

**COORDINACIÓN NACIONAL DE PROTECCIÓN CIVIL
CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES**

**Identificación del peligro por inundación en poblaciones
cercanas a presas, para lograr asentamientos seguros,
resilientes y sostenibles**

**Ángel Bautista Tadeo
Diego Montealegre Zuñiga**

**SUBDIRECCIÓN DE RIESGOS POR INUNDACIÓN
DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN**

Febrero, 2020

Contenido

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO 1. Introducción..... | 6 |
| 1.1. Generalidades..... | 6 |
| CAPÍTULO 2. Objetivo..... | 8 |
| CAPÍTULO 3. Presas y normatividad en México..... | 8 |
| 3.1. Normatividad oficial mexicana..... | 9 |
| CAPÍTULO 4. Presas en riesgo en México..... | 12 |
| CAPÍTULO 5. Selección de los casos de estudio..... | 15 |
| 5.1. Estimación de áreas de inundación..... | 15 |
| CAPÍTULO 6. Casos de estudio..... | 19 |
| 6.1. Presa El Aguacate..... | 19 |
| 6.1.1. Hidrogramas de entrada..... | 21 |
| 6.1.2. Tránsito de avenidas en la presa El Aguacate..... | 25 |
| 6.1.3. Mapas de inundación..... | 31 |
| 6.2. Presa Infiernillo..... | 35 |
| 6.2.1. Consideraciones para el análisis de la presa Infiernillo..... | 35 |
| 6.2.2. Modelo hidráulico para la obtención del peligro..... | 43 |
| 6.2.3. Mapas de peligro por inundación..... | 46 |
| CAPÍTULO 7. Conclusiones..... | 53 |
| CAPÍTULO 8. Bibliografía..... | 54 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.1.- Número de presas por estado (Arrequín, 2013) | 9 |
| Figura 3.2.- Criterios de aceptación de riesgo (NMX-AA-175-SCFI-2015) | 10 |
| Figura 5.1.- Ubicación de las 25 presas a analizar clasificadas con alto riesgo (SRI, 2019) | 15 |
| Figura 5.2.- Áreas de inundación estimadas para cuatro de las 25 presas analizadas (SRI, 2019) | 16 |
| Figura 5.3.- Nomograma de riesgo admisible y localización de capa presa analizada y clasificada según la NMX-AA-175-SCFI (SRI, partir de la NMX-AA-175-SCFI, 2019) | 17 |
| Figura 5.4.- Nomograma de riesgo admisible y localización de cada presa analizada según la clasificación de la NMX-AA-175-SCFI (SRI, 2019) | 18 |
| Figura 6.1.- Modificaciones realizadas a una de las galerías y la conservación de la segunda entre 2017-2018 (Video disponible en la página de Facebook de Suroeste de Guanajuato, revisado en 2019) | 20 |
| Figura 6.2.- Vertedor de excedencias consistente en seis escotaduras (CONAGUA – IIUNAM, 2017) | 20 |
| Figura 6.3.- Cuenca de aportación de la presa y red de drenaje (SRI, 2019) | 22 |
| Figura 6.4.- Perfil del cauce principal de la cuenca de la presa EL Aguacate (SRI, 2019) | 23 |
| Figura 6.5.- Hietogramas de los periodos de retorno analizados para intervalos de diez minutos (SRI, 2019) | 23 |
| Figura 6.6.- Uso y tipo de suelo dentro de la cuenca presa El Aguacate (SRI con insumos vectoriales de Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2019) | 24 |
| Figura 6.7.- Resultados del cálculo de hidrograma asociado a un periodo de retorno de 10,000 años en HeCHMS (SRI, 2019) | 24 |
| Figura 6.8.- Hidrogramas resultantes para los periodos de retorno analizados (SRI, 2019) | 25 |
| Figura 6.9.- Curva elevaciones - almacenamientos obtenidos para la presa El Aguacate (SRI, 2019) | 26 |
| Figura 6.10.- Capacidad de descarga de las obras de toma y excedencias en función de la carga hidráulica (SRI, 2019) | 28 |
| Figura 6.11.- Hidrogramas de entrada y salida, y variación del nivel de agua en el vaso presa EL Aguacate, Tr 100 años (SRI, 2019) | 29 |
| Figura 6.12.- Hidrogramas de entrada y salida, y variación del nivel de agua en el vaso presa EL Aguacate, Tr 500 años (SRI, 2019) | 29 |
| Figura 6.13.- Hidrogramas de entrada y salida, y variación del nivel de agua en el vaso presa EL Aguacate, Tr 1,000 años (SRI, 2019) | 30 |
| Figura 6.14.- Hidrogramas de entrada y salida, y variación del nivel de agua en el vaso presa EL Aguacate, Tr 10,000 años (SRI, 2019) | 30 |
| Figura 6.15.- Modelación de la cortina de la presa (SRI, 2019) | 31 |
| Figura 6.16.- Mapas de profundidades obtenidos para la presa El Aguacate, en la comunidad de Cuerámara. (SRI, 2019) | 32 |
| Figura 6.17.- Mapas de velocidades para la presa El Aguacate en la comunidad de Cuerámara (Fuente: SRI, 2019) | 33 |
| Figura 6.18.- Mapa de severidad para la presa El Aguacate en la comunidad de Cuerámara (SRI, 2019) | 34 |

| | |
|---|----|
| Figura 6.19.- Vista aérea de la cortina y túneles de desfogue de la presa Infiernillo (Sistema de Seguridad de Presas, 2012) | 35 |
| Figura 6.20.-Portada de la plataforma del BANDAS (CONAGUA, 2016) | 36 |
| Figura 6.21.-Gráfico del ajusté de la función de probabilidad a los datos de nivel del embalse (SRI, 2019) | 37 |
| Figura 6.22.- Imagen del ajuste de los datos a la función Doble Gumbel (SRI, 2019) | 37 |
| Figura 6.23.-Características generales de la presa después de su terminación (Fuente: CONAGUA, 2012) | 39 |
| Figura 6.24.- Características de la corona con sobreelevación (Fuente: CONAGUA, 2012) | 39 |
| Figura 6.25.- Nomograma de coeficientes de descarga en compuertas radiales (Sotelo, 1997) | 40 |
| Figura 6.26.- Esquema de las características hidráulicas en una compuerta radial (Sotelo, 1997) | 40 |
| Figura 6.27.- Hidrograma de derrame en la presa Infiernillo evento de 1985 (BANDAS, 2019) | 42 |
| Figura 6.28.- Hidrogramas de desfogue, asociados a distintos periodos de retorno en la presa Infiernillo (SRI, 2019) | 42 |
| Figura 6.29.- Cuenca entre las presas Infiernillo y La Villita (SRI, 2019) | 43 |
| Figura 6.30.- Delimitación de la superficie de cálculo con sistema de Información Geográfica (SRI, 2019) | 44 |
| Figura 6.31.-Polígono de la superficie final del cálculo en la interfaz de HEC-RAS (SRI, 2019) | 44 |
| Figura 6.32.- Acercamiento a la superficie de cálculo sobrepuesta en el modelo de terreno (SRI, 2019) | 45 |
| Figura 6.33.- Vista general de los resultados obtenidos de la simulación del Tr 100 años (SRI, 2019) | 45 |
| Figura 6.34.- Mapas de profundidades obtenidos entre las presas Infiernillo y La Villita (SRI, 2019) | 46 |
| Figura 6.35.-Mapas de velocidades obtenidos entre las presas Infiernillo y La Villita (SRI, 2019) | 47 |
| Figura 6.36.-Mapas de severidad obtenidos entre las presas Infiernillo y La Villita (SRI, 2019) | 48 |
| Figura 6.37.-Mapas de profundidades obtenidos para el poblado de Infiernillo (SRI, 2019) | 49 |
| Figura 6.38.-Mapas de velocidades obtenidos para el poblado de Infiernillo (SRI, 2019) | 50 |
| Figura 6.39.-Mapas de severidad obtenidos para el poblado de Infiernillo (SRI, 2019) | 51 |

| | |
|--|-----------|
| Tabla 1.1.-Casos documentados de fallas en presas mexicanas | 7 |
| Tabla 3.1.- Clasificación de consecuencias de falla. Tomada de la NMX-AA-175-SCFI-2015, declarada vigente en el 2016 en el Diario Oficial de la Federación..... | 10 |
| Tabla 4.1.- Factores para la ponderación de casos a analizar | 12 |
| Tabla 4.2.- Lista de 49 presas clasificadas por la CONAGUA con alto riesgo | 13 |
| Tabla 5.1.- Estimación de población expuesta aguas debajo de 25 presas | 16 |
| Tabla 6.1.- Resumen de niveles de referencia en la presa El Aguacate | 21 |
| Tabla 6.2.- Población y número de viviendas con posibles afectaciones para cada periodo re retorno presa El Aguacate | 34 |
| Tabla 6.3.- Periodos de retorno (Tr) obtenidos del ajuste de la función Doble Gumbel..... | 38 |
| Tabla 6.4.- Características de descarga en las compuertas radiales por periodo de retorno | 41 |
| Tabla 6.5.- Estimación bienes expuestos para los diferentes escenarios de desfogue | 52 |

CAPÍTULO 1. Introducción

El presente trabajo identifica el peligro por inundación en comunidades cercanas a algunas presas, mediante el análisis de las condiciones que amenazan la integridad de dicha infraestructura, esto, para establecer los requerimientos básicos y mínimos para la obtención del riesgo por inundación, provocado por la falla de este tipo de obras. Se desarrollan dos casos de estudio, a partir de la clasificación de presas con algún tipo riesgo de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), los cuales están definidos como: *Riesgo Estructural (RE)*, *Riesgo Hidrológico (RI)*, *Riesgo Geotécnico (RG)*, *Ordenamiento Territorial (OT)* o la combinación entre éstos.

En este sentido, se carece de un documento descriptivo que precise como se establecieron dichos niveles de riesgo, ya que está fundamentado en las atribuciones de la CONAGUA, porque la Comisión ha hecho mención de que clasifica las presas en función del monitoreo y de su sistema de seguridad de presas, que toma como base para identificar los embalses con las condiciones más desfavorables.

1.1. Generalidades

Las presas en México constituyen una de las obras hidráulicas más importantes en cuanto al desarrollo de actividades y aprovechamiento del recurso hídrico por parte de la población, ejemplo de esto, la generación de energía eléctrica, almacenamiento de agua potable y riego agrícola (principalmente en el norte del país), de manera adicional cuentan con un papel importante en la gestión y reducción de riesgos, mediante la mitigación de inundaciones, con el control de caudales en grandes ríos que pueden llegar a fluir con gran velocidad después de algún evento meteorológico que deje precipitación en sus cuencas de aportación. Como muchas otras obras civiles, la construcción de éstas se realiza con base en variables hidráulicas, fluviales, hidrológicas, geotécnicas, sísmicas y ambientales, entre otras; dependen de los requerimientos y solicitudes relacionadas con la ubicación y propias del proyecto de una presa, a fin de que su comportamiento sea adecuado y no represente peligro alguno a los sistemas expuestos, como las comunidades aguas abajo y sus bienes.

La seguridad de las presas está estrechamente ligada a la operación, funcionamiento, mantenimiento, conservación y rehabilitación, factores que la mayoría de las veces son difíciles de identificar sin un estudio detallado de la infraestructura, ya que cuentan con características cambiantes, por lo que existen elementos, tales como: cortina, obras de toma, obras de excedencia, compuertas, conductos (canales y túneles), entre otros, que pueden llegar a funcionar erróneamente o de una manera diferente de cómo fueron proyectados originalmente, por lo que es posible que presenten alguna falla y se comprometa la estabilidad estructural lo que podría provocar afectaciones por descargas sin control en el cauce.

Por lo anterior, es importante mencionar que alguna deficiencia en una presa y la condición de riesgo en la que se encuentre identificada, no necesariamente representa una condición de peligro inminente, por ejemplo, la formación de una brecha o tajo en una cortina de materiales pétreos, o la descarga de agua por las obras de excedencia, se cuente o no con compuertas de control, ya que existen condiciones que se consideran una falla en la presa, debido a que trabajan en situaciones diferentes para las que fue construida, y no satisface las necesidades para las cuales fue proyectada. Esto último muy importante de resaltar, ya que todo dique o embalse puede cambiar su uso o función de acuerdo con la proyección y las necesidades de su entorno, es así que la CONAGUA establece o modifica las Políticas de Operación, según las condiciones hidrológicas antecedentes y de pronóstico de la cuenca donde se encuentra el embalse, las condiciones de la infraestructura en general y los usos y aprovechamientos que se le da al agua almacenada.

Además de ser pocos los casos de algún tipo de falla en presas mexicanas, que se encuentran documentados, los cuales se resumen en la tabla 1.1, esto dejando fuera los eventos menores en pequeñas estructuras de retención como diques, bordos o presas de jales, que por su envergadura o propósito no requieren de la atención de instancias gubernamentales federales.

Tabla 1.1.-Casos documentados de fallas en presas mexicanas

| Nombre | Falla | Año | Observaciones |
|---|--|------|---|
| Presa del Conejo, Irapuato, Guanajuato | Volúmenes extraordinarios y trabajos mal ejecutados en la cortina de la presa, que provocaron la falla de una sección de la cortina. | 1973 | Vertedores de presa aguas arriba rebasados, falla en conjunto de un sistema de 6 presas |
| Estructura de protección en los arroyos El Cajoncito y El Piojillo, La Paz, Baja California Sur | Rebasó su capacidad durante el paso del huracán Liza | 1976 | Aumento de asentamientos humanos cerca de una obra de protección, construida para el control de los afluentes |
| Dique Laguna, Sistema Necaxa | Flujo concentrado y tubificación | 1969 | En el empotramiento derecho de la cimentación que abrió 30 m de ancho, provocando vaciado rápido de 20 Hm ³ |
| Presa Dolores, San Luis Potosí | Colapsó por almacenamiento excesivo | 2003 | Falla de estabilidad debido a la sobrelevación de la cortina en tres ocasiones, acumulación de azolves, cierre de obras de excedencias y crecimiento de vegetación en la cortina debido a filtraciones. |
| Presa El Capulín, Zacatecas | Acumulación de azolves | 2003 | Reducción de almacenamiento por azolves del 71 %, falla de estabilidad por cierre de vertedores |

Fuente: Bautista, A. L.,2016

CAPÍTULO 2. Objetivo

Con el objetivo de establecer una guía técnica de identificación de peligro por inundación en poblaciones cercanas a presas se elaboraron dos casos de estudio, partiendo de los reportes y categorización de presas en riesgo, realizados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y presentados en el marco del Comité Nacional de Grandes Presas (CNGP), en el cual semanalmente se revisa el estado del porcentaje de almacenamiento de 210 presas, en la sesión 1378 del 5 de febrero de 2019, se presentó el estado 115 presas clasificadas con algún tipo de riesgo; es importante mencionar que dicha información tiene un periodo de reserva temporal de un año bajo los términos de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública, por lo que los datos extraídos han sido modificados para su publicación.

Es importante mencionar que, la gran variedad de presas están en función de su estructura, ubicación geográfica, funciones, operación e incluso sus condiciones de riesgo, no es posible establecer una guía única, por lo que se pretende establecer los requerimientos mínimos para un análisis de peligro por inundación, debido a la condición de riesgo que presenten las mismas. Además, se ejemplificó mediante estudios de caso.

CAPÍTULO 3. Presas y normatividad en México

En nuestro país existen 5,166 presas y bordos, las cuales son administrados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la Comisión Federal de Electricidad (CFE), la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA) Sección México, Gobiernos Estatales y Municipales, Asociaciones de Usuarios y Propietarios Particulares.

La CONAGUA, como autoridad responsable de la administración en materia de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes, tiene la necesidad de conservar y, en su caso, mejorar la seguridad de las presas por medio de instrumentos regulatorios tendientes a mitigar los posibles efectos negativos o daños a terceros, con base en una descarga de sus obras de desfogue o a su falla parcial o total que puedan provocar pérdida de vidas humanas o daño a zonas urbanas, infraestructura y medio ambiente. El artículo 100 de la Ley de Aguas Nacionales establece que *la Comisión Nacional del Agua elaborará Normas o realizará las acciones necesarias para evitar que la construcción u operación de una obra hidráulica altere desfavorablemente las condiciones de una corriente o ponga en peligro la vida de las personas y la seguridad de sus bienes o la integridad de los ecosistemas.*

En México el monitoreo y la revisión de las presas es un trabajo que se realiza desde los años ochenta, sufriendo varios cambios a lo largo del tiempo. La figura 3.1 muestra la distribución del número de presas por estado, con la información del último inventario realizado en 2012.

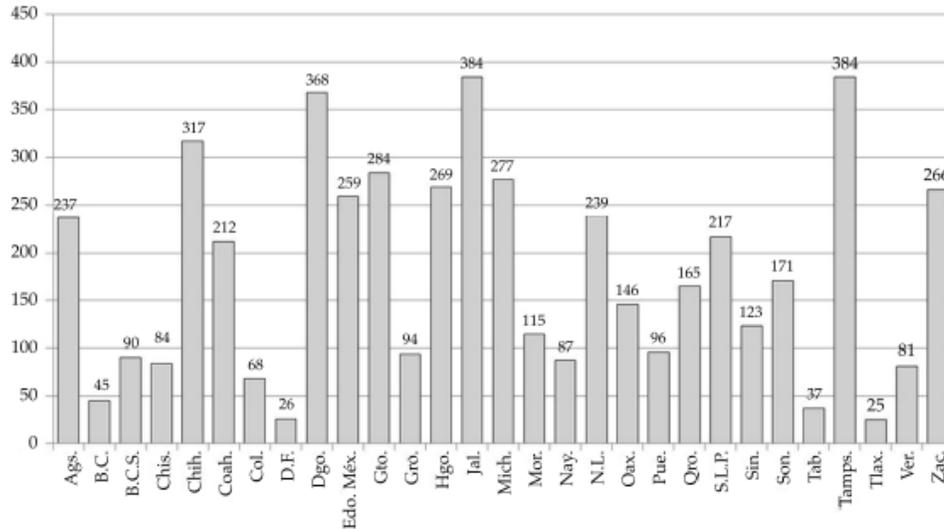


Figura 3.1.- Número de presas por estado (Arrequín, 2013)

A pesar de la importancia y magnitud de este tipo de infraestructura, en la actualidad no se cuenta con un criterio estandarizado para la evaluación del riesgo que éstas pueden provocar, lo que significa que no se evalúe el peligro (posibilidad de una amenaza) por los embalses o almacenamientos de agua, en específico del peligro y riesgo por inundación. En el país se cuenta con una norma que ayuda a sentar las bases para el análisis del peligro por inundación debido a la falla o desbordamiento de una presa, enfocándose en el daño que tendría la población, dejando claro que la gente no es el único sujeto que podría sufrir afectaciones en un evento de este tipo, por el momento las afectaciones que se tendrían en la ganadería, agricultura y medio ambiente en general.

A continuación, se presentan los puntos principales a considerar de la Norma Oficial Mexicana y sus objetivos:

3.1. Normatividad oficial mexicana

NMX-AA-175_SCFI-2015. Operación segura de presas. Parte 1.- Análisis de Riesgo y clasificación de presas- establece los requisitos que deben cumplir las presas en operación en el territorio nacional para determinar su grado de peligro o potencial daño en la zona de posible inundación aguas abajo, debido a la operación, falta de mantenimiento o de cuidado de las presas, por una descarga, o por falla parcial o total de la presa, de la cual se extrae la siguiente clasificación y el nomograma de aceptación de riesgos.

Tabla 3.1.- Clasificación de consecuencias de falla. Tomada de la NMX-AA-175-SCFI-2015, declarada vigente en 2016 en el Diario Oficial de la Federación

| Clasificación de Consecuencias | Consecuencias de una Falla | | |
|--------------------------------|---|---|--|
| | Pérdida de Vidas Humanas | Daños Materiales Posibles | Daños Ambientales ^b |
| ALTA | Población en riesgo > 100 personas | Daños a casas habitación, desarrollos industriales, comerciales, de servicios públicos, o a instalaciones de recreación permanentes. Interrupción de líneas vitales o vías de comunicación principales, o de instalaciones estratégicas esenciales y accesos de servicio críticos ^a . | No es factible mitigar la contaminación o daño ambiental |
| MEDIA | Población en riesgo entre 10 y 100 personas | Daños en zonas habitacionales rurales o casas habitación aisladas donde no existen desarrollos urbanos, o el uso del suelo es para actividades transitorias o instalaciones de recreación temporal de duración semanal. Interrupción de vías de comunicación secundarias, líneas vitales o de instalaciones y accesos de servicios secundarios no esenciales. | Es factible mitigar la contaminación o daño ambiental |
| BAJA | Población en riesgo < 10 personas | Daños en zonas agrícolas donde no existen instalaciones o desarrollos permanentemente habitados: granjas, bosques, tierras agrícolas, caminos rurales y vecinales. Sin interrupción de vías de comunicación principales, ni de líneas vitales o de instalaciones estratégicas y accesos de servicios críticos. | Sin contaminación y sin daño ambiental |

NMX-AA-175-SCFI-2015

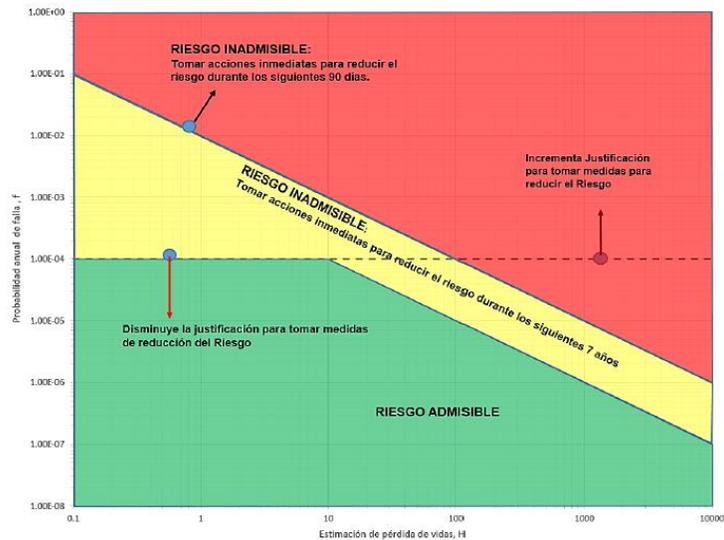


Figura 3.2.- Criterios de aceptación de riesgo (NMX-AA-175-SCFI-2015)

NMX-AA-175/2-SCFI-2016. Operación Segura de Presas-Parte 2- Inspecciones de Seguridad. - establece las especificaciones técnicas que deben de cumplir las presas en operación en el territorio nacional para determinar el plan de inspección de presas.

Los responsables de las presas son quienes deben de establecer el programa de inspecciones.

NMX-AA-175/3-SCFI-2017. Operación Segura de Presas-Parte 3- Plan de Acción Ante Emergencias (PAE). Si las consecuencias por su potencial de daños en caso de falla es alta o media y que den como resultado en riesgo admisible, deben de elaborar, mantener y promover que se implante un PAE, requisitos del PAE.

Los componentes de un PAE:

- Identificación, evaluación y clasificación de emergencias;
- Responsabilidades
- Diagrama de flujo de aviso a las autoridades y a la población en riesgo
- Procedimientos de aviso
- Mapas de peligro por inundación
- Análisis de riesgo
- Fases de alertamiento y plan de evacuación
- Acción preventiva; y
- Anexos

Acciones preventivas:

- Identificación
- Se debe de contar, conocer y aplicar la política de operación de la presa, para el manejo y tránsito de avenidas
- Identificación de rutas de acceso, evacuación de la zona de peligro del embalse y aguas abajo de la estructura de la presa.
- Inventario de maquinaria, equipo y mano de obra disponible ante una eventual emergencia.
- Disponibilidad y accesibilidad de bancos de material (roca, grava, arena y arcilla).
- Identificar operaciones y maniobras requeridas para la reducción del peligro y/o riesgo por inundación.

CAPÍTULO 4. Presas en riesgo en México

Varias presas en México fueron construidas durante los siglos XVII y XIX, principalmente de mampostería; en estados céntricos del país como Guanajuato, Aguascalientes, México y Querétaro. El auge de la edificación de estas obras hidráulicas se presentó durante el siglo pasado, en las décadas de 1960 y 1970, la mayoría de los proyectos de presas fueron realizados sin contar con mayor información hidrométrica o pluviométrica, provocando que se realicen sobreelevaciones de las cortinas de muchas de ellas, debido a que su capacidad de almacenamiento no es acorde a la cantidad de escurrimiento de los cauces sobre los que se encuentran. La seguridad de una presa se encuentra estrechamente ligada a la conservación de la misma, así como a las acciones de modernización que sean empleadas, siendo uno de los principales problemas la falta de mantenimiento y rehabilitación (Domínguez, Judith, 2019).

Algunos factores pueden ser considerados para establecer la priorización del análisis de presas en riesgo, siendo las implicaciones más graves: un probable escenario de inundación súbita por la falla de la estructura o instalaciones, desfogue o desbordamiento de grandes volúmenes, estos factores se mencionan en la tabla 4.1.

Tabla 4.1.- Factores para la ponderación de casos a analizar

| Criterio | Características |
|-------------------------------------|---|
| Población | Las pérdidas de vidas humanas por la falla estructural de la presa, al generarse el desplazamiento de un gran volumen de agua en un periodo de tiempo muy corto. |
| Daño ecológico-ambiental | Los daños ecológicos pueden llegar a ser irreparables en algunos casos, por el arrastre de escombros, detritos, sedimentos o simplemente agua. |
| Infraestructura estatal o municipal | Se refiere a pérdidas económicas generadas al afectarse infraestructura del estado o a las privadas (viviendas, industria, etc.) |
| Servicios | Aunque no conlleva la pérdida de vidas humanas o económicas directamente, el restablecimiento de éstos puede llegar a generar grandes costos, como el cierre de vías de comunicación o falta de agua para riego o consumo por su derrame. |
| Volumen de almacenamiento | Es importante considerar los volúmenes de almacenamiento, independientemente de las condiciones aguas abajo de la presa, se puede decir que, a mayor volumen almacenado mayor serán los daños provocados, en caso de falla, debido a la energía por sobreelevación del agua o simplemente por la magnitud del cúmulo de agua. |
| Condiciones físicas-Tiempo de vida | Las condiciones físicas desfavorables están relacionadas con el tiempo de vida de la |

| Criterio | Características |
|--------------------------|--|
| | infraestructura general y por la operación de la presa. |
| Material de construcción | Se considera el material de construcción de la presa un factor de importancia, cortinas a base de materiales graduados corren el riesgo de presentar filtraciones en el cuerpo o por debajo de la cortina, comprometiendo la integridad estructural de la presa. |
| Zona sísmica | Es un factor de suma importancia en el diseño estructural de una presa, se considera que las que se encuentran en zonas sísmicas representan un mayor riesgo para la población. |

SRI a partir de la bibliográfica consultada, 2019

De las 115 presas con algún tipo de riesgo, 49 se encuentran clasificadas con **alto riesgo**, de las cuales para el análisis se priorizaron 25, según lo expuesto en el CNGP, y con base en la clasificación de la CONAGUA, mencionada con anterioridad y sus combinaciones.

1. Riesgo Estructural (E)
2. Riesgo Hidrológico (H)
3. Riesgo Geotécnico (G)
4. Problemas Funcionales (F)
5. Problemas de Ordenamiento Territorial (OT)

Tabla 4.2.- Lista de 49 presas clasificadas por la CONAGUA con alto riesgo

| Núm. | Presa | Estado | Estatus |
|-------------|-------------------------------|-----------------|----------------|
| 1 | El Aguacate | Guanajuato | Riesgo E |
| 2 | Malpaso | Aguascalientes | Riesgo E |
| 3 | Lag. La Pastorilla | San Luis Potosí | Riesgo E |
| 4 | El Represo Nogales | Sonora | Riesgo F y OT |
| 5 | San Pedro | Michoacán | Riesgo G |
| 6 | Atemoztli | Tamaulipas | Riesgo G |
| 7 | La Salitrera | Guanajuato | Riesgo G, H |
| 8 | Juan Sabinés | Chiapas | Riesgo H |
| 9 | Venustiano Carranza | Coahuila | Riesgo H |
| 10 | Presidente Guadalupe Victoria | Durango | Riesgo H |
| 11 | Lic. Eustaquio Buelna | Sinaloa | Riesgo H |
| 12 | Ignacio R. Alatorre | Sonora | Riesgo H |
| 13 | Paso de Piedras | Veracruz | Riesgo H |
| 14 | Palo Blanco | Coahuila | Riesgo H |
| 15 | Infiernillo | Guerrero | Riesgo H |
| 16 | Laguna de Mora | Nayarit | Riesgo H |
| 17 | Coculan | Jalisco | Riesgo H |

| | | | |
|----|-----------------------------|-----------------|----------------|
| 18 | B. San Jose El Alto III S7D | Querétaro | Riesgo H |
| 19 | Los Arquitos | Aguascalientes | Riesgo H |
| 20 | El Chichimeco | Aguascalientes | Riesgo H |
| 21 | Calera | Zacatecas | Riesgo H |
| 22 | Calerilla | Zacatecas | Riesgo H |
| 23 | San Agustín | Durango | Riesgo H |
| 24 | La Guajolota | Chihuahua | Riesgo H |
| 25 | Las Adjuntas | Aguascalientes | Riesgo H |
| 26 | San Blas | Aguascalientes | Riesgo H |
| 27 | San Juan de Coyotillos | San Luis Potosí | Riesgo H |
| 28 | El Obraje | Guanajuato | Riesgo H |
| 29 | La Herradura | San Luis Potosí | Riesgo H |
| 30 | La Casita | San Luis Potosí | Riesgo H |
| 31 | Dolores | San Luis Potosí | Riesgo H |
| 32 | El Tanque | Tamaulipas | Riesgo H |
| 33 | San Jose | Zacatecas | Riesgo H, E |
| 34 | La Providencia | Durango | Riesgo H, OT |
| 35 | La Providencia | Chiapas | Riesgo H, E |
| 36 | El Cajón | Querétaro | Riesgo H, E |
| 37 | San Marcos III | Guerrero | Riesgo H, E |
| 38 | Providencia | San Luis Potosí | Riesgo H, E |
| 39 | Presa Grande | Zacatecas | Riesgo H, E |
| 40 | Angulo | Edo. de México | Riesgo H, E, F |
| 41 | La Rosita | Oaxaca | Riesgo H, F |
| 42 | Álvaro Obregón | San Luis Potosí | Riesgo H, F |
| 43 | San Juan de las Manzanas | Edo. de México | Riesgo H, G |
| 44 | La Cantera | Oaxaca | Riesgo H, G |
| 45 | Dique Puerto de la Paz | Chihuahua | Riesgo H, G OT |
| 46 | Malpais | Michoacán | Riesgo H, G, F |
| 47 | Atemajac | Zacatecas | Riesgo H, G, F |
| 48 | Tamuín | San Luis Potosí | Riesgo G |
| 49 | Ortiz | Sonora | Riesgo G |

Comité Nacional de Grandes Presas, CONAGUA, 2018

CAPÍTULO 5. Selección de los casos de estudio

Para la selección de casos de estudio se empleó como criterio la población expuesta ante la falla de cortina o desfogue, mediante la estimación de zonas de inundación preliminares, éstas se definieron a partir de la topografía aguas abajo de las 25 presas analizadas.

Las presas seleccionadas se encuentran distribuidas a lo largo del territorio nacional, observándose una mayor concentración en las zonas de El Bajío y el occidente del país, en estados como: Aguascalientes, Zacatecas y Querétaro.



Figura 5.1.- Ubicación de las 25 presas a analizar clasificadas con alto riesgo (SRI, 2019)

5.1. Estimación de áreas de inundación

La estimación de zonas de inundación se realizó con base en la topografía presente en las zonas cercanas a las obras de desfogue o cortinas de las presas, se tomaron en cuenta, obras urbanas, como carreteras y el alcance del probable pulso inicial provocado por la falla de cortina, es decir, la posición del volumen de agua por encima del terreno o derrame sin control.

En algunos casos, se carece de una cantidad numerosa de población que puede sufrir afectaciones, debido a que muchas veces los embalses se encuentran alejados de los centros poblacionales, siendo principalmente, zonas de cultivo las más susceptibles a presentar daños. Cabe señalar que, una correcta obtención del área afectada conllevaría la realización de modelaciones y simulaciones hidráulicas en cada una de las 25 presas, un proceso largo y poco práctico para los fines de este

trabajo. No obstante, la población que se tendría afectada se estimó mediante la aplicación del Atlas Nacional de Riesgos (ANR), que permite conocer los bienes expuestos dentro de un polígono.

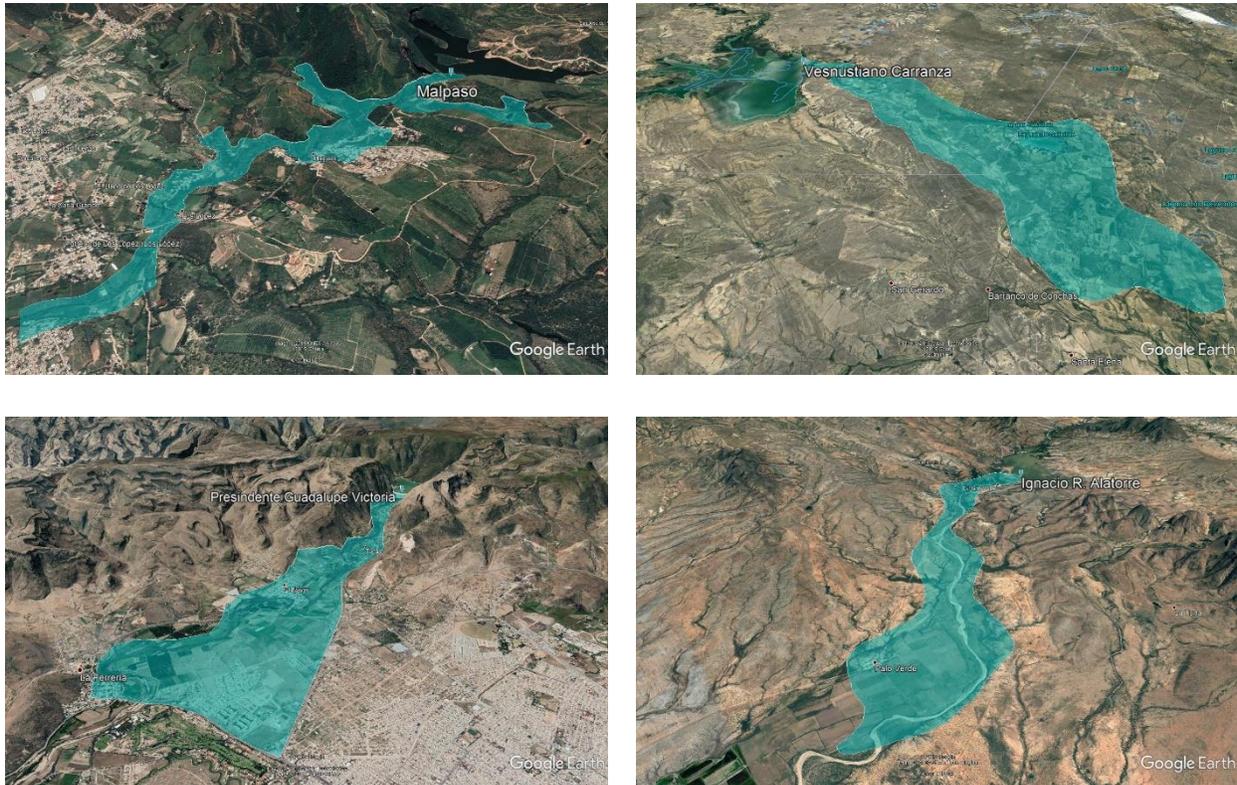


Figura 5.2.- Áreas de inundación estimadas para cuatro de las 25 presas analizadas (SRI, 2019)

Se tomó como criterio a la población expuesta dentro de un área afectada ante una posible falla de cortina u operación de obras de excedencia, de esta manera se clasificaron cada una de las 25 presas bajo análisis y se localizan en el nomograma de criterios de aceptación de riesgo, el cual se quedó fijo para todas y se utilizó el periodo de retorno (T_r) 10,000 años, magnitud de dicho parámetro empleado regularmente para el diseño de obras de excedencia como son las presas. En la tabla 5.1 y figura 5.3, se muestran los resultados de las personas en riesgo ante la presencia de embalses.

Tabla 5.1.- Estimación de población expuesta aguas debajo de 25 presas

| Zona de riesgo | Presa | Población |
|----------------|-----------------------|-----------|
| Inadmisibles | Lic. Eustaquio Buelna | 21844 |
| | Infiernillo | 19764 |
| | Los Arquitos | 16568 |
| | El Aguacate | 9114 |
| | El Represo Nogales | 7731 |

| | | |
|-----------|-------------------------------|------|
| | Presidente Guadalupe Victoria | 5203 |
| | Paso de Piedras | 4942 |
| | B. San Jose el Alto III | 2980 |
| | Laguna de Mora | 2112 |
| | Malpaso | 1772 |
| | Juan Sabinés | 919 |
| | Venustiano Carranza | 561 |
| | Las Adjuntas | 432 |
| | San Pedro | 385 |
| | Calerilla | 147 |
| | Ignacio R. Alatorre | 83 |
| | Coculan | 35 |
| | Calera | 33 |
| | Palo Blanco | 32 |
| | El chichimeco | 29 |
| Admisible | La Guajolota | 5 |
| | Lag La Pastorilla | 0 |
| | Atemoztli | 0 |
| | La Salitrera | 0 |
| | San Agustín | 0 |

SRI, 2019

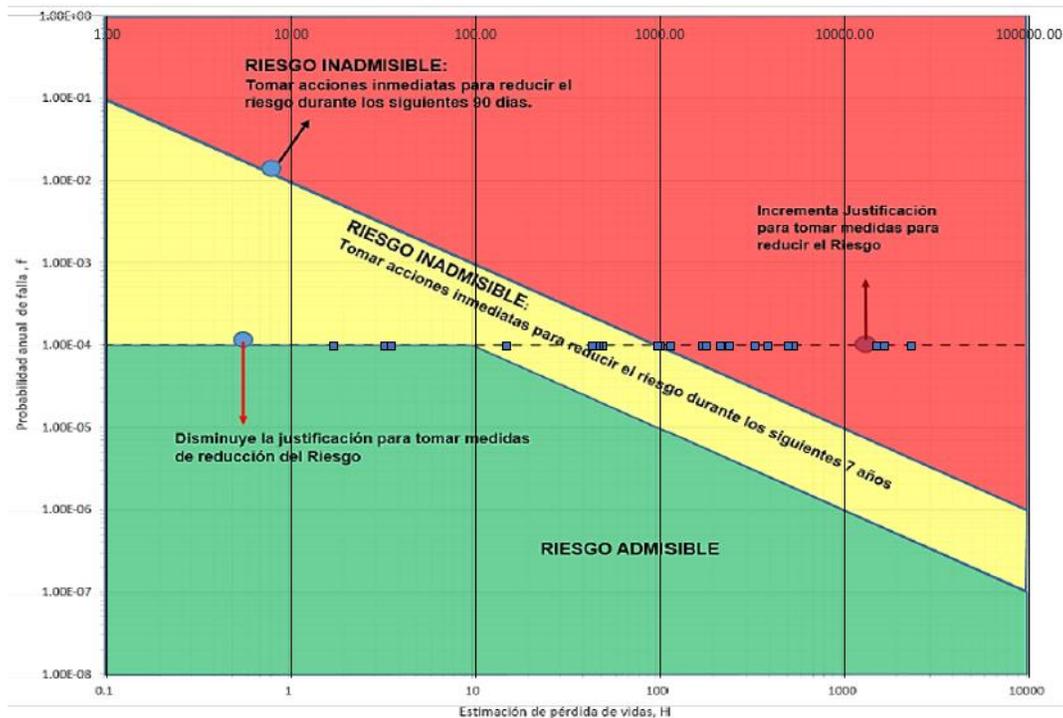


Figura 5.3.- Nomograma de riesgo admisible y localización de capa presa analizada y clasificada según la NMX-AA-175-SCFI (SRI, partir de la NMX-AA-175-SCFI, 2019)

La figura 5.4 muestra la ubicación de las presas en la República Mexicana, según el nivel de riesgo que obtuvieron con base en la Norma mexicana, en color verde aparece el riesgo admisible, en amarillo el riesgo inadmisibles B y en rojo riesgo inadmisibles A.

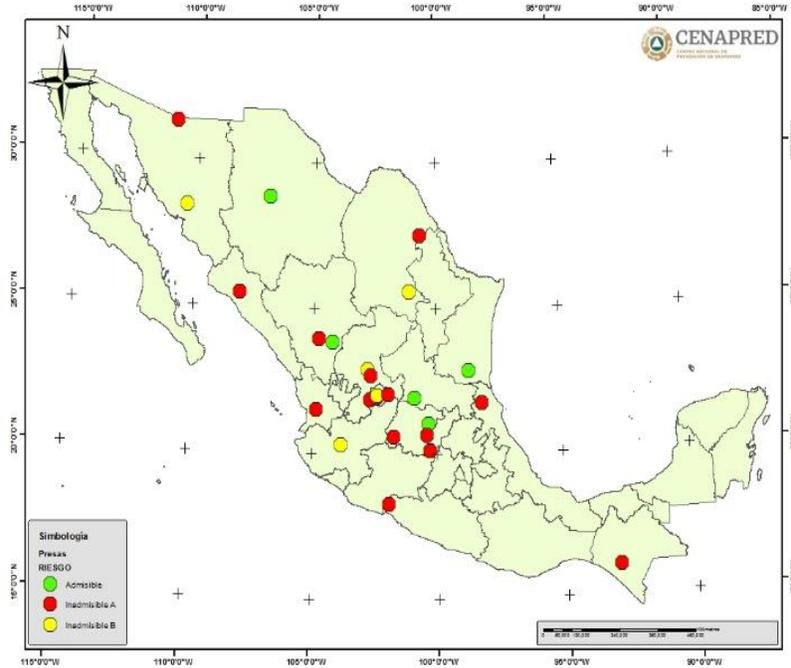


Figura 5.4.- Nomograma de riesgo admisible y localización de cada presa analizada según la clasificación de la NMX-AA-175-SCFI (SRI, 2019)

CAPÍTULO 6. Casos de estudio

De acuerdo con la ubicación en el nomograma de riesgo admisible en presas y tomando como probabilidad de falla, la probabilidad de excedencia de un evento hidrometeorológico extremo asociado a un $T_r=10,000$ años, 11 presas quedaron en el rango de *riesgo inadmisibles (área roja)*: Lic. Eustaquio Buelna, Infiernillo, Los Arquitos, El Aguacate, El Repeso Nogales, Presidente Guadalupe Victoria, Paso Piedras, B. San José el Alto III, Laguna Mora, Malpaso y Juan Sabinés.

De las cuatro primeras presas en rango de riesgo inadmisibles (Lic. Eustaquio Buelna, Infiernillo, Los Arquitos y El Aguacate), actualmente existen escenarios de operación para la presa Lic. Eustaquio Buelna y en el caso de Los Arquitos, está condicionada por la existencia de un vaso de regulación aguas arriba con una capacidad evidentemente superior. Por lo anterior, las presas Infiernillo y El Aguacate son los casos elegidos en este estudio.

6.1. Presa El Aguacate

La presa El Aguacate se ubica dentro del municipio de Pénjamo, Guanajuato, cuya cuenca de aportación tiene un área de aproximadamente 97 km^2 , el uso de la presa es de almacenamiento para riego de cultivos y fue construida en 1748. Aunque la presa se ubica en Pénjamo, la población beneficiada del almacenamiento y extracciones es Cuernavaca.

El Aguacate está construida con contrafuertes de mampostería, por lo que se clasifica como de comportamiento rígido y con base en la altura de la cortina, que, aunque no está directamente relacionada con la capacidad de almacenamiento, a mayor altura, mayor son las sollicitaciones estructurales de la misma. Según el catálogo de la Comisión Internacional de Grades Presas, las cortinas mayores a 15 m son grandes presas.

De acuerdo con el Sistema de Seguridad de Presas de la CONAGUA, en el periodo 1890-1970, se ha sobreelevado la cortina en tres ocasiones. Mientras que entre 2017 y 2018 se realizaron modificaciones a una de las obras de toma, la cual consistió en reemplazar una de las galerías con compuerta deslizante a una tubería de acero con diámetro de 0.457 m, con torre y 8 niveles de rejillas. Se conservó la segunda galería con compuerta deslizante de dimensiones: $1.5 \times 1.5 \text{ m}$ y una capacidad de descarga de $33.3 \text{ m}^3/\text{s}$



Figura 6.1.- Modificaciones realizadas a una de las galerías y la conservación de la segunda entre 2017-2018 (Video disponible en la página de Facebook de Suroeste de Guanajuato, revisado en 2019)

La obra de excedencia consiste en seis escotaduras con una capacidad acumulada de $61.5 \text{ m}^3/\text{s}$, localizadas en la margen izquierda de la cortina, la cresta se encuentra en la cota 1837.1 msnm. El periodo de retorno de diseño de la presa es de 10, 000 años y gasto máximo de $500 \text{ m}^3/\text{s}$ (información del Sistema de Seguridad de Presas de la CONAGUA)

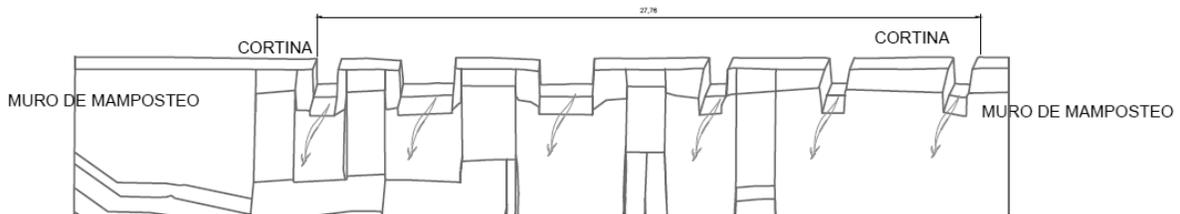


Figura 6.2.- Vertedor de excedencias consistente en seis escotaduras (CONAGUA – IIUNAM, 2017)

Es importante señalar que, los niveles de referencia en el embalse varían, según la fuente de información, los principales fueron: *Estudios especializados a tres presas de almacenamiento, derivadoras y bordos en alto riesgo, en los estados de Chihuahua, Durango y Guanajuato, año 2017 "id 1243 El Aguacate de la CONAGUA y el Sistema de Seguridad de Presas*, dichos niveles se establecieron según las necesidades, condiciones, almacenamientos y pronósticos de precipitación y escurrimiento hacia la presa, por lo que éstos pueden variar, según los años hidrológicos. En la tabla 6.1 se muestra un resumen de los niveles y volúmenes de almacenamiento.

Tabla 6.1.- Resumen de niveles de referencia en la presa El Aguacate

| Nivel | Sistema de Seguridad de Presas | | Estudio de la CONAGUA 2017 | |
|---------------------|--------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| | Elevación (msnm) | Almacenamiento (hm ³) | Elevación (msnm) | Almacenamiento (hm ³) |
| Corona | - | - | 1838.10 | - |
| NAME | 1838.10 | 1.65 | - | - |
| NAMO | 1837.10 | 1.42 | 1837.10 | - |
| NAMINO | 1815.07 | 0.00 | - | - |
| Control de avenidas | - | 0.23 | - | - |

SRI a partir la información del Sistema de Seguridad de Presas y CONAGUA - IIUNAM, 2019

La presa El Aguacate carece de información histórica en el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) de la CONAGUA, como es de niveles de almacenamiento, volúmenes de extracción y volúmenes de entrada, información que se emplearía para realizar una estimación del comportamiento general del embalse y sus características de regulación.

Debido a que falta información de la presa, que permita caracterizar el comportamiento real de la misma y, con el fin de estimar el funcionamiento para distintos periodos de retorno, se procedió a determinar volúmenes de entrada mediante el empleo del estudio de regionalización de avenidas máximas (Domínguez *et al.*, 2018).

6.1.1. Hidrogramas de entrada

A partir de lluvias de diseño para los periodos de retorno de 100, 500, 1000 y 10,000 años se obtuvieron hidrogramas de entrada al vaso de la presa. El procedimiento para determinar las lluvias mencionadas consiste en: i) establecer la cuenca de aportación, esto mediante herramientas del sistema de información geográfica ArcMap 10.1 con información del modelo digital de terreno del continuo mexicano de elevaciones, y resolución horizontal de 15 por 15 metros; ii) la aplicación de isoyetas (lluvia máxima acumulada a 24 horas) para estimar la lluvia asociada a los periodos de retorno que podría generar escurrimientos hacia el embalse, con los resultados del *Estudio regional* que asocia comportamientos estadísticos similares a los registros históricos de estaciones climatológicas en polígonos y factores regionales, para áreas con características fisiográficas similares.



Figura 6.3.- Cuenca de aportación de la presa y red de drenaje (SRI, 2019)

A partir de esta lluvia se obtuvieron hietogramas para una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca, condición que considera el gasto máximo que ocurre en este lapso. El tiempo de concentración se estima mediante la ecuación de Kirpich:

$$t_c = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$$

Donde:

S = Pendiente del cauce principal adimensional.

L = Longitud del cauce en m.

t_c = Tiempo de concentración en horas.

La pendiente del cauce principal se calculó con la siguiente ecuación

$$S = \left[\frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{l_m}{\sqrt{S_m}}} \right]^2$$

Donde:

L = Longitud total del cauce en m.

S = Pendiente del cauce adimensional.

l_i = Longitud del tramo i .

S_i = Pendiente del tramo i adimensional.

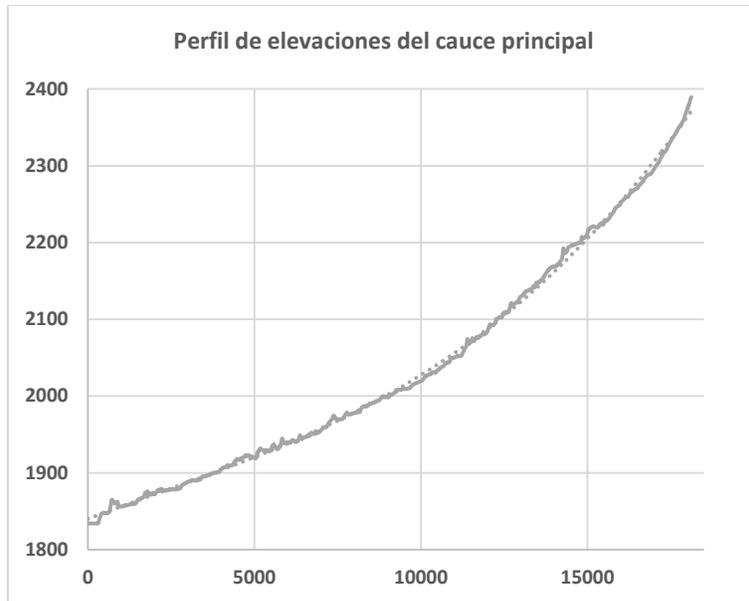


Figura 6.4 .- Perfil del cauce principal de la cuenca de la presa EL Aguacate (SRI, 2019)

La pendiente y tiempo de concentración resultan con los valores de 0.025 y 2.5 horas, respectivamente. La forma de los hietogramas se muestra en la figura 6.5, determinada con los parámetros obtenidos con anterioridad.



Figura 6.5.- Hietogramas de los periodos de retorno analizados para intervalos de diez minutos (SRI, 2019)

Las formas de los hidrogramas fueron determinadas con el programa HechMS (Hydrologic Modeling System) desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica, del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los EE. UU., el software calculó el hidrograma resultante a partir de los datos de precipitación, considerando pérdidas por infiltración mediante el método de número de curva NC, del Soil Conservation Center (SCS). El método del número de curva emplea insumos de uso y tipo de suelo (figura 6.6), así como las condiciones de pendiente.

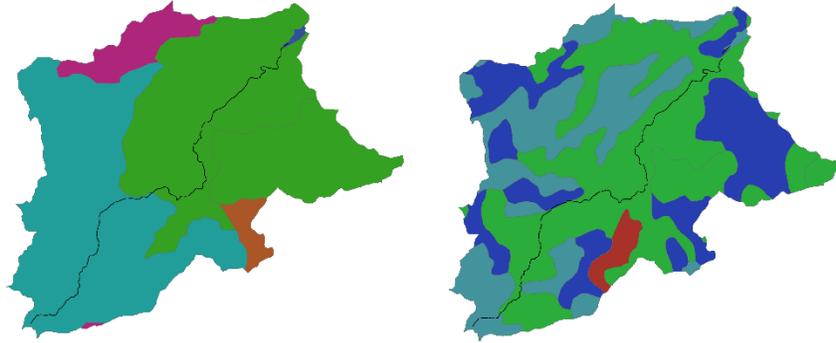


Figura 6.6.- Uso y tipo de suelo dentro de la cuenca presa El Aguacate (SRI con insumos vectoriales de Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2019)

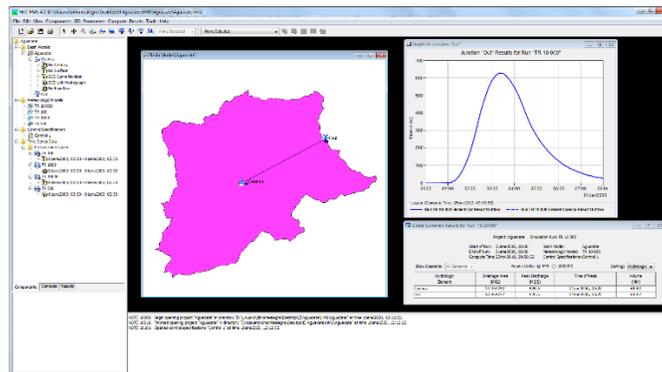


Figura 6.7.-Resultados del cálculo de hidrograma asociado a un periodo de retorno de 10,000 años en HechMS (SRI, 2019)

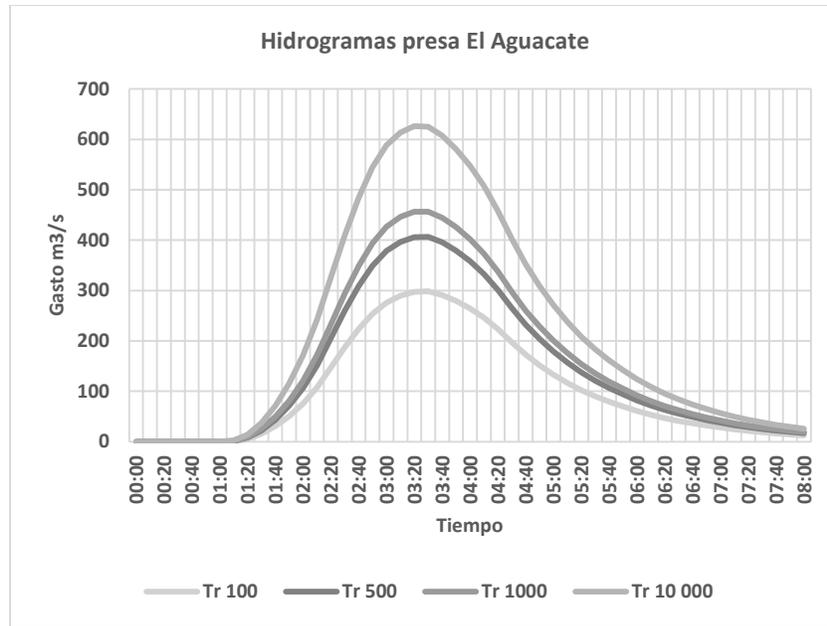


Figura 6.8.- Hidrogramas resultantes para los periodos de retorno analizados (SRI, 2019)

Como se mencionó anteriormente, el gasto de diseño de la presa es de 500 m³/s para un periodo de retorno de 10,000 años, lo que difiere del hidrograma obtenido para este periodo con un valor máximo del orden de 600 m³/s. Es importante mencionar que, dentro del parteaguas de la cuenca no se encuentra una estación climatológica o hidrométrica en las fuentes consultadas (CLICOM, BANDAS), que permitieran realizar una comparación con los valores de lluvia o gastos obtenidos, mediante el empleo de isoyetas y por tato una corrección. Así mismo, aguas arriba de la presa, se observan algunas retenciones de volúmenes de agua y la topografía relativamente elevada respecto a las zonas aledañas. Además, se tomó en cuenta que los cambios de uso de suelo dentro de la cuenca podrían influir en la impermeabilidad dentro de la misma, incrementándose el coeficiente de escurrimiento, por lo que el gasto estimado se encontró justificado.

6.1.2. Tránsito de avenidas en la presa El Aguacate

El tránsito de una avenida funciona como un procedimiento auxiliar para el dimensionamiento de la obra de excedencias, que permite determinar la regulación y el gasto de descarga por vertedores y, con ello, realizar un control de inundaciones. En este caso se utilizó el tránsito de avenidas para estimar los hidrogramas de salida dadas las condiciones de entrada, capacidad de descarga de las obras de desfogue y niveles de almacenamiento en la presa. Se establecieron los parámetros que describen la forma y tiempo de formación de la ruptura de la cortina, que conlleva una gran incertidumbre, debido a que en general existen muy pocos casos a nivel mundial de falla de cortina y que permitan establecer correlaciones entre dichos parámetros y las características de las presas.

Con el fin de establecer el peligro de inundación ante la presencia de una presa en la población de Cuernámaro, se optó por realizar una estimación con la capacidad de desfogue tomando en cuenta algunas consideraciones, principalmente que el nivel de almacenamiento se encontrará al mínimo y que las obras de toma estuvieran completamente abiertas, así como una variación en sus gastos en función de la carga hidráulica.

Datos necesarios

- **Curva elevaciones – almacenamientos**

La curva elevaciones almacenamientos describe la variación de las elevaciones dentro del vaso, en función de los volúmenes, dicha curva fue obtenida mediante las herramientas del sistema de información geográfica ArcMap, con ayuda de un modelo de elevación con resolución de 5 por 5 metros. Con base en la información de niveles y almacenamientos del Sistema de Seguridad de Presas, se realizó un ajuste de la curva para coincidir los niveles reportados con lo obtenidos que resultaron en el siguiente gráfico.

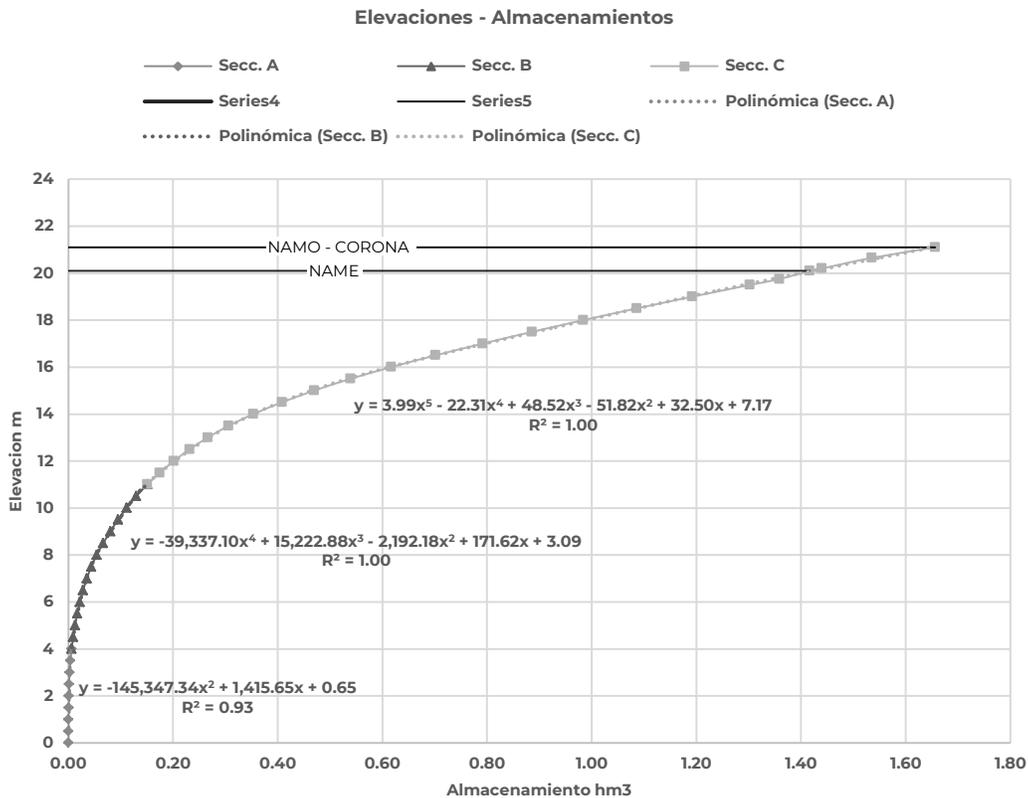


Figura 6.9.- Curva elevaciones - almacenamientos obtenidos para la presa El Aguacate (SRI, 2019)

- **Características de las obras de toma y vertedores.**

- **Vertedor**

Capacidad acumulada de las escotaduras de **62 m³/s**, elevación de la cresta 1837.10 msnm. Longitud equivalente **11 m**, carga máxima **1 m**

- **Obra de toma**

Tubería a presión sin dato de capacidad de descarga y galería de compuerta deslizante capacidad de descarga de **33.30 m³/s**

Simplificaciones del problema

Como se mencionó anteriormente, se consideraron algunas simplificaciones al problema debido a la falta de información; la primera y más importante es el nivel de almacenamiento en el vaso a nivel mínimo de operación; variación de descargas en función de la carga hidráulica; variación de niveles en el vaso según la curva elevaciones – almacenamientos, resultados del tránsito de avenidas; coeficientes de descarga de vertedor y galería calculados con el gasto máximo de descarga, no se consideraron pérdidas de energía. Los cálculos se muestran a continuación:

Coefficiente de descarga del vertedor

$$C = \frac{Q_{Max}}{L * H_{Max}^{3/2}}$$
$$C_v = 5.6$$

Coefficiente de descarga de la galería con compuerta

$$Q = AC\sqrt{2gH}$$
$$C = \frac{Q}{A\sqrt{2gH}}$$
$$C_{G.C} = 0.74$$

Coefficiente de descarga de la tubería a presión

Ya que se carece del dato de capacidad de descarga de la tubería a presión se considera $C_{T.P} = 1$

La capacidad máxima de descarga por obra de toma se muestra en el siguiente gráfico, en él se observa una diferencia considerable entre la galería y la tubería a presión de descarga por la diferencia de áreas, la tubería a presión apenas descarga menos de 5 metros cúbicos, asumiendo que la información sobre la obra de toma sea correcta.

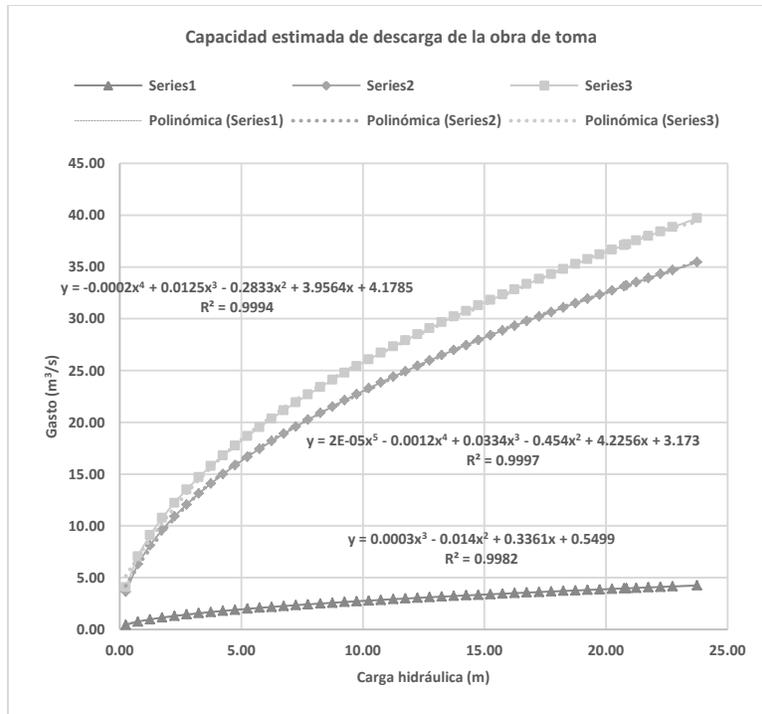


Figura 6.10.- Capacidad de descarga de las obras de toma y excedencias en función de la carga hidráulica (SRI, 2019)

Los resultados del tránsito de avenidas se resumen en los gráficos 6.11, 6.12, 6.13 y 6.14, en éstos se observa que incluso para un periodo de retorno de 100 años se presenta el desborde de la presa al superarse los niveles de almacenamiento (línea naranja) por encima de la elevación de la corona (línea amarilla), aunque existe una regulación, no sólo de los volúmenes sino también disminuye el gasto pico de 300 m³/s a 200 m³/s a la salida de la presa. En los demás periodos se tiene un gasto pico del orden de entrada y levemente mayores, un factor de importancia es el tiempo en que se presenta el incremento en el cauce, el cual es reducido.

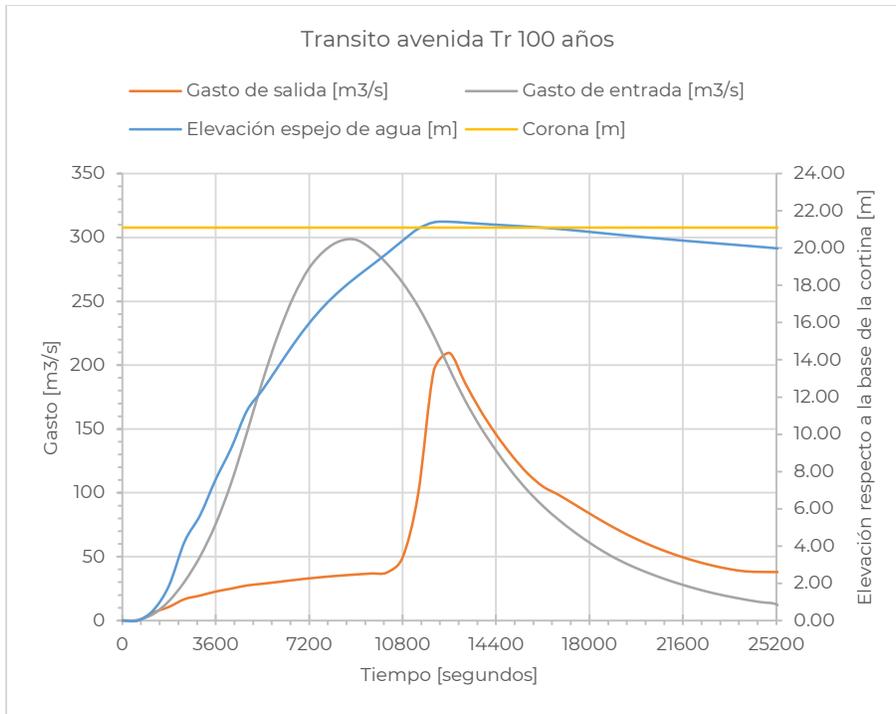


Figura 6.11.- Hidrogramas de entrada y salida, y variación del nivel de agua en el vaso presa EL Aguacate, Tr 100 años (SRI, 2019)

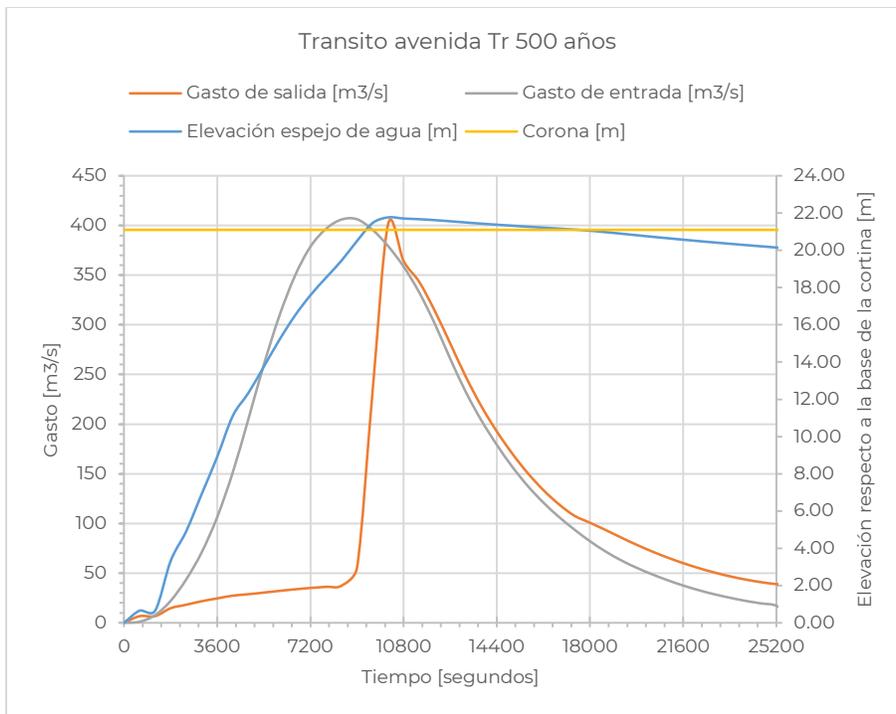


Figura 6.12.- Hidrogramas de entrada y salida, y variación del nivel de agua en el vaso presa EL Aguacate, Tr 500 años (SRI, 2019)

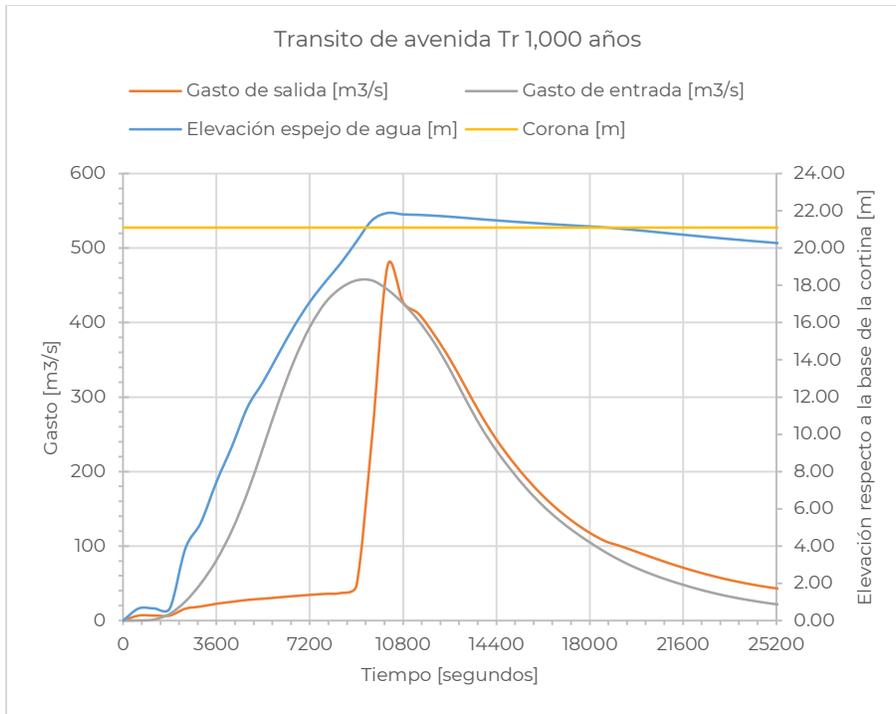


Figura 6.13.- Hidrogramas de entrada y salida, y variación del nivel de agua en el vaso presa EL Aguacate, Tr 1,000 años (SRI, 2019)

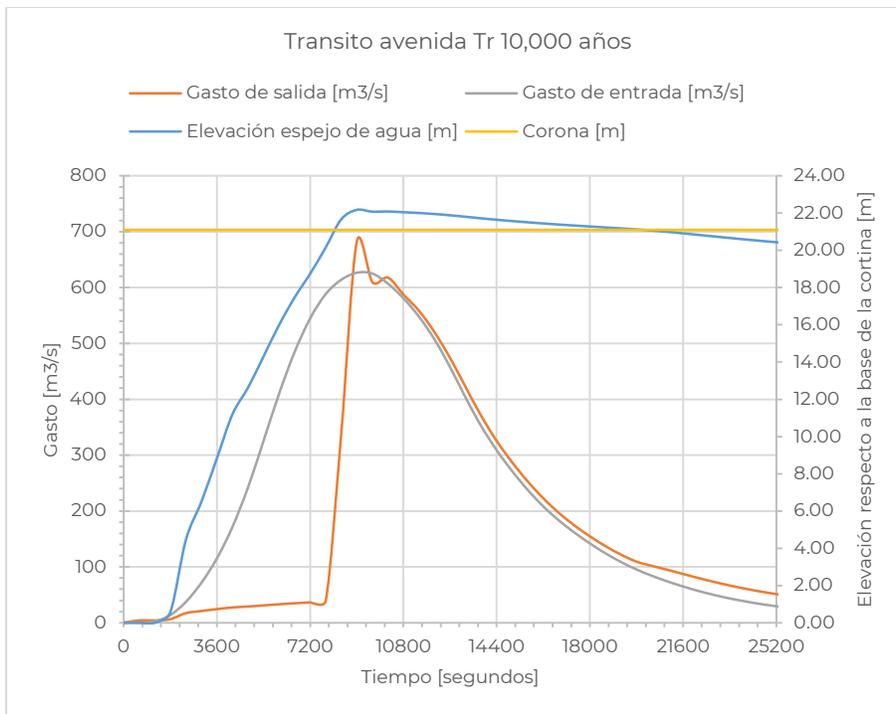


Figura 6.14.- Hidrogramas de entrada y salida, y variación del nivel de agua en el vaso presa EL Aguacate, Tr 10,000 años (SRI, 2019)

6.1.3. Mapas de inundación

Los hidrogramas de salida (líneas naranja de los gráficos 6.12 a 6.14) anteriores se ingresaron al modelo generado en el programa Iber de la Universidad Politécnica de Cataluña, para realizar el tránsito dentro de cauce y determinar las zonas de inundación.

En los casos analizados se consideró que la presa se encontraría en niveles mínimos de operación, así como variación de volúmenes de extracción en función de la carga hidráulica, sin bien esto no refleja la condición más desfavorable ni una política de operación de ésta, permitiría ver la capacidad de regulación de la presa. En un primer caso se modeló la presencia de la cortina sin obras de toma y de excedencias (figura 6.15), se observó un tiempo de cálculo elevado aún con tamaños de malla relativamente grandes (20 metros).

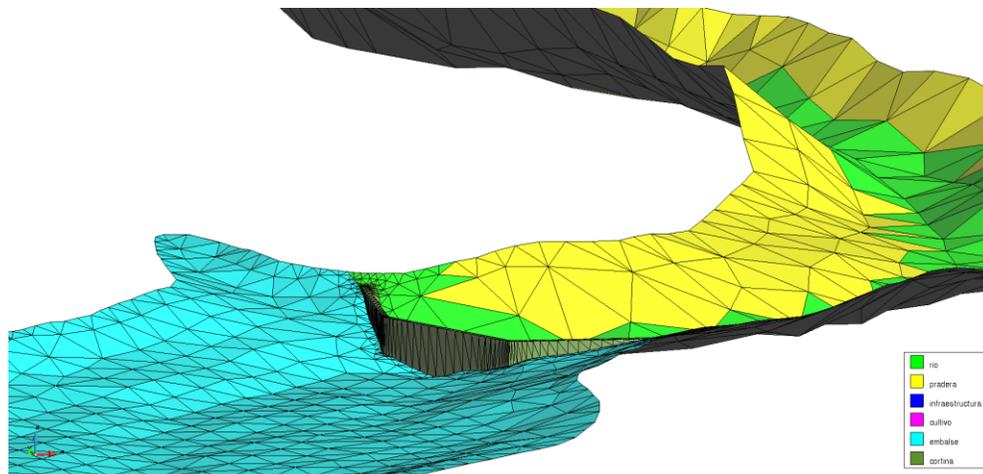


Figura 6.15.- Modelación de la cortina de la presa (SRI, 2019)

A partir de los resultados de esta primera simulación hidráulica se determinó el área adecuada de mallado. En el segundo modelo generado se omitió la cortina de la presa, ingresando los resultados del tránsito de avenidas como condición de contorno. Las envolventes de los resultados de la simulación para cada periodo de retorno se muestran en las figuras 6.16, 6.17 y 6.18.

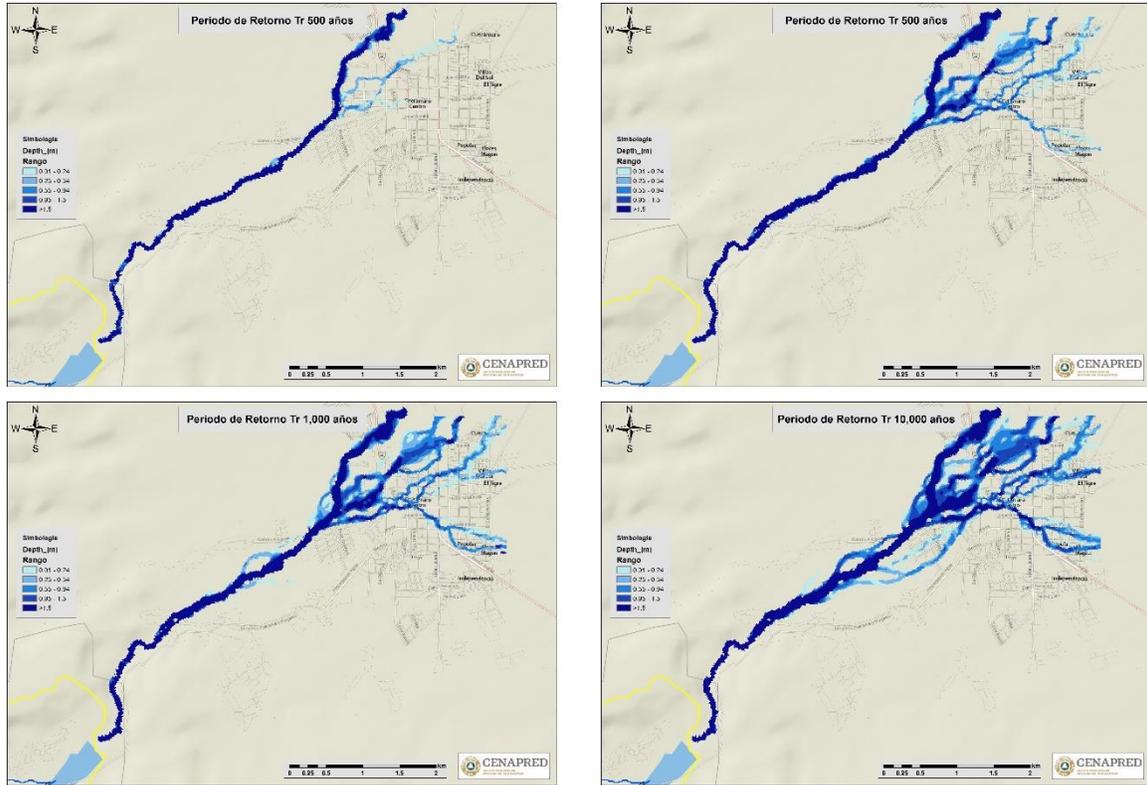


Figura 6.16.- Mapas de profundidades obtenidos para la presa El Aguacate, en la comunidad de Cuernámaro. (SRI, 2019)

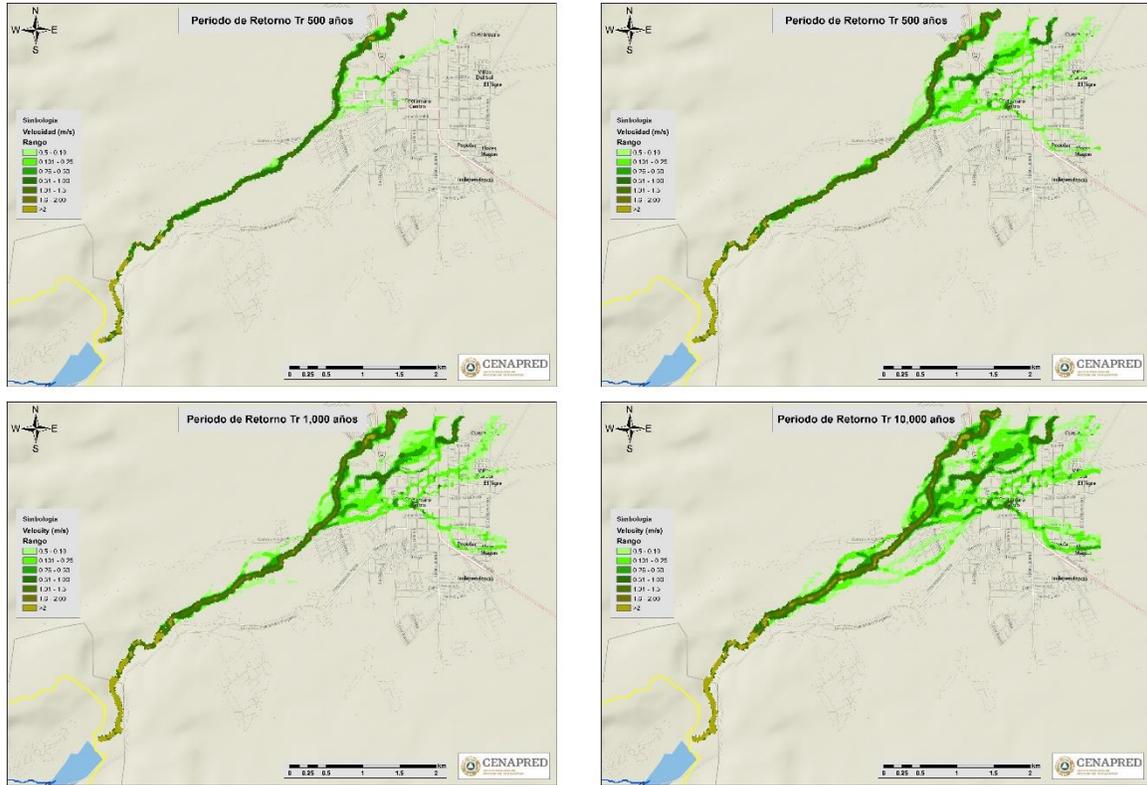


Figura 6.17.- Mapas de velocidades para la presa El Aguacate en la comunidad de Cuernavaca (Fuente: SRI, 2019)

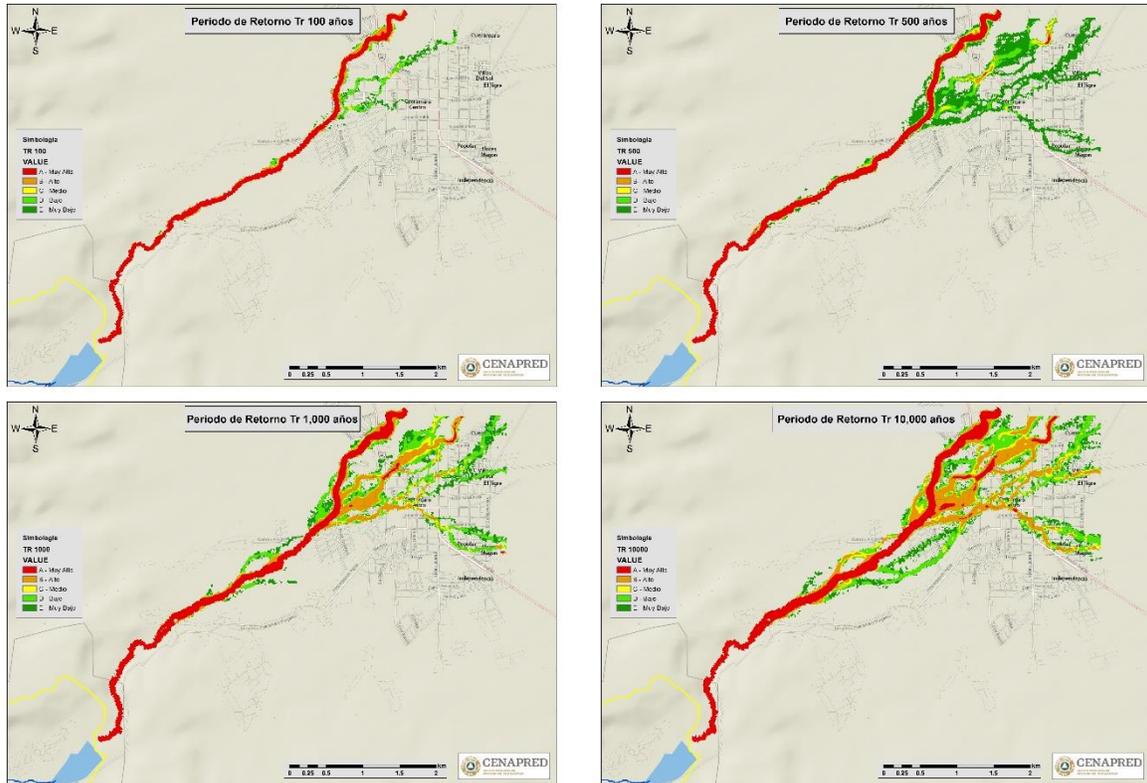


Figura 6.18.- Mapa de severidad para la presa El Aguacate en la comunidad de Cuernavaca (SRI, 2019)

Del análisis de bienes expuestos, la población y número de viviendas que podrían ser afectadas, se encuentran en la tabla 6.2.

Tabla 6.2.- Población y número de viviendas con posibles afectaciones para cada periodo de retorno presa El Aguacate

| TR (años) | Población | Viviendas |
|-----------|-----------|-----------|
| 100 | 4, 463 | 1, 533 |
| 500 | 12, 941 | 4, 304 |
| 1000 | 12, 941 | 4, 304 |
| 10, 000 | 13, 239 | 4, 392 |

SRI, 2019

6.2. Presa Infiernillo

El desarrollo del sistema hidroeléctrico Presidente López Mateos, *Infiernillo*, comenzó en 1960, se ubica a 70 km de la desembocadura del río Balsas, con una potencia instalada de 920 MW, y dos líneas de transmisión de 400 kW hacia la Ciudad de México. La presa cuenta con una altura de 145 m de altura, está construida con base en enrocamiento con un núcleo central de arcilla compactada, para su obra de desfogue se tienen tres túneles con una capacidad de descarga de diseño de 13,400 m³/s.

A finales de septiembre de 1967 se presentó una avenida extraordinaria en el río Balsas, con gasto de entrada de 25,200 m³/s, que se regularizó a un caudal máximo de salida de 7,500 m³/s; fue necesario operar compuertas radiales parcialmente abiertas para reducir la descarga de los vertedores al valor mencionado, con el fin de proteger la presa localizada aguas debajo de José Ma. Morelos, *La Villita*, que estaba en proceso de construcción (C F E, 1969).



Figura 6.19.- Vista aérea de la cortina y túneles de desfogue de la presa Infiernillo (Sistema de Seguridad de Presas, 2012)

6.2.1. Consideraciones para el análisis de la presa Infiernillo

Para el caso de Infiernillo el BANDAS de la CONAGUA cuenta con información sobre algunos niveles y volúmenes, que si bien, se encuentran incompletos o en algunos campos la base de datos carece de información, la cual nos facilitaría la estimación de un escenario de inundación por el desfogue de la presa. Se trabajó con el material encontrado y se realizó el análisis de las condiciones de descarga de la obra de excedencias.

Este banco de datos cuenta con un índice que muestra la clave de la presa de interés, los años con registros y un documento descriptivo de los campos y claves de la información. En la figura 6.20 se muestra la interfaz del sitio en internet donde se obtuvieron los datos de presas y ríos.

🏠 > Comisión Nacional del Agua > Acciones y Programas > Programa Nacional Contra Contingencias Hidráulicas (PRONACCH)

Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS)

Martes, 18 de Febrero de 2020



| |
|--------------------------------------|
| Catálogo de estaciones hidrométricas |
| Descripción de campos hidrometría |
| Bases de datos hidrométricas |
| Planos hidrológicos |
| Catálogo de presas |
| Descripción de campos de presas |
| Bases de datos de presas |

Autor
Comisión Nacional del Agua
Fecha de publicación
31 de julio de 2016

Figura 6.20.-Portada de la plataforma del BANDAS (CONAGUA, 2016)

En cualquier estudio es necesario obtener una curva Elevaciones-Volúmenes, con los datos medidos en la presa, esto en ocasiones es difícil debido a las condiciones cambiantes del embalse, las cuales pierden capacidad de almacenamiento debido a la acumulación de sedimentos o cambios morfológicos alrededor del mismo, o las diferentes políticas de operación establecidas a lo largo de los años, éstas pueden cambiar en función de diversos factores, tales como: a) las condiciones estructurales de compuertas y cortina de la presa, b) situación hidrológica de la cuenca o el uso y concesión del agua, entre otros factores; lo que complica la medición de las cantidades, tanto de agua como de sólidos. No obstante, se trabajó con los datos diarios de niveles desde 1963 hasta 1999, se omitieron los huecos de los meses y años faltantes, los cuales son relativamente pocos. Se obtuvieron los máximos anuales, a partir de los máximos mensuales. Al conjunto de datos del nivel máximo anual se le aplicó un ajuste de funciones de probabilidad para obtener niveles asociados a periodos de retorno, que en este caso fue doble Gumbel, la cual se observa en la figura 6.21.

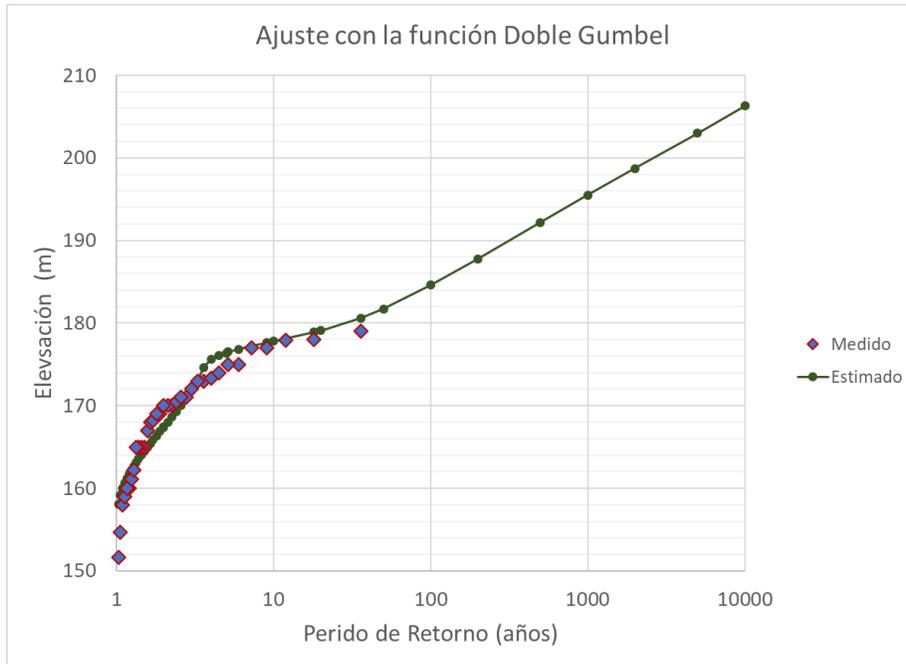


Figura 6.21.-Gráfico del ajusté de la función de probabilidad a los datos de nivel del embalse (SRI, 2019)

La figura 6.22 muestra los datos medidos y los resultados del ajuste de la función Doble Gumbel, además de su periodo de retorno y su error cuadrático.

Errores cuadráticos Archivo: ele.txt

| i | Tr | Dato | Calculada | Error ² |
|----|------|--------|-----------|--------------------|
| 12 | 3 | 172 | 171.9 | .01 |
| 13 | 2.77 | 171 | 170.9 | .01 |
| 11 | 3.27 | 173 | 173.1 | .01 |
| 5 | 7.2 | 177 | 177.21 | .04 |
| 3 | 12 | 177.93 | 178.15 | .05 |
| 28 | 1.29 | 162.2 | 162.67 | .22 |
| 24 | 1.5 | 165 | 164.47 | .28 |
| 4 | 9 | 177 | 177.63 | .39 |
| 2 | 18 | 178 | 178.93 | .86 |
| 14 | 2.57 | 171 | 170.05 | .9 |
| 25 | 1.44 | 165 | 164.02 | .95 |
| 29 | 1.24 | 161.1 | 162.2 | 1.21 |
| 31 | 1.16 | 160 | 161.19 | 1.42 |
| 15 | 2.4 | 170.5 | 169.3 | 1.45 |
| 16 | 2.25 | 170 | 168.62 | 1.92 |
| 26 | 1.38 | 165 | 163.58 | 2.03 |
| 7 | 5.14 | 175 | 176.5 | 2.24 |
| 1 | 36 | 179 | 180.61 | 2.59 |
| 10 | 3.6 | 173 | 174.62 | 2.63 |
| 32 | 1.13 | 159 | 160.62 | 2.64 |
| 30 | 1.2 | 160 | 161.71 | 2.93 |
| 34 | 1.06 | 154.66 | 159.2 | 20.61 |
| 6 | 6 | 176 | 176.85 | 3.41 |

Parámetros estadísticos de la muestra:
 $\mu = 168.42$ $\sigma = 6.89$ $\gamma = -0.564$ $\kappa = 2.963$

Parámetros de la función: Doble Gumbel

| Parámetro | Afa1 | Beta1 | Afa2 | Beta2 |
|-----------|----------|----------|----------|----------|
| * Valor | 0.211334 | 163.8422 | 0.943214 | 176.7098 |

Error estándar = 2.21

Cerrar Extrapolar Graficar Imprimir

Figura 6.22.- Imagen del ajuste de los datos a la función Doble Gumbel (SRI, 2019)

Se tomaron cuatro periodos de retorno para el análisis, desde el $Tr=100$ años, ya que se supone que la presa es capaz de contener los volúmenes para las elevaciones asociadas a los Tr 's menores, después el de 500 y 1000 años, debido a la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos, los cuales pueden estar asociados a éstos y por último el de 10,000 años, que es con el que se diseñan los vertedores y obras de excedencia.

Tabla 6.3.- Periodos de retorno (Tr) obtenidos del ajuste de la función Doble Gumbel

| | Tr | Elevaciones |
|----|-----------|--------------------|
| 1 | 2 | 167.4 |
| 2 | 5 | 176.4 |
| 3 | 10 | 177.8 |
| 4 | 20 | 179.1 |
| 5 | 50 | 181.7 |
| 6 | 100 | 184.6 |
| 7 | 200 | 187.8 |
| 8 | 500 | 192.2 |
| 9 | 1000 | 195.5 |
| 10 | 2000 | 198.7 |
| 11 | 5000 | 203 |
| 12 | 10000 | 206.3 |

SRI, 2019

Los niveles de referencia de la cortina como son el Nivel de Aguas Máximo Ordinario (NAMO) y el Nivel de Aguas Máximo Extraordinario (NAME), se encuentran en las cotas 169 y 183.2 m.s.n.m., respectivamente. La altura de la cortina es 184 m.s.n.m., las variaciones que existen entre la estructura y los niveles ordinario y extraordinario se establecieron para realizar una operación óptima y, con ello, contener las variaciones producidas por oleaje o efectos externos como sismos; el nivel de la cresta del vertedor es 154 m.s.n.m.

Las figuras 6.23 y 6.24 muestran las características de la cortina al momento de su terminación y después de una sobrelevación realizada por medio de un terraplén en 1985.

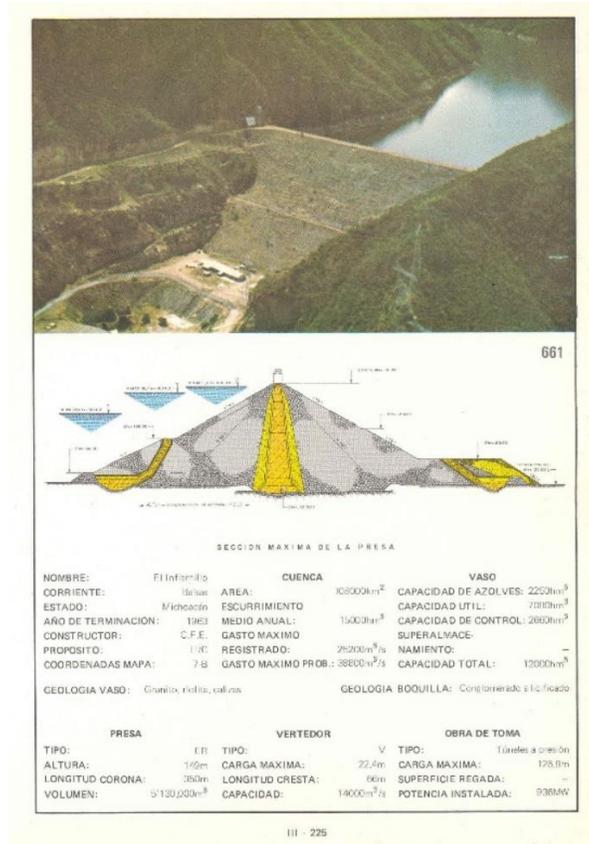


Figura 6.23.-Características generales de la presa después de su terminación (CONAGUA, 2012)

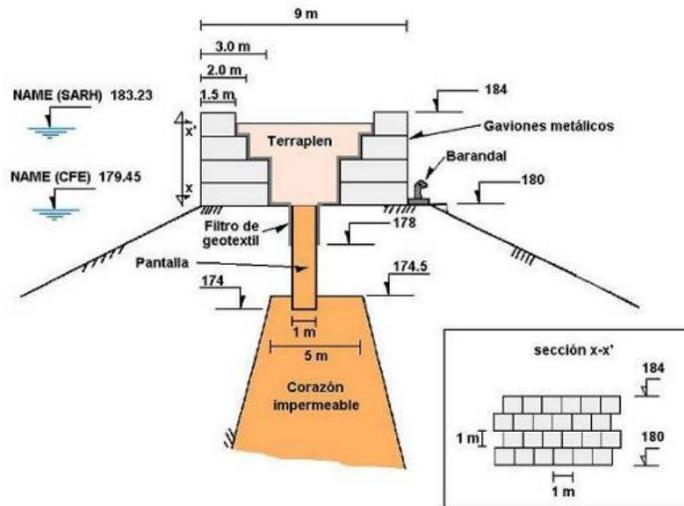


Fig. 10. Sobreelevación de la cortina (1985).

Figura 6.24.- Características de la corona con sobreelevación (CONAGUA, 2012)

Por medio de la ecuación de compuertas se estimó el gasto máximo que pasara por el vertedor.

$$Q = C_d b a \sqrt{2g y_1}$$

Donde:

Q ; es el gasto en m^3/s

C_d ; es el coeficiente de descarga

b ; es el ancho de la compuerta en m.

a ; es la apertura en m.

g ; es la aceleración de la gravedad en m/s^2

y_1 ; es la altura de agua sobre la compuerta o carga hidráulica en m.

Para la estimación del coeficiente de descarga se utilizó el nomograma de la figura 6.25, la carga hidráulica se estimó restando la altura de la cresta del vertedor a las elevaciones asociadas a los periodos de retorno en análisis, la cual se relacionó con la apertura de la compuerta, que para todos los gastos se consideró del 40 por ciento, debido a que ésta es la apertura óptima máxima, que permite la mayor cantidad de salida del agua sin comprometer la seguridad o estabilidad de la compuerta.

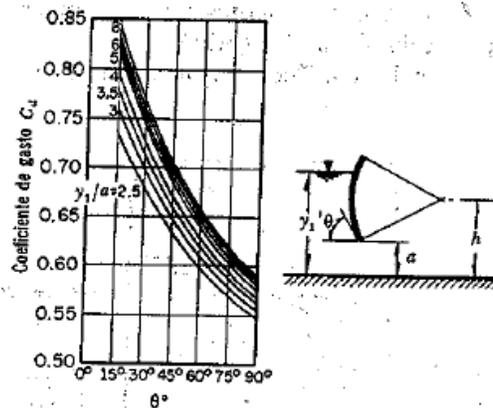


Figura 6.25.- Nomograma de coeficientes de descarga en compuertas radiales (Sotelo, 1997)

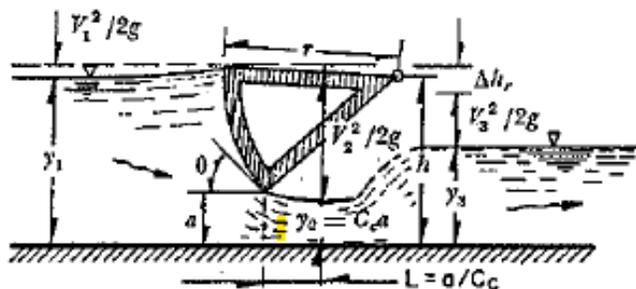


Figura 6.26.- Esquema de las características hidráulicas en una compuerta radial (Sotelo, 1997)

Con los niveles en el embalse asociados a los periodos de retorno y las características de las compuertas radiales, que se obtienen por medio de la teoría hidráulica de vertedores, es posible obtener los gastos que estaría desalojando la presa por medio de la obra de excedencias.

La tabla 6.4 muestra las elevaciones asociadas Tr 's, la carga que la misma genera sobre el vertedor, las relaciones entre esa altura de agua y la apertura de la compuerta; el gasto por compuerta y el que producen en conjunto los nueve dispositivos sobre los tres vertedores, es de resaltar que el gasto obtenido para el periodo de retorno de 10, 000 años es de 11,605 m³/s comparado con el de diseño con el mismo Tr que es de 13,400 m³/s, es menor en un 11%, lo cual se justifica debido a que el nuevo valor se obtuvo con los niveles históricos del embalse, siendo que éstos contemplan los ingresos a la presa, así que se considera adecuado.

Tabla 6.4.- Características de descarga en las compuertas radiales por periodo de retorno

| Tr | Elevación | y_1 | y_1/a | C_d | Q_u | Q_t |
|-------|-----------|-------|---------|-------|----------|-----------|
| 100 | 184.6 | 30.6 | 4.78 | 0.81 | 939.95 | 8,459.59 |
| 500 | 192.2 | 38.2 | 5.97 | 0.825 | 1,069.66 | 9,626.96 |
| 1000 | 195.5 | 41.5 | 6.48 | 0.83 | 1,121.66 | 10,094.99 |
| 10000 | 206.3 | 52.3 | 8.17 | 0.85 | 1,289.53 | 11,605.76 |

Fuente: SRI, 2019

Una vez obtenido el gasto que pasara por el vertedor, es necesario darle forma al hidrograma, es decir, se debe construir una curva donde se observe cómo evoluciona el volumen de agua por unidad de tiempo, hasta llegar al máximo y cómo dejara de pasar dicho gasto. Existen diversas maneras de realizar esto, una es elaborar la simulación de líneas de escurrimiento sobre el vertedor, la utilizada en el estudio fue construir una curva unitaria de derrames con base en registros históricos. Para infiernillo sólo se encontró un evento de este tipo en 1985, el cual se muestra en la figura 6.27 y tuvo una duración de 10 días con un gasto máximo de 10,912 m³/s.



Figura 6.27.- Hidrograma de derrame en la presa Infiernillo evento de 1985 (BANDAS, 2019)

Se tomó como base el derrame del evento histórico y los gastos para cada periodo de retorno, así como se elaboraron los hidrogramas de la figura 6.28 que se utilizaron posteriormente en el modelo hidráulico.

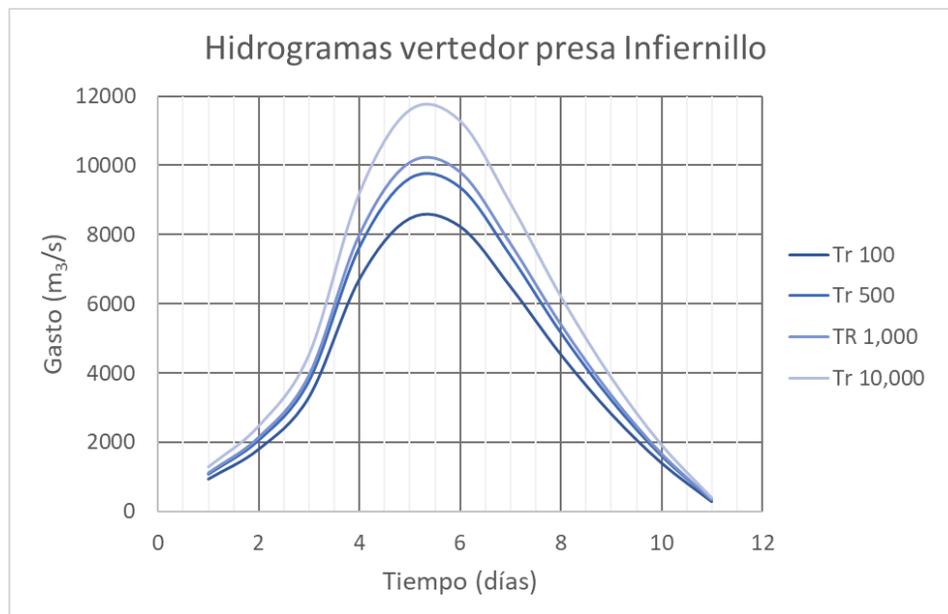


Figura 6.28.- Hidrogramas de desfogue, asociados a distintos periodos de retorno en la presa Infiernillo (SRI, 2019)

6.2.2. Modelo hidráulico para la obtención del peligro

El modelo para la simulación hidráulica que se decidió hacer fue en dos dimensiones, ya que con éste se pueden observar flujos secundarios que retorne sobre el cauce y la penetración o influencia del caudal de desfogue en los arroyos y afluentes del río Balsas, en el cual vierte la presa en estudio. Así mismo, se utilizó el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) del INEGI, con resolución de 15 m en la horizontal y 1 m en la vertical, el dominio original fue una cuenca con área de 1,510.4 km² entre las cortinas de las presas *Infiernillo* y *La Villita*, como se muestra en la figura 6.29.

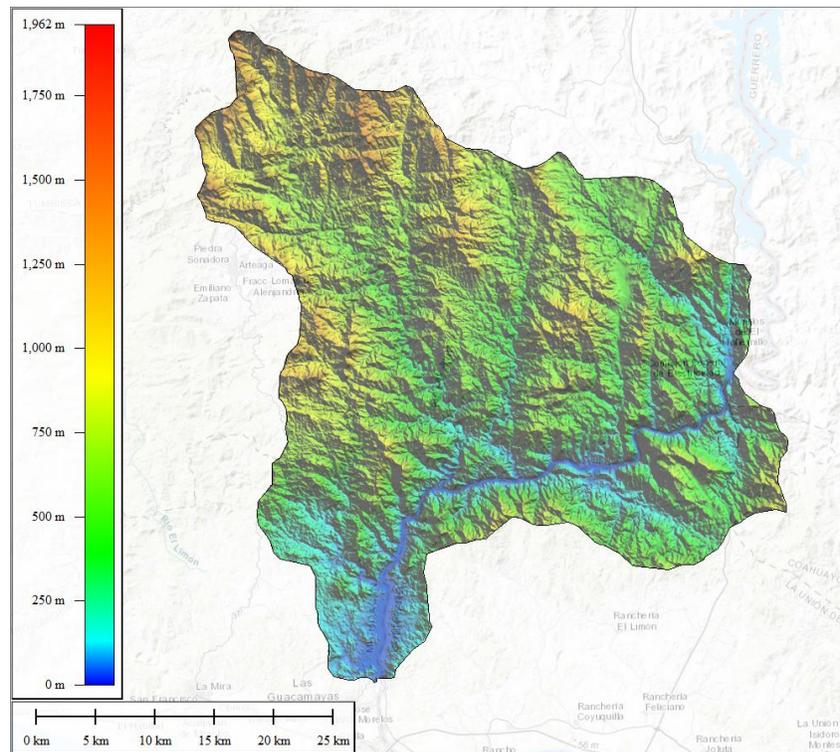


Figura 6.29.- Cuenca entre las presas Infiernillo y La Villita (SRI, 2019)

Se intentó utilizar el software Iber de Universidad Politécnica de Cataluña, pero debido al sistema de construcción de mallas de cálculo de dicho programa, el tamaño y resolución del área, no se obtuvo un modelo óptimo con el que se pudiera trabajar, por lo que se optó por el módulo bidimensional de HEC-RAS, aplicación desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos U.S.A. ARMY, ya que se emplea comúnmente para el tránsito de ríos en una dimensión. Se trabajó con una malla estructurada, compuesta por polígonos con lados de 25 m por lado, de igual manera se tuvieron problemas con la escala de la cuenca, por lo que fue necesario delimitar el área de estudio sólo a las cercanías del cauce principal y se eliminaron zonas altas con pendientes abruptas. Cabe mencionar que, no se realizó delimitación por medio de una cota, ya que ésta genera protuberancias o salidas

debido a los cauces que generan conflicto y problemas durante cálculo. El área de la simulación se presenta en la figura 6.30.

La figura 6.31 muestra la interfaz de HEC- RAS con la superficie de cálculo final, este software permite utilizar sistemas de referencia geográfica, por lo que se pueden manejar imágenes satélites o topográficas georreferenciadas. Además, permite la exportación de los resultados para su tratamiento en SIG´s.

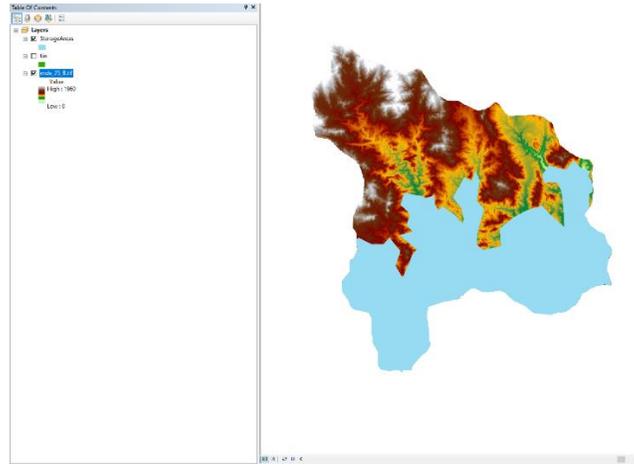


Figura 6.30.- Delimitación de la superficie de cálculo con sistema de Información Geográfica (SRI, 2019)

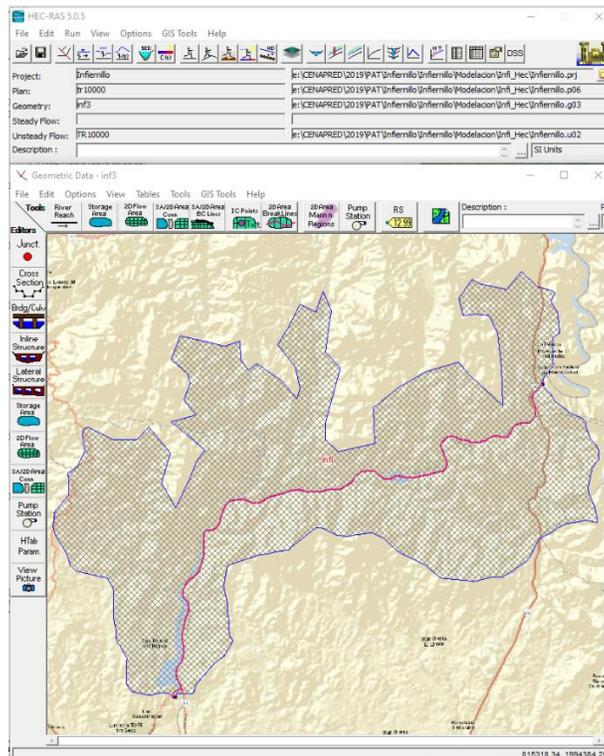


Figura 6.31.-Polígono de la superficie final del cálculo en la interfaz de HEC-RAS (SRI, 2019)

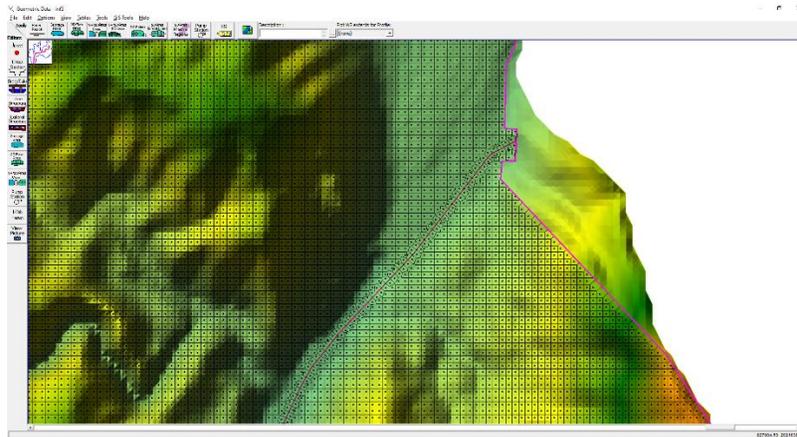


Figura 6.32.- Acercamiento a la superficie de cálculo sobrepuesta en el modelo de terreno (SRI, 2019)

En la figura 6.32 se tiene un acercamiento de la malla de cálculo sobrepuesta en el terreno, se observan los nodos centrales y el refinamiento que se hizo mediante una línea de quiebre, la cual se dibujó sobre el eje del cauce principal, esto permite obtener resultados más precisos de profundidad y velocidad a lo largo del mismo, permitiendo también que los resultados en las áreas de desborde aledañas al cauce o de influencia en los ríos sean más exactos.

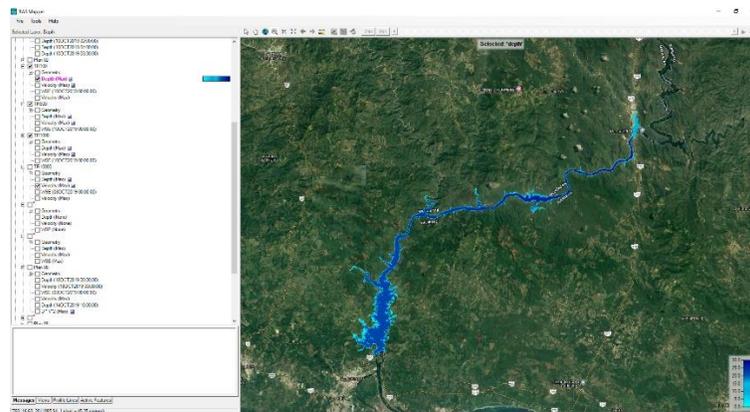


Figura 6.33.- Vista general de los resultados obtenidos de la simulación del Tr 100 años (SRI, 2019)

En la figura 6.33 se observa una vista general de las profundidades que se obtuvieron para el periodo de retorno de 100 años, a lo largo de 50 km de cauce, entre la obra de desfogue de Infiernillo y el embalse de la presa la Villita, es importante mencionar que, la altura de la cresta del vertedor de esta última presa, se caracterizó en la malla de cálculo, dejando como condición el libre vertido y no la operación de compuertas, simplificación que se realizó para evitar el análisis del funcionamiento de esa obra de desfogue, simplificación que se puede considerar errónea, pero se justifica con el desconocimiento de la operación que deben de establecer las autoridades pertinentes durante un evento de este tipo, así que para la obtención de peligro se cree adecuada esta suposición, ya que establece una de las condiciones más desfavorables.

6.2.3. Mapas de peligro por inundación

A continuación, se presentan los mapas de peligro por inundación obtenidos por el desfogue de la presa *Infiernillo*, para los niveles asociados a los periodos de retorno de 100, 500, 1,000 y 10,000 años. Se muestran las variables de profundidad, velocidad y severidad por inundación, esta última obtenida mediante el nomograma de Dorrigo, esquema utilizado para asignar una clasificación cualitativa a las características perjudiciales del peligro por inundación.

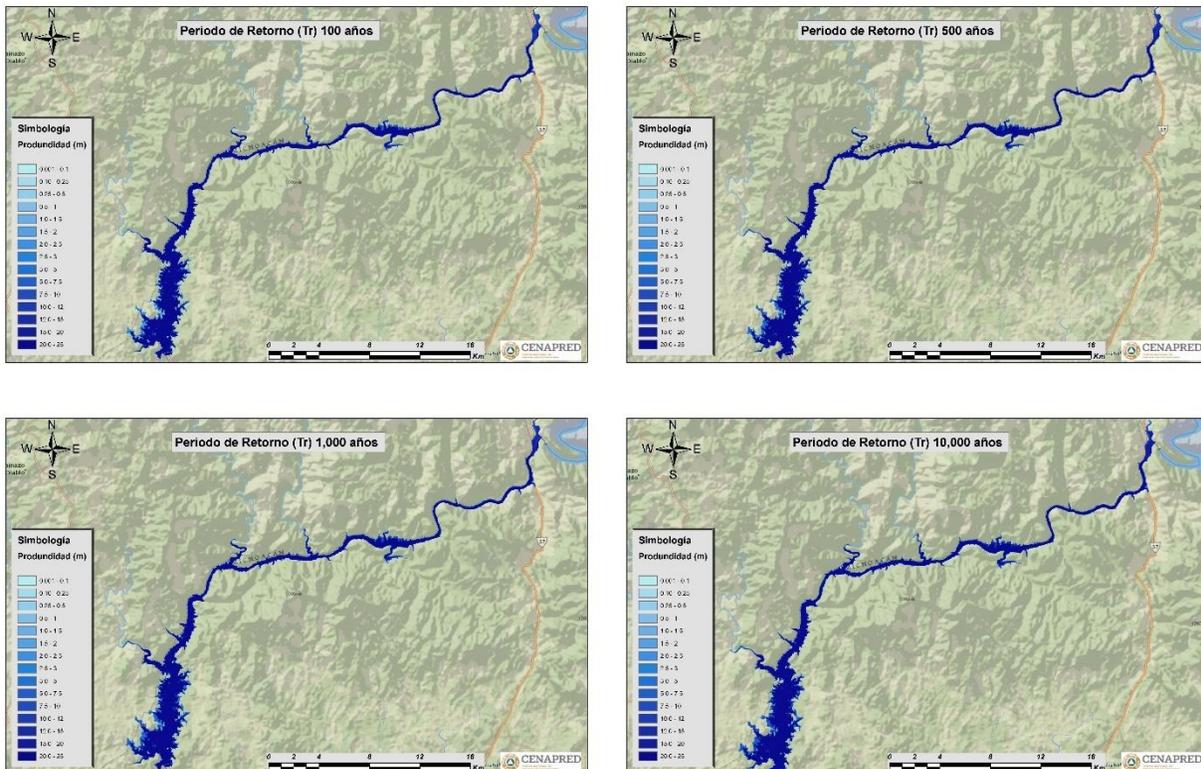


Figura 6.34.- Mapas de profundidades obtenidos entre las presas Infiernillo y La Villita (SRI, 2019)

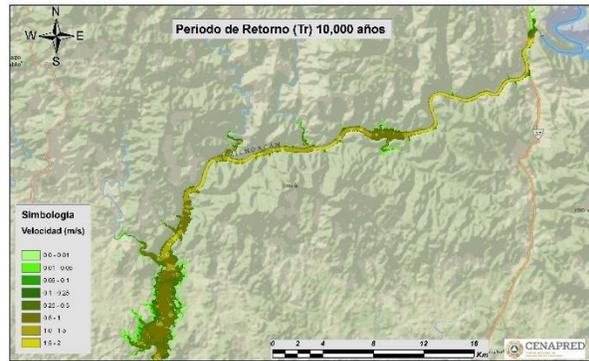
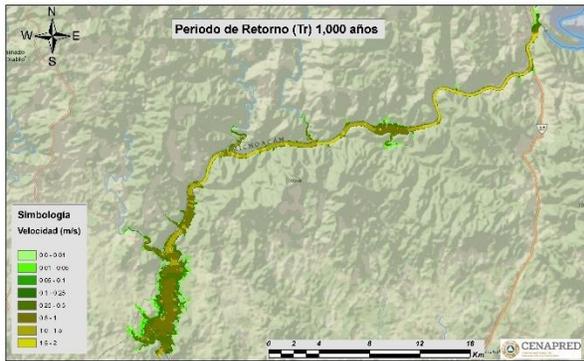
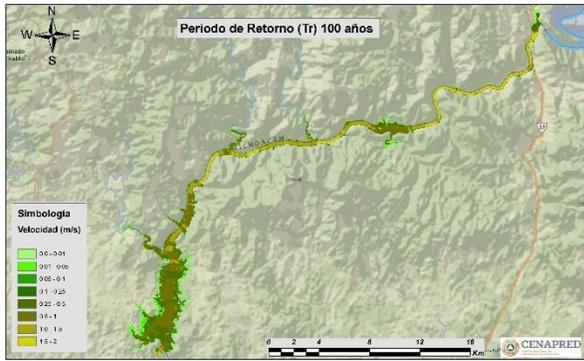


Figura 6.35.-Mapas de velocidades obtenidos entre las presas Infiernillo y La Villita (SRI, 2019)

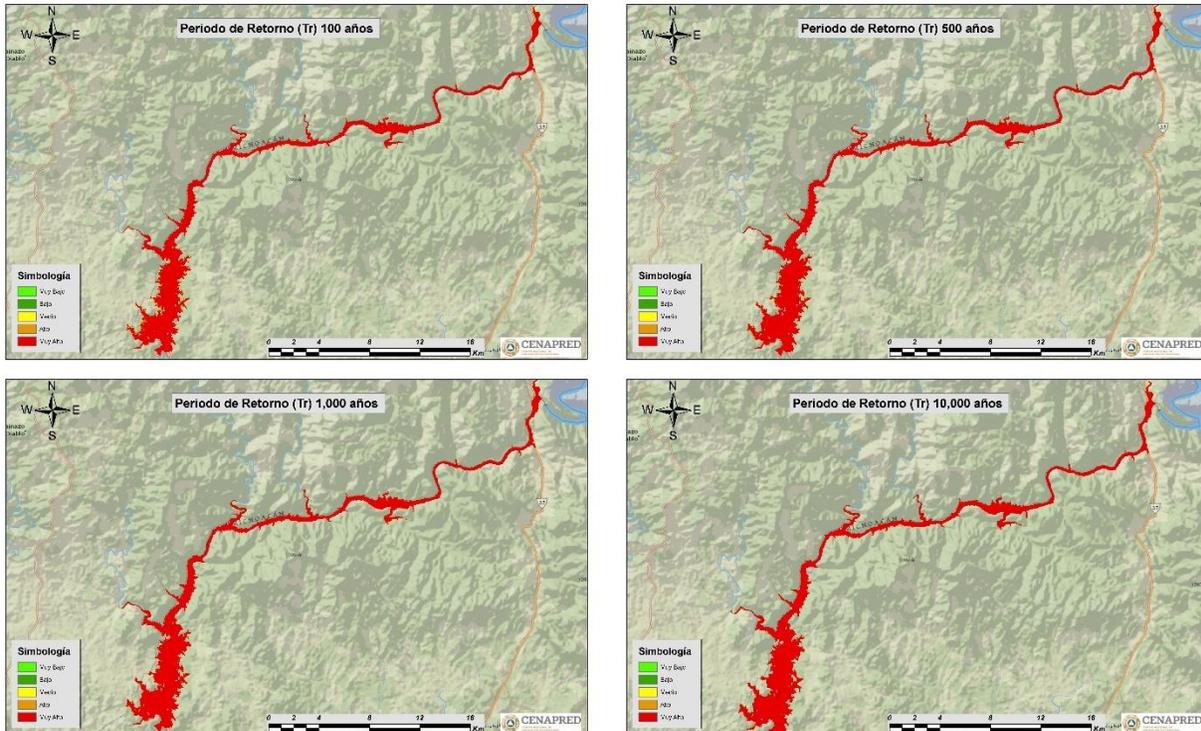


Figura 6.36.-Mapas de severidad obtenidos entre las presas Infiernillo y La Villita (SRI, 2019)

Debido a la escala del modelo hidráulico no se alcanzó a distinguir con claridad los cambios de profundidad o severidad entre los distintos escenarios en análisis, lo contrario sucedió para las velocidades, en las cuales se observó de manera adecuada el comportamiento del flujo, acelerado a la salida del vertedor y en las secciones encañonadas del cauce, mientras que fue lento en las grandes áreas o con profundidades mayores. Por lo anterior, se hizo un acercamiento a la zona de la infraestructura de la CFE y el poblado de Infiernillo, lo cual se muestra en las siguientes imágenes.

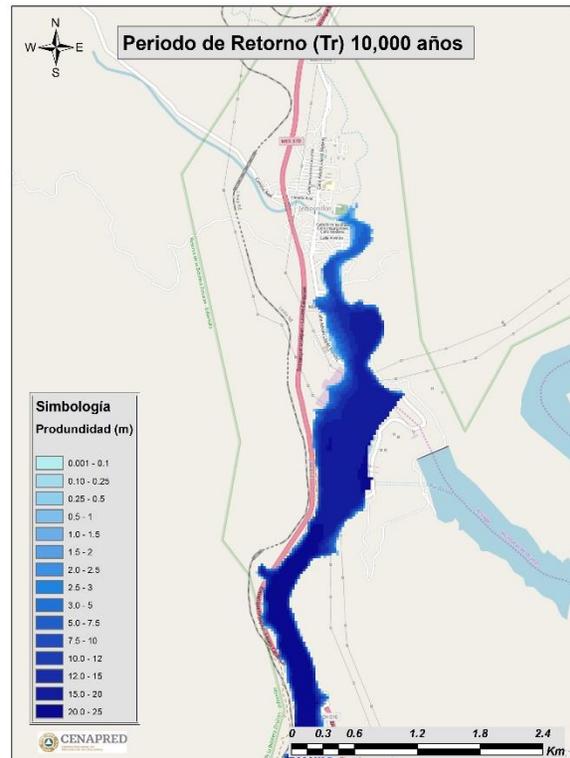
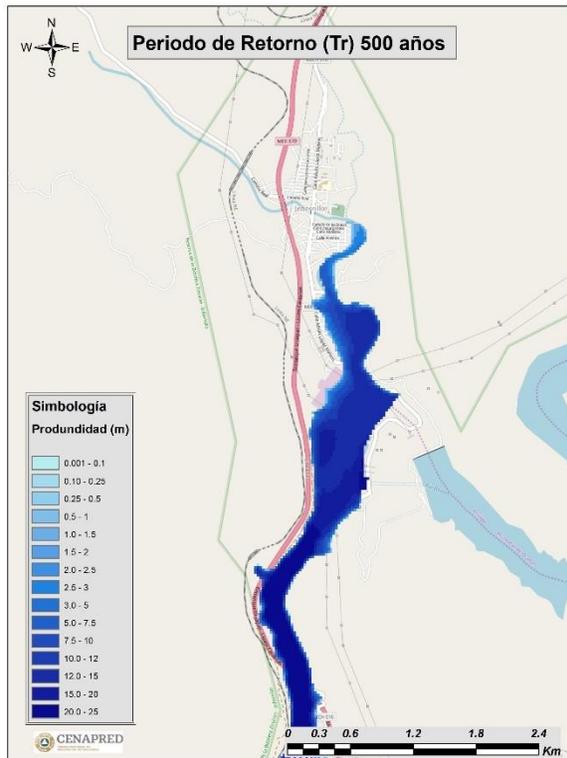
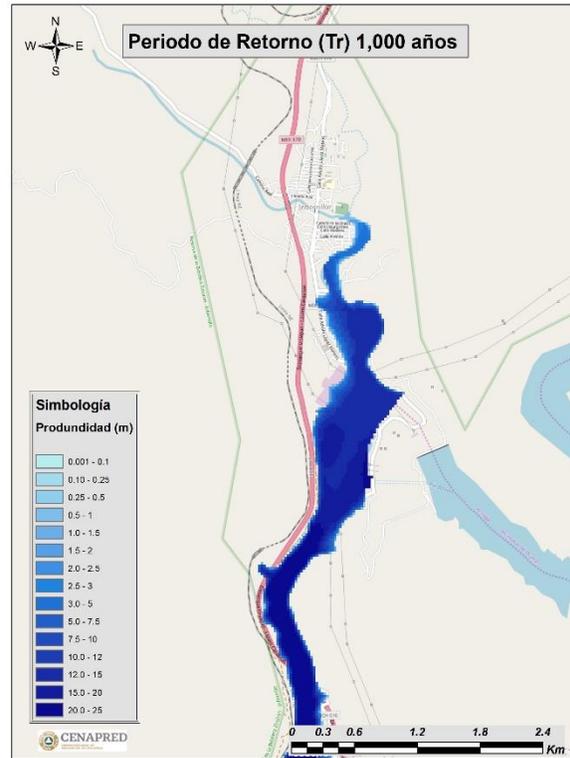
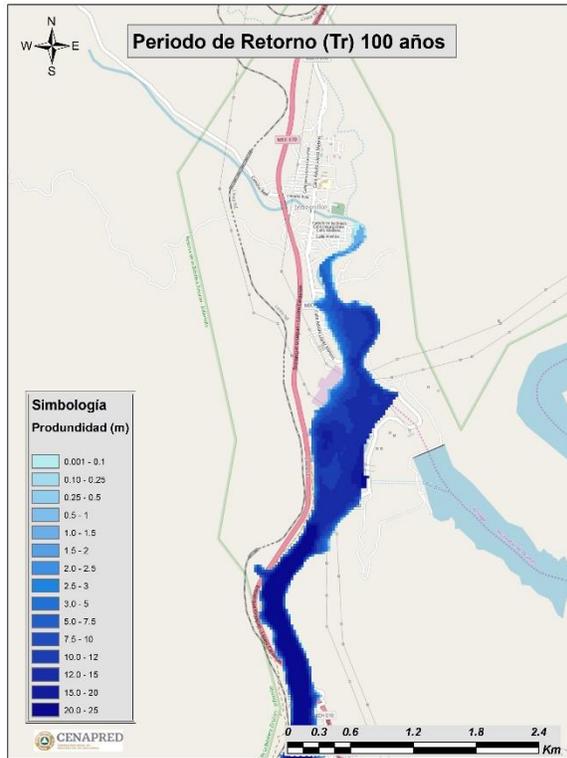


Figura 6.37.-Mapas de profundidades obtenidos para el poblado de Infiernillo (SRI, 2019)

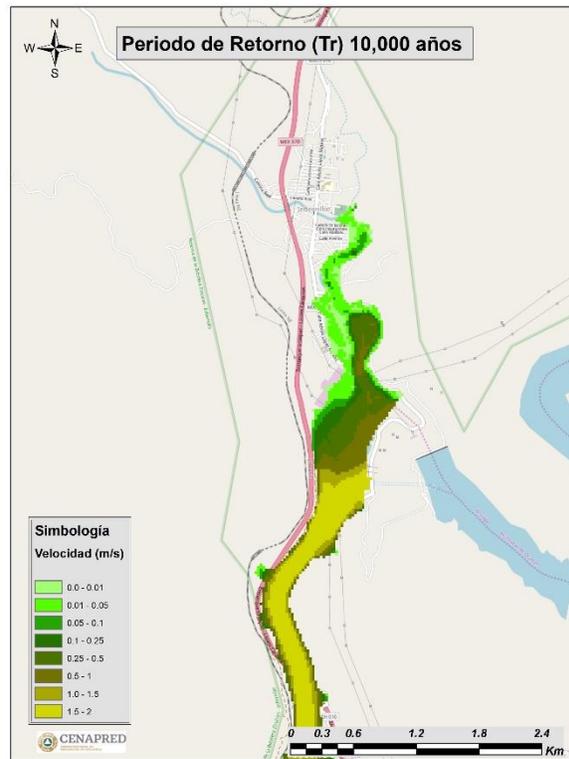
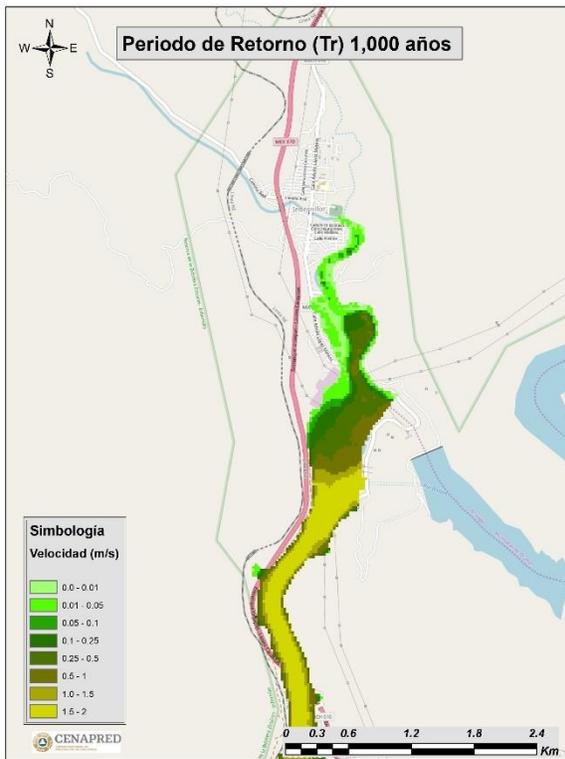
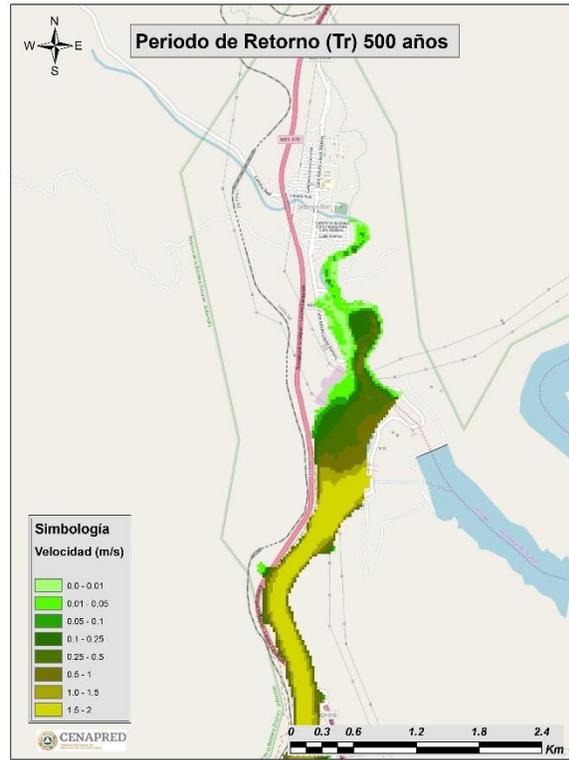
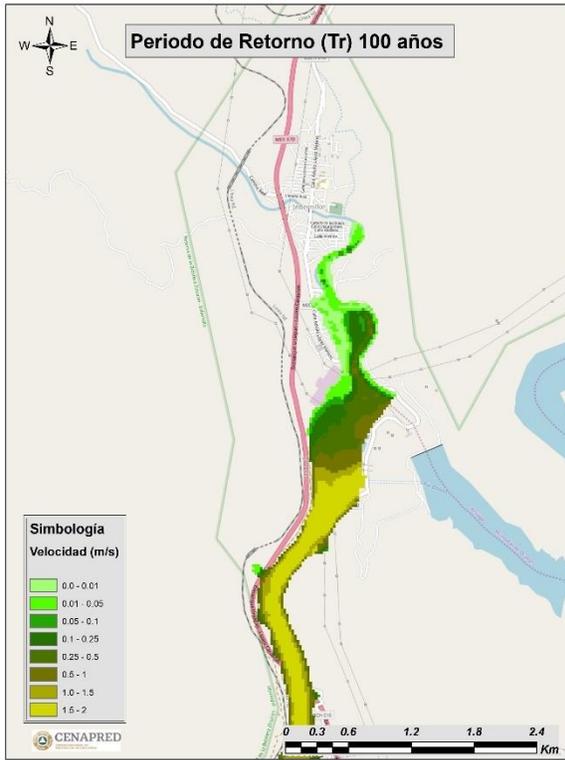


Figura 6.38.-Mapas de velocidades obtenidos para el poblado de Infiernillo (SRI, 2019)

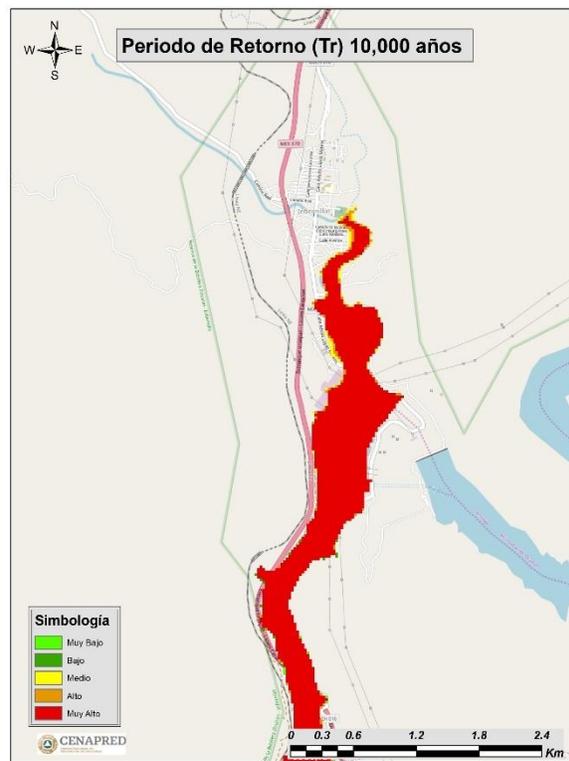
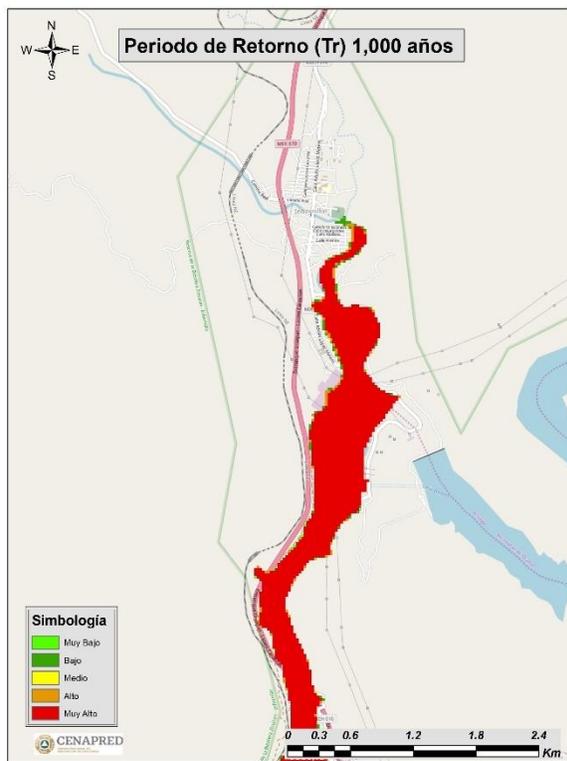
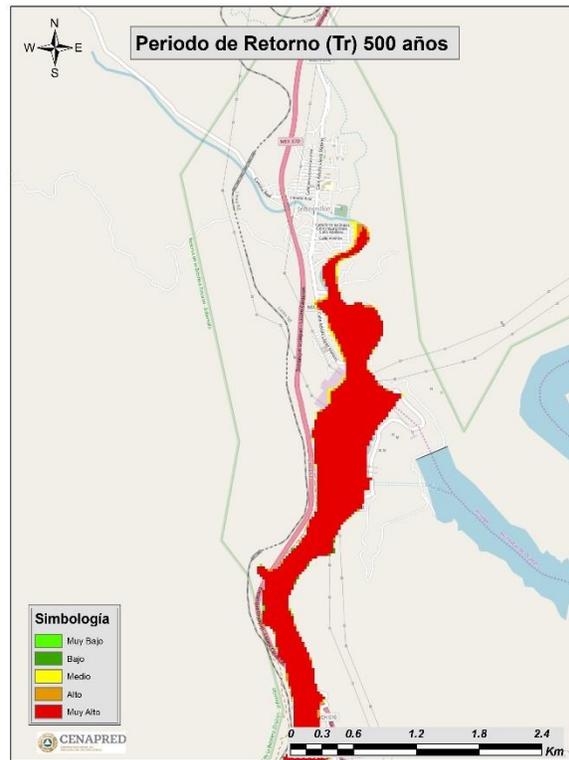
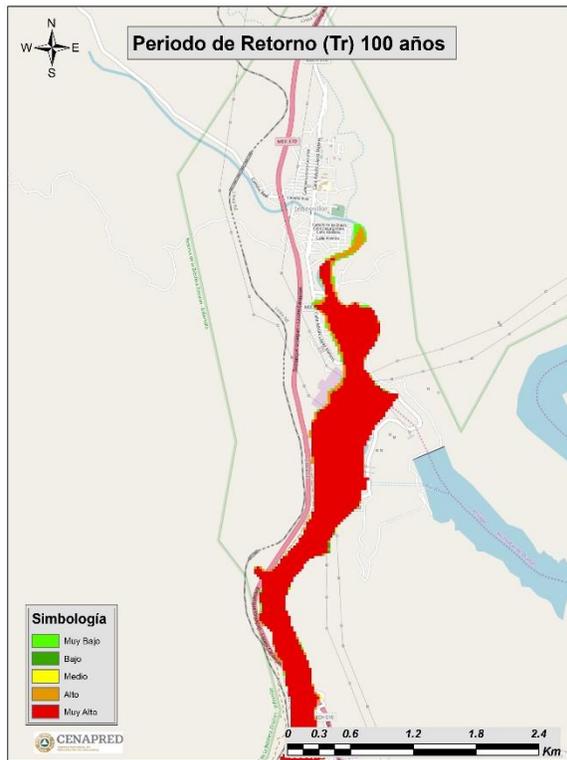


Figura 6.39.-Mapas de severidad obtenidos para el poblado de Infiernillo (SRI, 2019)

En los mapas anteriores se mostró la evolución del peligro por inundación para los periodos de retorno analizados, los cuales generaron afectaciones al sur del poblado y en la subestación eléctrica de la central hidroeléctrica, esto no es un efecto directo del desfogue, sino que es causado por la acción de la recirculación del flujo después del vertedor hacia aguas arriba del cauce, situación que se agravaría si se tienen aportaciones sobre el cauce, ya que la descarga de la presa provoca taponamientos hidráulicos.

La tabla 6.5 muestra la estimación de bienes expuestos mediante el análisis de áreas afectadas para los diferentes escenarios de desfogue, en los cuales no se observaron grandes cambios, lo que hay que precisar son las implicaciones de peligro que implican estos eventos para la presa La Villita.

Tabla 6.5.- Estimación bienes expuestos para los diferentes escenarios de desfogue

| TR (años) | Población | Viviendas |
|-----------|-----------|-----------|
| 100 | 1,500 | 480 |
| 500 | 1,500 | 480 |
| 1,000 | 2,363 | 738 |
| 10,000 | 2,363 | 738 |

Fuente: SRI, 2019

CAPÍTULO 7. Conclusiones

El análisis de presas al igual que para su construcción necesita de trabajos multidisciplinarios, por lo que este informe sólo se presenta uno de los criterios de elección para los casos de estudio, ya que dentro de la gestión integral de riesgo se busca minimizar las afectaciones a la población y a sus bienes. Por lo anterior, se requiere un proyecto con más detalle y que contemple otros factores, tales como: grado de sismicidad, edad de la estructura, material de construcción de la cortina, volúmenes actuales de almacenamiento, entre otros, con el fin de determinar los peligros a los que se encuentra expuesta.

En general, se alcanzaron los objetivos planteados, ya que se estimó escenarios de peligro por inundación aguas abajo de dos presas con clasificación de riesgo. Además, se establecieron puntos a cumplir para el análisis de este tipo de infraestructura, ya que es imposible establecer una guía única debido a las diversas características de todas las presas del país, por lo que sólo se trabajó con la información disponible. Los resultados obtenidos en cada caso estuvieron en función de la cantidad, calidad y existencia de datos disponibles.

Las avenidas de entrada que se analizaron en la presa El Aguacate, fueron generadas a partir del estudio de regionalización de lluvias, las cuales pueden considerarse sobre estimadas, por ejemplo, para el periodo de retorno de diseño de 10,000 años difiere el gasto pico obtenido del reportado en el sistema de seguridad de presas, siendo mayor el primero. Por lo anterior, se justifica ya que dentro de la cuenca de aportación no se encuentran estaciones climatológicas, cuya información podría brindar mayor precisión en los valores de precipitación obtenidos para cada uno de los periodos de retorno. Además la regionalización contempla los cambios en las condiciones de escurrimiento dentro de la cuenca.

Si bien, la clasificación de riesgo para la presa El Aguacate es del tipo estructural, asociar una probabilidad de falla por formación de brecha, es decir, falla en la cortina, es una tarea que requiere un estudio estructural de la cortina y de las condiciones actuales de los materiales o información de fallas estructurales en presas similares que se puedan relacionar entre éstas. Así mismo, se elaboraron mapas de peligro por inundación correspondientes a la ocurrencia de las lluvias de diseño de los cuatro periodos de retorno analizados.

En el caso de la presa Infiernillo se obtuvieron escenarios de peligro por inundación, con los cuales se identificaron las zonas aguas abajo de la misma, con mayor propensión a sufrir afectaciones y se verificó que entre las dos estructuras de contención ubicadas antes de la desembocadura del río Balsas, el cauce contara con la capacidad para conducir grandes volúmenes de agua. Las afectaciones en el poblado de Infiernillo se reducen a las instalaciones de control y conducción eléctrica, así como a un número menor de viviendas en las cercanías del cauce. Los mayores riesgos son la falta de energía que sufriría la CDMX por la falla en las instalaciones de generación y las avenidas extraordinarias que Infiernillo conduciría 50 km hacia el océano Pacífico, que pueden poner en riesgo la presa La Villita, esto se reduciría con un buen manejo y operación en las obras de desfogues de ambas.

CAPÍTULO 8. Bibliografía

- Aparicio, F. J. (1992). Fundamentos de Hidrología de Superficie, Limusa, México, 3 edición.
- Arreguín, F. I., et al. (2013). Inventario nacional de presas. Tecnología y ciencias del agua. 4. 179-185.
- Bautista, A. L. (2016). Metodología para Diagnosticar la seguridad de presas en México. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Campos, D. F. (2010). Introducción a la Hidrología Urbana. (1ra ed.) México.
- CONAGUA – IIUNAM. (2017). Estudios Especializados a Presas de Almacenamiento, Derivadoras y Bordos en Alto Riesgo, en 3 Presas de los Estados de Durango, Chihuahua y Guanajuato, Año 2017. Estudio disponible en el Sistema de Seguridad de Presas.
- CONAGUA. (2014). Diagnóstico del Programa K111. Operación y Conservación de Presas y Estructuras de Cabeza.
- Domínguez, Judith. (2019). La construcción de presas en México. Evolución, situación actual y nuevos enfoques para dar viabilidad a la infraestructura hídrica. Gestión y política pública, 28(1), 3-37. <https://dx.doi.org/10.29265/gypp.v28i1.551>
- Domínguez, et. al. (2016). Estudio para regionalizar los gastos generados por avenidas máximas, como base para la elaboración de mapas de peligro por inundaciones fluviales en todas las cuencas de la República Mexicana.
- NMX-AA-175/2-SCFI-2016. (2016). Norma Mexicana NMX-AA-175/2-SCFI-2016 Operación segura de Presas parte 2. Inspección de Seguridad. Diario Oficial.
- NMX-AA-175/3-SCFI-2017. (2017). Norma Mexicana NMX-AA-175/3-SCFI-2017 Operación segura de Presas parte 3. Acción ante emergencias. Diario Oficial.
- NMX-AA-175-SCFI-2015. (2015). Norma Mexicana NMX-AA-175-SCFI-2015 Operación segura de Presas parte 1. Análisis de Riesgo y Clasificación de Presas. Diario Oficial.
- Sotelo, G. (1997). Hidráulica General Vol. 1. (11va ed.) México: Limusa.
- Spanish National, Committee on Large Dams (2012). Technical Guides On Operation of Dam And Reservoirs Vol. 1 Risk Analysis Applied to Management of Dam Safety.