valor

de la altura significativa de oleaje para diseño o revisión del bordo libre se consideró de acuerdo con las recomendaciones del USACE, como

$$H_{WR} = 1.3H_w \quad (\text{VI.5})$$

Para el caso de la presa La Estrella la altura significativa del oleaje para revisión del efecto de la onda del embalse sobre el talud aguas arriba sería como máximo de

$$\text{HWR} = 1.3*(0.32) = 0.42 \text{ m} \quad (\text{VI.6})$$

La parte correspondiente al bordo libre por sismo que se presenta más adelante, permite estimar que la mayor porción del asentamiento máximo de la cortina ya se ha llevado a cabo durante vida operativa. Aquí se supone que ocurrirá un asentamiento adicional de 0.005 m.

La revisión del bordo libre total con asentamientos por sismo y oleaje daría entonces 0.43 m (43 cm) lo cual se satisface por la distancia de 0.70 m (70 cm) entre la corona de la cortina, que es el valor entre la corona y el NAME hidrológico.

Sedimentación y acumulación de azolves

La presa La Estrella tiene una altura de azolves de 2 a 3 m, acumulada durante sus años de vida operativa. Los análisis realizados en este estudio permiten estimar que para otros 50 años de vida operativa, se acumularía una altura adicional de otro metro de azolve en el caso de que no se cuide la desertificación y la vegetación nativa de las montañas circunvecinas.

Deficiencias de control de flujo de agua

Erosión interna de la cortina

La presa La Estrella tiene problemas de erosión interna de la cortina de tierra con sección homogénea, debidos a la presencia de tuzas que han cavado sus madrigueras en diferentes sitios de la cortina, como se ha visto en las visitas de inspección () y como se detectó en los sondeos por la pérdida del lodo bentonítico espeso. Su atención es muy importante y se requiere rellenarlas con lechada de cemento – bentonita muy fluida e inyectada a gravedad desde las bocas de madrigueras detectadas en un trabajo específico para este fin, y después colocando un enrocamiento de protección en ambos taludes para evitar que se vuelvan a excavar las madrigueras.

Filtraciones excesivas por el terreno natural o cimentación

Durante la visita de inspección se comprobó la existencia de la ciénega aguas abajo de la cortina, sobre el antiguo cauce, lo que indicaría que el agua del vaso fluye por la

cimentación en la zona central de la cortina, entre las estaciones 0+500 y 0+700, y va a dar a la zona de resurgencia en donde se ubica la ciénega. Contra esto no hay nada económico que se pueda hacer, y es parte de las pérdidas que tiene el embalse por filtraciones que, por otra parte, benefician la recarga del acuífero y alimentan las numerosas norias que existen en la zona.

Filtraciones no controladas en el respaldo aguas abajo

La presa La Estrella tuvo problemas de filtraciones excesivas cuando ocurrió la falla en 2010, lo cual se comprobaría parcialmente porque cuando se perforaron los sondeos SPT-1, SPT-2 y SPT-3 en la cortina, en todos los casos salió el agua y luego el lodo bentonítico por el talud aguas abajo, principalmente en el sondeo SPT-2, cuando entre la superficie, o sea desde el brocal del sondeo, hasta una profundidad de , ya que las que han sido reportadas, se reportaron como filtraciones en forma de “lloraderos” lo cual sería consecuencia de la salida de la línea de corriente superior a través del cuerpo de la cortina, sin causar mayores problemas. Esto se debería considerar una deficiencia del diseño y construcción de la cortina original, por la falta de elementos de control de filtraciones y del flujo de agua a través de la cortina, tal como un filtro en la parte inferior de la cortina, entre el centro de la cortina y el pie del respaldo aguas abajo, que captara el agua de la línea de corriente.

Infiltración por grietas o raíces vegetales

La cortina original de la presa La Estrella tiene grietas en la cortina, que se observaron sensiblemente transversales en los pozos a cielo abierto, y debido a las pérdidas del fluido de perforación en los sondeos, se presume que dichas grietas se prolongan en toda la altura de la cortina. Las grietas no presentan flujo del embalse hacia el talud seco de la cortina, pero sí se da el flujo de agua o lodo bentonítico cuando se perforaron los sondeos. Existen madrigueras de roedores, que se identificaron como tuzas, las cuales son visibles en la corona, y algunos sitios en los taludes de ambos respaldos. Asimismo, existen numerosos árboles en la cortina, algunos huizaches y cazahuates, cuyas raíces contribuyen a secar los suelos arcillosos que componen la cortina y generan agrietamiento.

Inestabilidad de la cortina o su cimentación

Capacidad de carga o deformación excesiva de la cimentación

El terreno de cimentación de la presa La Estrella es roca lutita, con muy sobrada capacidad de carga para las presiones de contacto que provienen del cortina que forma la cortina de la presa, y que se estiman en 290 kN/m^2 en el contacto y de 275 kN/m^2 a 5.0 m de profundidad que, con factor de seguridad de 4.0, requeriría una cohesión de 225 kN/m^2 , que es netamente inferior al valor de $c=412 \text{ kN/m}^2$,

estimada conservadoramente para una lutita alterada y fracturada, con una resistencia a la compresión simple de sólo $q_u=825 \text{ kN/m}^2$ (8.4 kg/cm^2). De la misma manera los asentamientos del terreno de cimentación de la cortina ya ocurrieron completamente, durante los años de vida operativa transcurridos de la presa.

Revisión del agrietamiento

El agrietamiento en la cortina de la presa La Estrella es el problema de estabilidad de la cortina, y se debe evaluar en términos de suponer una falla de la cortina por brecha, como pudo ocurrir en 2010, cuando una parte del respaldo aguas abajo se desconchó (), pero que de haberse saturado completamente la cortina y haberse llenado las cavidades de las madrigueras de los roedores y las grietas por desecación que existen en la cortina, el problema podría haber terminado con la abertura de una brecha en la estructura de contención. Ahora bien, la salida intempestiva del agua del embalse, es importante evaluarla en cuanto a sus consecuencias aguas abajo, ya que en muchos kilómetros a la redonda no hay cerca del cauce una población que pudiese ser afectada por la avenida.

El poblado de la pequeña localidad de La Estrella, situado en la ladera de la margen izquierda, aguas abajo y a un costado muy cerca de la obra de toma de la presa, está en una elevación de varios metros sobre el cauce, y se encuentra sobresaliendo la corona de la cortina de la presa, por lo que difícilmente sería afectado por la rotura de la cortina. El contenido de agua de prácticamente toda la cortina es de $w=20\%$ aproximadamente, en tanto que el límite plástico de las arcillas se sitúa por encima de $LP \geq 25\%$ y típicamente es mayor que $LP \geq 30\%$, por lo que la arcilla de la cortina se encuentra muy por debajo del LP , lo que explica en parte el agrietamiento observado, el cual se debería a la contracción del suelo, que en términos de la contracción lineal para las arcillas de la cortina, el valor varía entre 3 y 7%.

VI.9 Análisis del flujo de agua en la cortina

Consideraciones para el análisis de flujo de agua

Los análisis de flujo de agua en la cortina son fundamentales de estudiarse con detalle y en distintas condiciones de frontera y operación del embalse, con la finalidad de establecer las condiciones que imperan en cuanto a las presiones del agua en los poros del suelo que constituye la cortina de la presa, para estudiar las fuerzas de filtración y los gradientes en la cortina, y también para establecer las

condiciones correctas para los cálculos con los programas de cómputo para los análisis de estabilidad.

Los análisis efectuados parten de la condición de flujo establecido; esta condición se tiene cuando la lámina de agua se encuentra al nivel de aguas máximas extraordinarias (NAME) o al nivel de aguas máximas ordinarias (NAMO). Los estados de esfuerzo que resultan de estos análisis, se utilizan como condiciones iniciales para evaluar la estabilidad de taludes de la presa en condiciones estáticas y sísmicas. Los análisis se hicieron considerando el modelo estratigráfico y las propiedades ya mencionadas anteriormente.

Para los análisis de vaciado rápido, se considera que a partir del nivel del NAMO se inicia el proceso de vaciado rápido hasta que el tirante hidráulico disminuye al NAMIN. Finalmente, con los análisis de flujo establecido que se llevaron a cabo en la sección transversal del modelo, se determinó el gasto que pasa a través de la misma.

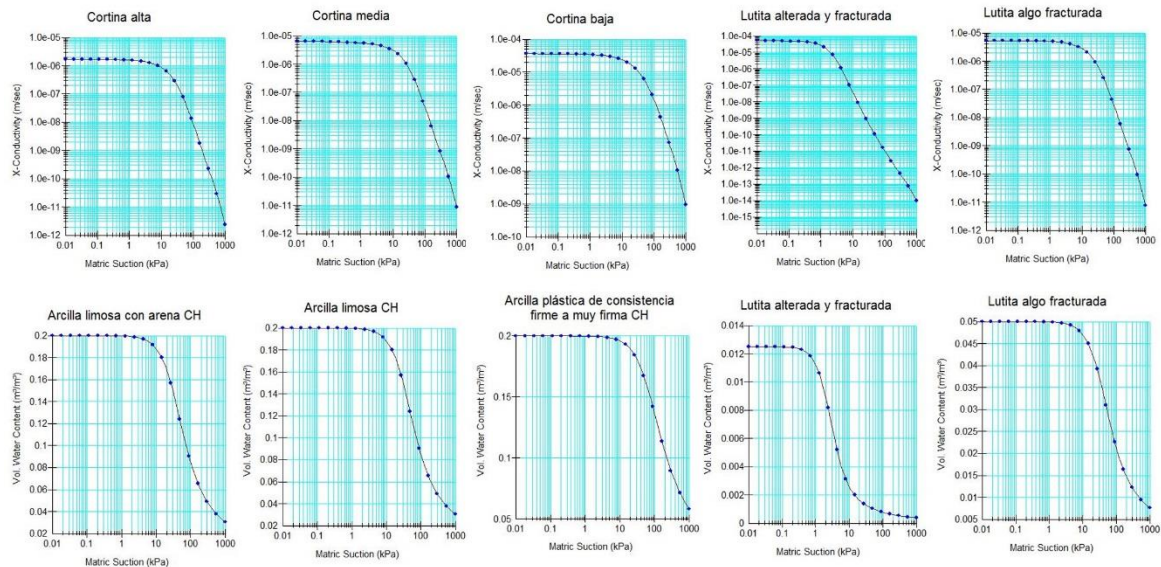


Figura VI.13 Funciones hidráulicas de comportamiento de la conductividad hidráulica y el contenido de agua en condiciones de saturación y parcialmente saturadas de las arcillas de la cortina y las lutitas de su cimentación.

Las funciones hidráulicas de los materiales considerados en el análisis (de almacenamiento y de conductividad hidráulica) se establecieron tomando en cuenta los valores del contenido de agua saturado y residual (Krahn J, 2004). Los resultados de la predicción de las funciones hidráulicas de saturación y conductividad hidráulica para los suelos de la cortina y el terreno de cimentación se presentan en la Figura VI.13.

Asimismo, se consideraron conductos o estratos con erosión interna en la zona inferior de la cortina, tal como ya se han observado en esta obra de contención, lo cual permite evaluar condiciones de flujo de agua más críticas, tanto en términos de velocidades como de gradientes hidráulicos, y tomar estos resultados para los análisis de estabildades de la cortina.

Estudio de las condiciones de flujo de agua establecido

Para realizar el análisis, se parte de la condición de que después de cierto tiempo de operación de la presa, los materiales han sido saturados y han alcanzado condiciones de flujo establecido. La primera etapa consistió en realizar los análisis de flujo establecido para la cortina. De estos análisis se determinó el gasto que pasa a través de la misma y las condiciones iniciales para los análisis de estabilidad de taludes.

Se consideran las condiciones hidráulicas de operación normal con el nivel al NAMO; se presentan de la Figura VI.14 a la Figura VI.21, las líneas equipotenciales de presión de poro, así como las isolíneas de gradientes hidráulicos y de flujo horizontal, vertical y resultante, junto con los vectores de velocidad del flujo de agua durante la operación normal de la presa con embalse al NAMO. Los valores obtenidos están dentro de los aceptables, con excepción de algunos gradientes que son poco altos al pie del respaldo aguas abajo, pero se deben también a nodos de singularidad del método de elementos finitos, y dan factores de seguridad de 1.20 y mayores, por lo cual no son preocupantes para la estabilidad de la cortina.

Las condiciones más severas que corresponden a una operación inusual con el nivel del embalse al NAME. Son estas últimas las que nos permiten visualizar los mayores problemas en términos de valores de los gradientes hidráulicos y las velocidades que alcanzaría el flujo en el cuerpo de la cortina. De esta manera, se presentan de la Figura VI.22, para las líneas de flujo y vectores de velocidad del flujo de agua con el embalse a su máximo nivel; en la Figura VI.23, se tienen las líneas equipotenciales; se presentan de la Figura VI.24 a la Figura VI.26, los contornos de isovalores de los componentes horizontales, verticales y resultantes de los gradientes hidráulicos en la cortina con el embalse completamente lleno, con valores negativos de hasta -0.80 aguas arriba y positivos de 0.63 del gradiente vertical (Y), con lo cual el factor de seguridad contra ebullición del suelo al pie del respaldo seco de la cortina de La Estrella, alcanzaría $FS_{gh}=1.43$ con $\gamma_m=18.64 \text{ kN/m}^3$, aunque es importante considerar que en el cálculo del flujo de agua en 2D no es tan cierto que el gradiente crítico sea $i_c=1.0$, y el valor de $i_c \geq 1.15$. En tanto que de la Figura VI.27 a la Figura VI.28, se presentan los contornos de isovalores de los componentes horizontales,

verticales y resultantes de los vectores de velocidad del flujo. Por otro lado, el gasto unitario para el gradiente hidráulico de 0.63, es de $q=0.06$ l/s, lo que daría un gasto de $Q=6$ l/s en un frente de 100 m, que es un valor muy alto con respecto a lo observado, por lo que las propiedades de permeabilidad consideradas en la cortina baja son muy conservadoras, además de la influencia de los conductos o tubificaciones, con lo cual se analiza la cortina en condiciones conservadoras para estudiar la problemática de tubificación.

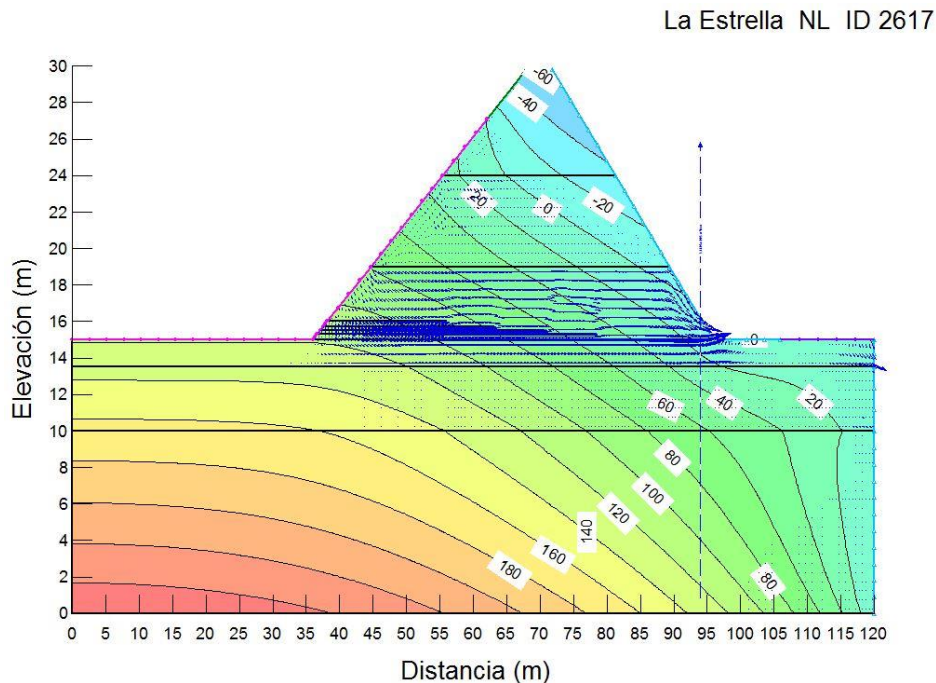


Figura VI.14 Isolíneas de presiones de poro (kPa) y vectores de velocidad al NAMO.

La Estrella NL ID 2617

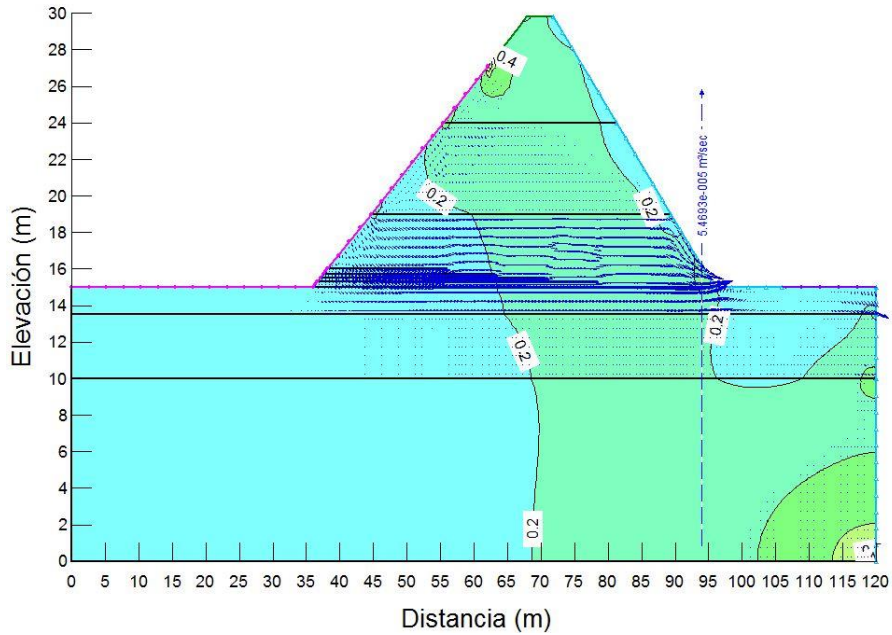


Figura VI.15 Isolíneas de carga hidráulica (m) y vectores de velocidad al NAMO.

La Estrella NL ID 2617

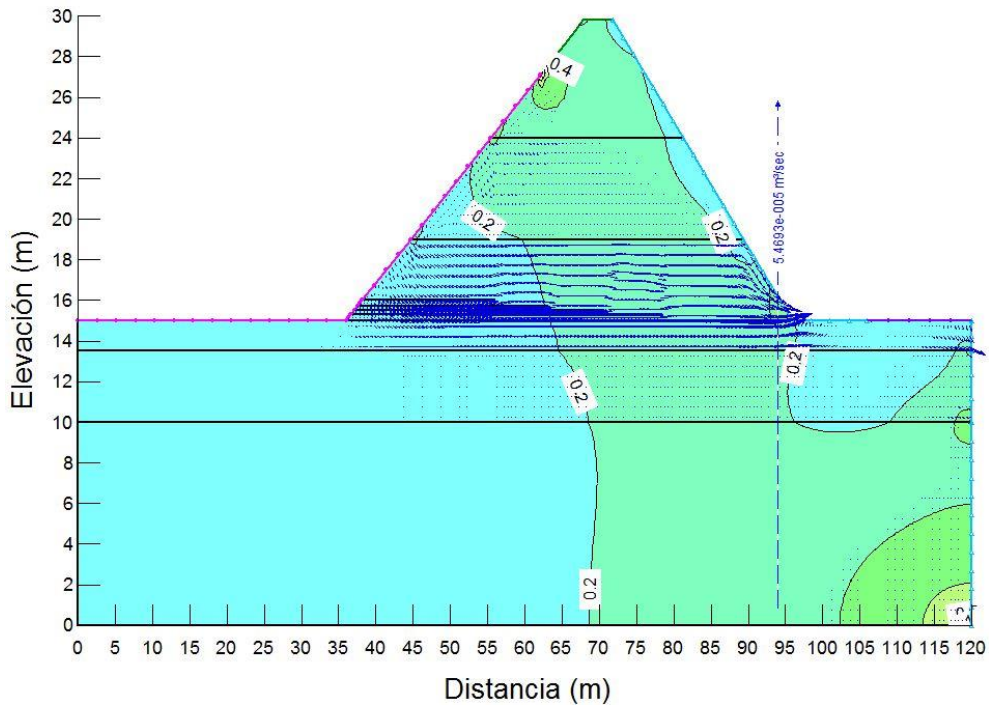


Figura VI.16 Los gradientes hidráulicos horizontales con embalse al NAMO.

La Estrella NL ID 2617

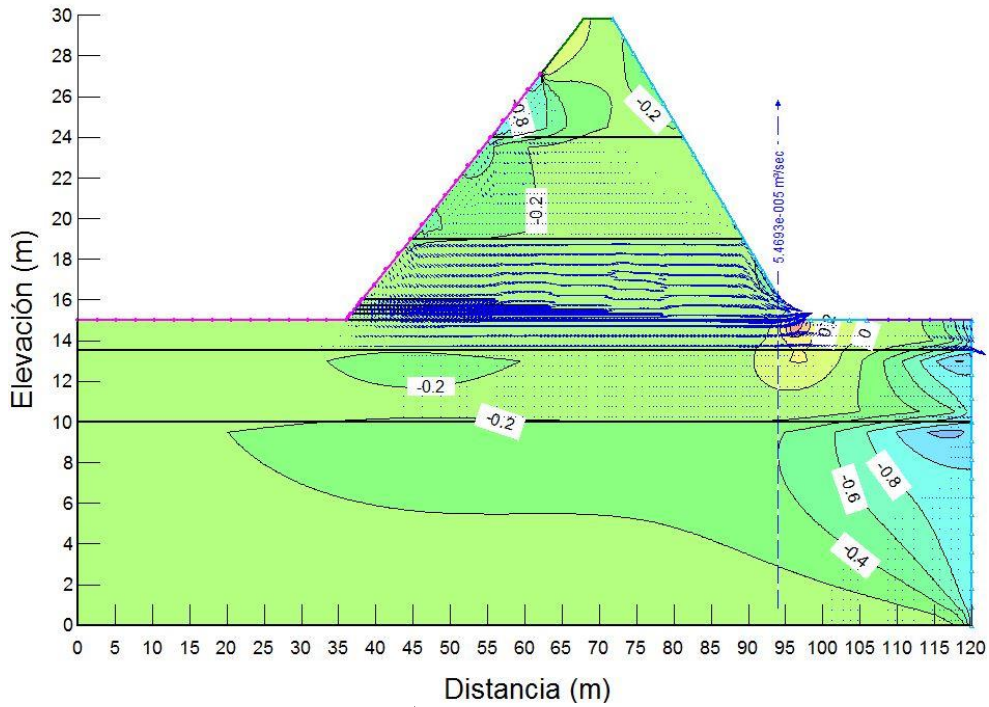


Figura VI.17 Los gradientes hidráulicos verticales con embalse al nivel del NAMO.

La Estrella NL ID 2617

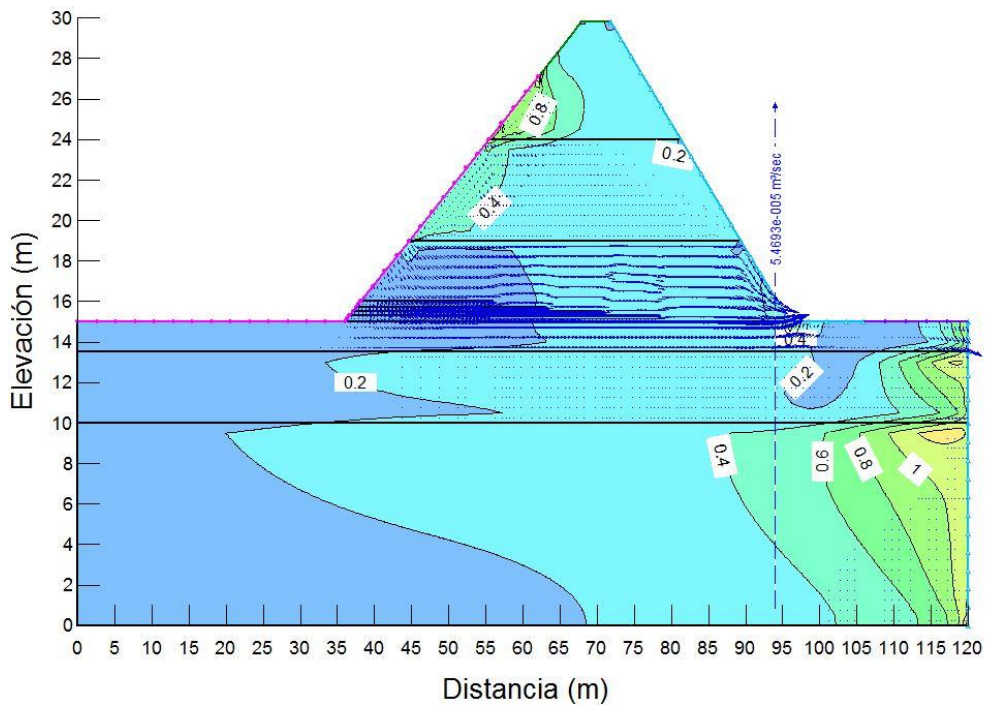


Figura VI.18 Los gradientes hidráulicos resultantes con embalse al nivel del NAMO.

La Estrella NL ID 2617

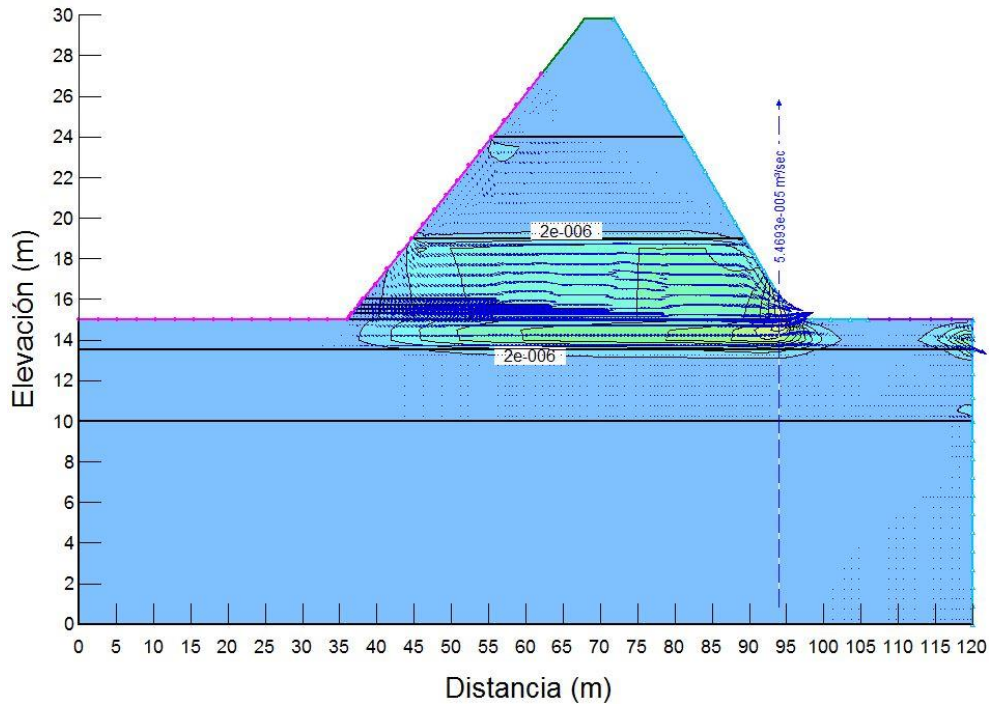


Figura VI.19 Isovalores de velocidad horizontal del flujo (m/s) al nivel del NAMO.

La Estrella NL ID 2617

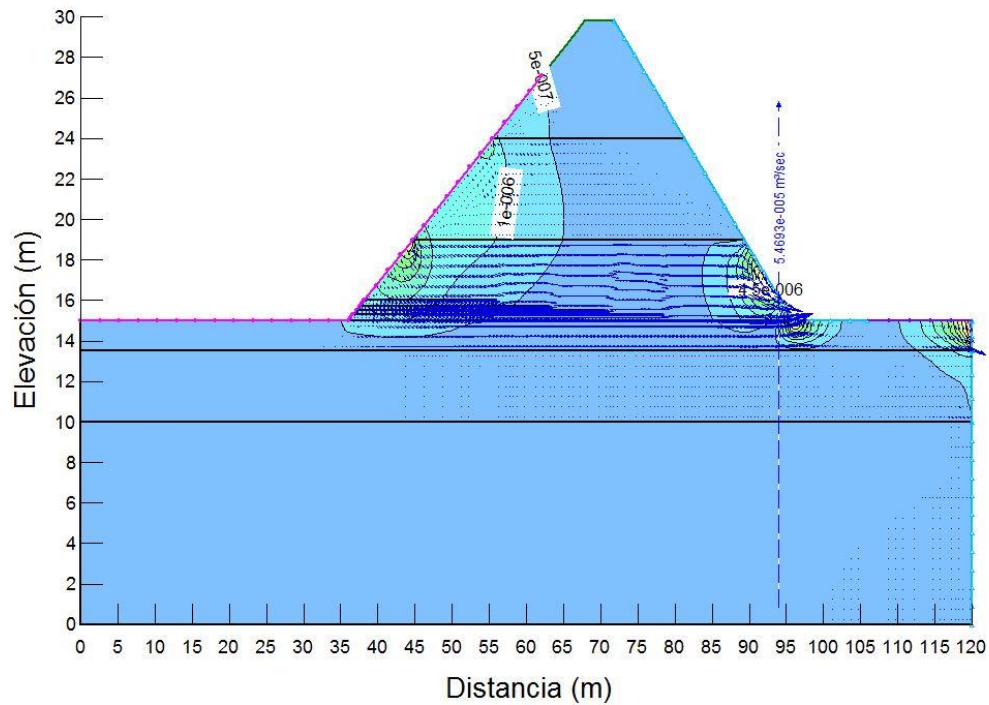


Figura VI.20 Isovalores de velocidad vertical del flujo (m/s) al nivel del NAMO.

La Estrella NL ID 2617

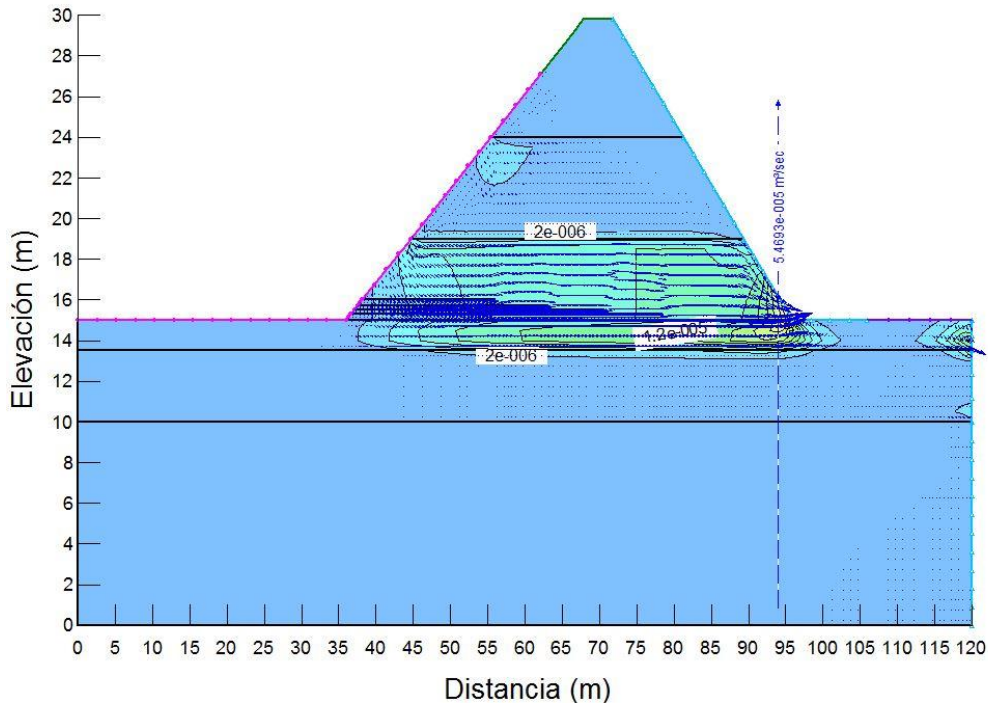


Figura VI.21 Isovalores de velocidad resultante del flujo (m/s) al NAMO.

La Estrella NL ID 2617

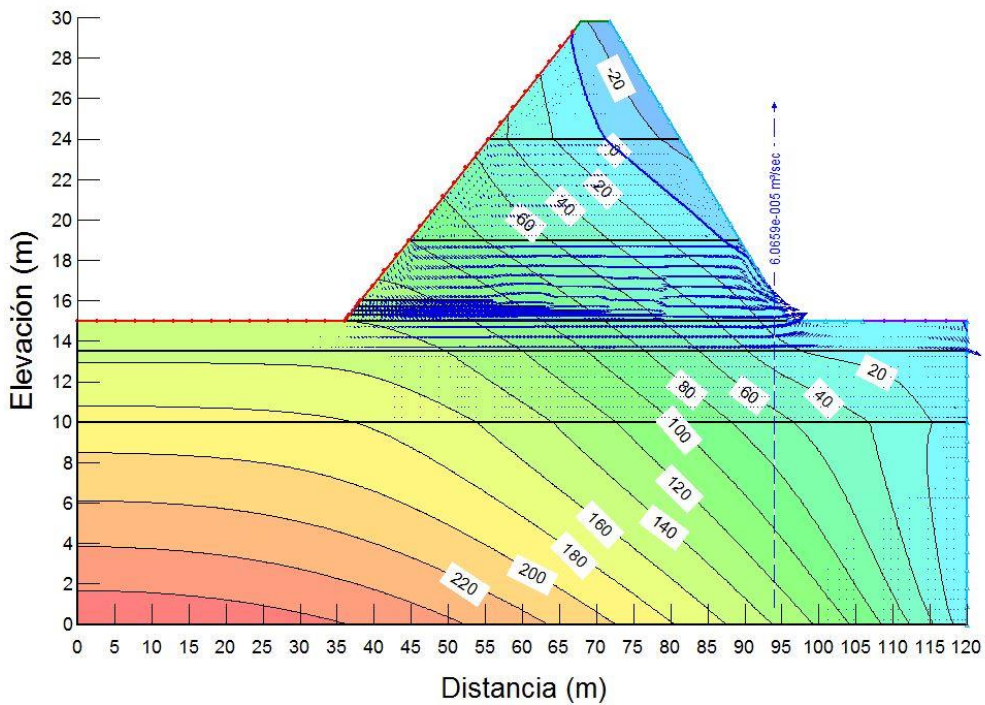


Figura VI.22 Isolíneas de presiones de poro (kPa) y vectores de velocidad al NAME.

La Estrella NL ID 2617

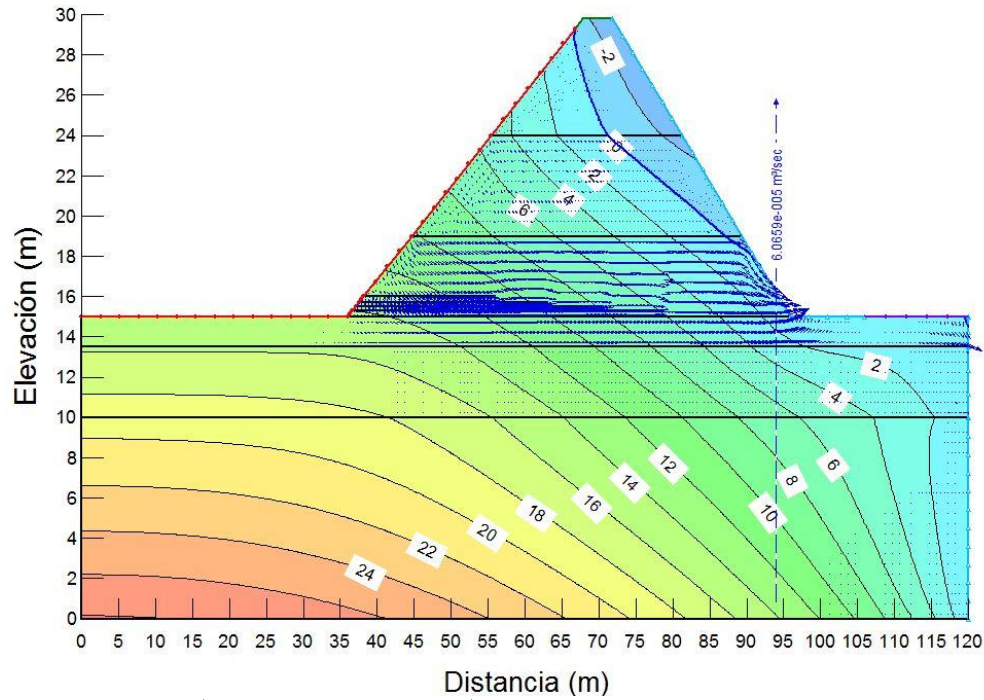


Figura VI.23 Isolíneas de carga hidráulica (m) y vectores de velocidad al NAME.

La Estrella NL ID 2617

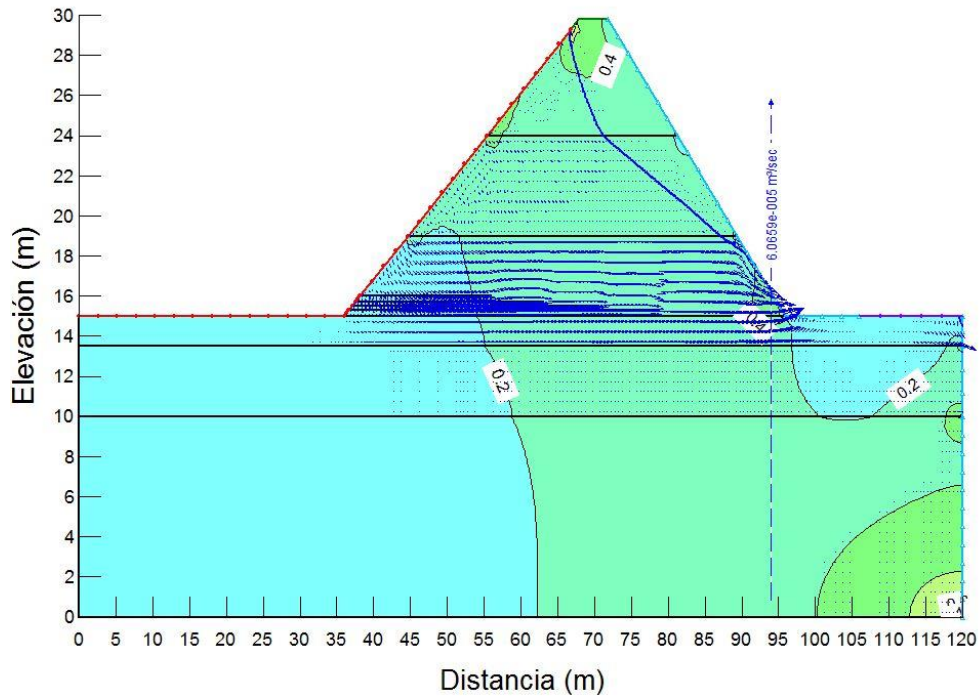


Figura VI.24 Los gradientes hidráulicos horizontales con embalse a NAME.

La Estrella NL ID 2617

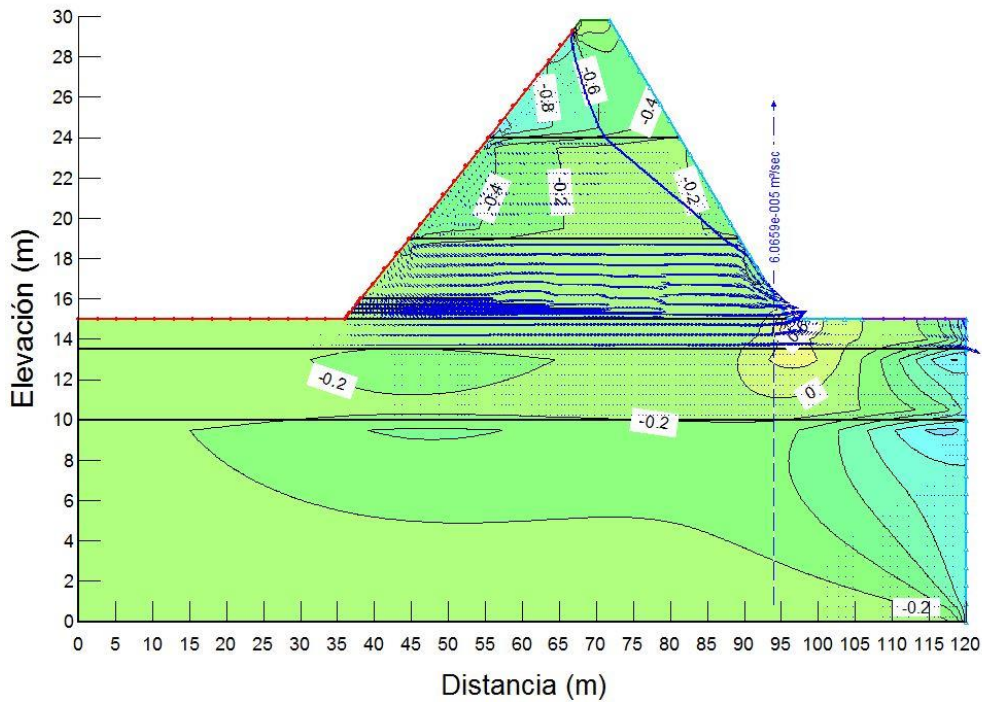


Figura VI.25 Los gradientes hidráulicos verticales con embalse a nivel del NAME.

La Estrella NL ID 2617

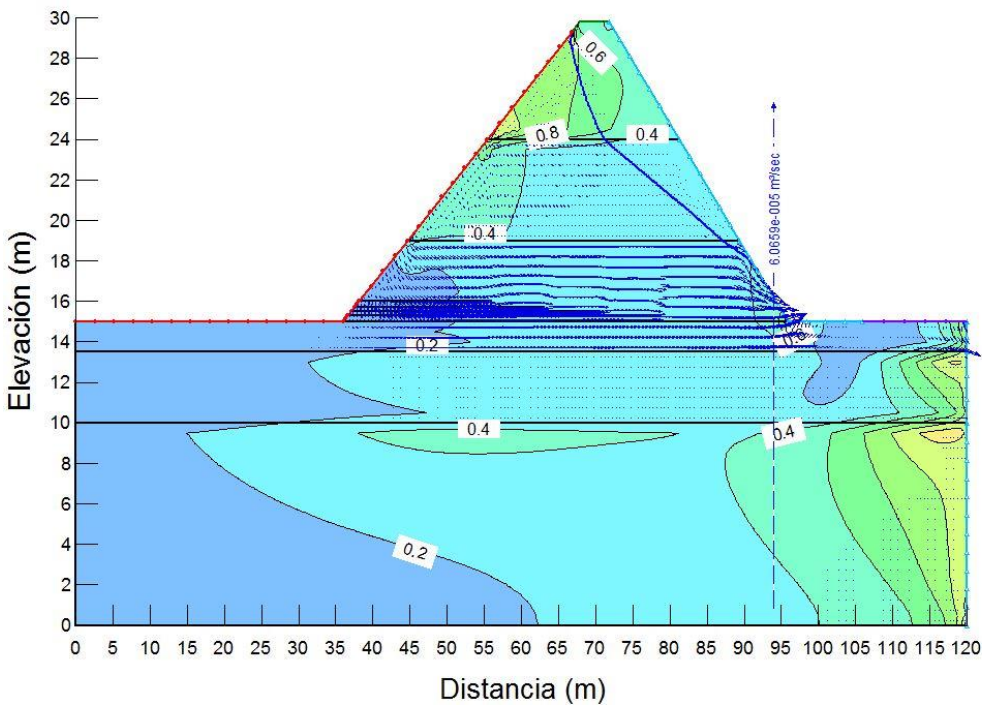


Figura VI.26 Los gradientes hidráulicos resultantes con embalse a nivel del NAME.

La Estrella NL ID 2617

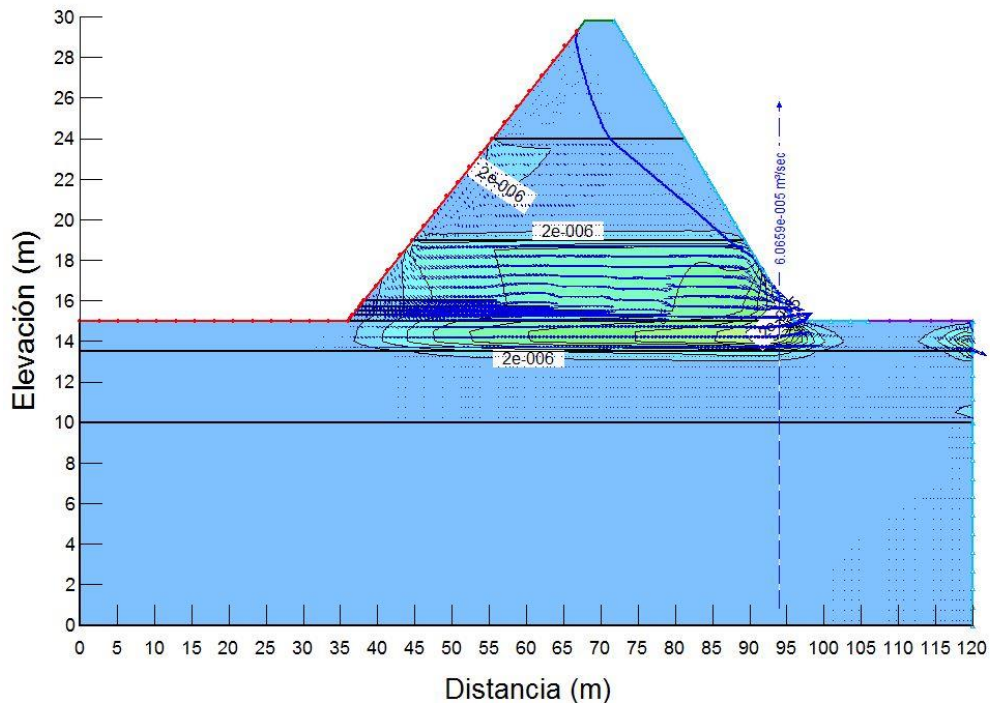


Figura VI.27 Isovalores de velocidad horizontal del flujo (m/s) con nivel al NAME.

La Estrella NL ID 2617

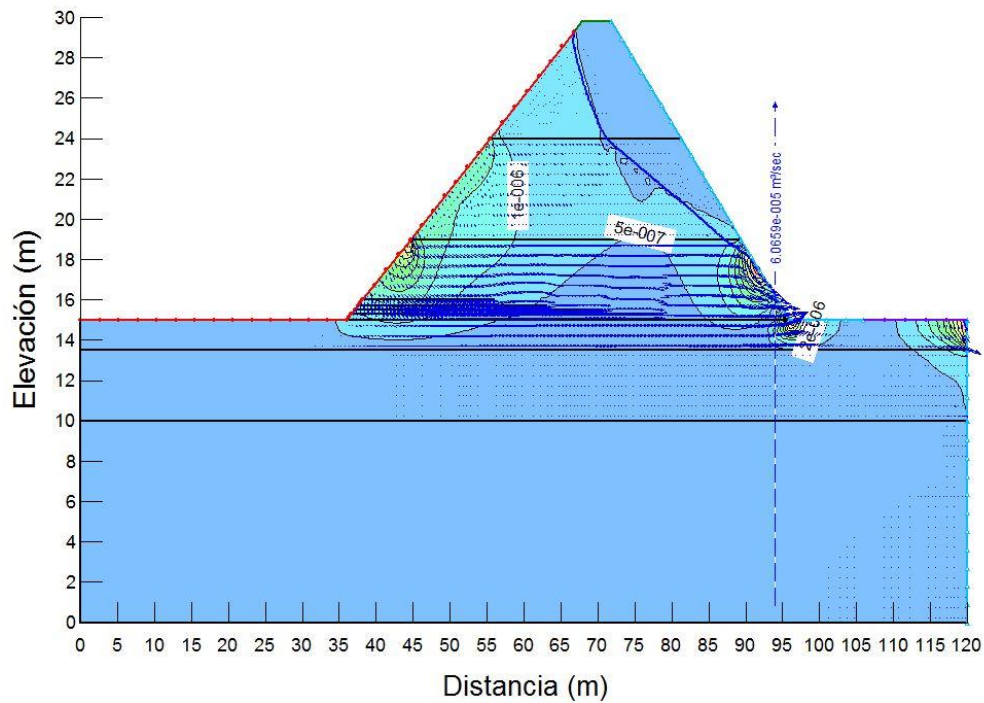


Figura VI.28 Isovalores de velocidad vertical del flujo (m/s) con nivel al NAME.

La Estrella NL ID 2617

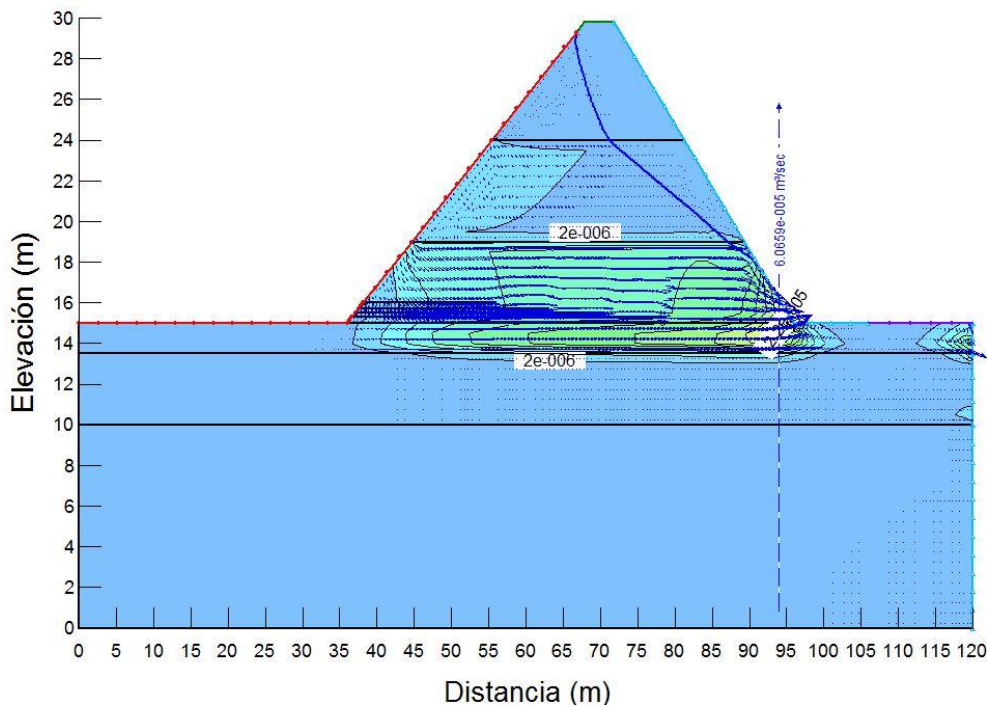


Figura VI.29 Isovalores de velocidad resultante del flujo (m/s) con nivel al NAME.

Flujo de agua en condiciones de vaciado rápido

Esta condición se produce cuando el nivel de agua adyacente a un talud desciende rápidamente en relación con el tiempo requerido para desalojar el agua contenida dentro del talud. Para evaluar esta condición se parte del análisis de flujo establecido. Se considera que la condición más crítica en el vaciado rápido se tiene cuando el vaciado se presenta de manera instantánea, es decir, el agua que corresponde a la condición de embalse lleno al nivel del NAMO con descenso a nivel del NAMIN.

Se estudió el comportamiento del flujo de agua en condiciones extremas, de las cuales, una es cuando el nivel del embalse disminuye de manera inmediata, siguiendo la superficie del talud aguas arriba o del talud aguas abajo, hasta llegar a nivel del NAMIN, mientras que la condición del agua dentro de la cortina se mantiene sin cambios. La otra condición es que el embalse se vacía por la obra de toma en 1 mes, 2 meses y hasta 3 meses, con lo cual se calculan las condiciones al transcurrir varios millones de segundos. Las condiciones críticas se presentarían si el embalse se vacía en un tiempo menor que seis horas, lo que se produciría en el caso de una tubificación, por donde se desalojara el agua con gran rapidez. Es este último caso en el que se presenta en este informe.

De esta manera, se presentan de la Figura VI.30, para las líneas de flujo y vectores de velocidad del flujo de agua durante el llenado rápido; en la Figura VI.31, se tienen las líneas equipotenciales; se presentan de la Figura VI.32 a la Figura VI.34, los contornos de isovalores de los componentes horizontales, verticales y resultantes de los gradientes hidráulicos en la cortina durante el momento crítico del llenado rápido; en tanto que de la Figura VI.35 a la Figura VI.37, se presentan los contornos de isovalores de los componentes horizontales, verticales y resultantes de los vectores de velocidad del flujo la cortina durante el momento crítico del llenado rápido.

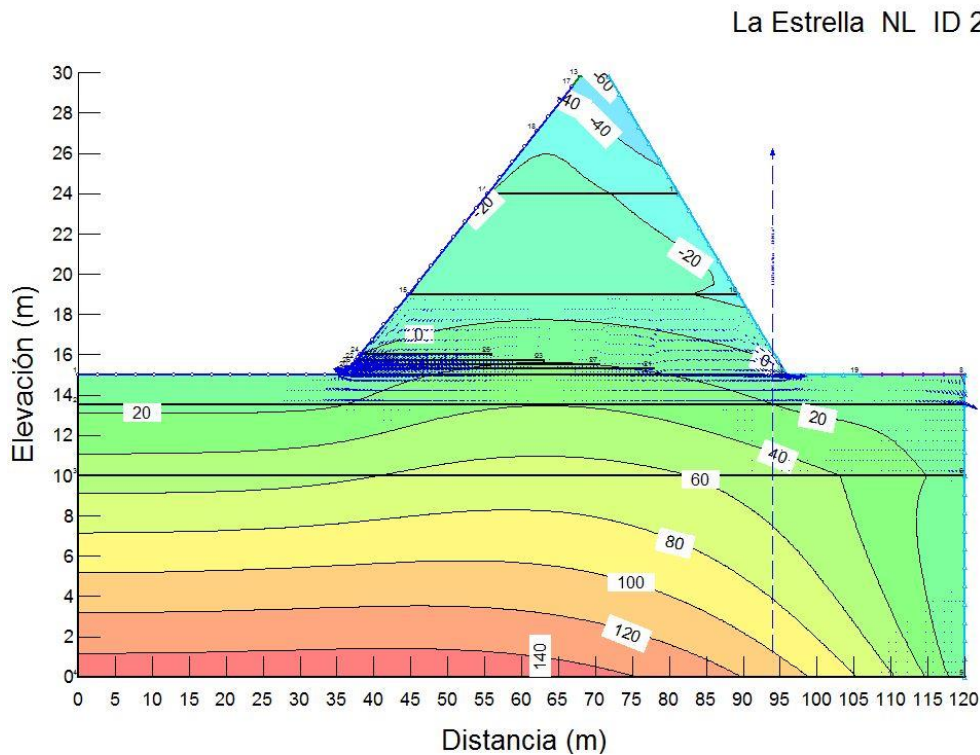


Figura VI.30 Isolíneas de presiones de poro (kPa) y vectores en vaciado rápido.

La Estrella NL ID 2617

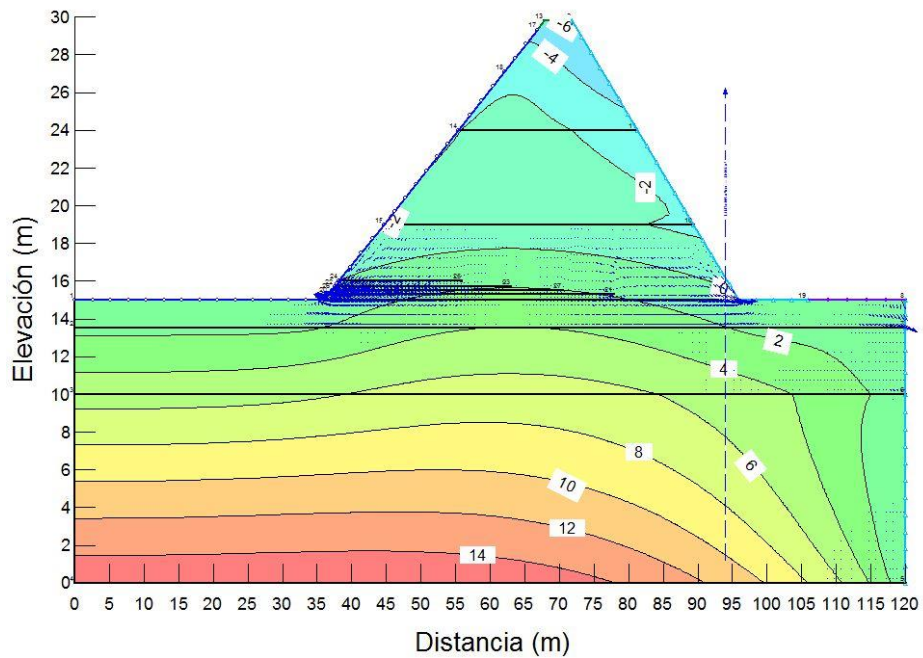


Figura VI.31 Isolíneas de carga hidráulica (m) y vectores en vaciado rápido.

La Estrella NL ID 2617

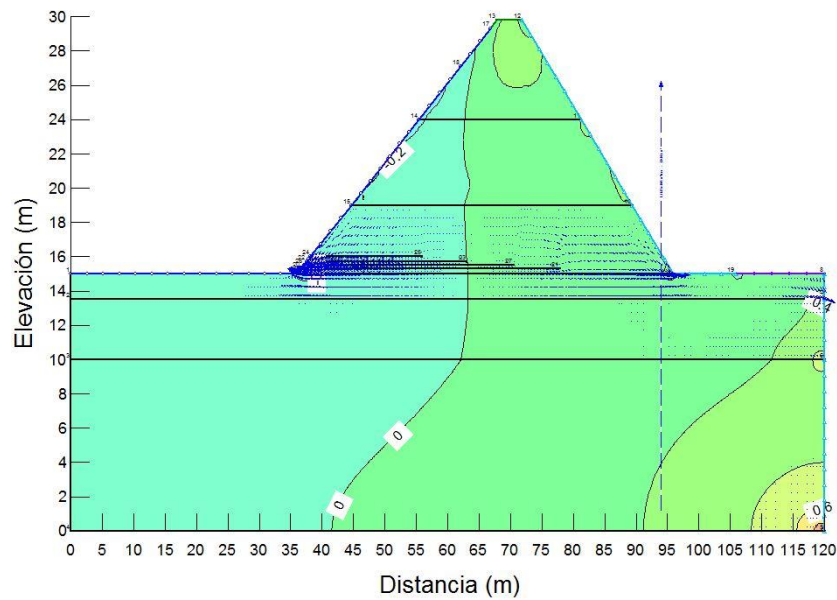


Figura VI.32 Los gradientes hidráulicos horizontales en un vaciado rápido.

La Estrella NL ID 2617

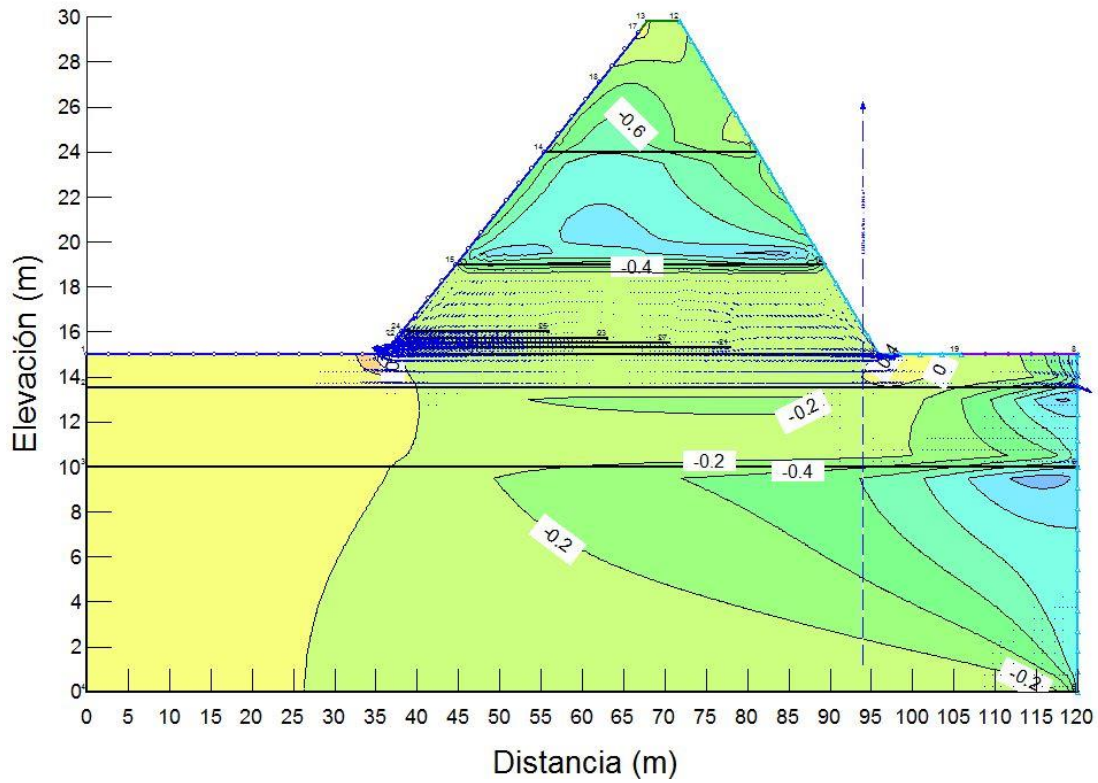


Figura VI.33 Los gradientes hidráulicos verticales en un vaciado rápido.

La Estrella NL ID 2617

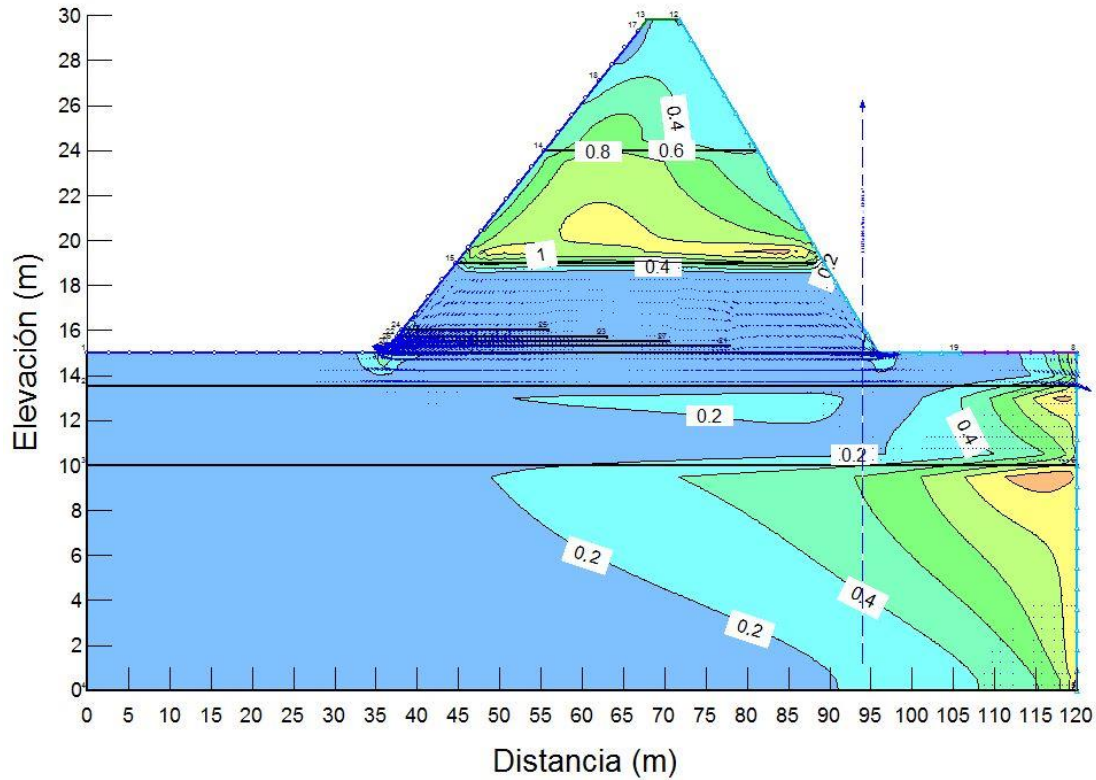


Figura VI.34 Los gradientes hidráulicos resultantes en un vaciado rápido.

La Estrella NL ID 2617

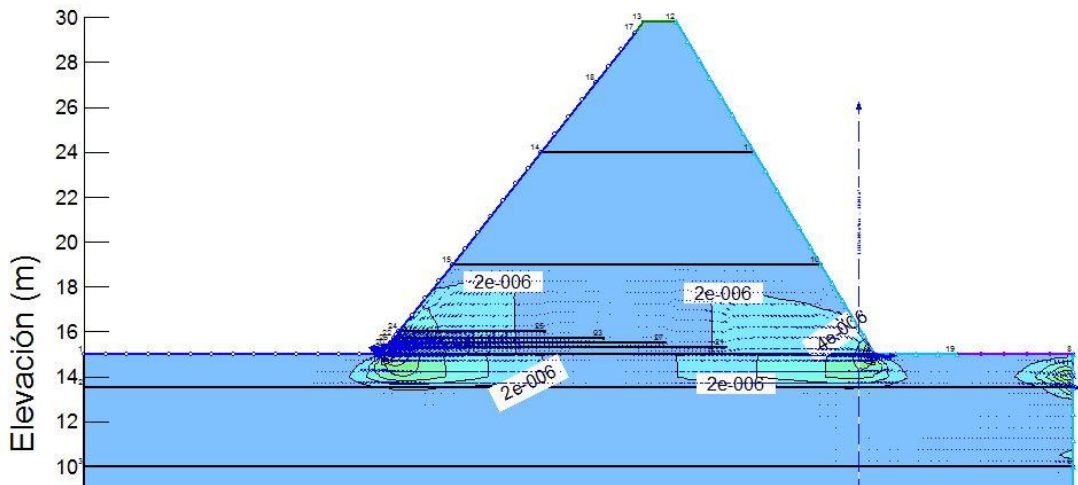


Figura VI.35 Isovalores de velocidad horizontal de flujo (m/s) en vaciado rápido.

La Estrella NL ID 2617

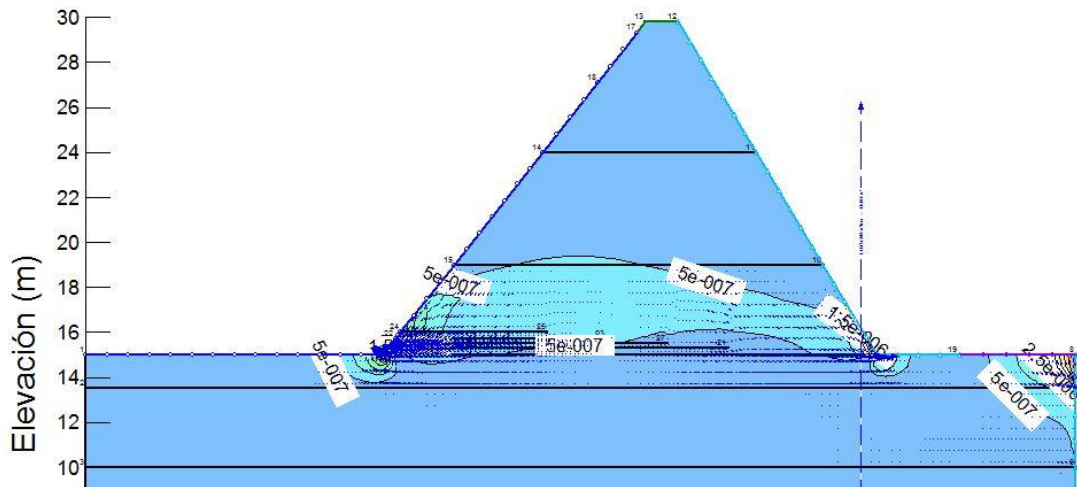


Figura VI.36 Isovalores de velocidad vertical del flujo (m/s) en vaciado rápido.

La Estrella NL ID 2617

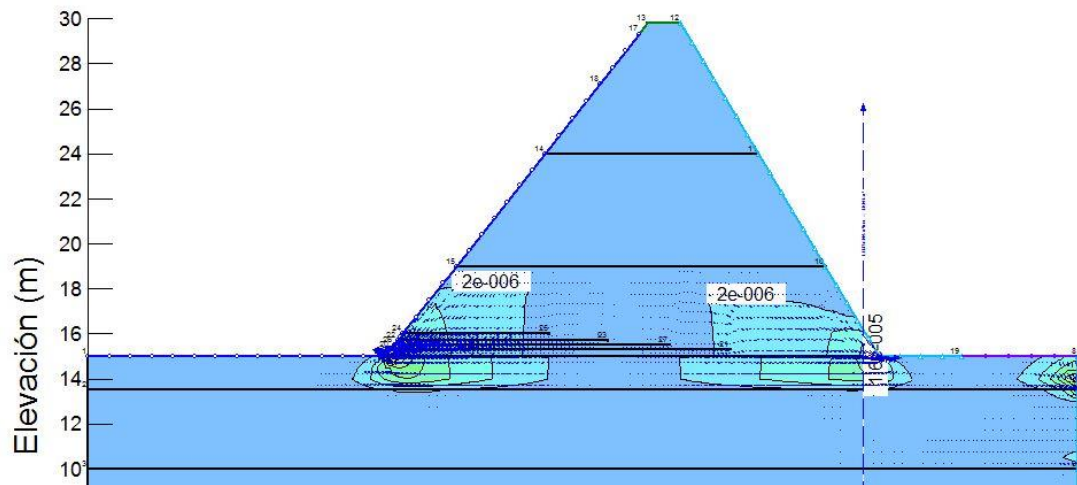


Figura VI.37 Isovalores de velocidad resultante de flujo (m/s) en vaciado rápido.

Flujo de agua en condiciones de llenado rápido

Esta condición inusual, se produciría cuando el vaso estuviese vacío y llegase una creciente muy importante, donde el nivel de agua pase desde el pie del talud mojado hasta el NAME. Esta condición se revisa ya que es realista y podría conducir a una falla por tubificación de la cortina. Si bien no se modela la tubificación per se los resultados permitirían evaluar la susceptibilidad de la estructura de contención a fallar por esta condición de operación inusual. Para evaluar esta condición se parte del análisis de flujo establecido. Se considera que la condición más crítica en el llenado rápido se tiene cuando éste ocurre en el lapso de 2 a 4 horas, es decir, el tiempo que corresponde a que una creciente importante llenase el vaso desde el nivel del MANIM hasta el NAME.

De esta manera, se presentan en la Figura VI.38, los contornos de isovalores de los componentes horizontales, verticales y resultantes de los gradientes hidráulicos en la cortina durante el momento crítico del llenado rápido; en tanto que en la Figura VI.39, se presentan los contornos de isovalores de los componentes horizontales, verticales y resultantes de los vectores de velocidad del flujo la cortina durante el momento crítico del llenado rápido.

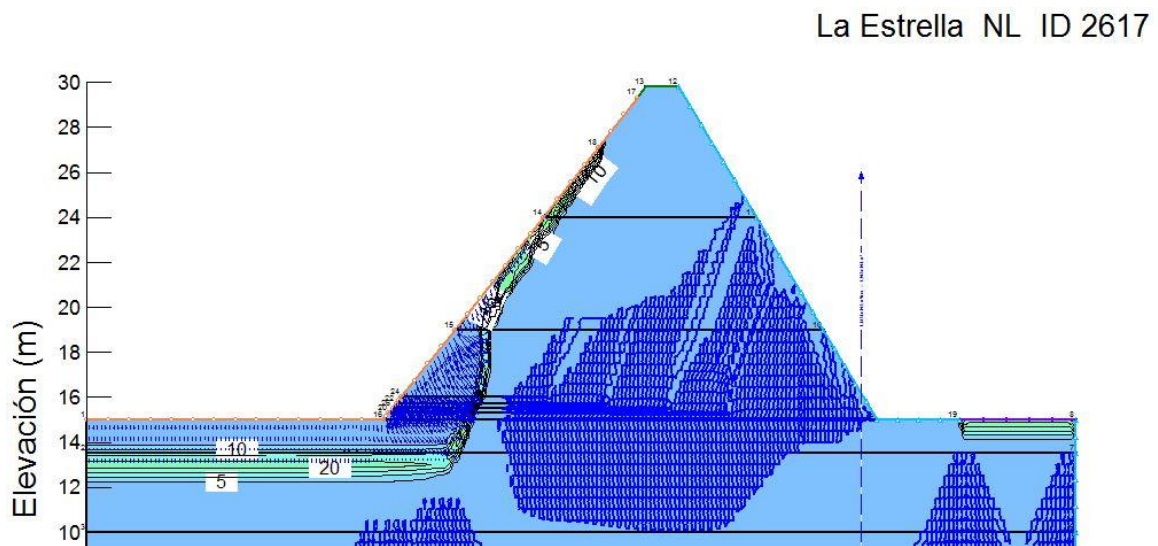


Figura VI.38 Los gradientes hidráulicos resultantes en un llenado rápido.

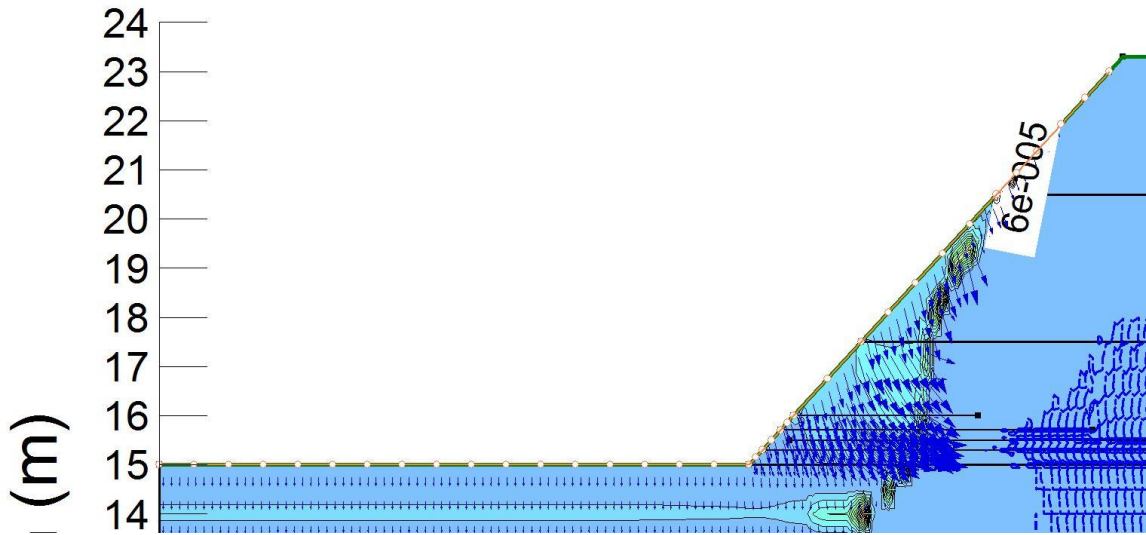


Figura VI.39 Isovalores de velocidad resultante del flujo (m/s) en un llenado rápido.

La Estrella NL ID 2617

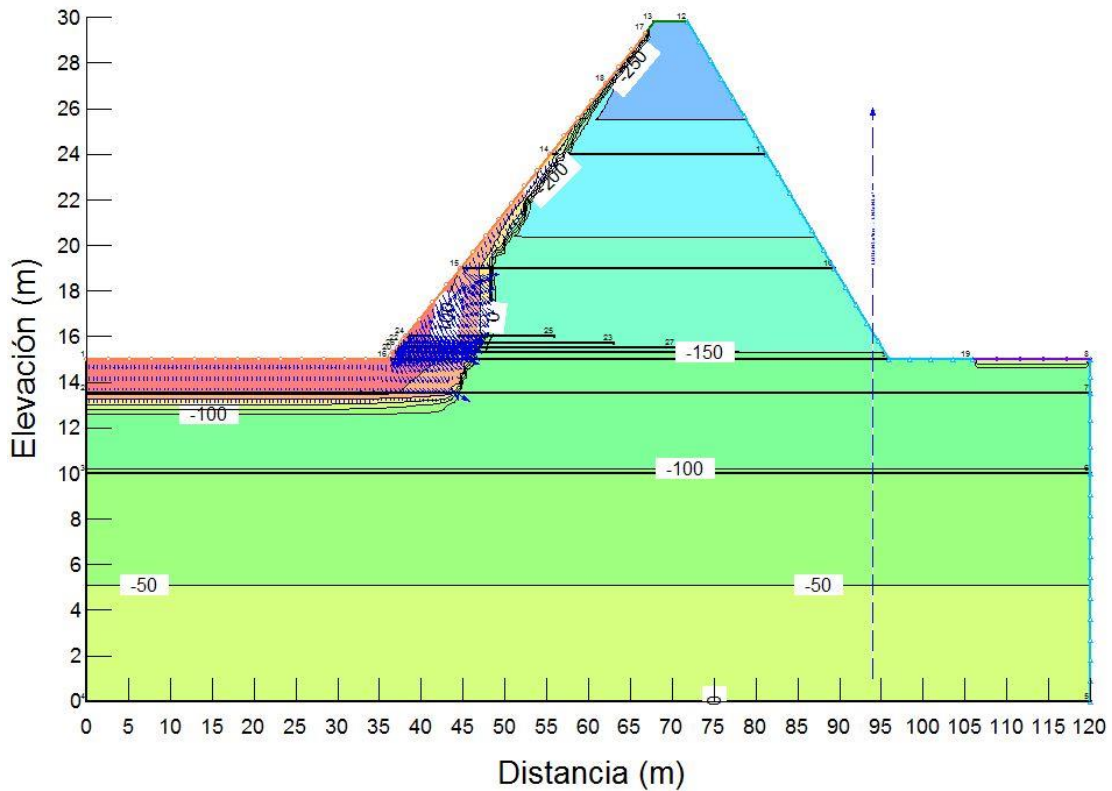


Figura VI.40 Isovalores de las presiones de poro (kPa) y vectores de velocidad, a las 4 h de iniciado el llenado rápido.

VI.10 Análisis de estabilidad de la cortina

Método de análisis y factores de seguridad admisibles

Los análisis se hicieron a partir de la modelación numérica de las condiciones de flujo establecido, vaciado rápido y ante condiciones sísmicas. Para los análisis de estabilidad de taludes se utiliza el método de equilibrio límite y que toma en cuenta las presiones de poro determinadas en los análisis de flujo establecido. Los resultados del Factor de Seguridad (FOS) presentados en este análisis se obtuvieron con el método general de análisis por equilibrio al límite de Fredlund y Krahn (GLE por sus siglas en inglés), mediante una generalización del método de Morgenstern – Price, que cumple tanto con el equilibrio por la suma de momentos como por la suma de fuerzas, permite analizar todos los demás métodos (Ordinario Sueco, Bishop, Janbu simplificado, Janbu riguroso, Spencer, Sarma, etc.), y que está bien y completamente implementado en la herramienta computacional utilizada. Por su parte, el comportamiento geomecánico de la presa se evalúa a partir de los Factores de Seguridad obtenidos del análisis de estabilidad de taludes. El Factor de Seguridad se define como el cociente entre la fuerza o momento resistente total y la fuerza o momento actuante, ambas a lo largo del plano de falla y se expresa como:

$$F_m = \frac{\sum M_R}{\sum M_M}$$

$$F_F = \frac{\sum F_R}{\sum F_M} \quad (VI.7)$$

$$FOS = f(F_m) \quad \forall \quad f(F_F)$$

Donde;

FOS = Factor de seguridad del método GLE cuando se satisfacen F_m y F_F

F_M = Factor de seguridad por momentos

M_R = Momentos resistentes

M_M = Momentos motores

F_F = Factor de seguridad por fuerzas

F_R = Fuerzas resistentes

F_M = Fuerza motoras

Por medio del análisis de estabilidad de taludes (equilibrio límite), no se pueden estimar las deformaciones de talud, aunque en forma cualitativa, un talud con mayor factor de seguridad sufre menor distorsión. También debe tenerse presente

que existen deformaciones que se pudieran presentar en una presa que no tienen que ver con los factores de seguridad contra deslizamiento, como son los hundidos por pérdida de material producto de erosión local, o penetración del enrocamiento en el suelo de la cortina, por movimiento sísmico y otras.

Para garantizar la seguridad estructural de la cortina, se deben cumplir los factores de seguridad que se muestran en la Tabla VI.9, de acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

Tabla VI.10 Factores de Seguridad Admisibles (USACE, USBR, CONAGUA).

Condición	FS	Talud	Notas
Operación Normal	1.50	Ambos	Embalse con nivel al NAMO.
Operación Inusual	1.30	Ambos	Embalse con nivel al NAME.
Operación Inusual por vaciado rápido	1.20	Ambos	El embalse desciende del NAMO al NAMIN.
Operación Inusual por llenado rápido	1.20	Ambos	El embalse asciende del NAMIN al NAME.
Operación Extrema por sismo	1.10	Ambos	Embalse lleno con nivel al NAMO.

Marco de referencia del estudio de estabilidad de la cortina

El factor de seguridad mínimo (FOS por sus siglas en inglés factor of safety) obtenido de los análisis de estabilidad de taludes se calculó para las condiciones de operación presentadas en la Tabla VI.9 y para ambos respaldos: aguas arriba y aguas abajo, de la cortina de la presa La Estrella.

El factor de seguridad que se debe emplear para la correcta interpretación de los cálculos es el que corresponde al método GLE o al de Morgenstern – Price, donde λ tiene una distribución de media senoide para la variación funcional de la inclinación de las fuerzas horizontales XL y XR con respecto a la dirección del eje vertical x, de acuerdo con la expresión general:

$$\lambda \cdot f(x) = X / E \quad (VI.8)$$

En donde:

FOS es el factor de seguridad.

λ es una constante que se debe evaluar para resolver el sistema de ecuaciones de las sumas de momentos y de fuerzas, y así obtener el FOS. Es una constante entre 0 y 1 (i. e. un porcentaje) de la función $f(x)$ a considerar en cada caso.

- $f(x)$ es una función que describe cómo varía la relación entre los esfuerzos cortantes τ (fuerzas verticales entre rebanadas – X – interslices shear forces) y los esfuerzos normales σ (fuerzas normales entre rebanadas – E – interslices normal forces). La función se propone *a priori*. Por ejemplo, para hacer la equivalencia con lo que se obtendría utilizando el método de estabilidad de taludes de Spencer, en donde $X/E = \tan \theta$, en donde θ es el ángulo que forma la resultante de fuerzas entre rebanadas con la horizontal; se requiere que $f(x) = 1$, y que la constante $\lambda = \tan \theta$.
- X son las fuerzas verticales entre las rebanadas (*interslices normal forces*) en que se discretiza la masa.
- E son las fuerzas horizontales entre las rebanadas (*interslices shear forces*) en que se discretiza la masa.

Para $f(x) = \text{constante}$, los resultados del método GLE o el de Morgenstern – Price son idénticos a los producidos por el método de Spencer. De una manera general, con base en la Figura VI.41, los factores de seguridad derivados del análisis de la suma de momentos $\Sigma M=0$, y del análisis de la suma de fuerzas $\Sigma F=0$, se pueden escribir como sigue:

Factor de seguridad por la suma de momentos:

$$F_M = \frac{\sum [c l R] + \sum [(P - ul) R \tan(\phi)]}{\sum W_x - \sum P f + \sum [k W e \pm A a + L d]} \quad (\text{VI.9})$$

Factor de seguridad por la suma de fuerzas:

$$F_F = \frac{\sum [c l \cos(\alpha)] + \sum [(P - ul) \tan(\phi) \cos(\alpha)]}{\sum [P \sin(\alpha) + \sum [k W \pm A - L \cos(\omega)]]} \quad (\text{VI.10})$$

En donde:

- c es la cohesión del suelo
- ϕ es el ángulo de fricción interna del suelo
- W es el peso total de una rebanada de ancho b y altura h
- P es la fuerza normal total en la base de la rebanada en una longitud l
- S_m es la fuerza cortante movilizada en la base de la rebanada y definida por el criterio de Mohr – Coulomb: $S_m = l \{ c + [P/l - u] \tan(\phi) \} / F$
- u es la presión de poro

- F es el factor de seguridad
 R es el radio o brazo de momentos asociado con la fuerza cortante S_m
 f es la distancia perpendicular de la fuerza normal al eje de rotación
 x es la distancia horizontal de la rebanada al centro de rotación
 α es el ángulo entre la tangente al centro de la base de cada rebanada y el eje de referencia horizontal
 E representa a las fuerzas horizontales entre rebanadas
 E_L fuerza horizontal del lado izquierdo
 E_R fuerza horizontal del lado derecho
 X representa a las fuerzas verticales entre las rebanadas
 e distancia vertical desde el centroide de cada rebanada y el centro de rotación
 L es una carga lineal (fuerza por unidad de longitud, v. gr. kN/m)
 ω es el ángulo que hace la carga lineal con la horizontal
 d es la distancia perpendicular entre la carga lineal y el centro de rotación
 A es la resultante de las fuerzas por empuje del agua en las grietas
 a es la distancia perpendicular entre A y el centro de rotación

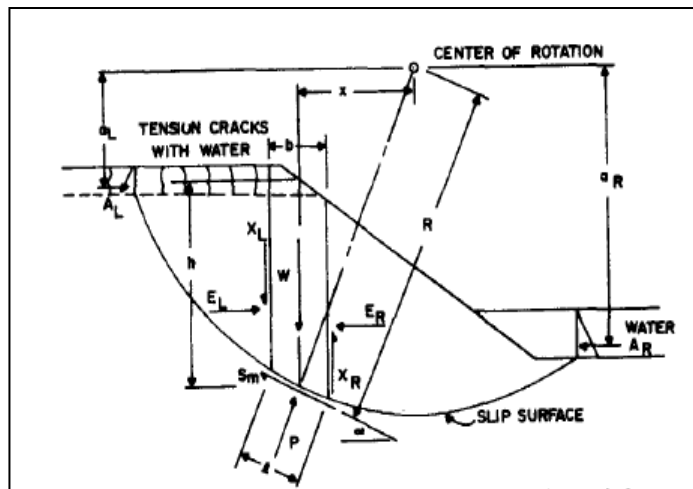


Figura VI.41 Esquema de análisis (Fredlund, Krahn y Pufhal, 1981).

El modelo geométrico y geotécnico de la cortina consiste en una cortina de tierra con sección homogénea, formada por tres estratos de suelo arcilloso de acuerdo con los resultados de la exploración efectuada, constituyendo así tres estratos de cortina sobre tres de cimentación, y su geometría es asimétrica, con altura de 14.8 m desde el desplante, un ancho de corona de 4.0 m, el respaldo aguas arriba con talud inclinado 24.9° o 2.15H:1V; en tanto que el talud del respaldo aguas abajo está inclinado de 31.5° o 1.63H:1.0V. La cortina está desplantada sobre tres estratos

conformados, el estrato superficial por lutitas de la Formación Méndez, alteradas y fracturadas, que facilitan el flujo del agua a mayores velocidades que en el estrato inferior de limo arenoso, lo que explica algunas de las fallas que ha presentado esta cortina; sobreyace un segundo y tercer estrato que son también las lutitas de la Fm. Méndez, menos fracturadas conforme se profundiza.

La Estrella NL ID 2617

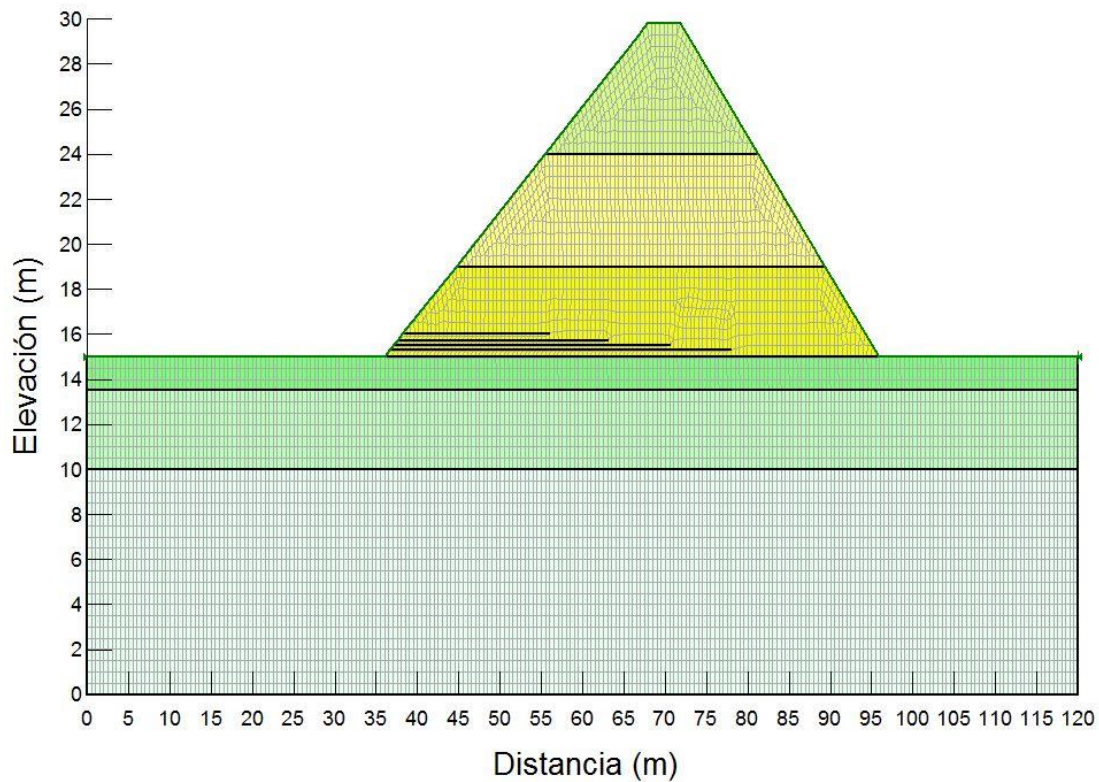


Figura VI.42. Modelo de elementos finitos de la cortina.

Revisión de estabilidad en condiciones de operación normal

En la Figura VI.42 y Figura VI.43, se muestran los principales resultados de los análisis de estabilidad en condiciones de operación normal con nivel al NAMO y para todos los casos se obtiene la estabilidad de la masa térrica de ambos taludes. Los valores del factor de seguridad son en todos los casos mayores que 1.50. En el análisis, además se simuló el desarrollo de agrietamiento en la parte superior para considerar el caso más desfavorable y se buscó optimizar la superficie de falla.

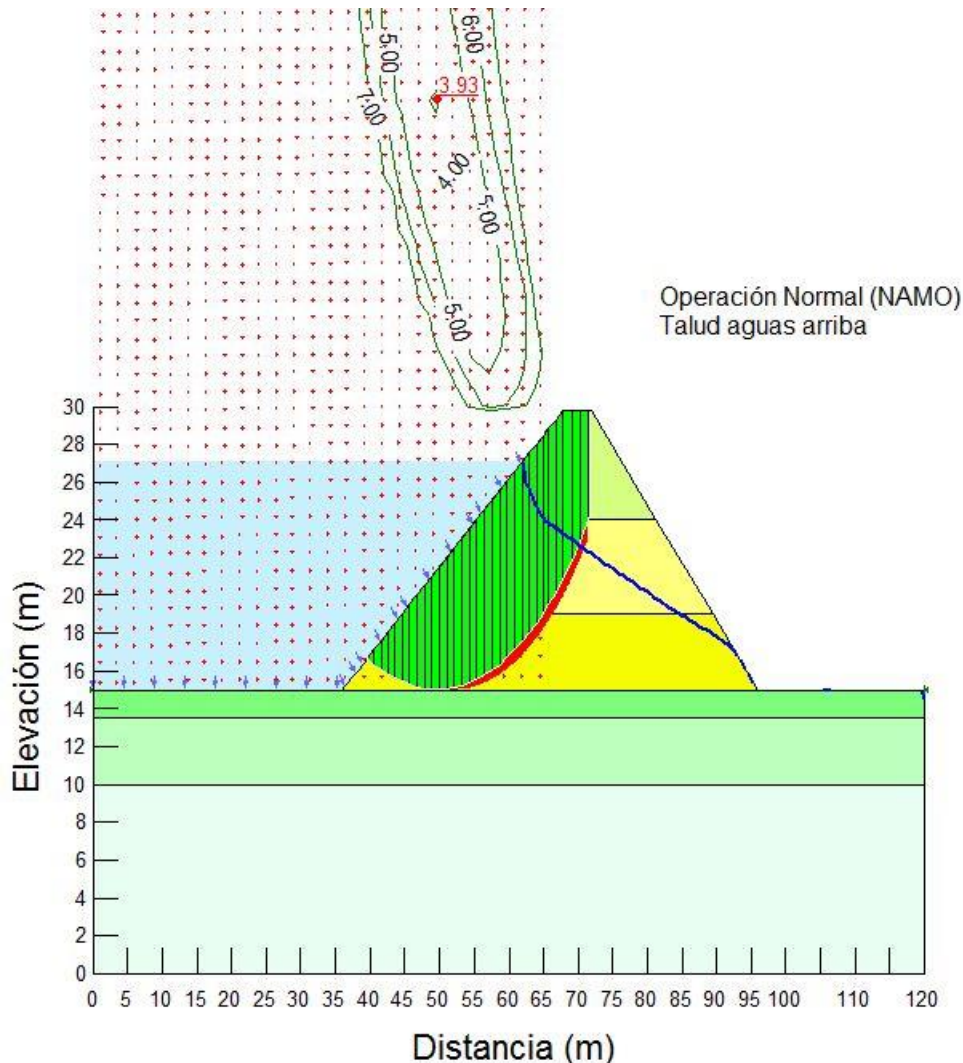


Figura VI.43 Contornos del factor de seguridad del análisis en condiciones de operación normal, con embalse al NAMO y flujo de agua establecido.

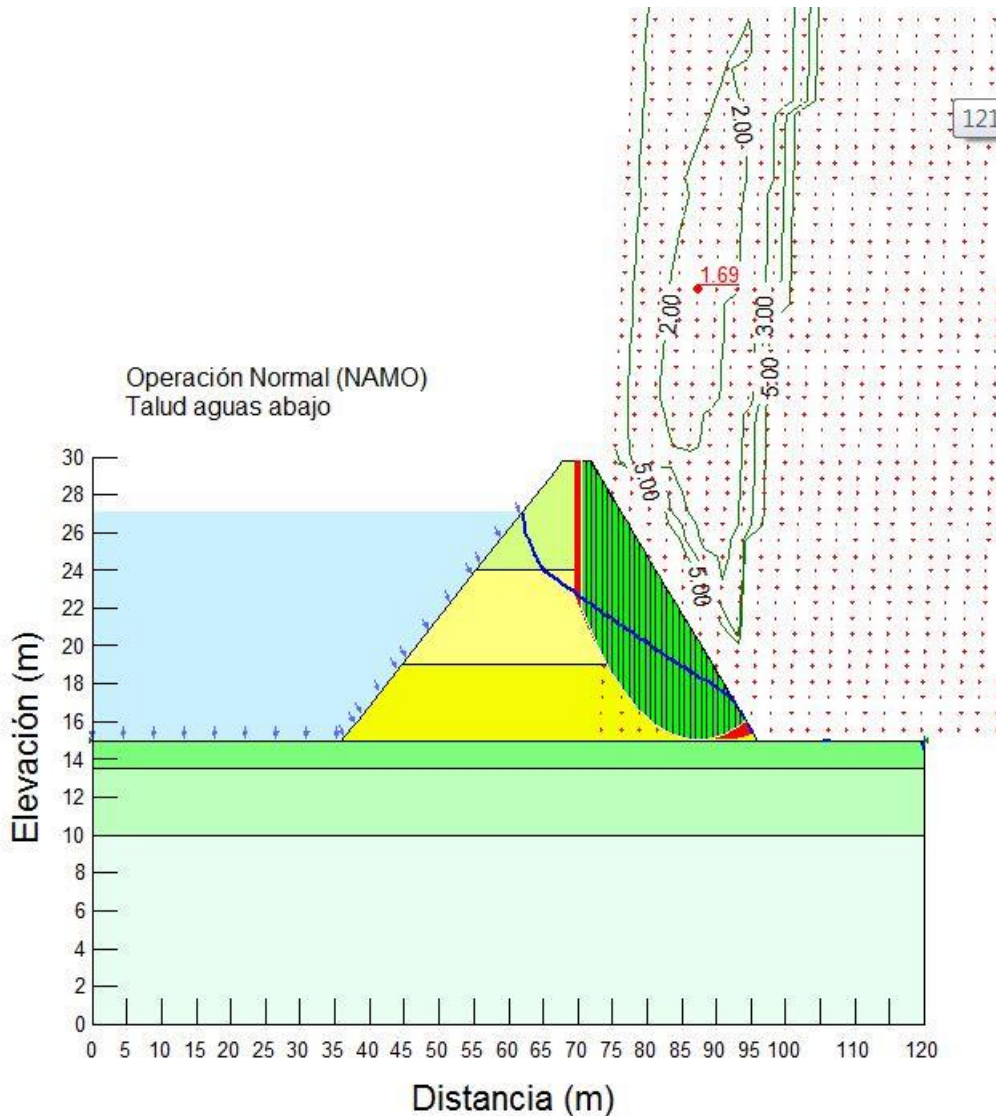


Figura VI.44 Contornos del factor de seguridad del análisis en condiciones de operación normal, con embalse al NAMO y flujo de agua establecido.

Revisión en condiciones de operación inusual (NAME)

En la Figura VI.44 y en la Figura VI.45, se muestran los principales resultados de los análisis de estabilidad en condiciones de operación inusual con nivel al NAME y para todos los casos se obtiene la estabilidad de la masa térrica de ambos taludes. Los valores del factor de seguridad son en todos los casos mayores que 1.30. En el análisis, además se simuló el desarrollo de agrietamiento en la parte superior para considerar el caso más desfavorable y se buscó optimizar la superficie de falla.

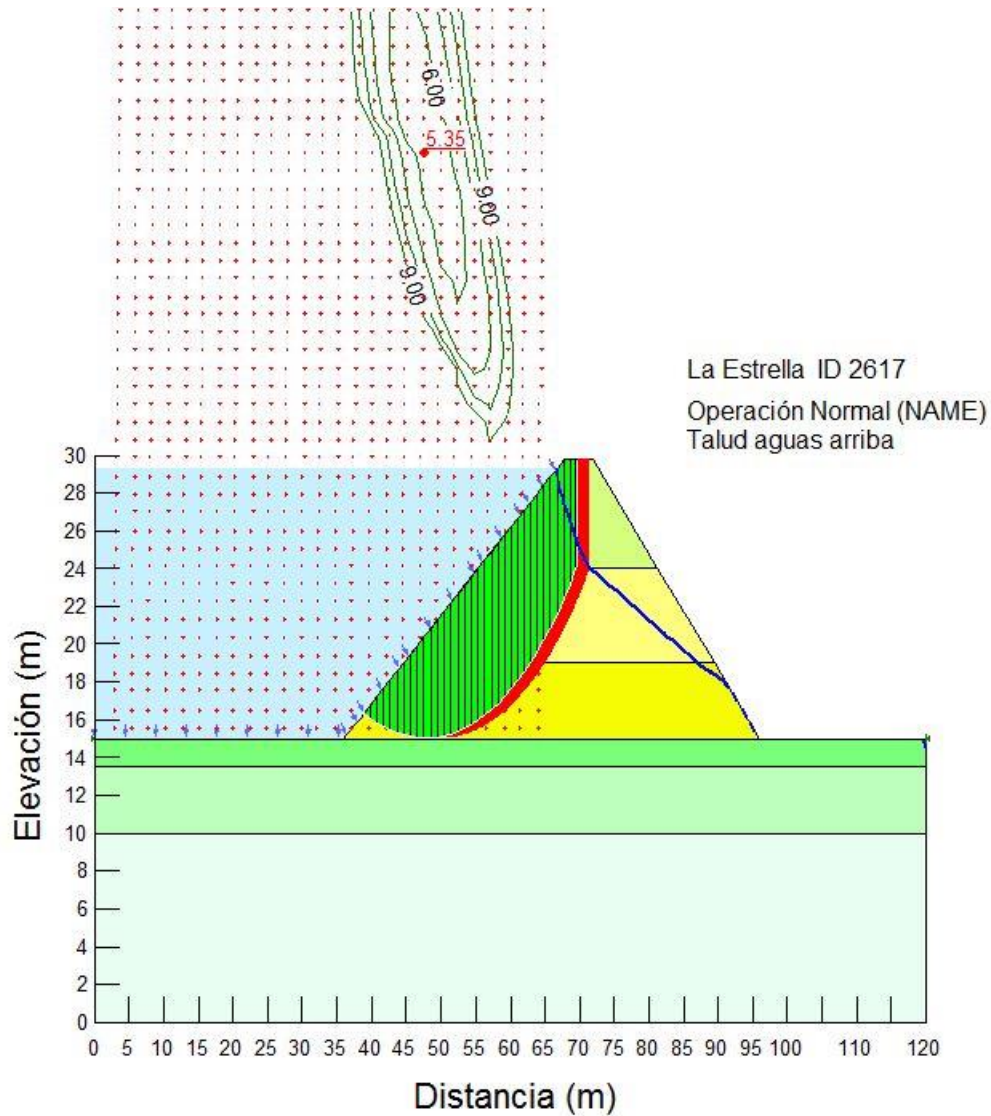


Figura VI.45 Contornos del factor de seguridad para el análisis en condiciones de operación inusual, con embalse al NAME y flujo de agua establecido.

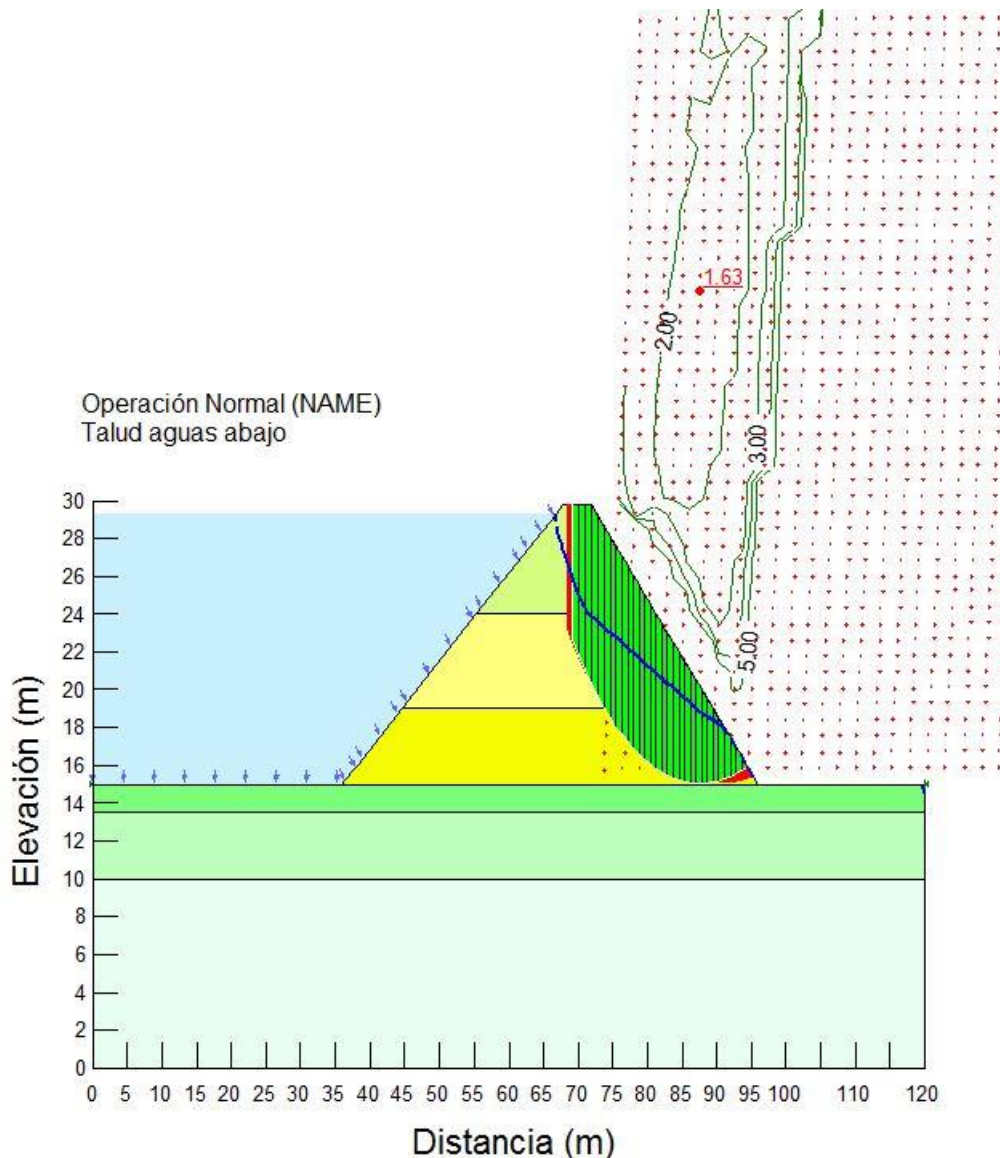


Figura VI.46 Contornos del factor de seguridad para el análisis en condiciones de operación inusual, con embalse al NAME y flujo de agua establecido.

Revisión de estabilidad en condiciones de vaciado rápido

Para realizar los análisis de esta condición, se parte de la línea superior de corriente que resulta del análisis de flujo establecido, es decir, el agua que corresponde al embalse de la presa con el agua al NAMO disminuye de manera inmediata siguiendo la superficie del talud aguas arriba hasta llegar al NAMIN, mientras que la condición del agua dentro de la cortina se mantiene sin cambios. De igual manera que para el caso de flujo establecido, cabe aclarar que las áreas donde se desarrollan los gradientes hidráulicos se encuentran confinadas y por lo tanto no causan problemas en los materiales. Los resultados de los análisis se presentan a continuación.

En la Figura VI.46 y la Figura VI.47, se muestran los principales resultados de los análisis de la estabilidad de la cortina en condiciones de vaciado rápido y en todos los caso el factor de seguridad es mayor que 1.20.

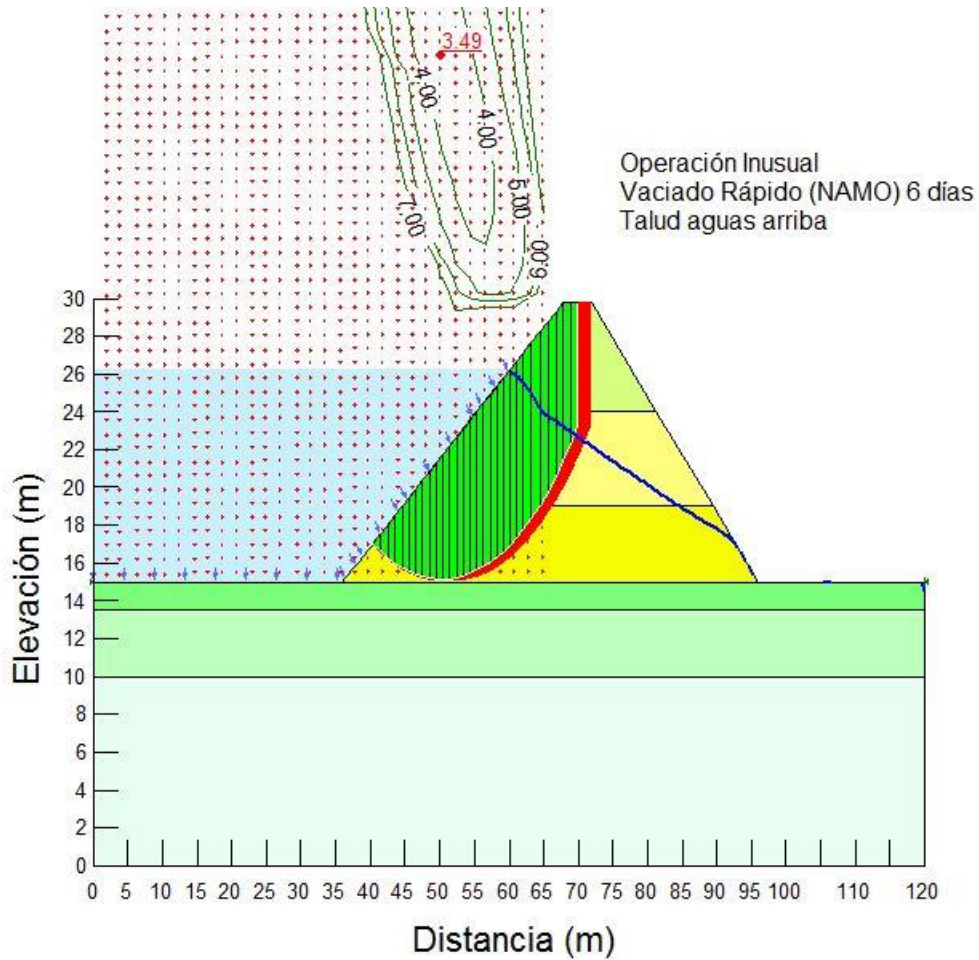


Figura VI.47 Contornos del factor de seguridad para el análisis en condiciones de operación inusual por un vaciado rápido del vaso, desde el nivel del NAMO al NAMIN.

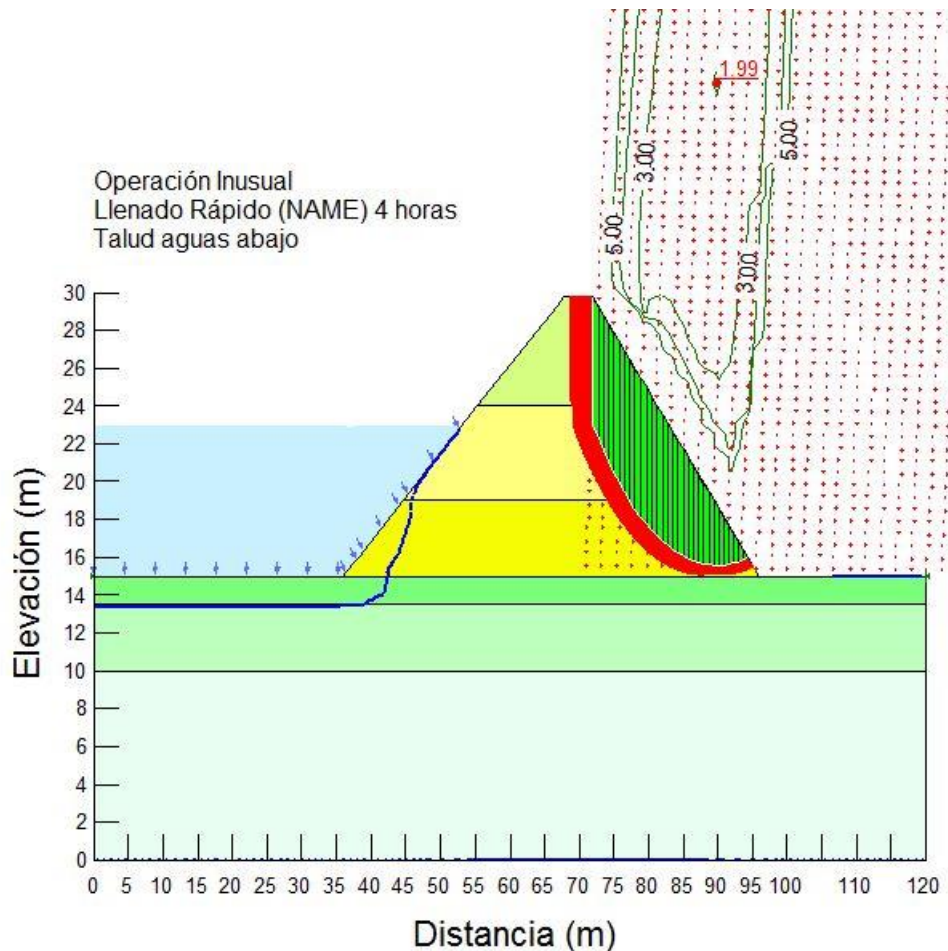


Figura VI.48 Contornos del factor de seguridad para el análisis en condiciones de operación inusual por un vaciado rápido del vaso, desde el nivel del NAMO al NAMIN.

Revisión de estabilidad en condiciones de llenado rápido

Para realizar los análisis de esta condición, se parte de la línea superior de corriente que resulta del análisis de flujo establecido, es decir, el agua que corresponde al embalse de la presa vacío (al NAMIN) asciende durante una avenida muy importante, en un lapso de 2 a 4 horas, que es prácticamente de manera inmediata, hasta llegar al NAME, lo cual provoca un empuje importante y súbito sobre los suelos finos de la cortina. Los resultados de los análisis se presentan a continuación. En la Figura VI.48 y la Figura VI.49, se muestran los principales resultados de los análisis de la estabilidad de la cortina en condiciones de llenado rápido y en todos los caso el factor de seguridad es mayor que 1.20.

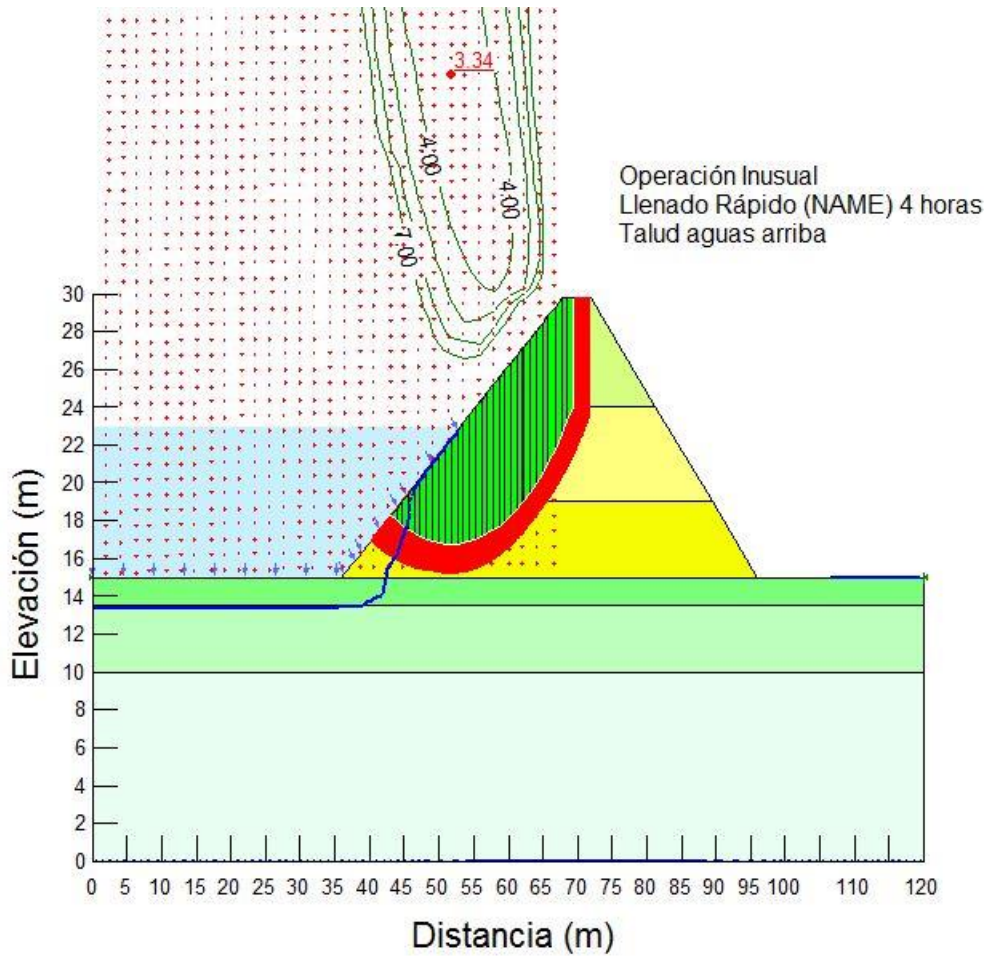


Figura VI.49 Contornos del factor de seguridad para el análisis en condiciones de operación inusual por un llenado rápido del vaso, desde el nivel del NAMIN al NAMO.

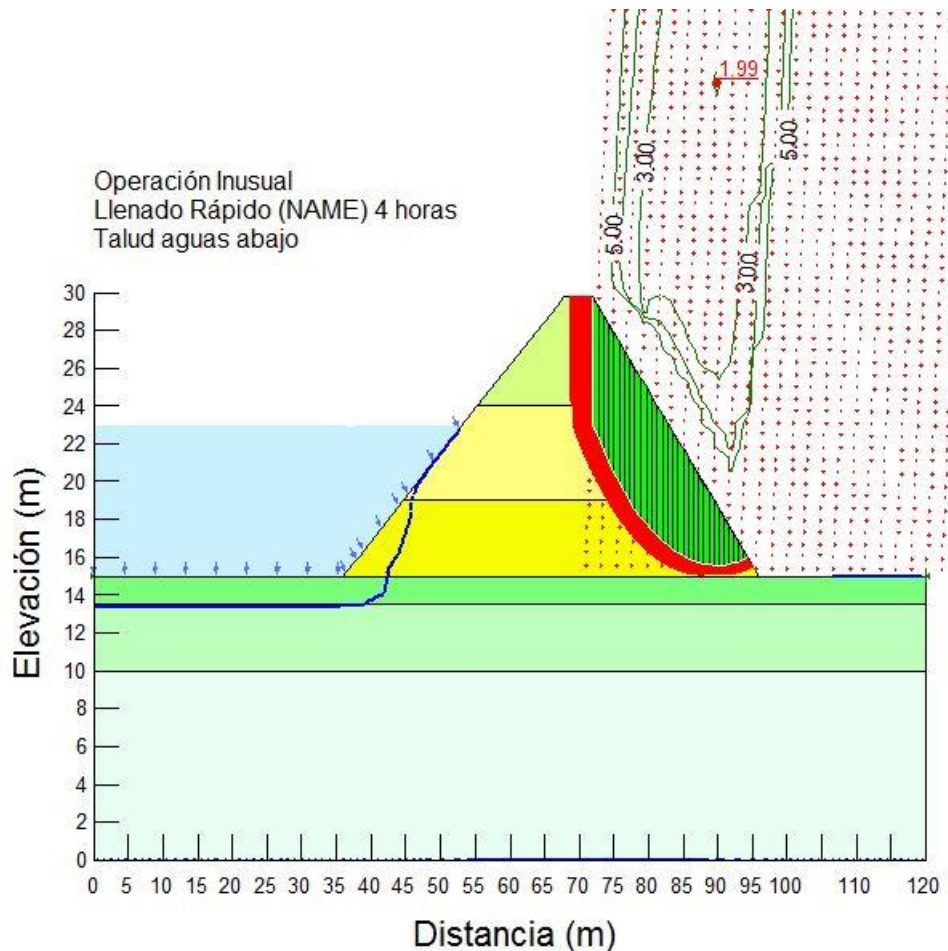


Figura VI.50 Contornos del factor de seguridad para el análisis en condiciones de operación inusual por un llenado rápido del vaso, desde el nivel del NAMIN al NAMO.

Revisión de estabilidad en condiciones extremas (sismo)

Para el análisis incluyendo la acción sísmica, método seudoestático, se presenta un análisis bidimensional empleando la formulación del método de equilibrio límite y considerando que el embalse se encuentra lleno al NAMO. El análisis incluyendo la acción sísmica, método seudoestático, sigue siendo uno de los procedimientos más comunes para evaluar la estabilidad sísmica de un talud. Este método emplea la teoría del análisis de equilibrio límite en el que los efectos del sismo están representados por una fuerza estática equivalente horizontal o vertical, cuya magnitud es el producto de un coeficiente sísmico, k_h y k_v , y el peso de la masa potencial de deslizamiento. Las fuerzas de inercia generadas actúan en el centroide de la posible masa a deslizarse. En la Figura VI.50 y la Figura VI.51, se presentan los resultados del análisis sísmico para la aceleración máxima del terreno con período de retorno de 950 años (equivalente al sismo determinista: Temblor Máximo Creíble),

que muestran un factor de seguridad de 2.16 para el talud aguas arriba y de 1.30 para el talud aguas abajo, lo que permite concluir que la cortina tiene una probabilidad prácticamente nula de fallar ante el sismo de diseño y para los próximos 50 años de vida operativa.

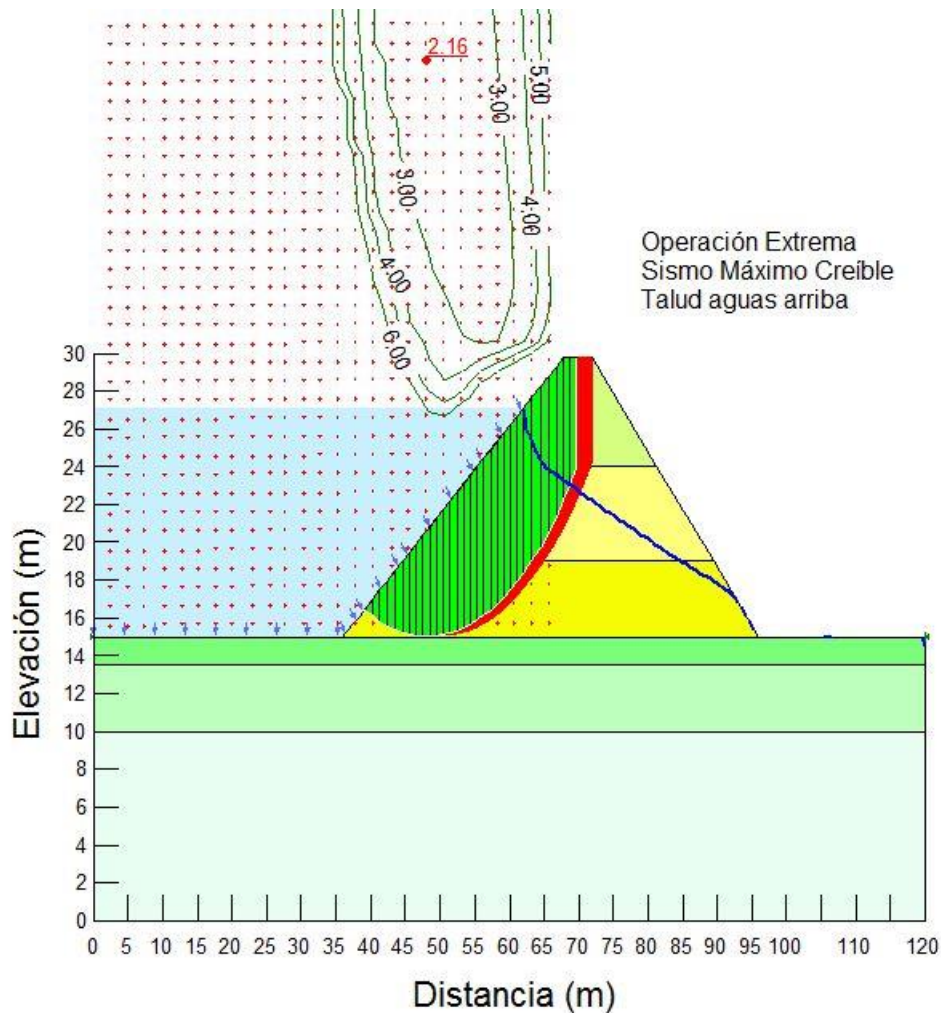


Figura VI.51 Contornos del factor de seguridad para el análisis en condiciones de operación extremas por acción sísmica, con el nivel del embalse al NAMO y flujo de agua establecido.

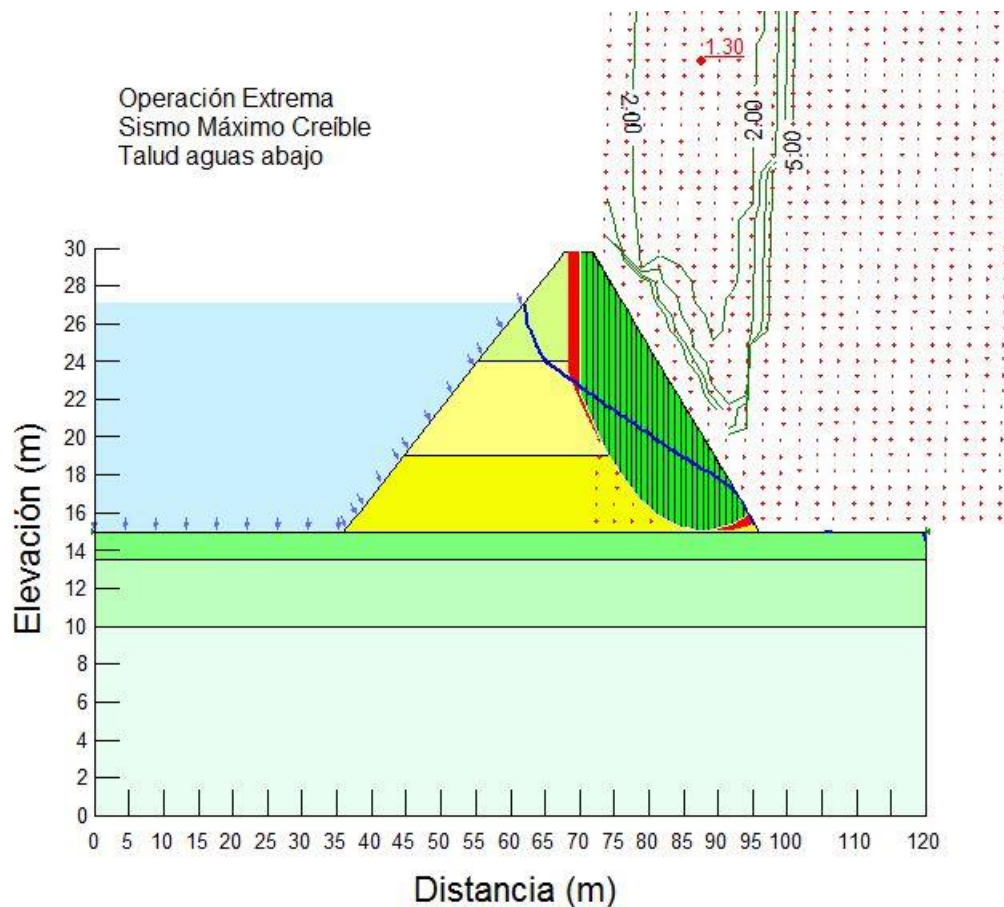


Figura VI.52 Contornos del factor de seguridad para el análisis en condiciones de operación extremas por acción sísmica, con el nivel del embalse al NAMO y flujo de agua establecido.

Análisis dinámico de los esfuerzos y deformaciones de la cortina

Mediante la solución de las ecuaciones por el método de los elementos finitos (MEF), adoptando como ley de comportamiento el modelo lineal equivalente de la Universidad de Berkeley, se efectuó un análisis dinámico completo de la cortina, simulando nuevamente el flujo de agua con el nivel del embalse al NAMO y mismas propiedades de permeabilidad ya antes expuestas y empleadas, y se calculó el estado de esfuerzos y deformaciones inicial, a partir del cual se efectuó el análisis dinámico de la cortina para los acelerogramas sintéticos determinados en el estudio sísmico ya antes expuesto en este trabajo.

Para el modelo lineal equivalente es necesario conocer la función de variación del módulo de rigidez del suelo, G , con respecto al nivel de deformación, y La Estrella como una razón de G con respecto al módulo elástico del suelo, $G_{\text{máx}}$, como se

muestra en la Figura VI.52, en donde también se muestra la variación del amortiguamiento con el nivel de deformación. Se utilizó para el suelo de la cortina la relación dada por Vucetic y Dobry, que es aceptable para el tipo de arcilla arenosa con grava que conforma el suelo de la cortina. De la misma manera se utilizaron modelos para la roca superficial y la roca más profunda.

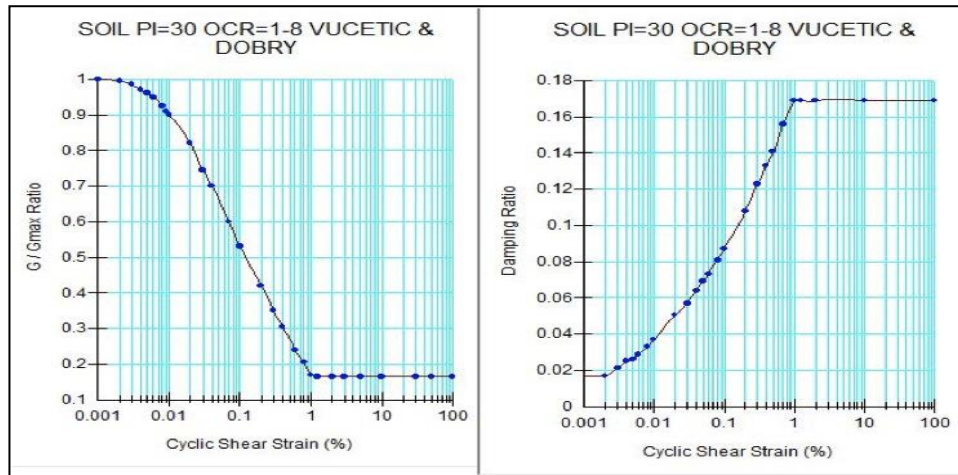


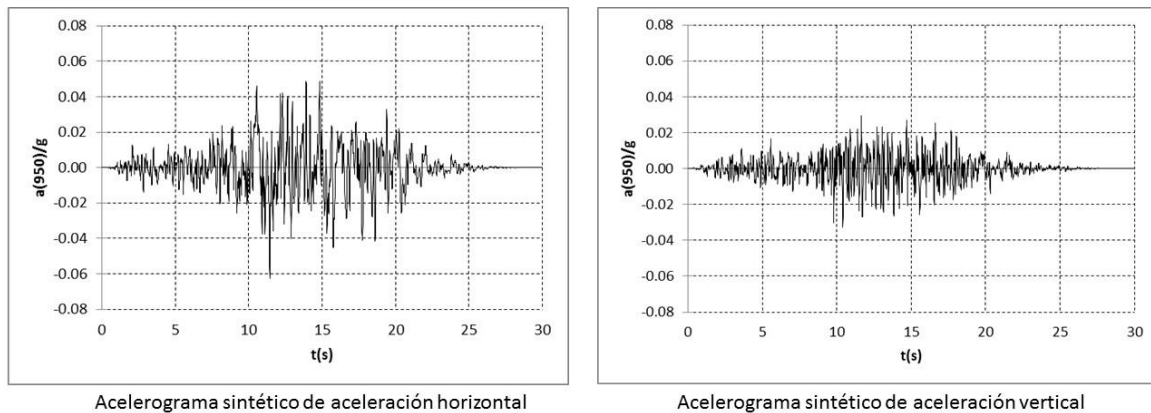
Figura VI.53 Curvas de variación del módulo de rigidez G normalizado por G_{\max} y del amortiguamiento con el nivel de deformación angular del suelo de la cortina.

En la Figura VI.53, se presentan los acelerogramas de los componentes de aceleración horizontal y vertical que se utilizaron como señales de entrada para el análisis dinámico con el MEF.

En la Figura VI.57, se muestran los contornos de los valores del desviador de esfuerzos (2° invariante del tensor en el sentido de Von Mises) de acuerdo con

$$q = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} = (\sigma_1 - \sigma_3) \quad \forall \sigma_2 = \sigma_3 \quad (VI.11)$$

En la Figura VI.54, se muestran los valores del desviador de esfuerzos dinámico durante el sismo de seguridad que es casi equivalente a considerar el TMC por el período de 950 años. En la Figura VI.56, se muestran los valores y la distribución del desviador de pico durante el sismo. En la Figura VI.57, se muestra la distribución de los valores del desviador post-sismo.



Tembor Máximo Creíble	a_0	c	T_a (s)	T_b (s)	r
Aceleración					
HORIZONTAL	0.083	0.150	0.075	0.25	0.40
VERTICAL	0.061	0.112	0.100	0.20	0.90

Figura VI.54 Acelerogramas sintéticos del sismo de diseño con período de retorno $T_r=950$ años, para el análisis dinámico en el dominio del tiempo.

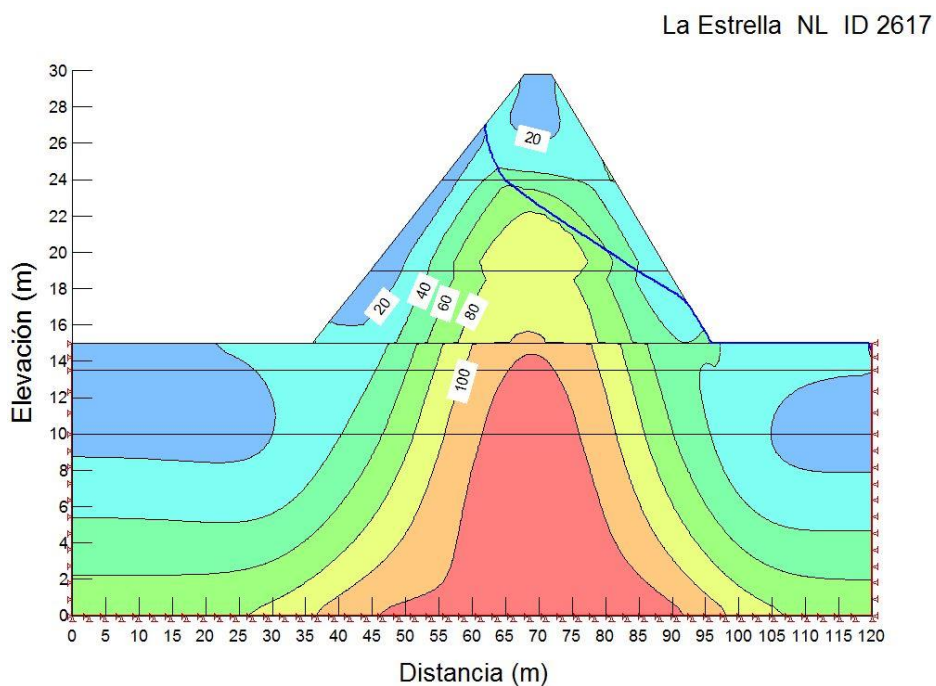


Figura VI.55 Desviador de esfuerzos dinámicos para el sismo máximo creíble.

La Estrella NL ID 2617

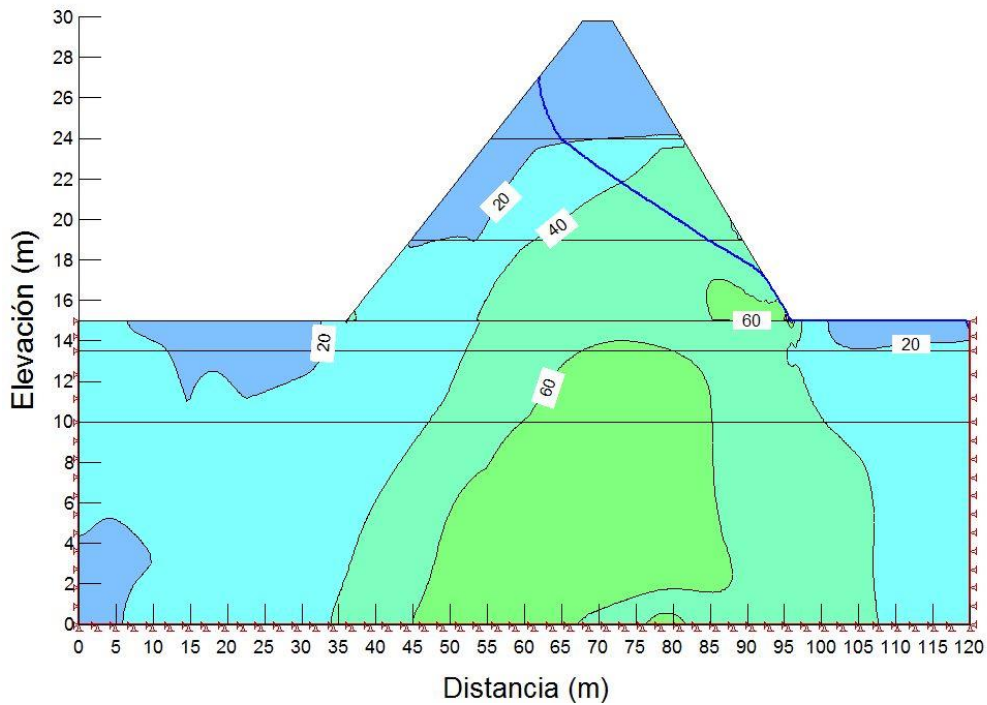


Figura VI.56 Desviador pico (q , en kN/m^2) durante el sismo máximo creíble.

La Estrella NL ID 2617

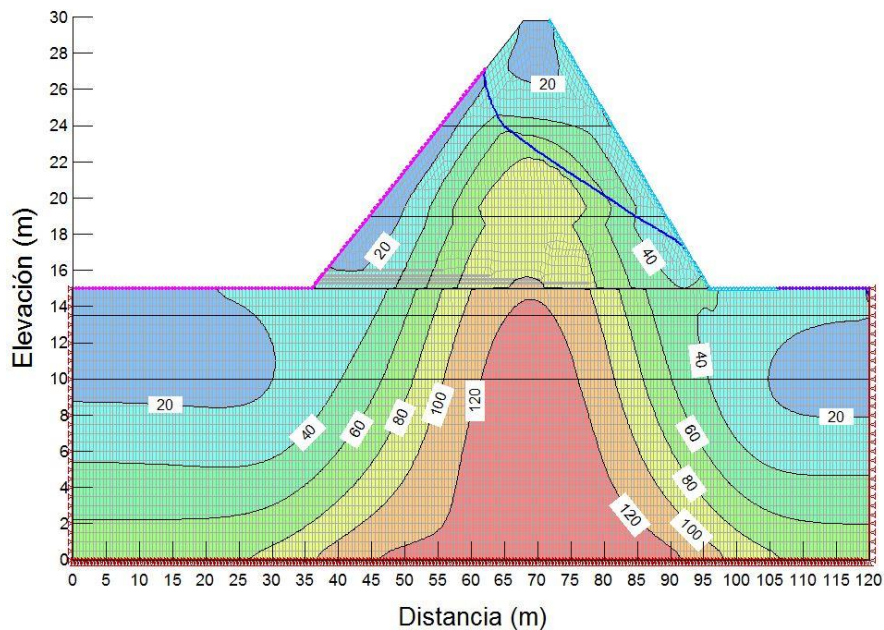


Figura VI.57 Desviador de esfuerzos post-sismo.

En la Figura VI.57, se muestran los valores máximos que alcanza el desviador de esfuerzos durante el sismo, mientras que en la Figura VI.58, se muestran los

incrementos de desviador al ocurrir el pico de aceleración horizontal. Se aprecia en dichas figura, que el valor del desviador es superior al 50% de la resistencia al esfuerzo cortante del suelo que conforma el cuerpo de la cortina, lo cual permite verificar y comprobar la validez de los resultados obtenidos mediante el método pseudoestático para el cálculo del factor de seguridad.

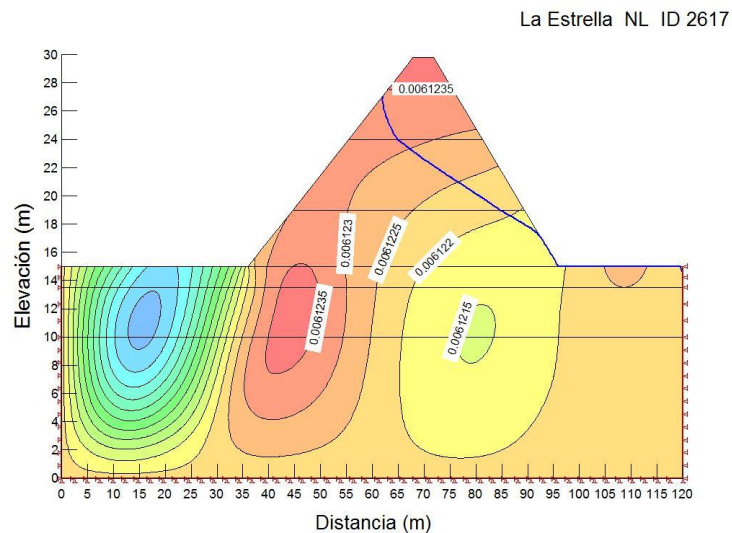


Figura VI.58 La respuesta dinámica de la cortina muestra valores de desplazamientos horizontales del orden de 6 milímetros.

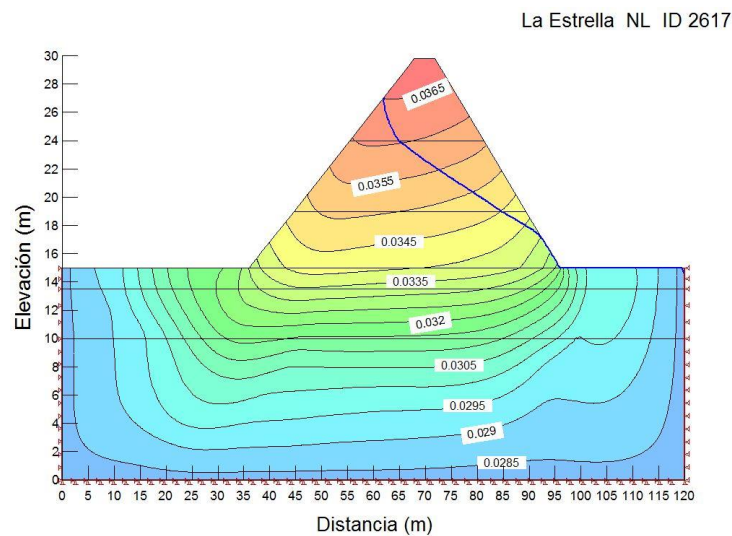


Figura VI.59 La respuesta dinámica de la cortina muestra valores de desplazamientos horizontales máximos durante el TMC del orden de 3 a 4 cm.

En cuanto a los desplazamientos horizontales durante el sismo, éstos se calcularon para los acelerogramas sintéticos y sus valores se reportan de la Figura VI.59, Figura VI.60 y en la Figura VI.61. En la Figura VI.62, se puede apreciar que los asentamientos verticales permanentes después de ocurrido el temblor máximo creíble, serían del orden de 0.5 cm. En la Figura VI.63, se muestra la historia de aceleración y en la Figura VI.64, la historia de las deformaciones unitarias de corte y los desplazamientos durante el sismo de diseño en la corona de la cortina.

La Estrella NL ID 2617

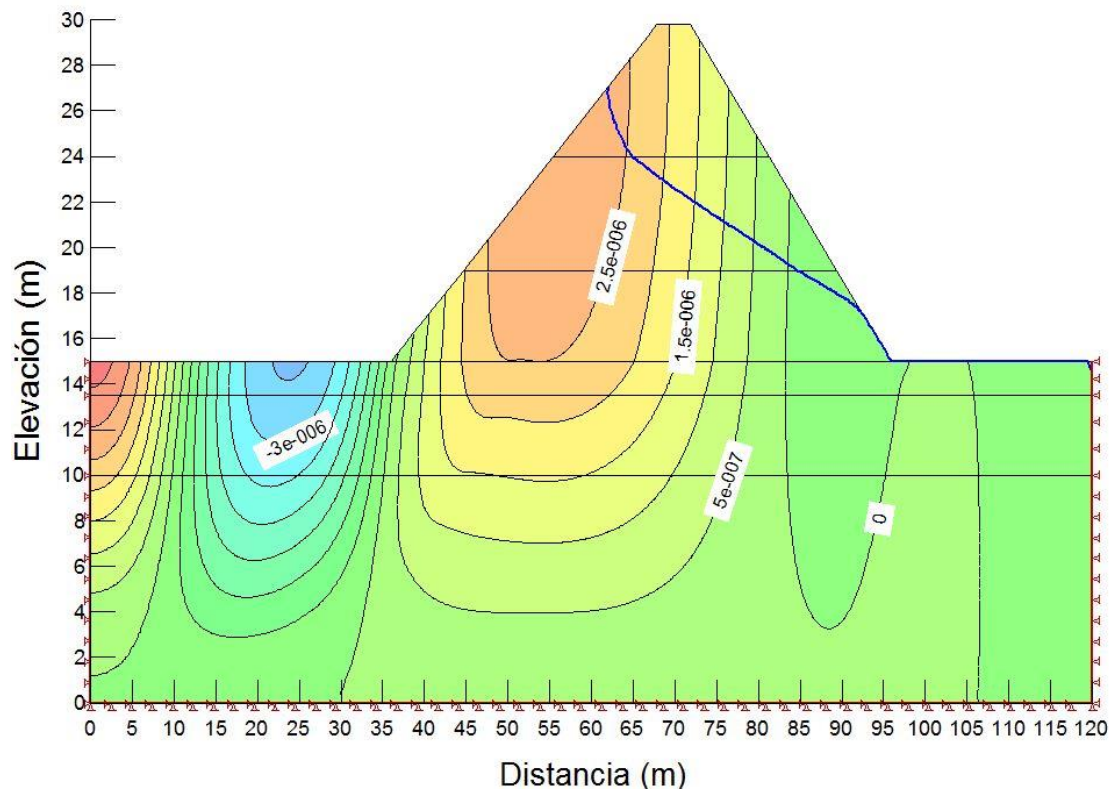


Figura VI.60 Contornos de los desplazamientos verticales medios.

La Estrella NL ID 2617

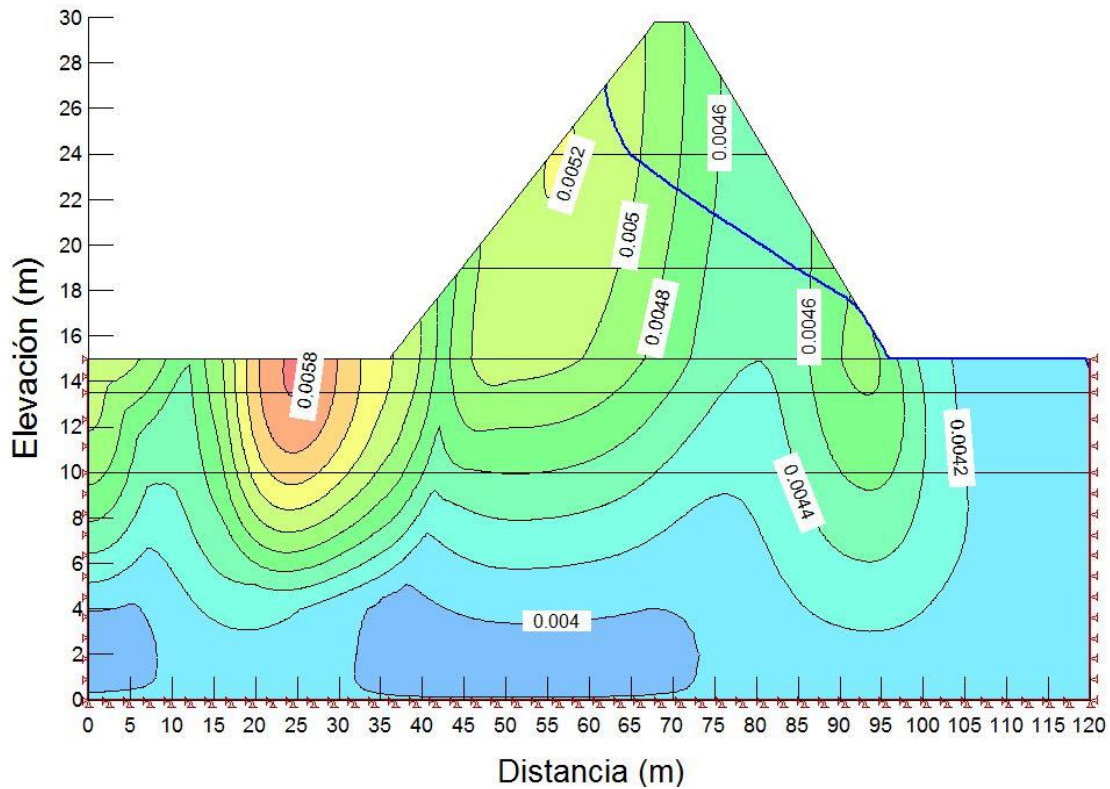


Figura VI.61 Contornos de los desplazamientos horizontales máximos.

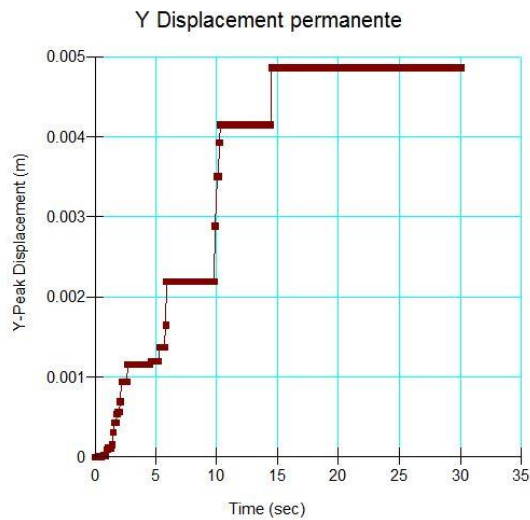


Figura VI.62 Desplazamientos permanentes post-sismo.

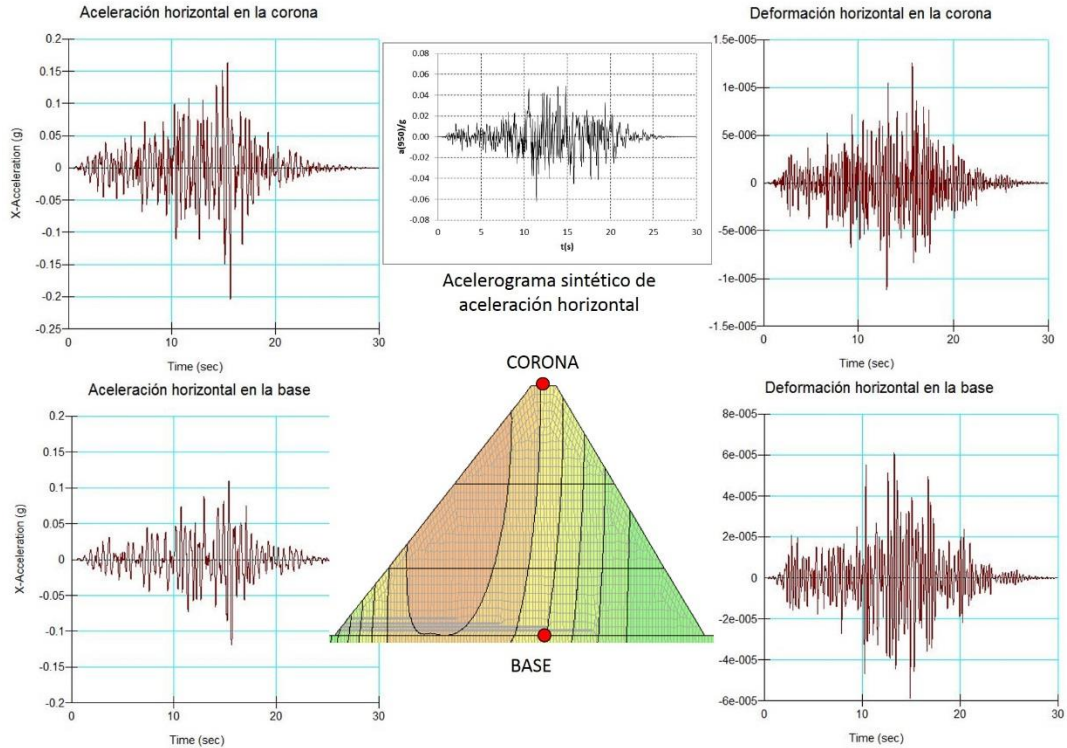


Figura VI.63 Historias de la aceleración horizontal (en g) y amplificaciones entre la base y la corona de la cortina durante el sismo máximo creíble.

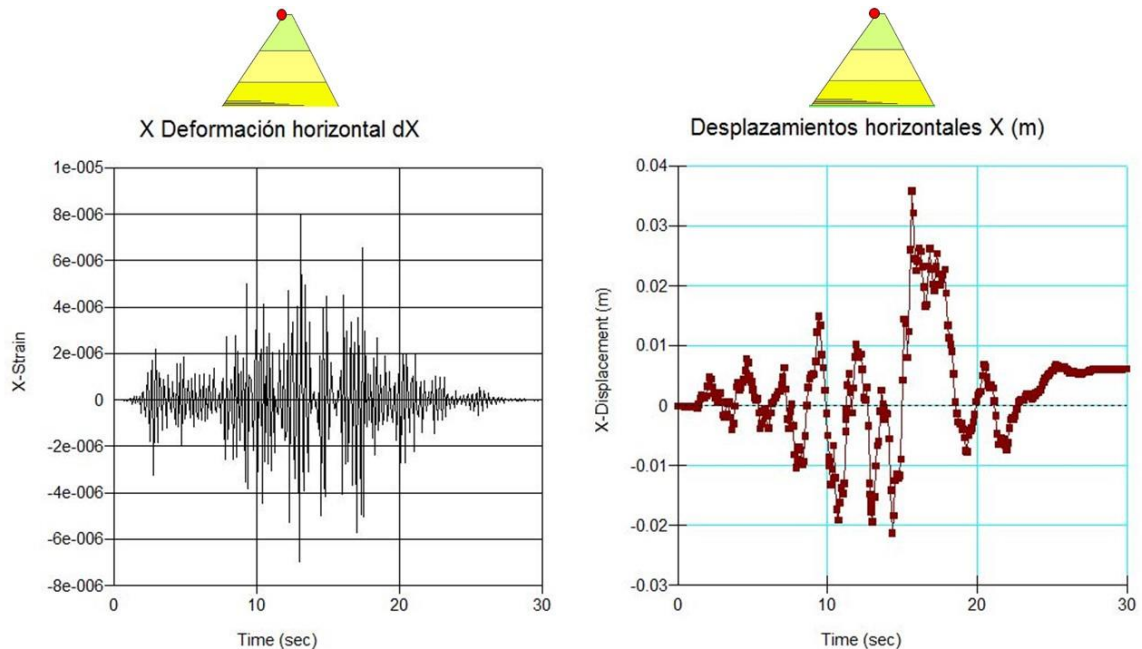


Figura VI.64 Historia de deformaciones y desplazamientos horizontales en la corona de la cortina de la presa La Estrella durante el sismo TMC.

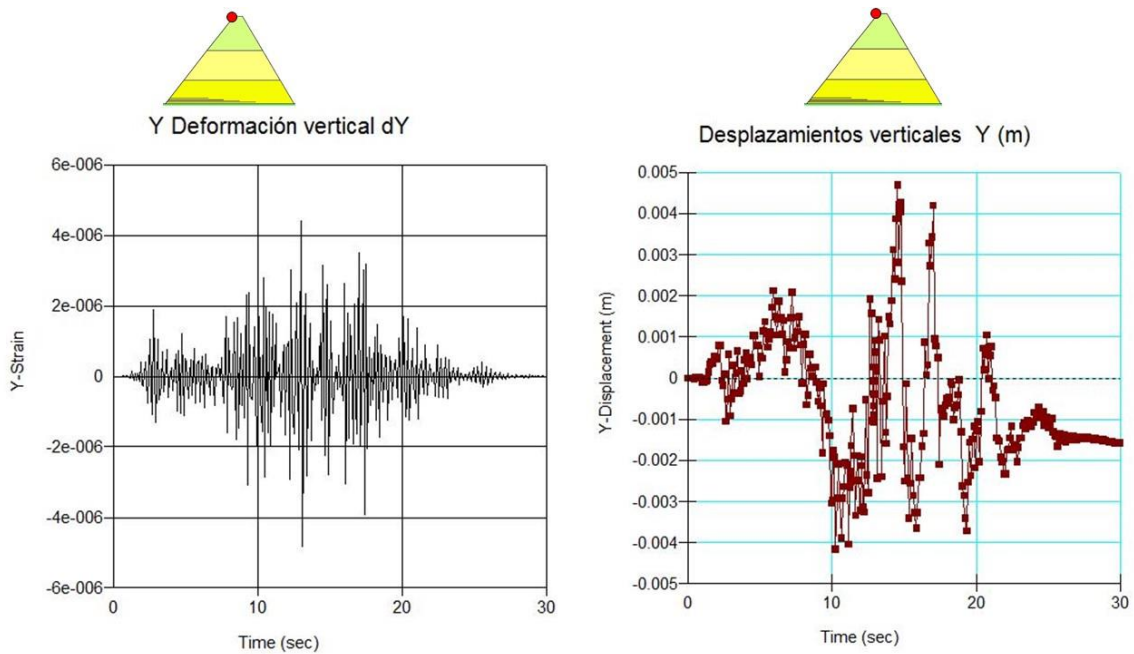


Figura VI.65 Historia de deformaciones y desplazamientos verticales en la corona de la cortina de la presa La Estrella durante el sismo TMC.

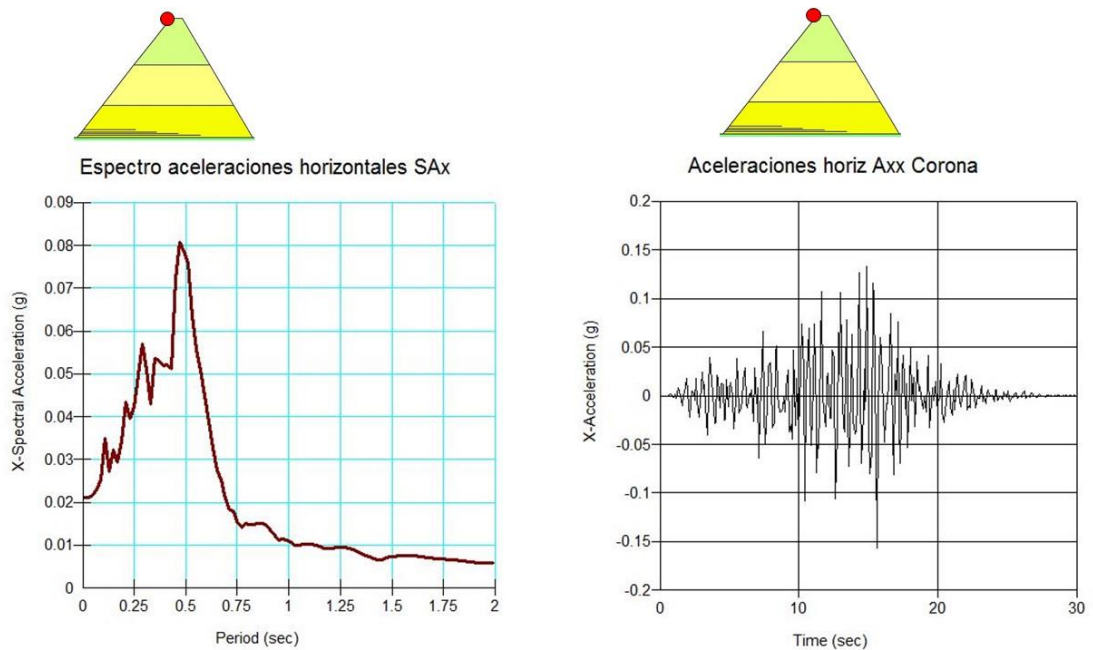


Figura VI.66 Espectro de aceleraciones e historia de aceleraciones horizontales (en g) en la corona de la cortina de la presa La Estrella durante el sismo TMC.

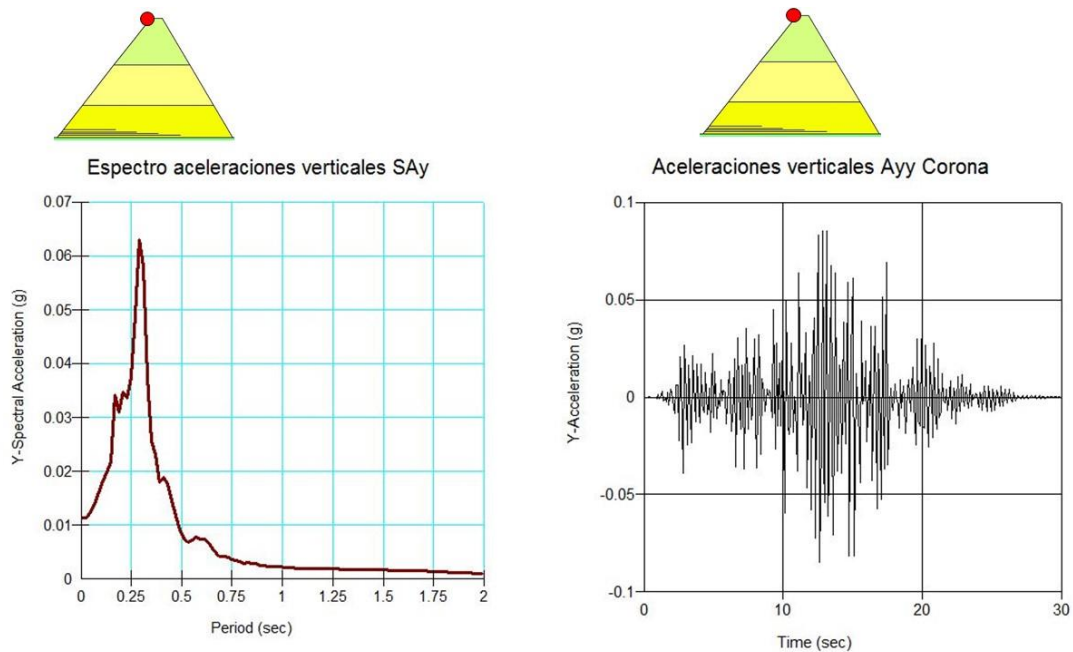
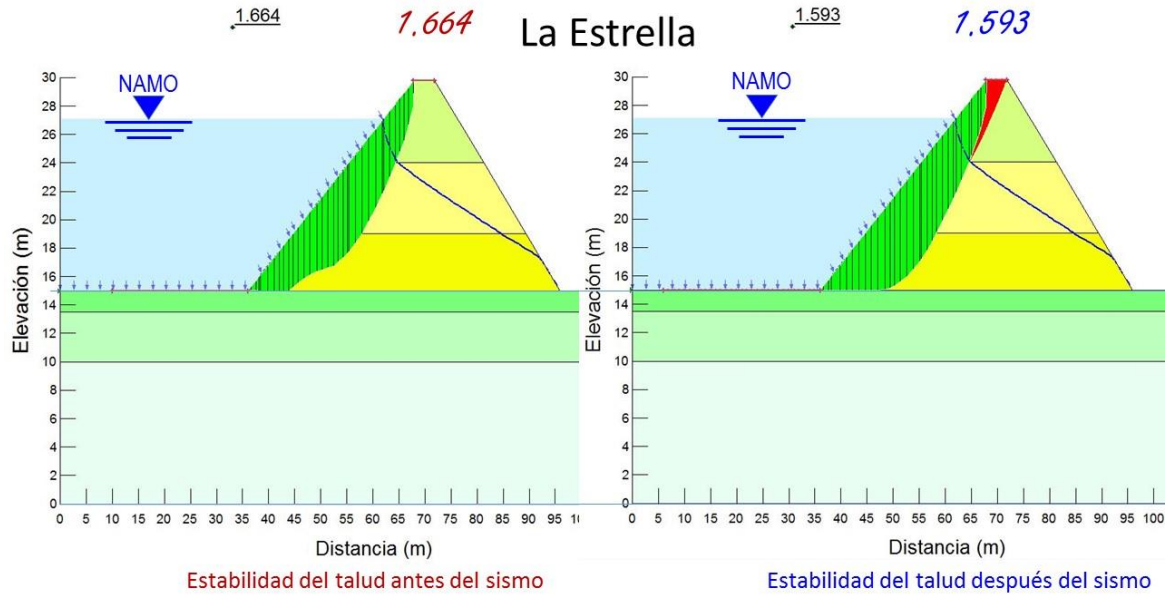


Figura VI.67 Espectro de aceleraciones e historia de aceleraciones verticales (en g) en la corona de la cortina de la presa La Estrella durante el sismo TMC.

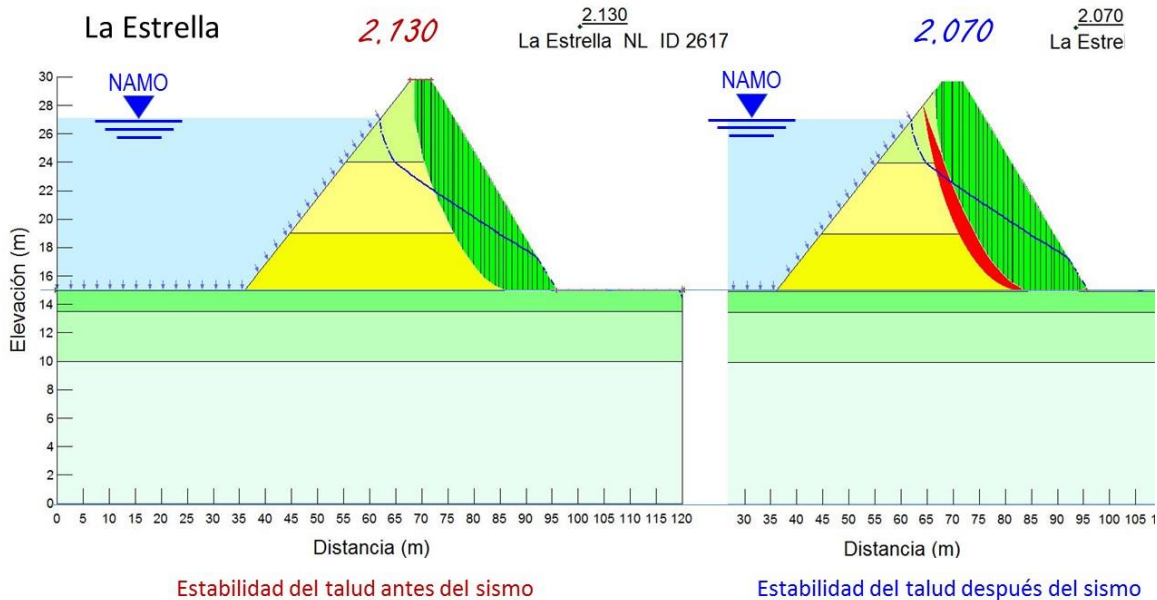
Como se aprecia en las gráficas de la Figura VI.63 a la Figura VI.67, se tienen períodos dominantes de la cortina de 0.43 s y 0.28 s, horizontal y vertical respectivamente, y aunque las amplificaciones alcanzan un 50% de la aceleración entre la base y la corona de la cortina, la deformaciones se reducen por efecto de la disipación por amortiguamiento debido a la deformación irreversible de las arcillas, con un valor de $\varepsilon_y=0.0015\%$, lo cual ya causa deformaciones plásticas en las arcillas de la cortina.

En la Figura VI.65, se muestra que el talud de la cortina más crítico, que es de aguas abajo por estar más inclinado (31.5° o 1.63H:1V) es estable durante el sismo, una vez que se calcula la estabilidad a partir del estado de esfuerzos calculado por una solución con el método de elementos finitos y obtenido para cada paso durante el temblor de diseño (casi el TMC) con período de retorno de 950 años. En la , se muestra el cálculo post-sismo efectuado para el talud aguas arriba antes y después del sismo, que muestra un valor de 1.664 antes del sismo y un valor de 1.593 después del temblor, los cuales son aceptables; en tanto que en la Figura VI.69, se muestra el caso del talud aguas abajo, el cual tiene factores de seguridad mayores que 2.0, con lo cual es seguro.



Determinación de la estabilidad con el círculo más crítico

Figura VI.68 Revisión de la estabilidad del respaldo aguas arriba de la cortina por elementos finitos antes y después del sismo máximo creíble (TMC), y en ambos casos cumple con un factor de seguridad FS > 1.50.



Determinación de la estabilidad con el círculo más crítico

Figura VI.69 Revisión de la estabilidad del respaldo aguas abajo por elementos finitos antes y después del TMC, y cumple con un factor de seguridad FS > 1.50.

VI.11 Resumen de resultados de estabilidad de la cortina

En la Tabla VI.10, se presenta un resumen de los principales resultados de los análisis de estabilidad para estudiar el comportamiento y la seguridad de la cortina. Los factores de seguridad obtenidos del análisis de estabilidad de la cortina, para ambos respaldos, en condiciones de operación normal, inusual por NAME y por llenado y vaciado rápido, así como en condiciones de operación extrema por efectos del sismo máximo creíble, satisfacen los valores mínimos exigidos, por lo que la cortina es segura antes esas condiciones.

Tabla VI.11 Factores de seguridad obtenidos del análisis de estabilidad de taludes en condiciones de operación normal, inusual y extrema.

Condición Operación	Talud	Factor de Seguridad	Condiciones de Flujo de Agua	Condiciones del nivel del Embalse
Normal	A. Arriba	3.93 > 1.50 Cumple	Flujo de agua establecido	NAMO
	A. Abajo	1.69 > 1.50 Cumple		
Inusual	A. Arriba	5.35 > 1.50 Cumple	Flujo de agua establecido	NAME
	A. Abajo	1.63 > 1.50 Cumple		
Inusual	A. Arriba	3.43 > 1.20 Cumple	Vaciado rápido	NAME a NAMIN
	A. Abajo	1.99 > 1.20 Cumple		
Inusual	A. Arriba	3.34 > 1.20 Cumple	Llenado rápido	NAMIN a NAME
	A. Abajo	1.99 > 1.20 Cumple		
Extrema (sismo)	A. Arriba	1.593 > 1.00 Cumple	Sismo	NAMO
	A. Abajo	2.070 > 1.00 Cumple		

VI.12 Dictamen de seguridad geotécnica y estructural

Los factores de seguridad contra deslizamiento, así como por asentamientos o capacidad de carga, para todas las condiciones de operación: normal, inusuales y extrema, tienen valores superiores a los mínimos recomendados para cada caso. No obstante, con base en los análisis realizados, se puede afirmar en conclusión que el peligro de estabilidad que tiene la obra de contención de la presa La Estrella se debe exclusivamente a los problemas de los agrietamientos que tiene la cortina, los cuales se deberían a que las arcillas de plasticidad media (CH) con está construida, fueron compactadas con contenidos de agua menores (18 a 24%) que su límite plástico (25 a 35%), aunado a ello, se tienen los efectos de las madrigueras que han excavado roedores de la familia de la tuza, lo que ha provocado una *tucificación* parcial de la cortina, que de llenarse de agua y sobrevenir una avenida con la presa al NAMO, esto podría causar un problema de deslizamiento parcial o terminar con abrir una brecha en la cortina.

Las grietas debidas a la contracción del suelo, se orientan en muchos casos de manera transversal al eje longitudinal de la cortina, lo que las hace peligrosas al poder conectar el embalse con el talud aguas abajo, lo que podría llevar a un problema de erosión interna y conducir a la apertura de una brecha y la falla de la cortina.

Es importante considerar la rotura en brecha de la cortina, y evaluar las consecuencias de una vaciada súbita del vaso, que en el caso del poblado más cercano que es la localidad de La Estrella, como está más alto que la corona de la cortina, no tendrían problema en caso de rotura de la cortina. Por otra parte, la presa ha dejado de tener uso para riego agrícola que es su objetivo original, ya que ni siquiera la obra de toma funciona y tampoco hay agricultura de riego alrededor, la población joven ha emigrado a Monterrey y otras ciudades. Sin embargo, el vaso sirve para la recarga de numerosas norias que se utilizan para agricultura de patio o en pequeña escala y para otros usos domésticos, incluyendo el abrevadero de ganado.

Del punto de vista de peligro por desbordamiento, éste no existe, ya que la avenida de período de retorno de 10,000 años, da un NAME que aún tiene un bordo libre suficiente.

VII. REVISIÓN FUNCIONAL Y OPERACIONAL

Se revisaron los aspectos de funcionamiento y operación de las estructuras auxiliares de la presa, tales como el vertedor para el control de excedencias, la obra de toma, así como del vaso y del cauce aguas abajo del vertedor. También se incluyeron otros aspectos, tales como la condición de los caminos de acceso.

VII.1 Revisión del vertedor de excedencias

El vertedor de excedencias de la presa La Estrella, se ubica al lado derecho de la cortina, confinado por dicha cortina en el lado izquierdo y por la ladera natural en el derecho, mediante muros de mampostería. El muro del lado izquierdo sirve también como cierre de la cortina, que soporta el material compactado que la conforma. El muro del lado derecho sirve como soporte para el corte que se hizo en la ladera para alojar el vertedor.



Figura VII.1 Ubicación del vertedor de excedencias de la presa La Estrella.

Entre ambos muros, como sección de control, el vertedor tiene un espigón de concreto de 106.45 m de largo y 0.85 m de ancho, desplantado sobre las lutitas y margas finamente estratificada de la formación Méndez, con un nivel de la cresta de 534.90 msnm, aproximadamente 2.65 m por debajo del nivel de la corona de la cortina, por lo que considerando un metro de bordo libre y un coeficiente de descarga de 1.45, el gasto de descarga es igual a 327.14 m³/s. Este vertedor cuenta con un canal de llamada de aproximadamente 50 m de longitud, que conduce el flujo hasta su descarga.



Fotografía VII.1 Panorámica del vertedor tipo lavadero.

Desde el punto de vista funcional, el vertedor se encuentra en condiciones operativas y vierte casi todos los años, lo que ha generado desgaste en algunas partes del espigón de concreto, pero que no representan problema alguno para su funcionamiento. Los muros se encuentran en buen estado en términos generales, con algo de deterioro en el muro del lado izquierdo que tiene dislocadas algunas piezas de mampostería en la parte superior; este muro es el que está adjunto a la cortina y el deterioro se debe muy probablemente al vandalismo o a los visitantes que periódicamente visitan esta presa. En el lado derecho, inmediatamente aguas abajo del muro se detectó una zona del corte de la ladera con rasgos de erosión, que debe vigilarse para monitorear su comportamiento.



Fotografía VII.2 Muro izquierdo, que soporta la cortina.



Fotografía VII.3 Muro derecho sobre la ladera.

En la zona de descarga del vertedor existen varios arbustos de no más de 3 m de altura, que actualmente no representan problemas a la descarga, pero que se recomienda eliminar a la brevedad para evitar que se sigan desarrollando hasta un punto tal que sí obstaculicen la descarga y sea más difícil su eliminación. En esta

zona no existen rasgos severos de erosión en el terreno de cimentación (formación Méndez), pero aproximadamente 50 m aguas abajo, se observaron erosiones en el punto donde el flujo ingresa formando un cauce por el que se conduce rodeando la cortina hasta su descarga en el cauce original.



Fotografía VII.4 Aspecto de la zona erosionada de la ladera derecha.



Fotografía VII.5 Detalle de la zona erosionada de la ladera.



Fotografía VII.6 Espigón de concreto en la sección de control.



Fotografía VII.7 Panorámica de la zona de descarga.



Fotografía VII.8 Punto de entrega de las descargas del vertedor al cauce.



Fotografía VII.9 Detalle del material de la formación Méndez.

Debido a la lejanía del vertedor y al tipo de éste, las erosiones no deben considerarse como elemento de riesgo para su funcionamiento.

VII.2 Revisión de la obra de toma

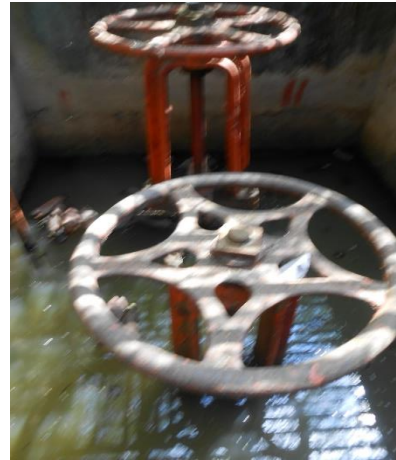
La obra de toma está compuesta por una tubería a presión de 0.61 m (24 pulgadas) de diámetro que cruza perpendicularmente la cortina y es controlada al pie de la cortina por un par de válvulas de compuerta del mismo diámetro, que están dentro de una caja de concreto protegida por una rejilla metálica.



Figura VII.2 Ubicación de la obra de toma de la presa La Estrella.



Fotografía VII.10 Caja de válvulas de la obra de toma.



Fotografía VII.11 Válvulas de mariposa de la obra de toma.

El estado de las válvulas es malo, requiere lubricación y mantenimiento en general, la caja de válvulas está inundada aproximadamente hasta la mitad de su altura, lo que ha generado que los elementos metálicos presenten rasgos de oxidación. Sin embargo, a pesar del abandono de esta estructura, es muy probable que aún funcione ya que no se observaron fugas y no deben de existir ya que de lo contrario la caja de válvulas estaría completamente inundada. La rejilla que protege la caja de válvulas está oxidada y con algunas barras dobladas, pero es de factible rehabilitación; la escalera para el acceso a la caja está completa, aunque requiere de limpieza y pintura.



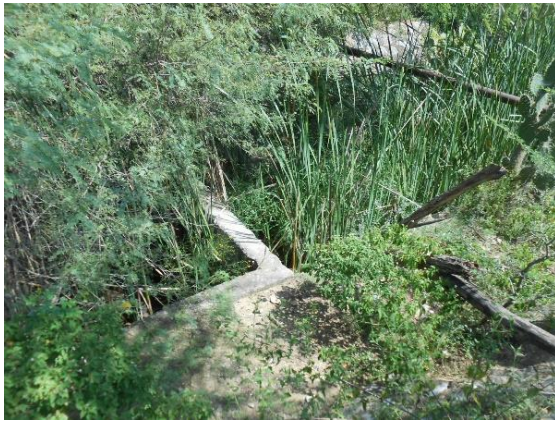
Fotografía VII.12 Rejilla metálica de protección de la caja de válvulas de la obra de toma.



Fotografía VII.13 Escalera para el acceso a la caja de válvulas.

La tubería descarga a un canal de distribución de sección trapecial que se encargaba de conducir el agua hasta la zona de riego, donde se derivaba entre los predios de los ejidatarios.

Actualmente la obra de toma está fuera de operación y lleva más de 15 años en ese estado, debido principalmente a la migración de los campesinos y a que los que aún siembran, toman el agua de pozos y norias.



Fotografía VII.14 Azolve y vegetación en la entrega al canal de distribución.



Fotografía VII.15 Aspecto del canal de distribución.

El canal de distribución está muy azolvado y con excesiva vegetación y en algunos puntos ya dentro de la zona poblada, ha sido rellenado por los vecinos del lugar, quienes han invadido el canal.

Se recomienda darle rehabilitación a esta estructura para que funcione como descarga de fondo del embalse en caso de alguna emergencia. De acuerdo con lo observado, su rehabilitación solo implica extraer el agua de la caja de válvulas y darle mantenimiento preventivo consistente en limpieza, pintura y lubricación de las dos válvulas. Asimismo, se requiere limpiar y pintar la rejilla de protección y la escalera y asegurar la puerta de entrada con cadena y candado para impedir el ingreso a gente ajena a la operación. También sería necesario limpiar el canal de distribución, lo cual no sería muy problemático en los primeros metros, sin embargo, requeriría el desalojo de las personas que han invadido y obstruido el canal, metros más adelante.

En el caso de que se decida que la rehabilitación de la obra de toma no es factible, entonces deberá ser sellado de manera definitiva capando u obstruyendo la tubería de manera adecuada, ya que si se deja avanzar el deterioro de las válvulas, estas pueden fallar de manera repentina sin que se tenga la capacidad de controlar el flujo, lo que causaría la inundación de las zonas ocupadas por las personas que han invadido el canal. Cabe comentar que esta es la única estructura para bajar el nivel de la presa en caso de una emergencia.

VII.3 Revisión del vaso, el cauce y los accesos

El acceso a la presa se hace mediante una carretera pavimentada que se toma desde la carretera federal 85 Linares Montemorelos, con dirección al oeste, pasando por el ejido El Brasil para posteriormente llegar al ejido La Estrella, donde se ubica la presa. El camino está en buen estado y es transitable todo el año.



Figura VII.3 Panorámica del acceso a la presa y del cauce aguas abajo.



Fotografía VII.16 Desviación sobre la carretera No. 85, hacia el ejido El Brasil.



Fotografía VII.17 Carretera de acceso al ejido La Estrella, tomada desde la presa.

El embalse de la presa La Estrella, es alimentado por tres corrientes que provienen de la formación montañosa ubicada a menos de 10 km, al oeste de la presa. Estas corrientes son intermitentes y no tienen ninguna restricción en su funcionamiento, una de ellas pasa por el ejido Loma Alta ubicado aproximadamente 3.5 km aguas arriba del embalse.

El cauce aguas abajo de la presa corresponde al arroyo El Chocolate, que cruza por debajo del puente del mismo nombre, ubicado a aproximadamente 1.5 km de la descarga, que comunica al ejido La Estrella y El Brasil, para seguir su recorrido y pasar aledaño a este último ejido y continúa para atravesar la carretera Federal No. 85 Linares Montemorelos y descargar al río Potosí o Cabezones, después de recorrer aproximadamente 10 km. El cauce del arroyo El Chocolate ha sido suficiente hasta esta fecha para transitar las descargas de la presa La Estrella, ya que no se tienen reportes de inundaciones o daños a la infraestructura a lo largo de su recorrido, sin embargo, para fines del análisis del riesgo, se realizó un estudio para definir las zonas potencialmente inundables para una descarga extraordinaria del vertedor, mismo que se muestra en el siguiente capítulo de este informe.



Fotografía VII.20 Aspecto del cauce aguas arriba del puente El Chocolate.



Fotografía VII.21 Aspecto del puente El Chocolate sobre el arroyo del mismo nombre.



Fotografía VII.22 Cruce del arroyo El Chocolate bajo el puente del mismo nombre.



Fotografía VII.23 Aspecto del cauce aguas a la altura del ejido El Brasil.



VIII. DELIMITACIÓN DE ZONAS DE PELIGRO POR DESCARGAS CONTROLADAS Y NO CONTROLADAS

De acuerdo con el Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED, 2006), para el estudio de zonas de peligro es importante definir parámetros cuantitativos como son la magnitud (medida del tamaño del fenómeno, su potencial destructivo y la energía que libera) y la intensidad (medida de fuerza con que se manifiesta el fenómeno en un sitio dado). El riesgo es la probabilidad de ocurrencia de daños, pérdidas o efectos indeseables sobre sistemas constituidos por personas, comunidades o sus bienes, como consecuencia del impacto de eventos o fenómenos perturbadores. El riesgo, a su vez, está en función de la vulnerabilidad (medida de la susceptibilidad de un bien expuesto a la ocurrencia de un fenómeno perturbador) y el peligro (probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino de cierta intensidad, durante un cierto periodo de tiempo y en un sitio dado). La probabilidad de ocurrencia de tales eventos en un cierto sitio constituye una amenaza, entendida como una condición latente de posible generación de eventos perturbadores.

Se entiende por inundación al aumento del agua por arriba del nivel normal del cauce generando invasión o penetración de agua en sitios donde usualmente no la hay (OMM/UNESCO, 1974); los parámetros utilizados para la evaluación de peligro en inundaciones son el tirante de la inundación y la velocidad del flujo (CENAPRED).

Con el fin de delimitar las áreas más peligrosas en términos de inundación o fallas de laderas, se realizó el estudio de inundaciones para las zonas de peligro aguas abajo de la presa La Estrella, en el estado de Nuevo León, ante un evento o descarga extraordinaria. Se evaluó la capacidad del cauce aguas abajo para delimitar zonas de peligro considerando una longitud de 3 km.

VIII.1 Modelo digital de elevaciones del terreno

Para la modelación hidráulica de las zonas de peligro es necesario tener la topografía del terreno requerida como dato de entrada de los modelos de simulación; en el presente estudio se utilizó la información que facilita el producto Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) complementando con el levantamiento topográfico.

El CEM 3.0 es un producto que representa las elevaciones del territorio continental mexicano, mediante valores que indican puntos sobre la superficie del terreno, cuya ubicación geográfica se encuentra definida por coordenadas (X, Y) a las que se le integran valores que representan las elevaciones (Z). La versión 3.0 fue generada en el año 2012 y su principal característica es contar con una resolución de 15 metros.

Utilizando el programa ArcGIS 10.1 se delimitó la cuenca del cauce aguas abajo de la presa La Estrella y, posteriormente, se afinó e interpoló el Raster que proporciona el CEM 3.0 obteniendo así el modelo digital de elevaciones del cauce aguas abajo y, como la topografía es mayormente plana, se realizó un posprocesamiento de las secciones transversales utilizadas en la simulación unidimensional con apoyo del levantamiento topográfico, de tal forma que se representara de buena forma el curso del río (Figura VIII.1)

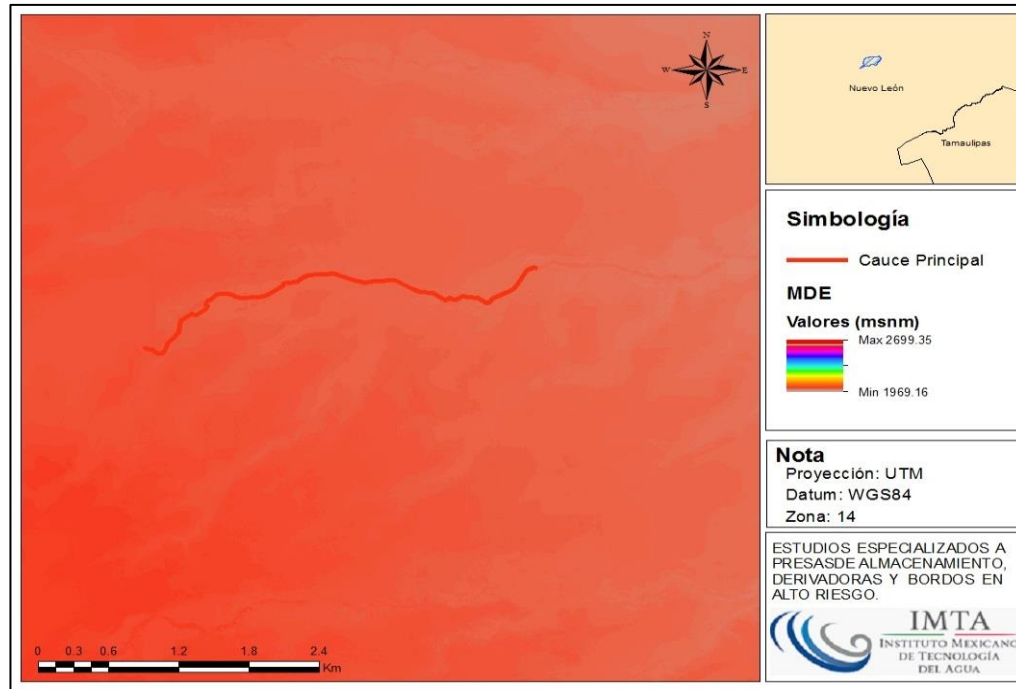


Figura VIII.1 Modelo digital de elevaciones del cauce agua abajo de la presa La Estrella.

VIII.2 Coeficiente de rugosidad

Como dato de entrada del modelo, el coeficiente de rugosidad (n) de Manning utilizado tiene un valor de 0.045, valor designado para cauces naturales limpios, sinuosos, con algo de hierba, rocas y con irregularidades en el fondo.

En el modelo FLO-2D se requieren más valores de rugosidad (n) que en los programas unidimensionales, esto debido a que al asignar un valor de n se debe considerar la resistencia total del flujo como la fricción de arrastre, formas de fondo, vegetación, expansión, contracción y otras condiciones propias del flujo no uniforme; y no solo la rugosidad de la fricción del fondo del cauce.

VIII.3 Modelación bidimensional con FLO- 2D

Una vez validados los resultados, se aplicó el programa bidimensional FLO-2D para obtener el campo de profundidades y velocidades y, a través de dichas variables, delimitar las zonas de peligro.

VIII.3.1 Bases teóricas del modelo hidrodinámico bidimensional

El modelo FLO-2D simula flujo de fluidos no-newtonianos, como flujos de debris y aludes torrenciales en ríos, quebradas y abanicos fluviales. El modelo permite simular flujo en topografías complejas, tales como planicies de inundación y áreas urbanizadas, así como el intercambio de fluido entre ríos y la planicie de inundación, en la Figura VIII.2 se muestran los procesos físicos que puede simular el modelo FLO-2D. Como datos de entrada se requiere la topografía digital del terreno, geometría del río, valores estimados de la rugosidad del río y de la planicie de inundación, hidrogramas de entrada (líquido y sólido), precipitación y propiedades geológicas de la mezcla agua-sedimento.

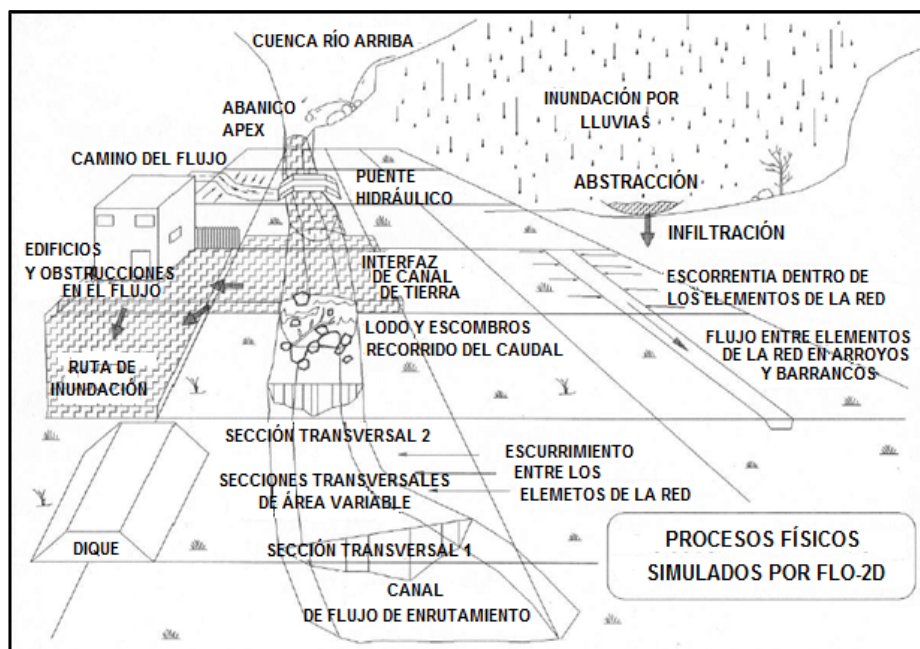


Figura VIII.2 Procesos físicos simulados por el modelo FLO-2D.

El FLO-2D es un modelo de conservación de volumen, que transporta el volumen de inundación a través de celdas en el caso de flujo superficial o por medio de

segmentos de corriente por la ruta que sigue el canal. La propagación de la onda de flujo es controlada por la topografía y resistencia al flujo. El tránsito de avenida en dos dimensiones se realiza mediante la integración numérica de las ecuaciones de movimiento y conservación del volumen de fluido utilizando ecuaciones en un esquema central de diferencias finitas.

Ecuaciones generales

Se utiliza la ecuación de continuidad y la de cantidad de movimiento (ecuación de la onda dinámica):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h V_x}{\partial x} = i \quad (\text{VIII.1})$$

$$S_f = S_{ox} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_x}{\partial t} \quad (\text{VIII.2})$$

Donde

h es el tirante del flujo en metros

V_x es el componente de la velocidad promediada en el tirante en metros por segundo

La intensidad de la lluvia en exceso (i) debe ser diferente a cero en el flujo superficial. El componente de la pendiente de fricción S_{fx} se basa en la ecuación de Manning. Los otros términos consideran la pendiente del lecho S_{ox} , el gradiente de presión y los términos de la aceleración local y convectiva.

La ecuación de cantidad de movimiento se resuelve calculando el promedio de la velocidad del flujo a través del contorno de los elementos de celda en una misma dirección. Existen 8 direcciones potenciales del flujo, cuatro en los puntos cardinales (Norte, Este, Sur y Oeste) y cuatro en direcciones diagonales (Noreste, Sureste, Suroeste y Noroeste). Cada velocidad calculada es esencialmente unidimensional por naturaleza y se resuelve independientemente de las otras 7 direcciones. La estabilidad de este esquema numérico explícito se basa sobre el criterio específico del control del tamaño de la variable del intervalo de tiempo de computación.

En la Figura VIII.3 se muestra el diagrama de flujo que explica el proceso de simulación que realiza FLO-2D.

EL FLO-2D cuenta con un sistema de desarrollo de mallas llamado GDS (pre-procesador) el cual ayuda a tratar la información topográfica digital para crear el modelo de desarrollo para el FLO-2D.

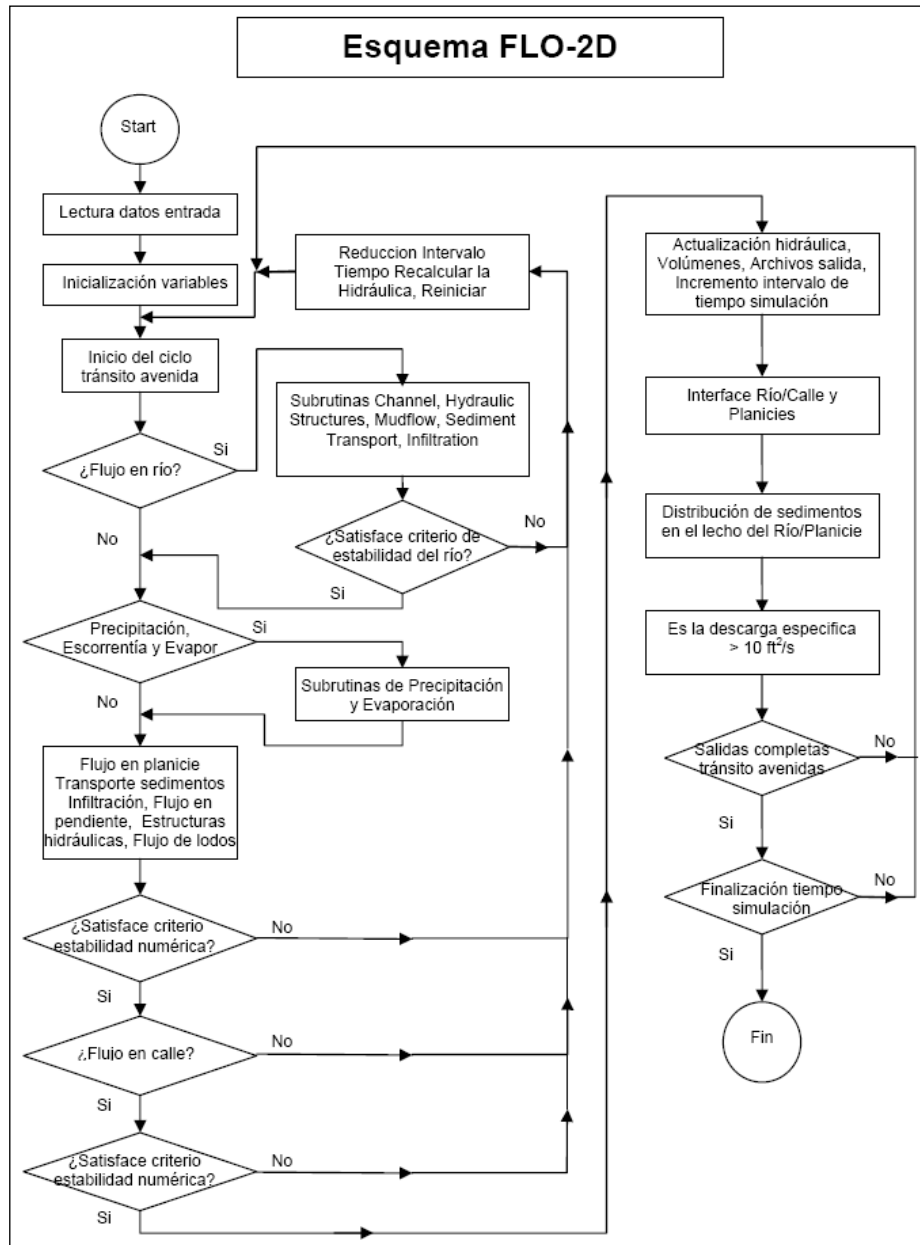


Figura VIII.3 Diagrama de flujo del FLO-2D.

VIII.3.2 Delimitación de la zona federal.

Para la delimitación de la zona Federal, de acuerdo con los criterios de la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos (GASIR) de la Comisión Nacional del Agua para corrientes con obras de control, se simuló la descarga de la presa La Estrella para una avenida con un periodo de retorno de 5 años. Se procede a determinar la planicie de inundación para dicho periodo de retorno aplicando el programa FLO-2D y, posteriormente, delimitar la zona federal trazando una franja de 10 metros contigua a dicha zona de inundación.

Los insumos principales para desarrollar la simulación son el gasto para el periodo de retorno de 5 años, la asignación de coeficiente de rugosidad y la topografía de la zona en estudio que comprende el cauce, planicie de inundación y, en caso de existir, de la zona urbana cercana al cauce del río.

Con dicha información se ejecutó el programa FLO-2D el cual dio como resultado los tirantes, áreas de inundación y las velocidades correspondientes al periodo de retorno de 5 años, con lo que se delimitó la zona federal quedando como se muestra en la Figura VIII.4.

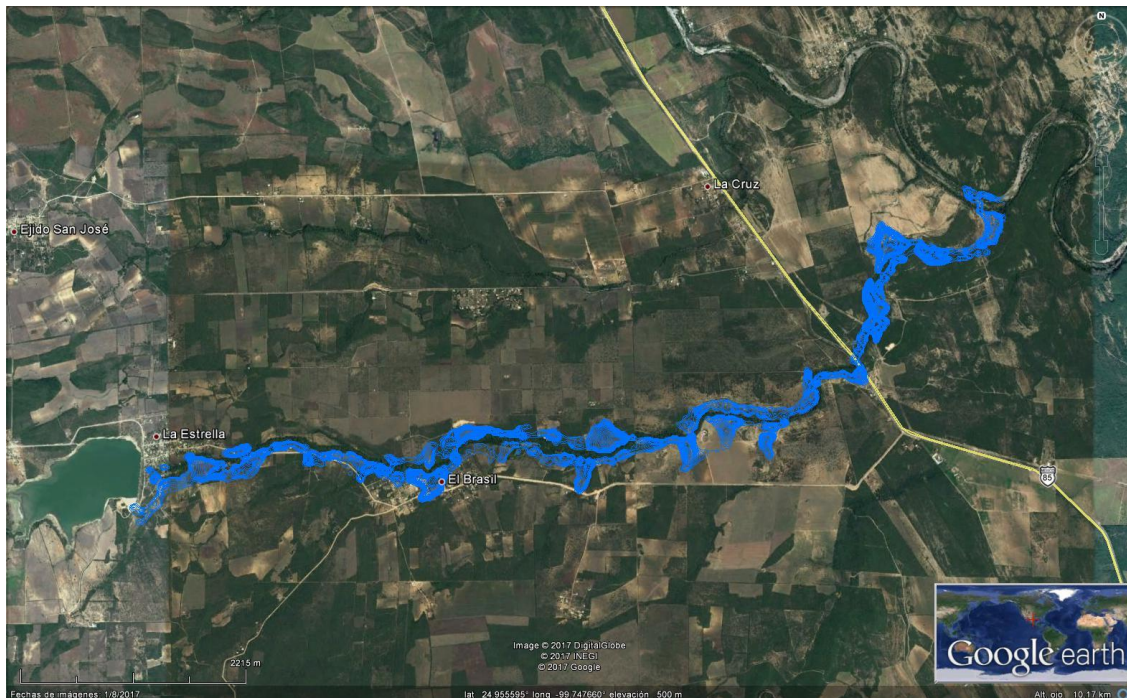


Figura VIII.4 Delimitación de la zona federal, cauce aguas abajo de la presa La Estrella.

VIII.3.3 Delimitación de zonas de peligro para una descarga controlada

Existen diversos criterios para la construcción de mapas de riesgos por inundación y, para este estudio, se generaron utilizando la herramienta MAXPLOT del modelo bidimensional FLO-2D que permite generar mapas de peligro por inundación utilizando el criterio de la Office Federal De i Economie Des Aux (OFEE) que se muestra en la Figura VIII.5; este criterio define tres niveles de peligro:

- Nivel de peligro alto: La población está en riesgo dentro y fuera de sus viviendas; las edificaciones están en peligro de colapsar.
- Nivel de peligro medio: La población está en riesgo fuera de las viviendas; las edificaciones pueden sufrir daños y colapsar dependiendo de sus características estructurales.
- Nivel de peligro bajo: El riesgo para la población es bajo, las edificaciones pueden sufrir daños leves ya que la inundación o los sedimentos arrastrados llegan a afectar su interior.

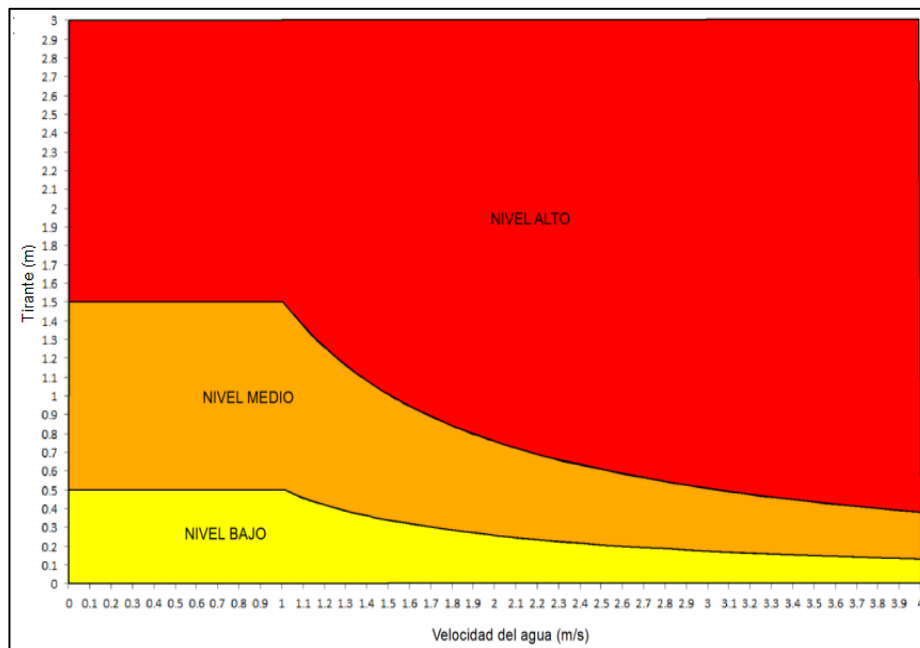


Figura VIII.5 Criterio para clasificar el peligro de inundación emitido por la OFEE.

Para poder determinar el mapa de peligro se necesita contar con la profundidad de inundación y la velocidad máxima; finalmente el resultado será un mapa de peligro clasificado en los 3 niveles de peligrosidad mostrados en la Figura VIII.5.

Se procede a realizar la simulación con el programa FLO-2D para delimitar la zona de peligro mediante la simulación bidimensional; los insumos principales para desarrollar la simulación son el gasto para el periodo de retorno de 10000 años, la asignación de coeficiente de rugosidad y la topografía de la zona en estudio que comprende el cauce, planicie de inundación y, en caso de existir, de la zona urbana cercana al cauce del río.

Con dicha información se ejecutó el programa FLO-2D que dio como resultado los tirantes, áreas de inundación y las velocidades correspondientes al periodo de retorno de 10000 años, con lo que se delimitaron las zonas de peligro como se muestra en la Figura VIII.6.

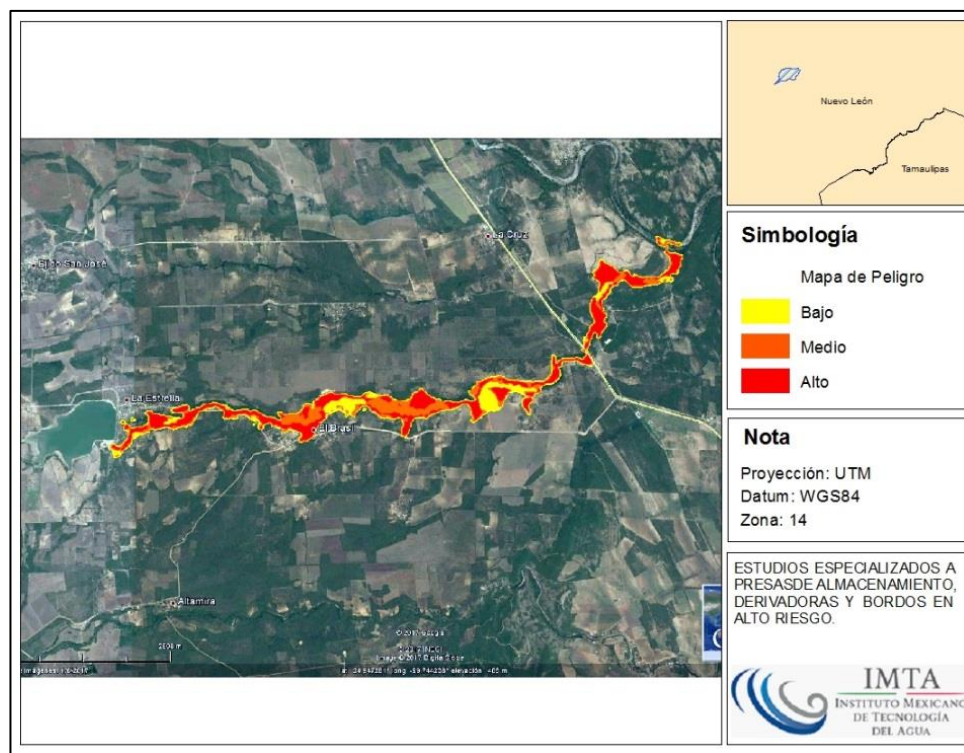


Figura VIII.6 Delimitación de las zonas peligro, cauce aguas abajo de la presa La Estrella.

IX. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas a partir de los estudios realizados a la presa La Estrella.

IX.1 Conclusiones

La presa La Estrella es una estructura que fue construida a fines de la década de los setenta por la Secretaría de Recursos Hidráulicos para fines de control de avenidas y almacenamiento para riego. Es de sección compuesta en planta, con una parte recta en el extremo derecho que llega hasta la obra de toma y que corresponde a la parte más alta de la cortina, que cierra en un semicírculo en el extremo izquierdo, frente al que se ubican las viviendas del ejido La Estrella. Actualmente la cortina se encuentra con excesiva vegetación sobre todo en el talud aguas abajo en la parte recta, consistente en árboles de más de tres metros de alto, cactáceas y arbustos; esta parte del talud se encuentra delimitado por una cerca de alambre de púas que impide el acceso para los trabajos de conservación e inspección. El talud aguas arriba cuenta con enrocamiento de protección en buen estado en términos generales, con corrimiento del pedraplén en algunas zonas debido a los árboles y a caminos que se han formado para el acceso al embalse. Sobre la corona se apreciaron algunas oquedades generadas por roedores, agravadas por los escurrimientos pluviales, que son rellenadas por los usuarios con arena, gravas y pequeños boleos, conforme van apareciendo. Cabe comentar que, aunque la corona no conduce a ninguna parte, en el extremo izquierdo de la cortina existe una rampa para subir a ella y para cruzar hacia el embalse, ya que esta presa es muy visitada para esparcimiento de los lugareños, lo que ha generado el deterioro de ambos taludes por la circulación de vehículos automotores en esa zona, además de baches y deformaciones sobre la corona. En el tramo a la izquierda de la obra de toma, frente a la que se ubica el ejido, los lugareños han construido al pie de la cortina, caballerizas y corrales para ganado equino y porcino y utilizan esta zona para el estacionamiento de plataformas para su transporte, lo que ha deteriorado el talud aguas abajo. No se detectaron filtraciones a través de la cortina, pero sí a través del terreno de cimentación en la zona del cauce original, que ha formado grandes lagunas aguas abajo de la presa; de acuerdo con lo investigado, estas filtraciones han ocurrido durante toda su vida de operación y no han aumentado su volumen ni se ha observado arrastre de finos, por lo que no representan riesgo estructural alguno, generando solamente pérdidas del almacenamiento.

En julio del 2010, por el evento del huracán Alex, ocurrió un deslizamiento de tipo local en la parte alta del talud aguas abajo, en la zona que se alinea con el cruce de la obra de toma, afectando la corona en una longitud de 10 m y el talud aguas abajo aproximadamente 2 m por debajo del nivel de la corona. La parte afectada fue

reparada de inmediato por los usuarios mediante la restitución del material perdido con material arcilloso compactado rústicamente. Esta situación, aunada a la presencia de las viviendas del ejido La Estrella aguas abajo de la presa hizo que la presa fuera calificada como de ALTO RIESGO. Actualmente, después de 7 años de haber sido reparada, la zona se observó estable, sin grietas y con mínimos rasgos de erosión pluvial, por lo que puede considerarse que la rehabilitación fue realizada de manera adecuada, con lo que se disminuye el riesgo de falla. Asimismo, los resultados obtenidos de la revisión de la estabilidad de ambos taludes para todos los casos analizados es decir, en condiciones de operación normal con el agua al NAMO, inusual con el embalse al NAME y por vaciado rápido, así como la denominada extrema por sismo, con el embalse al NAMO, muestran que los factores de seguridad obtenidos son mayores que los mínimos requeridos, de manera que ante un problema de estabilidad de taludes generalizado, la cortina de la presa La Estrella es SEGURA.

Además de lo anterior debe aclararse que aunque si bien las viviendas del ejido La Estrella se encuentran aguas abajo de la presa, estas se ubican más precisamente al pie del tramo a la izquierda de la obra de toma, donde la cortina es significativamente más baja que el tramo de la derecha, a una elevación mucho mayor que la del cauce, por lo que el riesgo de afectaciones a las viviendas ante una posible falla de la presa en la zona reparada, es mínimo.

La obra de excedencias se ubica en el extremo derecho de la cortina y consiste en un vertedor tipo lavadero de poco más de 105 m de longitud de cresta, desplantado sobre las lutitas y margas de la formación Méndez, que se observó en buen estado, con rasgos mínimos de erosión y prácticamente sin obstrucciones. A ambos lados del vertedor se ubican un par de muros de mampostería que muestran algunos signos de deterioro, sobre todo el del lado izquierdo que también sirve de apoyo a la cortina, en el que se observaron dislocadas algunas piezas de mampostería de la parte alta; sin embargo, ambos muros se encuentran estables, sin grietas ni rasgos de asentamientos o desplomes. De acuerdo con la revisión hidrológica e hidráulica, el vertedor tiene la capacidad para transitar de manera SEGURA las avenidas extraordinarias para un periodo de retorno de hasta 10,000 años.

Esta presa cuenta con una obra de toma formalmente construida, ubicada prácticamente al inicio de la sección curva, al lado izquierdo de la cortina, es de tipo tubería a presión de 0.61 m (24 pulgadas) de diámetro y cuenta con una estructura de salida ubicada al pie de la cortina, constituida por una caja de válvulas con rejilla de protección, donde se alojan dos válvulas tipo compuerta. Esta obra de toma está fuera de servicio desde hace más de 20 años, en estado de completo abandono, inundada, con el tren de descarga con deterioro evidente por la falta de mantenimiento. La obra de toma descarga a un canal trapecial, revestido de

concreto, abandonado también, que en algunos tramos ha sido obstruido con tierra por los usuarios. Cabe mencionar que esta estructura es el único medio para bajar el nivel de la presa ante una eventual emergencia.

IX.2 Recomendaciones

A continuación se presentan las recomendaciones para la rehabilitación de la presa La Estrella, buscando mejorar su operación y funcionamiento con lo que servirán como medidas preventivas orientadas a aumentar su seguridad.

IX.2.1 Conservación de la cortina

Deben eliminarse la excesiva vegetación tipo arbustiva y cactácea que afecta la presa sobre todo en la parte a la derecha de la obra de toma y considerar la posible eliminación de los árboles jóvenes cuyas raíces aún hayan penetrado lo suficiente, dejando únicamente los árboles de mayor edad y tamaño cuya eliminación requeriría prácticamente la reconstrucción de la cortina. El talud aguas arriba requiere que se repongan los enrocamientos que se han corrido debido a la vegetación y a los caminos hechos por los usuarios para acceder al embalse. Especial atención debe ponerse al corte que se utiliza como rampa para que vehículos automotores puedan subir a la corona e ingresar al embalse; esta zona debe rehabilitarse en su totalidad rectificando los taludes, reponiendo el enrocamiento sobre el talud aguas arriba e impidiendo el acceso de los vehículos por esta zona. Asimismo, es recomendable realizar trabajos de renivelación de la corona hasta un nivel mínimo de 537.29 *msnm*, que fue el valor utilizado para la revisión hidrológica e hidráulica de la presa. Durante estos trabajos se deben rellenar las oquedades o dolinas que se detecten. Como parte de los trabajos de rehabilitación, debe considerarse el retiro de las caballerizas, corrales, animales (caballos y cerdos) y vehículos (plataformas) que se han asentado al pie de la cortina, en el tramo a la izquierda de la obra de toma y que han afectado el talud aguas abajo en esa zona, colocando señalizaciones que inhiban su reinstalación.

IX.2.2 Mantenimiento del vertedor

Se recomienda eliminar los arbustos existentes en la zona de descarga del vertedor, para evitar se conviertan en obstrucciones. Es necesario también reponer la mampostería en la parte superior del muro del lado izquierdo y eliminar los árboles que se ubican adyacentes a él en la parte posterior, cuyas raíces pueden introducirse entre la mampostería y generar empujes que pueden afectarlo. Asimismo se

recomienda darle seguimiento a la erosión detectada sobre la ladera, inmediatamente aguas abajo del muro del lado derecho.

IX.2.3 Rehabilitación de la obra de toma

Aunque si bien, de acuerdo con lo manifestado por la autoridad ejidal, la obra de toma no se utiliza desde hace más de 20 años, la presa actualmente no cuenta con ningún mecanismo que permita bajar el nivel del embalse ante una posible eventualidad, por lo que se recomienda su rehabilitación, que en términos prácticos consistiría en la revisión del tren descarga existente para evaluar su posible reutilización o su sustitución, considerando todos los elementos requeridos para su adecuado funcionamiento (tubería, válvulas de emergencia, servicio y para expulsión de aire, etc.). Durante esta rehabilitación, deberá considerarse también la caja de concreto que resguarda el tren de descarga y su rejilla metálica para impedir el acceso, así como la limpieza del canal de distribución, con la construcción de una derivación que conduzca directamente hacia el cauce para evitar la inundación de la zona de riego durante un desfogue de emergencia, aprovechando que el cauce corre paralelo al canal existente.

REFERENCIAS

ANEXOS

ANEXO 1 INFORMACIÓN RECOPIADA

ANEXO 2 INFORME DE INSPECCIÓN

ANEXO 2.1 ÁLBUM FOTOGRÁFICO

ANEXO 3 RESULTADOS DE CAMPO Y LABORATORIO

ANEXO 3.1 TOPOGRAFÍA DE LA CORTINA

ANEXO 3.2 TOPOGRAFÍA DE CAUCE AGUAS ABAJO

ANEXO 3.3 EXPLORACIÓN DE CAMPO Y LABORATORIO

ANEXO 4 ANÁLISIS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS

ANEXO 5 ANÁLISIS DE PELIGRO SÍSMICO

ANEXO 6 REVISIÓN DE ESTABILIDAD DE LA CORTINA

ANEXO 7 REVISIÓN FUNCIONAL Y OPERACIONAL DE LA PRESA

ANEXO 8 ZONAS DE PELIGRO

ANEXO 9 MEMORIAS DE CÁLCULO DE LOS ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

ANEXO 10 DISEÑO CONCEPTUAL DE MITIGACIÓN DE RIESGOS