

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FC
Facultad de
Construcciones

Departamento de Ingeniería Hidráulica

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Evaluación de la seguridad integral de la presa Alacranes.

Autor: Yaniel Vega Herrera

Tutores: Lamberto Moisés Álvarez Gil

Carlos Alexander Recarey Morfa

Santa Clara, Junio, 2019
Copyright©UCLV

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FC
Facultad de
Construcciones

Academic Departament of Hydraulic Engineering

DIPLOMA THESIS

Title: Evaluation of the integralsecurity oftheAlacranes dam.

Author: Yaniel Vega Herrera

Thesis Director: Lamberto Moisés Álvarez Gil

Carlos Alexander Recarey Morfa

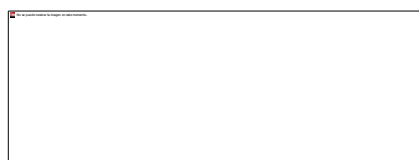
Santa Clara ,June, 2019
Copyright©UCLV



Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución-No Comercial-Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419



Dedicatoria

A mis padres por ser quienes me han guiado en esta vida y se han sacrificado tanto cambio de esta carrera universitaria.

A mi hermano Alíx.

A mis abuelos por preocuparse siempre por mí.

A mis tíos que siempre estuvieron ahí cuando los necesitaba.

A toda mi familia.



Agradecimientos

Quiero agradecer a mis padres por haberme guiado y ayudado a completar esta etapa de mi vida.

A mi hermana Alina,

a mis abuelos,

a mis tíos y a toda mi familia.

*A mis amigos de la UCLV, a todos mis compañeros de la UCLV especial a mis compañeros del
cuarto 101 A.*

A mi tatar por brindarme su experiencia,

En fin, a todos los que me han ayudado a cumplir esta meta.

MUCHAS GRACIAS...



RESUMEN

En la presente investigación se realiza un estudio del estado del arte sobre la seguridad integral de presas de tierra. Se exponen varias clasificaciones de las presas en general, se aborda sobre las fallas de presas en Cuba y el mundo, estableciéndose una descripción de los diferentes tipos de fallos que se han presentado y sus causas. Se aborda la temática sobre la seguridad de presas de manera tradicional y con las nuevas tendencias que vinculan a esta con el riesgo. Se estudiaron varios métodos para la evaluación de la seguridad integral de presas y se aplicó uno de ellos en el caso de estudio presa Alacranes.

Palabras claves: presas de tierra, seguridad, riesgo, causas de falla.



ABSTRACT

In the present investigation a study of the state of the art on the integral security of the earth dams is carried out. Several classifications of the dams are exposed in general, they are addressed on the failures of dams in Cuba and the world, establishing a description of the different types of failures that have been presented and their causes. The subject is dealt with on the security of traditional practices and the new trends that link this risk. Several methods for the evaluation of the integral safety of dams were studied and one of them was applied in the case of the Alacranes dam study.

Keywords: earth dams, security, risk, causes of failure.



Índice

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTOS.....	ii
RESUMEN.....	iii
INTRODUCCIÓN.....	8
CAPÍTULO 1. Revisión bibliográfica y estudio de antecedentes.....	14
1.1 Clasificación de las presas.....	14
1.2 Consideraciones generales de las presas de tierra.....	15
1.3 La seguridad en presas.....	17
1.3.1 Análisis de riesgos.....	21
1.3.2 Seguridad integral de presas.....	22
1.4 Auscultación.....	24
1.5 Tipos de fallas en presas de tierra.....	25
1.5.1 Incidentes de fallas en presas de tierra en Cuba.....	27
CAPÍTULO 2. Análisis y propuesta de un procedimiento para aplicar los métodos de evaluación de la seguridad integral de presas.....	32
2.1 Método 1: Herramienta completa de análisis y evaluación de riesgos en seguridad de presas.....	32
2.2 Método 2: Protocolo para la evaluación de la seguridad de presas.....	39
2.3 Método 3: Análisis de riesgo y confiabilidad en presas de tierra.....	46
2.4 Comparación entre los métodos estudiados.....	52
CAPÍTULO 3. Evaluación mediante un ejemplo con los datos disponibles la seguridad integral de la presa Alacranes.....	55
3.1 Características principales del Embalse Alacranes.....	55



3.2 Procedimiento para la evaluación de la seguridad integral de la presa Alacranes	56
3.2 Estudio de escenarios más probables que producirían la falla de la presa Alacranes.....	77
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	81
Conclusiones.....	81
Recomendaciones.....	82
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84
ANEXOS.....	87



Introducción





INTRODUCCIÓN

Las presas constituyen, posiblemente, las construcciones realizadas por el hombre que más incidencias tienen sobre la sociedad. Estas incidencias pueden ser de diversos índoles: positivas, negativas o mixtas.

Entre las incidencias positivas se encuentran el abastecimiento de agua a la población, su uso en la agricultura, el empleo en los procesos industriales, el uso de los embalses en el control de inundaciones y su utilización con fines recreativos.

Dentro de las repercusiones negativas se halla el impacto socioeconómico y medioambiental por la inundación de extensas áreas, pero sin lugar a dudas la repercusión negativa más importante es la derivada de la rotura de la presa; ésta puede dar lugar a una catástrofe de carácter humano, ambiental y económico de mucha mayor entidad que las originadas por las restantes construcciones realizadas por el hombre.

Entre las repercusiones de tipo mixto se encuentran aquellas que afectan a los regímenes hídricos de los ríos; este efecto es claramente positivo cuando se traduce en el control de avenidas, pero puede ser negativo cuando la variación de caudales aguas abajo los aleja de los idóneos para conservar los equilibrios biológicos y morfológicos del río.

Estas obras de ingeniería son diseñadas y construidas con varias finalidades, proporcionando múltiples beneficios para la sociedad y la economía. Las mismas para su construcción deben tener en cuenta medidas que le garanticen estabilidad y seguridad, puesto que al mismo tiempo que son beneficiosas, el fallo de la presa, que es difícil de prever, representaría un enorme daño, ya que podría arrasarse con cuanto encontrara a su paso aguas debajo de la obra y en el peor de los casos ocasionar pérdidas de vidas humanas (del Río, 2016).

La historia nos muestra numerosas fallas de presas que constituyeron verdaderas catástrofes, traducidas en fuertes pérdidas de vidas, daños económicos, daños al ambiente y fuerte impacto social. Se mencionan: Austin, E.U., 1911 (80 muertos); St. Francis, E.U., 1928 (450); Vega de Tera, España, 1959 (144); Malpasset, Francia, 1959 (421); Vaiont, Italia, 1963 (2.600); Baldwin Hills, E.U., 1963 (5); Oros, Brasil, 1960 (1.000);



Panshet, India, 1961 (4.000); Frías, Argentina, 1970 (42); Teton, E.U. 1976 (14); Machu, India, 1979 (2.000), entre otras (ORSEP, 2018).

Todos estos ejemplos ponen de manifiesto que el estudio y comprensión de sus causas de falla es relevante, pues contribuye a generar medidas de prevención y mantenimiento que minimicen los efectos de un eventual colapso.

Por lo expuesto, la Seguridad de Presas ha sido un tema de constante preocupación y desarrollo, en función de exigencias de la sociedad cada vez mayores. Con los años mejoraron fuertemente los criterios de seguridad aplicados al proyecto y la construcción, así como los sistemas operativos, la auscultación y el control de las obras, a la vez que se incorporaron previsiones para situaciones de emergencias. También se avanzó con legislación específica y se crearon organismos reguladores y de fiscalización, existiendo en la actualidad numerosos documentos en la materia (ORSEP, 2018).

La seguridad pública y la protección ambiental plantean exigencias cada vez mayores en materia de la administración y la seguridad de estas instalaciones. A fin de dar respuesta a las exigencias planteadas, se requieren Sistemas de Gestión y Seguridad de las presas y embalses, que aseguren la integridad y operación de las obras de acuerdo con las mejores prácticas y los estándares internacionalmente aceptados (Leiva, 2017).

En Cuba existen 242 presas administradas por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) y más de 700 micropresas, con una capacidad de embalse de agua superior a los 9 128 millones de metros cúbicos. La mayoría de estos embalses fueron construidos a partir de la década del 60, a través de un amplio Programa Constructivo de Obras Hidráulicas, conocido como Voluntad Hidráulica, impulsado por el Comandante en Jefe Fidel Castro (Ferrer, 2018, INRH, 2016, Castro, 1964, ONEI, 2017).

Además de constituir una garantía para el desarrollo socio económico del país, este imponente conjunto de obras, brinda una valiosa protección a la población contra las inundaciones que de otro modo provocarían las copiosas e intensas precipitaciones, tanto de origen convectivo que se producen durante el año a lo largo del País, como las que acompañan a una actividad ciclónica que en esta región del planeta se hace cada vez más frecuente y destructiva (Sarduy, 2010).



Para ello se construyó un 55% de la cantidad de embalses actuales antes de 1980. Esto representa por contraste un paradójico peligro potencial para el medio millón de habitantes que se asientan aguas abajo de las mismas (Cantero & Velazco, 2010). Criterio este que hace necesario realizar un estudio exhaustivo de la seguridad integral de estos embalses con el fin de prevenir los desastres que pueden provocar las fallas de los mismos dado el progresivo envejecimiento desde su fecha de construcción.

Durante la explotación de los embalses, es necesario hacer un control sistémico y exhaustivo de ellos, para con los sistemas de alerta temprana existentes, poder conocer a tiempo los posibles riesgos que podrían afectar su correcto funcionamiento y comprometer la seguridad integral de estas obras.

En Cuba es práctica habitual realizar inspecciones a las presas periódicamente. Las Empresas de Aprovechamiento Hidráulico de cada provincia pertenecientes al Grupo Empresarial de Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos (GEARH), son las encargadas de realizar visitas trimestralmente a los complejos hidráulicos, con el objetivo de realizar lo que ellos denominan Inspección estatal a las presas y derivadoras que ostentan la categoría de obra certificada. Además, anualmente se realiza un informe del Sistema de Control Técnico donde se analizan y exponen los principales problemas presentados por dichas obras en este período.

Los beneficios derivados de las mejores prácticas en la seguridad integral de presas incluyen la protección pública y ambiental, el resguardo del patrimonio estatal, una mayor confianza y calidad de vida de la sociedad, así como el aprovechamiento seguro y sostenible de los recursos del país.

Diseño Metodológico de la Investigación

Problema científico:

¿De qué manera la aplicación de una metodología de trabajo para la evaluación de la seguridad integral de la presa Alacranes, sustentada en análisis de los datos existentes facilita la obtención de un conocimiento actualizado sobre la seguridad en esta obra?

El objetivo general en el que se sustentará la investigación será aplicar una metodología de trabajo para la evaluación de la seguridad integral de la presa Alacranes, apoyada en



el estudio de los datos existentes a través de un análisis de riesgo y confiabilidad de esta obra.

Como **objetivos específicos** los siguientes:

1. Establecer el marco teórico para la evaluación de la seguridad integral de las presas mediante la revisión bibliográfica de las fuentes de información disponibles.
2. Caracterizar los métodos para la evaluación de la seguridad integral de presas.
3. Evaluar la seguridad integral de la presa Alacranes mediante la aplicación de la metodología de trabajo propuesta.

Hipótesis:

Si se aplica la metodología de trabajo para la evaluación de la seguridad integral de la presa Alacranes, se podrá afirmar el correcto comportamiento de la obra durante su operación de acuerdo a sus parámetros de diseño y a la normativa vigente.

Campo de la investigación:

Seguridad en presas.

Objeto de la investigación:

Métodos para evaluar la seguridad integral en presas.

Tareas de Investigación:

1. Recopilación bibliográfica, definición, aprobación del tema y elaboración del plan de trabajo.
2. Estudio de los métodos para la evaluación de la seguridad en presas.
3. Aplicación de un método para la evaluación de la seguridad en presas conforme con las condiciones y normativas cubanas en la presa Alacranes

Aporte práctico:

Los especialistas en el tema de la seguridad de presas dispondrán de una evaluación completa de la seguridad de la presa Alacranes mediante un procedimiento metodológicamente estructurado para la realización de estos estudios.



La presente investigación estará estructurada de la siguiente forma:

Introducción

Capítulo1:Revisión bibliográfica y estudio de antecedentes.

Capítulo2: Análisis y propuesta de un procedimiento para aplicar los métodos de evaluación de la seguridad integral de presas.

Capítulo3: Evaluación mediante un ejemplo con los datos disponibles la seguridad integral de la presa Alacranes.

Conclusiones

Recomendaciones

Bibliografía

Anexos



Capítulo 1





CAPÍTULO 1. Revisión bibliográfica y estudio de antecedentes

En este capítulo se realiza un bosquejo bibliográfico del estado actual del conocimiento sobre la seguridad integral de presas, exponiéndose los principales conceptos, evolución histórica e importancia de los estudios sobre este tema.

1.1 Clasificación de las presas

Las presas son obras ingenieriles muy heterogéneas, cada una de ellas tiene sus propias singularidades, lo que hace necesario establecer criterios de clasificación para diferenciarlas. Dichos criterios son muy diversos, en esta investigación se exponen los siguientes:

a) En función de sus dimensiones

Según la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD), se clasificarán como “Grandes Presas” a aquellas que cumplan al menos una de las siguientes condiciones:

- Altura superior a 15 metros, medida desde la parte más baja de la superficie general de cimentación hasta la coronación.
- Capacidad de embalse superior a 1.000.000 de metros cúbicos.
- Capacidad de descarga superior a 2.000 metros cúbicos por segundo.

Se clasificarán como “Pequeñas presas” a todas aquellas que no cumplan ninguna de las condiciones señaladas anteriormente.

b) En función del daño potencial

Como función del daño potencial que pueda derivarse de su posible rotura o del funcionamiento incorrecto, a nivel internacional esta es una de las clasificaciones más usadas:

- **Presa categoría A:** Corresponde a las presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede afectar gravemente a núcleos urbanos o servicios esenciales, o producir daños materiales o medioambientales muy importantes.



- Presa categoría B: Corresponde a las presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede ocasionar daños materiales o medioambientales importantes o afectar a un reducido número de viviendas.
 - Presas categoría C: Corresponde a las presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede producir daños materiales de moderada importancia y sólo incidentalmente pérdida de vidas humanas. En todo caso a esta categoría pertenecerán todas las presas no incluidas en las Categorías A o B.
- c) En función de su tipología:
- Presas de Fábrica: Todas aquellas presas construidas con algún tipo de concreto. Presas de Gravedad, Arco, Bóveda etc.
 - Presas de materiales sueltos: En Cuba más conocida como de materiales locales o de tierra. La principal característica es el tipo de material utilizado para su construcción. En principio la gran mayoría de materiales geológicos son aceptables, excepto los que se pueden alterar, disolver o evolucionar modificando sus propiedades. Dentro de este grupo también se clasifican de acuerdo a su sección, como se explicará más adelante.

1.2 Consideraciones generales de las presas de tierra

Con la resolución por parte de los científicos de los principales problemas que enfrentaba la Mecánica de Suelos en el siglo XX, se evidenció un auge considerable en el diseño y construcción de presas de tierra en el mundo. Debido a la relativa facilidad que representa la obtención de los materiales necesarios para su construcción, estas obras ingenieriles son muy comunes en países en vías de desarrollo.

Las Presas de Tierra son estructuras de suelo y roca que debido a la gran variedad de materiales existentes en la naturaleza, la cantidad de estos disponible para la construcción, las condiciones de los yacimientos, la diversidad de contornos, cerrada y valle, del emplazamiento, tiene como consecuencia una amplísima gama de morfología y dimensiones para la sección tipo de la presa (Álvarez, 1998).

Las presas de materiales locales se clasifican en secciones homogéneas, secciones graduadas y secciones mixtas (ver tabla 1) (Armas & Horta, 1987).



Tabla 1. Clasificación de las presas de tierra

Clasificación	Descripción
Presas de sección homogénea	- Constituidas por un solo material (arcilla, arena arcillosa, limo, arena, etc.) - Pueden tener otros materiales que no contribuyen en nada a la estabilidad de la presa, como son el enrocamiento de protección aguas arriba y la protección de la corona.
Presas de sección graduada	- Constan de varios materiales colocados en cierto orden y en cantidades similares. - Pueden ser de pantalla y de núcleo, dependiendo de la colocación del material impermeable (arcilla) en la zona del talud aguas arriba o en el centro de la cortina o terraplén.
Presas de sección mixta	- Constan de dos materiales, uno impermeable y el otro resistente con capas de filtro entre uno y otro. - Pueden ser también de pantalla y de núcleo, tierra y piedra, y enrocamiento.

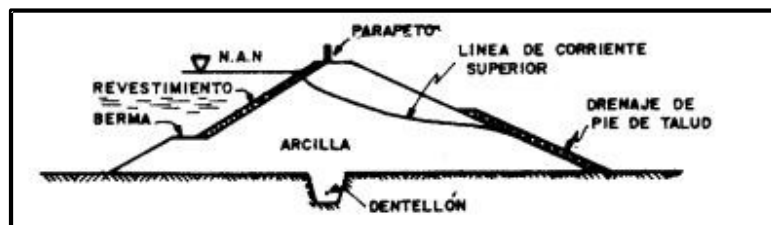


Figura 1. Presa de sección homogénea

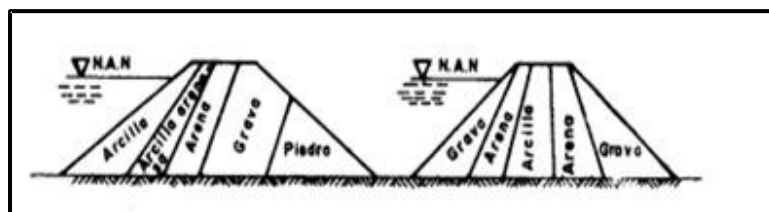


Figura 2. Presas de secciones graduadas

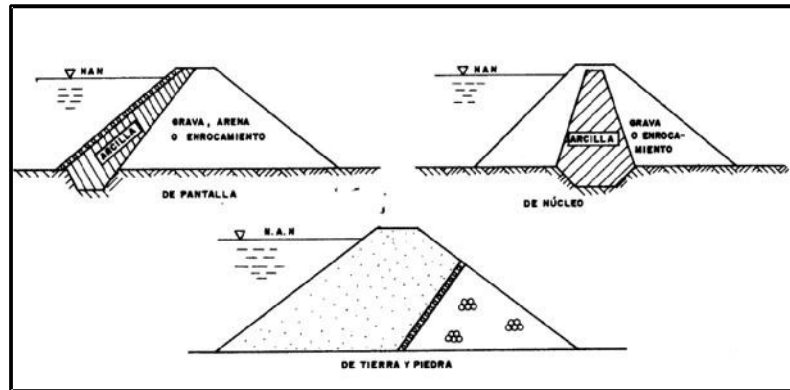


Figura 3. Presas de secciones mixtas

1.3 La seguridad en presas

Dentro del contexto de la seguridad de las presas existen multitud de términos y acepciones utilizadas, así como infinidad de autores que han investigado y abordado este tema.

La Seguridad de Presas puede definirse como la relación entre la capacidad nominal que tenga una estructura para soportar carga, y la magnitud y modo en que dicha carga venga aplicada (Rosales, 2009).

Por capacidad nominal de soportar carga se entiende que son los esfuerzos máximos que pueden soportar los materiales que conforman cada uno de los elementos de una presa, los cuales cuentan con características mecánicas conocidas.

Suele entenderse por seguridad de una presa al “margen que separa las condiciones reales que existen en la presa de las que llevan a su rotura”. La forma más fácil de definir ese margen, en ingeniería, es el establecimiento de un número (coeficiente de seguridad) para el análisis de cada uno de los modos potenciales de fallo (o escenarios) (Sánchez, 2007).

En ingeniería, el concepto de coeficiente de seguridad va fundamentalmente asociado al cociente entre “resistencias” y “acciones”, ya sea desde el punto de vista de los esfuerzos o de las tensiones asociadas. Aunque todavía suele restringirse al análisis de los estados últimos de servicio, poco a poco se va incorporando también un punto de vista deformacional (Sánchez, 2007).



Tradicionalmente las recomendaciones para el diseño de presas se basan en un enfoque determinista del estado de esfuerzos admisibles por los materiales y se ha formulado de este modo Factores de Seguridad que de manera conservadora, garantizan, con un buen margen de probabilidad, que el diseño esté siempre del lado de la seguridad (Rosales, 2009).

Según la relación entre los conceptos anteriores, se puede intuir que la seguridad es el margen que separaría las condiciones reales que existen en la presa construida de las que llevan a su destrucción o deterioro.

La seguridad de presas de materiales sueltos ha experimentado un gran avance en las últimas décadas. El estado del arte sobre la protección de estas obras de ingeniería incluye tipologías muy diferentes en función del origen del daño al que se pretende hacer frente, el grado de protección deseado y de las características específicas de la presa a proteger, entre otras.

En la actualidad existen miles de presas en el mundo, muchas concebidas y construidas según criterios menos exigentes que los actuales y con edad superior a los 50 años. Este es el caso en países como Estados Unidos, Canadá, Australia, Gran Bretaña y de la mayoría de los países de Europa.

Cuba no es la excepción, la mayoría de las presas en nuestro país cuentan con más de 30 años de construidas, por lo que cada día aumenta la importancia de su cuidado y conservación.

En la actualidad existen varias obras afectadas por lo que se ha denominado en el país "Prevención hidrológica", lo que significa, limitar los volúmenes a embalsar por problemas de seguridad, con la correspondiente afectación en las entregas de agua con diferentes intereses, además de limitarlos en cuanto a la protección contra inundaciones, factor de máximo interés, al aumentar los riesgos, sobre todo ante los fenómenos climatológicos extremos (Díaz, 2010).

En Cuba el documento rector en la clasificación de las obras hidrotécnicas y, por ende, de las presas de materiales locales, es la Norma Cubana 974 del 2013 (NC 974:2013), en el cual también se tiene en cuenta las posibles consecuencias que tendría la rotura de una presa a la hora de establecer su categoría.



En comparación con las regulaciones de años anteriores, en esta norma los principios generales de clasificación de las obras hidráulicas han sido modificados y ampliados.

La categoría de las obras hidrotécnicas se establece con el objetivo de definir su importancia desde los puntos de vista técnicos y económicos, así como la importancia relativa entre los diferentes objetos de obra que componen un conjunto hidráulico. Por medio de esta clasificación se establecen diferenciaciones para las investigaciones y proyectos, dándose un tratamiento distinto a cada obra u objeto de obra de acuerdo con la categoría que le corresponda (INRH, 1991).

Se establecen 5 categorías (I, II, III, IV y V), siendo las obras de mayor importancia las de categoría I y las de menor importancia las de categoría V (ver tabla 2).

Tabla 2. Categoría de las obras hidráulicas permanentes principales de acuerdo con la clase de cimiento, con la altura h y con el volumen de almacenamiento W

Tipo de Obra	Clase del cimiento*	Categoría de la obra en función de su altura (m) y volumen (m ³)				
		I	II	III**	IV***	V****
Presas, micropresas y tanques de materiales locales	A	$h \geq 100$	$100 > h \geq 70$	$70 > h \geq 15$	$15 > h \geq 6$ y $3 > W \geq 0.15$	$H < 6$ o $W < 0.15$
	B	$h \geq 75$	$75 > h \geq 30$	$30 > h \geq 15$		
	C	$h \geq 50$	$50 > h \geq 25$	$25 > h \geq 15$		

*Las clases del cimiento A, B y C se definen en la tabla 3.

**Se inscribirán en las categorías I, II o III, y se conceptuarán como presas, las obras de almacenamiento con alturas $h < 15$ m, con independencia del volumen de sus embalses; asimismo se inscribirán en la cat. III aquellas con $h < 15$ m, pero con volúmenes de almacenamiento $W \geq 3$ hm³.

*** Las obras de almacenamiento que cumplan estos parámetros se conceptuarán como micropresas.

**** Las obras de almacenamiento que cumplan estos parámetros se conceptuarán como tanques.



Tabla 3. Clases de cimiento a considerar para establecer la categoría de una obra

Clase del cimiento	Descripción
A	Rocas sanas
B	Rocas meteorizadas, conglomerados rocosos, semirrocas
	Suelos sueltos de fracciones gruesas
	Suelos arcillosos compactos de consistencia dura o medianamente dura
C	Suelos arcillosos plásticos saturados

En los casos en que la potencial destrucción de una obra hidráulica permanente pueda provocar daños catastróficos a poblaciones; centros industriales que sean vitales para la economía, tales como las centrales atómicas, las centrales termoeléctricas, las hidroacumuladoras, las industrias de carácter único y otros; o a vías de comunicación imprescindibles, el grado de importancia de su categoría de proyección deberá aumentarse, tanto como sea necesario, en correspondencia con la escala de los daños previstos, y mediante una detallada argumentación ((NC), 2013).

Seguridad y riesgo.

Pero existen otras formas diferentes de evaluar la seguridad, que son las basadas en el análisis y la estimación del riesgo. La construcción de una presa siempre supone un riesgo impuesto a la población y recursos económicos ubicados aguas debajo de dicho embalse. Esta tendencia, con base en el análisis del riesgo y teoría de confiabilidad, sigue ejemplos de otras industrias como la nuclear, la aeronáutica y la química.

Esta estimación del riesgo, para cada uno de los modos de fallo previsibles, se realiza como el producto de la probabilidad anual de fallo por el “daño” correspondiente (si tal fallo ocurriera). La suma de estos riesgos (para todos los modos potenciales de fallo) integrada a lo largo del tiempo, conduciría a una medida del riesgo global durante un cierto período de vida útil (Sánchez, 2007).



La nueva metodología considera al Riesgo, como resultante del producto de la Probabilidad de Falla de la estructura por las Consecuencias del evento. El análisis de riesgo puede ser de carácter cualitativo o cuantitativo (Giuliani, 2004).

1.3.1 Análisis de riesgos

El análisis y evaluación de riesgos en presas de tierra en épocas actuales es muy necesario. Las técnicas modernas de análisis de riesgos permiten un elevado grado de evaluación del riesgo y seguridad sobre estas obras.

El riesgo es la combinación de tres conceptos: qué puede pasar, cómo de probable es que pase y cuáles son sus consecuencias. Cuando se realiza un Análisis de Riesgo cuantitativo en seguridad de presas, esta terna se suele reducir a un único número: el producto de la probabilidad de fallo por sus consecuencias (Serrano, 2011).

El Análisis de Riesgo es una herramienta útil para la toma de decisiones, ya que permite integrar toda la información referente a la seguridad de la presa que se analiza por separado en otros documentos. Por ejemplo, un cálculo hidrológico y de laminación puede mostrar que la presa no es capaz de laminar las avenidas que la normativa recomienda. Un cálculo de estabilidad que arroje un coeficiente de seguridad menor que el recomendado muestra que la presa puede tener un problema de seguridad en ese sentido. Durante las actividades de mantenimiento se puede detectar que una compuerta no funciona adecuadamente. El seguimiento de la auscultación de la presa puede detectar un aumento de las filtraciones, un desplazamiento de un bloque o un aumento de las presiones intersticiales y permitir actuar sobre él antes de que derive en un problema mayor.

Al realizar un análisis de riesgo en presas, se tienen en cuenta muchas variables que incluye desde las solicitaciones hasta las consecuencias, pasando por la respuesta del sistema. Se crea un modelo de riesgo de la presa que se nutre de la información que proporcionan los distintos documentos de seguridad de la presa.

Mediante este modelo, una vez introducida toda la información concerniente a la presa, es posible evaluar la importancia de cada una de estas cuestiones y, además, compararla con criterios internacionales que permiten contextualizar el estado actual de la presa.



En tal sentido, en las presas de Cuba se realiza el Sistema de Control Técnico, que comprende una serie de documentos con información detallada sobre cada embalse (ver figura 4), también se realizan visitas de campo periódicas para complementar la información de dichos documentos.

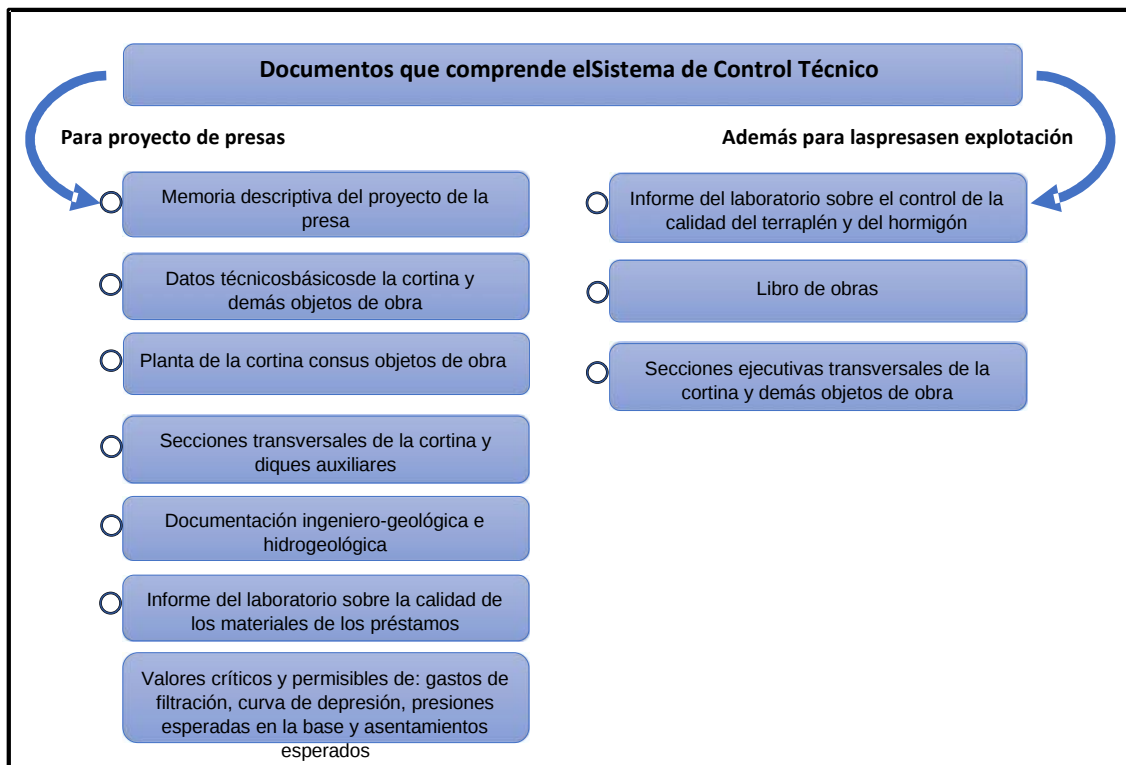


Figura 4. Documentación técnica comprendida en el Sistema de Control Técnico

1.3.2 Seguridad integral de presas

La seguridad integral de presas supone una aplicación globalizada de la seguridad en estas obras, en la que se tienen en cuenta todos los aspectos (humanos, legales, sociales, económicos, técnicos, etc.) de todos los riesgos que pueden afectar o comprometer su correcto funcionamiento. La principal ventaja de la gestión integrada de la seguridad de presas es que permite una visión global de las deficiencias en materia de seguridad, posibilitando el diseño de una estrategia de trabajo única e integrada para solucionarlas.



Líneas en las que se subdivide la seguridad integral de presas

Las metodologías para evaluar la seguridad integral de presas subdividen el problema en varias partes para un mejor análisis del mismo, ya que evaluarlo de forma global sería prácticamente imposible.

En la siguiente tabla se mencionará una de las líneas en las que se subdivide el análisis de la seguridad integral de presas, que habitualmente se basa en los mismos criterios de diseño de las estructuras.

Tabla 4. Líneas en las que se subdivide la seguridad integral de presas

Líneas en las que se subdivide la seguridad integral de presas	Características
Seguridad Hidrológica-Hidráulica	• Seguridad hidrológica: es la seguridad de una presa frente a eventos de creciente. • Seguridad hidráulica: es aquella relacionada con el comportamiento de los aliviaderos superficiales y desagües de fondo frente a amplios rangos de caudales.
Seguridad Estructural	Comprende la caracterización de la respuesta de la presa ante la acción de todas las solicitaciones previsibles individuales o en conjunto.
Seguridad de instalaciones Electromecánicas	Se refiere a todas aquellas instalaciones cuyo funcionamiento esté condicionado a la operación de equipos electromecánicos tales como Motores y Cilindros Hidráulicos, de los cuales normalmente depende la apertura de compuertas y válvulas.
Seguridad de Accesos y Comunicaciones	Se refiere a la evaluación de las condiciones de accesibilidad al sitio de presa en ocasión de efectuar cualquier tipo de maniobra que redunde en la seguridad de la estructura y de las poblaciones ubicadas aguas abajo.
Seguridad Funcional	Es la capacitación técnica de los encargados de operación de los sistemas y toma de decisiones en situaciones de operación normal y eventos extremos.



1.4 Auscultación

Debido al cierto riesgo de destrucción que implican las presas, surge la necesidad de un procedimiento sistémico mediante el cual se evalúen las condiciones en las que se encuentran estas obras, conocido universalmente como auscultación.

Por auscultación se entiende un conjunto sistemático de tareas como la realización de inspecciones visuales rutinarias, la medición de instrumentos y la evaluación del comportamiento estructural y, finalmente la evaluación de la seguridad (Restelli, 2016).

La auscultación de presas puede ser hidráulica, piezométrica (ver figura 5), deformacional y de control de movimientos.



Figura 5. Dispositivo de auscultación (piezómetro) en una presa de materiales sueltos

El principal objeto de la auscultación es la ayuda en la observación del comportamiento de la presa. La tendencia creciente a la centralización, y automatización de los dispositivos de auscultación no debe sustituir nunca la observación directa por el personal responsable de la vigilancia de la presa y del equipo encargado de su inspección, ya que estas permiten constatar la aparición de agrietamientos, goteos, humedades, etc., que de otra forma sería difícil de detectar.

La auscultación de una presa debe entenderse como un concepto global que va más allá de la existencia de una serie de sensores y de su lectura:

- Establecimiento de una serie de controles (movimientos externos mediante topografía, movimientos internos y deformaciones del cuerpo de presa, deformaciones del cimiento, filtraciones, presiones intersticiales, etc.), para cuya medida es necesaria la instalación de una cierta instrumentación.



- Definición de la periodicidad de las lecturas, asociadas a los distintos controles (y sensores correspondientes).
- Estandarización de los trabajos de lectura, archivo y proceso de la información para la traducción de estas lecturas a unidades físicas.
- Jerarquización de controles (y sensores asociados): Esenciales, Importantes y Normales.
- Establecimiento de un sistema de niveles de alerta y alarma para cada uno de estos controles (y sensores asociados).
- Redacción de documentación relacionada con el comportamiento de la presa (parte diario, informes mensuales, informes trimestrales, informes generales de comportamiento de carácter anual, informes de revisión de la seguridad con periodicidad de 5-10 años, en función de la clasificación de la presa) (Sánchez, 2007).

1.5 Tipos de fallas en presas de tierra

La observación del comportamiento de las presas ha permitido identificar una serie de tipos de fallas características, unas comunes a todas las tipologías de presas y otras particulares para un determinado tipo (gravedad, materiales sueltos, bóveda, etc.) e incluso dentro de cada tipo poder diferenciar modos característicos de fallo por subtipos.

En materia de fallas, a fines del siglo XX, la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD, 1995), reportó que la mayor frecuencia de rupturas se presenta en estructuras de tierra con el 85% de los casos estudiados, siendo las presas de tierra las que más fallas han presentado en comparación con las de otros tipos.

La comunidad presística ha ido definiendo con ayuda de modelos matemáticos y físicos, cada vez con más detalle, los posibles modos de fallo estableciendo para muchos de ellos los márgenes de seguridad que existen en función de los valores de los parámetros físicos que gobiernan el mecanismo de rotura utilizado (ICOLD, 2011).

A nivel internacional se ha investigado los distintos tipos de fallas de las presas de tierra. Existen muchos criterios de especialistas que coinciden en que la falla de mayor frecuencia de ocurrencia en el mundo es el desbordamiento o rebase de la cortina.



Luego de múltiples estudios sobre el tema, (Armas, 2002) enunció el siguiente orden de ocurrencia de fallas graves o catastróficas en presas de materiales locales:

1. Desbordamiento o rebase de la cortina.
2. Tubificación o sifonamiento mecánico.
3. Agrietamiento transversal.
4. Deslizamiento del talud aguas abajo.
5. Sismos.
6. Licuación.
7. Pérdidas por filtración.

De forma similar Santayana (2010) describe las causas principales de rotura en presas de materiales sueltos (ver tabla 5), haciendo una distribución de fallos en función de la edad de la presa (ver tabla 6). Se ha graficado dicha información para una mejor interpretación (ver figura 6).

Tabla 5. Orden de ocurrencia de fallas, Santayana (2010)

Causa	Porcentaje
Rebosamiento	30
Filtración a través de la presa o en el cimiento	25
Deslizamientos	15
Fugas en conductos	13
Erosión de taludes	5
Otras, o combinación de varias causas	7
Desconocida	5



Tabla6. Distribución de las fallas en función de la edad de la presa, Santayana (2010)

N.º de años desde el fin de la construcción	Falla por Rebase %	Falla por Filtración %	Falla por Deslizamiento %	Falla por Fuga en Conducto %
0-1	9	16	29	23
1-5	17	34	24	50
5-10	9	13	12	9
10-20	30	13	12	9
20-30	13	12	12	5
30-40	10	6	11	4
40-50	9	6	0	0
50-100	3	0	0	0

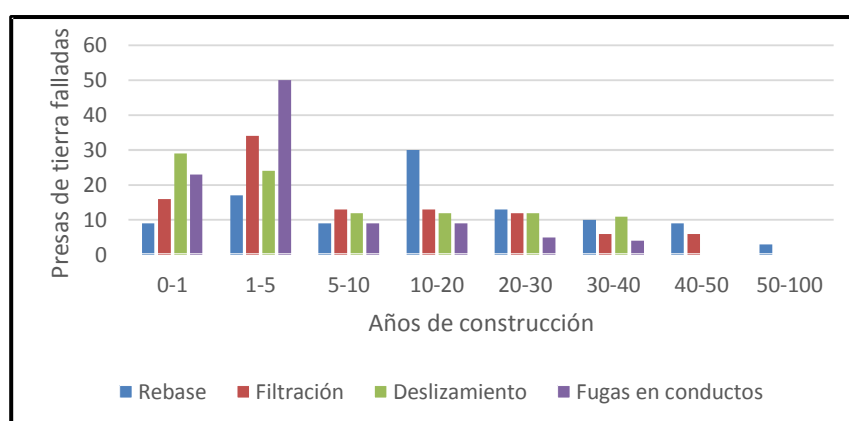


Figura6. Distribución temporal de las causas de falla según Santayana (2010)

En los estudios de estos autores resulta difícil distinguir las fallas por sifonamiento de las fallas por filtraciones, ambas muy diferentes en cuanto a los daños que pueden causar a la estructura, y a los bienes y vidas humanas que se encuentren aguas debajo de las mismas (González et al., 2017).

1.5.1 Incidentes de fallas en presas de tierra en Cuba

En Cuba se ha registrado varios incidentes relacionados con la seguridad de presas, de diferentes magnitudes y consecuencias. La información aquí consultada, fue obtenida de



la investigación realizada por González et al. (2017), contabilizando un total de 52 casos de fallos de presas de tierra (ver anexo 1).

El estudio de las causas que han originado los incidentes en presas, es de gran utilidad a la hora de definir las principales carencias de inspección y vigilancia en la gestión de estas estructuras.

La principal causa de falla en presas de tierra en Cuba es el deslizamiento de taludes con un 38 % de los casos, aunque la mayoría no han sido motivo de catástrofes, en ninguno de ellos colapsó la presa. En segundo lugar, se encuentra el desbordamiento o rebase de la cortina (27%), que sí es motivo de desvelo, y en el que la mayoría de las presas han colapsado formando una brecha por donde se ha vaciado totalmente el embalse. Le sigue, en orden de ocurrencia, el sifonamiento (21%), que ha provocado el colapso de dos presas y una tercera nunca llegó a funcionar. Las filtraciones (10%), se encuentran en cuarto lugar de las fallas ocurridas en el país, estas nunca han sido catastróficas. En último lugar se encuentra el agrietamiento (4%), siendo la menos frecuente en cuanto a incidentes graves (ver figura 7).

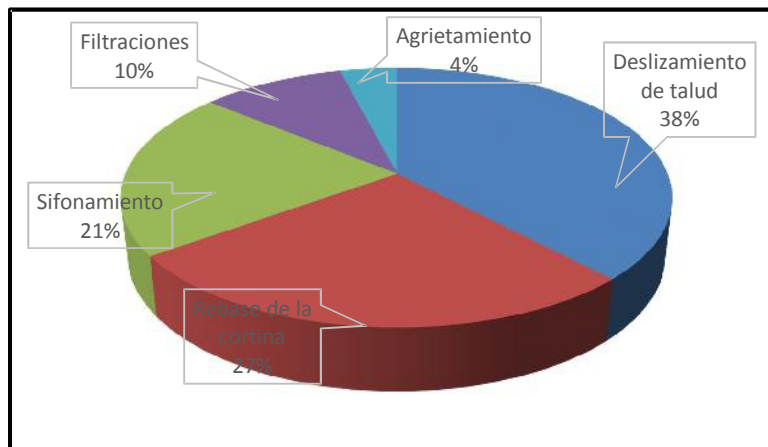


Figura 7. Categorización de los incidentes en presas de tierra en Cuba

Haciendo un estudio del comportamiento de los fallos por la edad de la presa (ver tabla 7), se puede apreciar que el mayor porcentaje de presas que han fallado por deslizamiento de taludes ocurre en los primeros cinco años de explotación, lo que se puede adjudicar a problemas en la calidad de la construcción. Algo muy similar pasa con el rebase de la cortina, pero en los casos de sifonamiento y filtraciones ocurren a edades más tempranas,



por lo general en el llenado del embalse o en su primer año de explotación. Los agrietamientos aparecen a edades tempranas debido a los esfuerzos de tracción por el llenado y durante la vida útil de la presa originados generalmente por las grandes sequías (González et al., 2017).

Tabla 7. Distribución de las fallas en función de la edad de la presa para Cuba, González et al. (2017)

Edad de la presa cuando falló (años)	Deslizamiento de talud %	Rebase de la cortina %	Sifonamiento %	Filtraciones %	Agrietamiento %
0-1	10	14	45	100	50
1-5	30	29	0	0	0
5-10	0	14	0	0	0
10-20	30	7	10	0	0
20-30	5	0	0	0	0
30-40	15	0	0	0	50
40-50	5	0	0	0	0
50-100	0	0	0	0	0
No se sabe	5	36	45	0	0

En la figura 8 se observa el nivel de daño en la estructura causado por los fallos, en los casos en que la presa colapsó accidental o de forma intencionada.

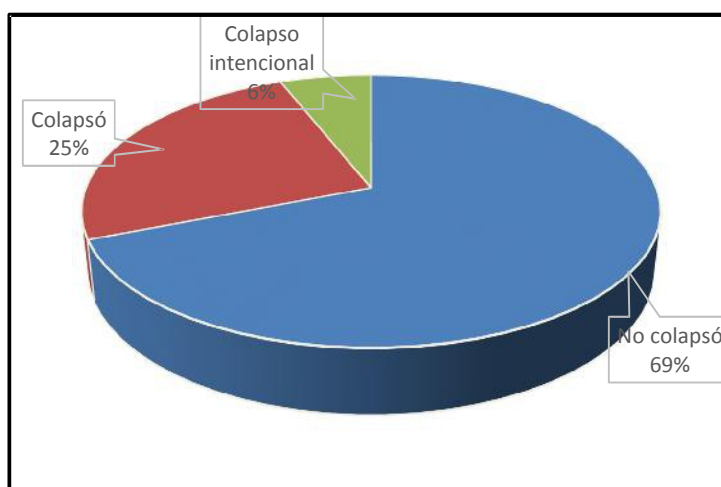


Figura 8. Grado de afectación a la cortina de la presa.



Del total de las presas falladas en Cuba, hay cuatro fuera de funcionamiento, tres de ellas colapsaron, no se repararon y se dieron de baja del sistema nacional de presas; la cuarta no llegó al colapso, pero está en proceso de darse de baja del catastro nacional de presas (González et al., 2017).

De un total de 242 embalses, el colapso de 3 de ellas representa un porcentaje del 1.24 % del total de estas estructuras en explotación. Según la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD), la media mundial de fallas en grandes presas es de alrededor del 1%, según lo cual dicho porcentaje en Cuba supera la media mundial.

Desde el punto de vista de gestión de la seguridad de presas, la recopilación y estudio pormenorizado de cada uno de estos incidentes, indagando sus causas, justifica la necesidad de emprender una herramienta de evaluación de seguridad, con la finalidad de advertir con suficiente antelación la eventual ocurrencia de un evento similar en cualquiera de las estructuras en operación.



Capítulo 2





CAPÍTULO 2. Análisis y propuesta de un procedimiento para aplicar los métodos de evaluación de la seguridad integral de presas

Los métodos de evaluación de seguridad integral de presas son muy diversos, pero todos enfocados en la seguridad de cada una de las estructuras que conforman estas obras ingenieriles. En este capítulo se describen y analizan varias metodologías para la evaluación de la seguridad integral de presas.

2.1 Método 1: Herramienta completa de análisis y evaluación de riesgos en seguridad de presas

Este método elaborado por Serrano (2011), tiene como objetivo principal desarrollar una herramienta completa que permita realizar análisis de riesgos sobre cualquier presa o sistema de presas. Para ello, se analizan cada una de las variables que forman parte de un modelo de riesgo y las relaciones existentes entre ellas.

Luego de una recopilación del estado del arte en la confección de modelos de riesgo y en la modelación de las distintas variables que intervienen en los modelos, el autor desarrolla una conceptualización que se basa en los diagramas de influencia y permite especificar un modelo de riesgo de tal manera que pueda ser calculado automáticamente por un programa informático. Se propone una nueva metodología de cálculo que es especialmente ventajosa para el cálculo de sistemas de presas.

Las metodologías desarrolladas se han implementado en un programa informático, que se emplea para realizar los cálculos con mayor facilidad.

Para la elaboración de un modelo de riesgo, este método toma en cuenta las siguientes variables u objetos de estudio:

- Estudio de solicitaciones: avenidas y sismos
- Estudio de niveles de embalse
- Estudio de fiabilidad de órganos de desagüe
- Estudio de laminación
- Identificación y caracterización de modos de fallo
- Estudio de probabilidades de fallo
- Estudio de hidrogramas de rotura



- Estudio de consecuencias

En la figura 9 se pueden apreciar los pasos que sigue esta metodología en el proceso general de análisis de riesgo.

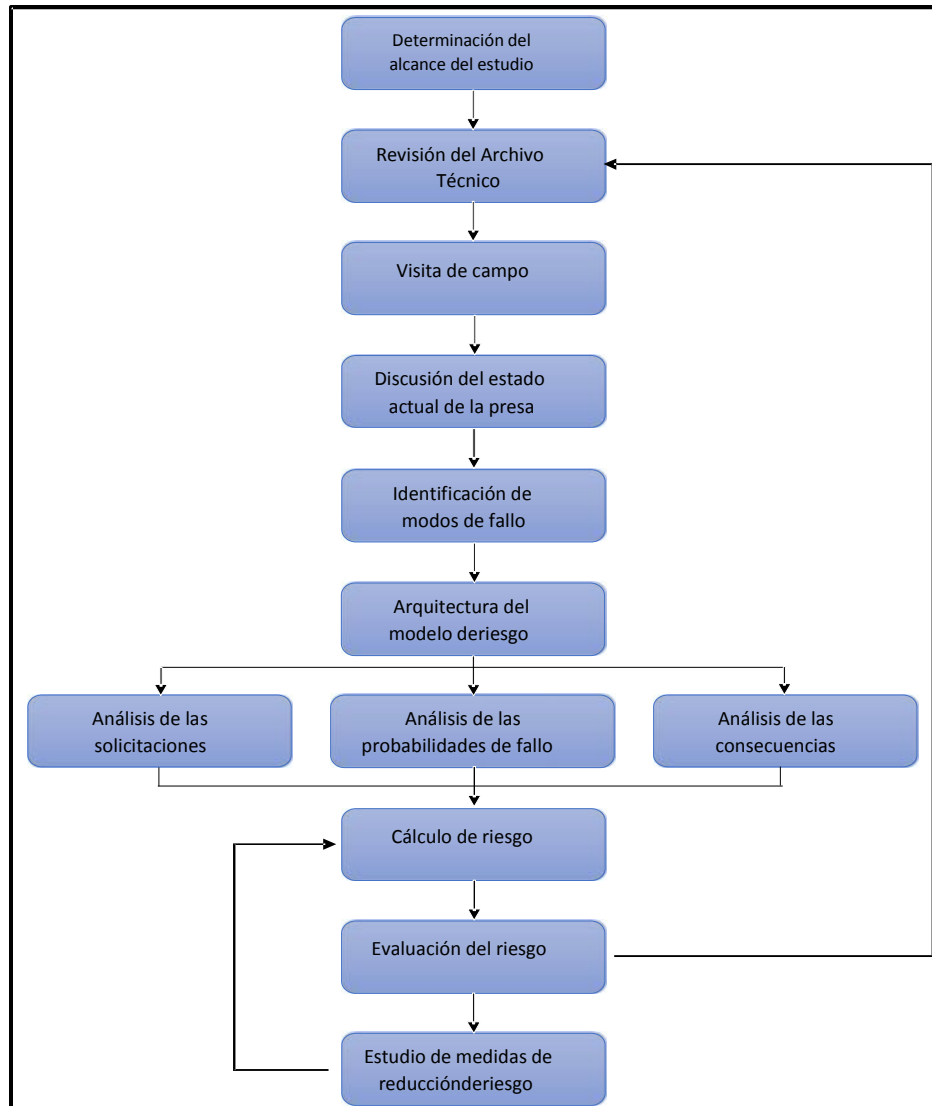


Figura9. Proceso general de análisis de riesgo

Una característica de la metodología de Análisis de Riesgo es que no se limita en su planteamiento a una única forma de fallar, sino que se estudian todas las posibles maneras en que la presa pueda fallar. Cada una de ellas se conoce como modo de fallo. Así, la probabilidad total de fallo es la suma de las probabilidades de cada modo de fallo (Serrano, 2011).



Para realizar el análisis de riesgo, este método se basa en los documentos de seguridad de presas vigentes en España. En este sentido, los documentos más importantes que se realizan en las presas de España son:

- El Documento XYZT¹,
- El Plan de Emergencia,
- Las Normas de Explotación,
- Los Informes Anuales,
- Las Revisiones de Seguridad y
- Los Informes de Comportamiento.

La figura 10 resume el proceso de la gestión de la seguridad de presas y embalses informado mediante modelos de riesgo. El modelo de riesgo es la herramienta que permite integrar toda información concerniente a la seguridad de la presa y producir resultados útiles para la toma de decisiones.

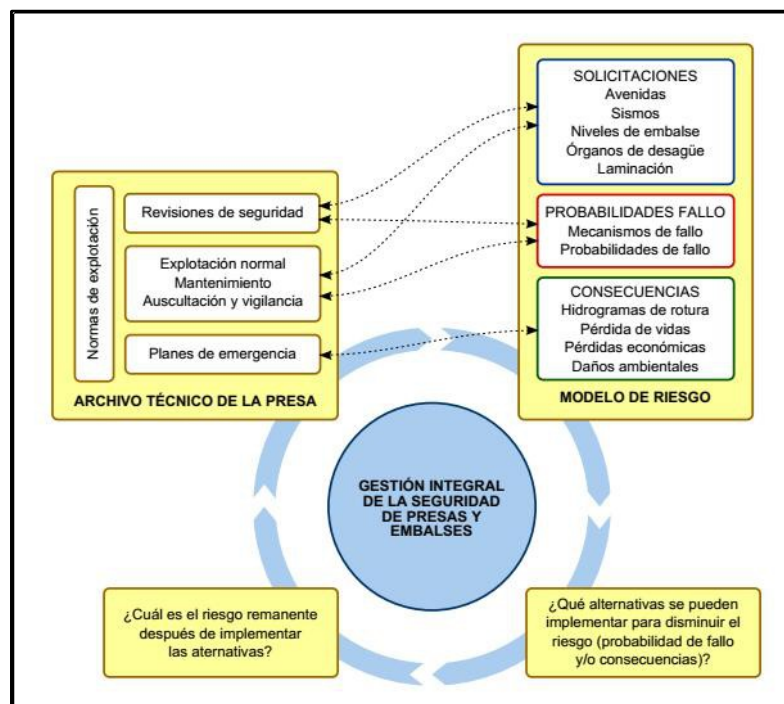


Figura 10. Modelo de riesgo para la gestión de la seguridad integral de presas, según Serrano (2011)

¹ El documento XYZT es un documento que recoge de forma clara, fiable y concisa las características más básicas y esenciales de una presa y su embalse según la normativa española.



Como se puede ver, el modelo de riesgo está dividido en tres áreas: las solicitudes, las probabilidades de fallo (también conocidas como respuesta del sistema) y las consecuencias. Cada una de estas tres áreas del modelo de riesgo corresponde con uno o varios de los documentos del Archivo Técnico.

Una vez confeccionado el modelo e introducida toda la información propia de la presa, es posible evaluar la importancia que cada una de estas cuestiones tiene. Además, la comparación con criterios internacionales de tolerabilidad de riesgo permite contextualizar el estado actual de la presa. Este proceso se denomina Evaluación de Riesgo.

La Evaluación de Riesgo es el proceso por el cual se evalúa la importancia del riesgo asociado a la rotura de una presa. La fase de evaluación de riesgo es el punto en el que los juicios y valores se introducen en el proceso de decisión (implícita o explícitamente) al incluir la consideración de la importancia de los riesgos estimados (Serrano, 2011).

Para llevar a cabo la Evaluación de Riesgo Serrano (2011) se basa en los conceptos de riesgo inaceptable, tolerable y ampliamente aceptable, conceptos en los que se basan en gran medida la mayoría de los criterios de tolerabilidad internacionales.

- Un riesgo inaceptable es aquel que la sociedad no puede aceptar, independientemente de los beneficios que pueda reportar.
- Riesgo tolerable es aquel con el que la sociedad está dispuesta a convivir obteniendo a cambio ciertos beneficios como contrapartida. Es un riesgo que no se considera despreciable y que por lo tanto no se puede ignorar, que es adecuadamente gestionado y vigilado por el propietario y que es reducido si ello es factible.
- Riesgo ampliamente aceptable es aquel que en general puede ser considerado como insignificante y adecuadamente controlado. Sin embargo, los riesgos asociados a las presas, debido al gran potencial de consecuencias que suelen tener, no suelen poder ser clasificados en esta categoría.



Árboles de eventos y diagramas de influencia

Un árbol de eventos es una representación exhaustiva de todos los eventos y posibilidades que pueden llevar a la rotura de una presa. Se utiliza para realizar el cálculo de la probabilidad de rotura o del riesgo asociado a dicha rotura. Sin embargo, un árbol de eventos típico para el cálculo del riesgo asociado a la rotura de una presa puede tener fácilmente miles de ramas. Especificar manualmente las probabilidades de cada una de ellas puede ser una tarea inabarcable. Es por esto que es necesario recurrir a algún tipo de representación más compacta a la hora de definir el problema (Serrano, 2011).

El autor recurre a los diagramas de influencia, que son una representación conceptual compacta de la lógica del sistema para presentar los modelos de riesgo. En un diagrama de influencia, cada variable se representa mediante un nodo y cada relación mediante una flecha.

La figura 11 muestra un ejemplo de las dos representaciones (equivalentes) del mismo modelo.

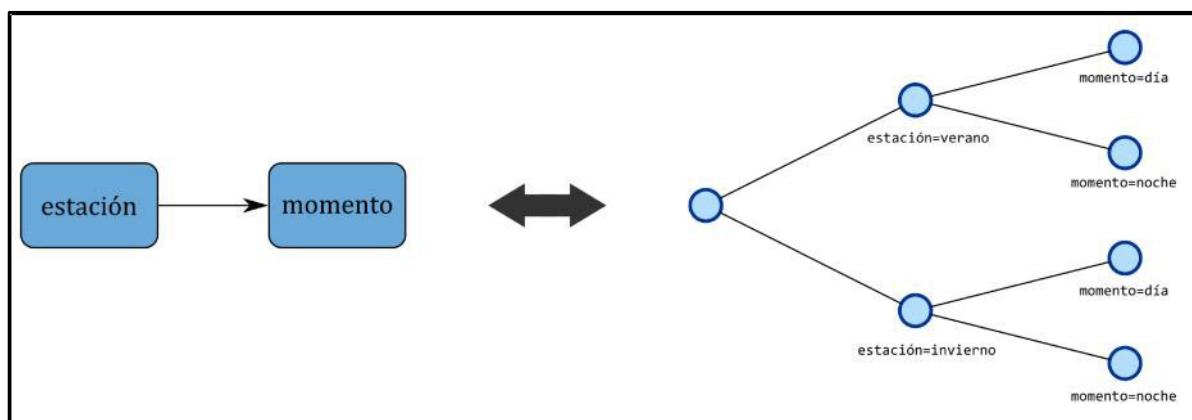


Figura 11. Equivalencia entre diagramas de influencia (izquierda) y árboles de eventos (derecha).

Escenarios de solicitud

Para la obtención del riesgo de una presa, es habitual desagregar el cálculo en varios escenarios, según el evento de solicitud que inicia el fallo. Una presa puede fallar por ejemplo cuando se enfrenta a una avenida extrema o cuando se enfrenta a un sismo de



gran magnitud y es conveniente realizar dichos cálculos por separado en lo que se conoce como escenarios de sollicitación.

Los escenarios de sollicitación que el autor considera más habituales son:

- Escenario normal
- Escenario hidrológico (avenidas)
- Escenario sísmico
- Otros escenarios

Los escenarios hidrológico y sísmico tratan eventos extremos (¿qué pasa cuando se presenta una avenida? ¿qué pasa cuando se presenta un terremoto?) mientras que el escenario normal (o estático) trata la situación normal, día a día, en la que no hay sismos ni avenidas (¿qué pasa en un día cualquiera?). La categoría de otros escenarios engloba acciones de sabotaje, vandalismo u otras situaciones que no puedan ser incluidas en los otros tres escenarios. En teoría se podría estudiar también la combinación de varias sollicitaciones (por ejemplo sismo y avenida) pero en la práctica la probabilidad de ocurrencia simultánea es tan pequeña que su riesgo resulta despreciable al compararlo con los demás riesgos (Serrano, 2011).

La herramienta base sigue siendo la misma que se ha utilizado en el campo hasta ahora, es decir los árboles de eventos, pero el proceso de generalización ha conducido a emplear los diagramas de influencia como herramienta suficientemente genérica y compacta como para especificar de forma precisa cualquier modelo de riesgo que se pueda presentar.

Modelos de riesgo

A partir de los tres escenarios de sollicitación: hidrológico, sísmico e hidrológico interno Serrano (2011) plantea dos árboles de eventos: uno para el escenario sísmico y otro que trata de manera conjunta el escenario hidrológico y el hidrológico interno.

Los modos de fallos que se incluyen en cada escenario de sollicitación son los siguientes:

a) Hidrológico:

- Erosión en el pie de aguas abajo
- Rotura por colapso de equipos hidromecánicos del desagüe de fondo



b) Sísmico:

- Sección aliviadero-Deslizamiento en el contacto presa-cimiento
- Sección lateral -Deslizamiento profundo
- Sección lateral -Deslizamiento contacto presa-cimiento
- Estribo derecho-Deslizamiento

c) Hidrológico interno:

- Sección aliviadero-Deslizamiento en el contacto presa-cimiento
- Sección aliviadero-Deslizamiento en el contacto presa-cimiento
- Sección aliviadero-Deslizamiento en el contacto presa-cimiento
- Rotura por sifonamiento o erosión interna a través de un estrato margoso
- Rotura por sifonamiento o erosión interna a través de un estrato margoso

A continuación, se muestra el modelo de riesgo empleado para realizar los cálculos de los escenarios hidrológico e hidrológico interno, plasmado mediante su diagrama de influencia (ver figura12)

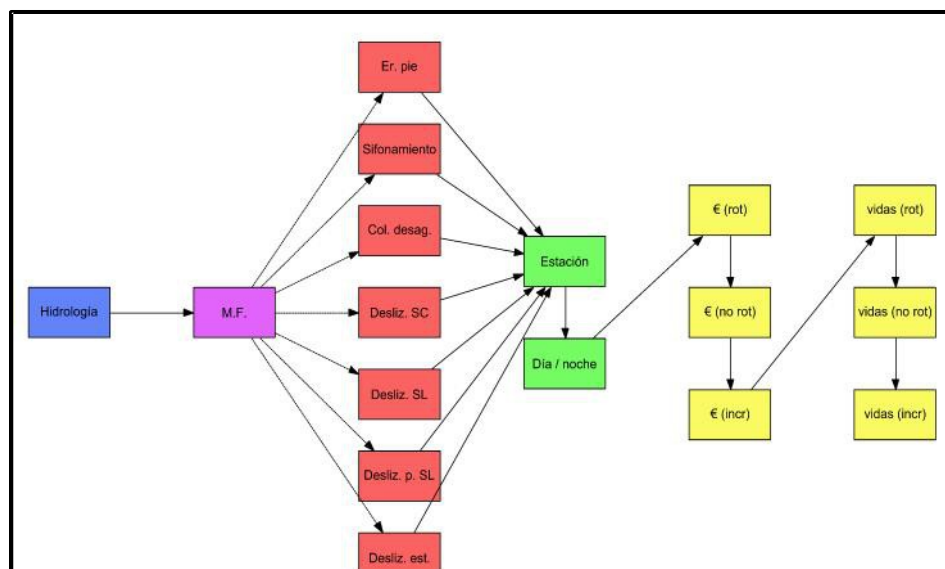


Figura12. Diagrama de influencia del escenario hidrológico e hidrológico interno

El primer nodo da la probabilidad anual de alcanzar un determinado nivel máximo, así como los valores asociados de caudal pico laminado y caudal pico de rotura.

A continuación, se recoge la probabilidad de fallo de cada uno de los 7 modos de fallo considerados. Para cada modo de fallo, la probabilidad condicional de rotura viene dada



mediante una tabla de interpolación en función del nivel máximo de embalse, excepto para el modo de fallo por erosión en el pie, donde la probabilidad es función del caudal máximo laminado.

Los siguientes dos nodos determinan la probabilidad de que sea verano o invierno y día o noche, lo cual influye en la estimación de consecuencias.

Finalmente, se calculan las consecuencias, tanto económicas como sociales (vidas). Para cada una de estas dos consecuencias se calculan las consecuencias debidas a la inundación en caso de que la presa rompa (en función del caudal pico de rotura) y en caso de que la presa no rompa (en función del caudal pico laminado sin rotura). Las consecuencias en vidas son distintas según la estación (verano/invierno) y el momento del día (día/noche).

2.2 Método 2: Protocolo para la evaluación de la seguridad de presas

Este método ha sido desarrollado por Rosales (2009), tiene como objetivo fundamental formular una herramienta para el análisis de la seguridad de presas y embalses con miras a uniformizar criterios y formalizar una guía técnica. Está basado en el análisis clásico de la seguridad complementada por un estudio de Modos de Fallo potenciales, está basada en la normativa vigente en España, por considerarse que la misma es congruente con los estándares mundialmente aceptados. Este protocolo fue aplicado a un caso de estudio, el embalse Tres Ríos ubicado en el Río Palmar, Venezuela.

Este análisis complementario de Modos de Fallo está dado por el hecho de la poca disponibilidad de información que caracteriza el entorno de trabajo en algunas presas, el cual induce un elevado grado de incertidumbre en los análisis cuantitativos, de modo tal que este análisis complementario otorga la ventaja de enriquecer la evaluación con una mayor cantidad de criterio ingenieril, información secundaria y experiencia acumulada.

Esta metodología, al igual que la anterior, plantea en primer lugar una revisión comentada del estado del conocimiento en materia de seguridad de presas, enunciar los conceptos básicos y explica brevemente en qué se fundamenta el análisis tradicional de la seguridad para luego introducir el enfoque moderno de evaluación de la seguridad basada en el riesgo. Posteriormente, se desarrolla el protocolo de evaluación de la seguridad (ver figura 13) haciendo particular énfasis en la adquisición y catalogación de la información



básica que conforma el archivo técnico, así como también en la estructura organizacional que define la titularidad y responsabilidades sobre la seguridad de los embalses, todo esto como condiciones iniciales para que pueda elaborarse un análisis de seguridad de calidad y que sus resultados puedan ser de utilidad en la gestión



Figura13. Protocolo de evaluación de la seguridad



Una vez desarrollado al detalle el protocolo de evaluación clásica de la seguridad, se indican los pasos a seguir para desarrollar el análisis complementario cualitativo de modos de fallo.

Este análisis cualitativo de modos de fallo se realiza por un equipo técnico conformado por un grupo de expertos, los cuales definen las principales necesidades de inspección, vigilancia y auscultación. Por último, se clasifica en orden de prioridad a todos los modos de fallo.

a) Consideraciones previas

- Sobre la Titularidad

Es necesario establecer como principio, que las evaluaciones llevadas a cabo con el presente protocolo, tendrán utilidad y harán un aporte cierto a la gestión de la seguridad de la presa siempre y cuando el Titular de la obra, designe un equipo calificado como encargado de la explotación y lleve a cabo un seguimiento periódico del estado de conservación de las obras, ajustando los estándares de gestión según se actualice el estado del conocimiento en esta área.

- Sobre la Explotación

El equipo responsable de la explotación debe estar conformado por personal capacitado y entrenado en los conceptos básicos de seguridad de presas, su estructura organizacional será definida por el titular. Entre sus funciones fundamentales se indican las siguientes:

- ✓ Promover inspecciones periódicas y evaluaciones de seguridad para verificar el estado de conservación de las obras y equipos.
- ✓ Custodiar, mantener y actualizar los Archivos Técnicos
- ✓ Efectuar la auscultación de la presa y conservar registros de la misma en los Archivos Técnicos correspondientes.
- ✓ Comunicar los episodios excepcionales y las circunstancias anómalas que pudieran producirse, promoviendo de manera simultánea su estudio y análisis, así como disponer los medios necesarios para proceder a su reparación en el caso que proceda.
- ✓ Elaborar las Normas de Explotación de la presa y el embalse, que se incorporarán al Archivo Técnico de la misma.

**b) Clasificación de las Presas**

En este apartado se establecen distinciones entre las presas a analizar ya que cada una tiene sus singularidades propias lo que las hace muy heterogéneas.

Este método de evaluación de la seguridad clasifica las presas en función de sus dimensiones, del daño potencial que puede ocurrir de una supuesta rotura y según su tipología; para esto se basa en los criterios de clasificación adoptados por la ICOLD, expuestos anteriormente en el Capítulo 1 de la presente investigación.

c) Revisión del archivo técnico

Toda evaluación de la seguridad de una presa, tendrá como punto de partida la revisión detallada del Archivo Técnico.

El Archivo Técnico de una presa es el compendio de todos aquellos documentos relacionados con el proyecto, construcción, puesta en carga e historial de operación de cada una de las estructuras que intervienen en la regulación del embalse. La información básica contenida en este archivo será la base de los análisis de la seguridad que se lleven a cabo durante la vida de la presa. La custodia y actualización del mismo han de ser responsabilidades del Titular de la Presa.

La revisión del Archivo Técnico consiste en verificar la cantidad y calidad de la información catalogada. Para la organización de este archivo se distinguen tres categorías fundamentales:

- Archivo Técnico del Proyecto
- Archivo Técnico de la Construcción
- Archivo Técnico de la Explotación

d) Inspección Técnica

De manera imprescindible, la Evaluación de la Seguridad de una presa en funcionamiento requiere la verificación en sitio de todas aquellas características observables que reflejen el estado y comportamiento de la presa y sus obras auxiliares.



Una inspección técnica completa debe cubrir siempre que sea posible los siguientes aspectos:

- Accesos,
- Entorno geológico,
- Parámetros,
- Coronación,
- Cuerpo de Presa,
- Instrumentación,
- Desagües,
- Aliviaderos Superficiales,
- Instalaciones Electromecánicas,
- Tomas y
- Zona inundable.

De toda inspección realizada se compondrá un informe técnico que cubra los aspectos anteriormente mencionados, en el cual se enuncien las conclusiones y recomendaciones que serán añadidas al Archivo Técnico de la Explotación de la presa.

e) Evaluación de la seguridad Hidrológica-Hidráulica

- **Seguridad Hidrológica**

En este apartado se estudiará las características de la cuenca receptora y el régimen de lluvia-escorrentía al que estará sometido el embalse, basándose en los registros históricos disponibles de estaciones meteorológicas y de aforo en la propia cuenca y a nivel regional.

- **Seguridad Hidráulica**

En este apartado se evaluará la capacidad hidráulica, comportamiento y operación de los aliviaderos superficiales y desagües profundos.

f) Evaluación de la seguridad Estructural

En este apartado se llevará a cabo el análisis del comportamiento del conjunto presa-cimiento ante la acción de diferentes combinaciones de solicitaciones. Se definirán las características mecánicas de los materiales de construcción y la caracterización



geotécnica del sitio de presa, se definirán situaciones de análisis y se llevarán a cabo los análisis de estabilidad teniendo en cuenta las particularidades de las presas.

Descripción estructural de la presa: Se describirá de forma general la geometría de los componentes de la presa, detalles constructivos de la cimentación, secciones transversales y longitudinales, drenajes y disposición de los materiales de construcción.

Propiedades de los materiales de construcción: Deberá constatarse que los materiales de construcción poseen las propiedades mecánicas prescritas en el proyecto de la presa. En las presas de materiales sueltos se verificará que se seleccionaron los materiales según la granulometría indicada en el diseño de la presa y que la colocación se lleva a cabo según lo previsto alcanzando las densidades de compactación indicadas en el proyecto.

Se obtendrán los parámetros geomecánicos y resistentes de los materiales de construcción que serán utilizadas posteriormente en los análisis de estabilidad y comportamiento tenso-deformacional de la presa.

Situaciones de Análisis:

Los análisis de la seguridad estructural se efectuarán considerando tres tipos de situaciones de análisis:

- Situaciones Normales: Corresponden a la acción del peso propio, empuje hidrostático y a las presiones intersticiales con el embalse para distintos niveles inferiores al Nivel de Aguas Normales (NAN). Se considerará también el empuje de los sedimentos y los efectos debidos a la temperatura. La persistencia en el tiempo de estas situaciones es generalmente prolongada.
- Situaciones Accidentales: Corresponden a acciones de duración limitada que producen incrementos en las sollicitaciones tales como: Empuje hidrostático debido a un incremento del nivel del embalse hasta el Nivel de la Creciente de Proyecto (NCP); aumento anormal de las presiones intersticiales; o acciones sísmicas, de magnitud inferior o igual al Terremoto de Proyecto (TP).
- Situaciones Extremas: Corresponde a situaciones como: empuje hidrostático debido a la Creciente Extrema (Nivel de Aguas Máximas), sobre elevación



extraordinaria por avería de las compuertas, situaciones anómalas de disminución de resistencia u ocurrencia del Terremoto Extremo (TE).

Análisis de estabilidad al deslizamiento:

La comprobación de la estabilidad en presas de materiales sueltos, consistirá en determinar el coeficiente de seguridad al deslizamiento a lo largo de la superficie más desfavorable entre todas las posibles. La elección de la forma de las superficies de deslizamiento dependerá del tipo de presa en estudio. Los métodos mayormente utilizados para el cálculo de la estabilidad son los de equilibrio límite, basados exclusivamente en las leyes de la estática para determinar el estado de equilibrio de una masa de terreno potencialmente inestable. No tienen en cuenta las deformaciones del terreno. Suponen que la resistencia al corte se moviliza total y simultáneamente a lo largo de la superficie de corte.

Dentro de estos métodos, los procedimientos de mayor uso en la actualidad son los basados en el “método de las rebanadas”, tales como Morgenstern–Price, Spencer, Jambu y Bishop (Leiva, 2017).

Estos métodos se basan en elegir una superficie de deslizamiento adecuada; para ello, hay que tener en cuenta las propiedades de los materiales y la geometría de la presa. La única condición que debe cumplir una superficie de deslizamiento es que sea viable como tal, es decir que su geometría haga posible el deslizamiento.

g) Evaluación de la seguridad de las Instalaciones Electromecánicas

En este apartado se debe evaluar las condiciones de operatividad de los accionamientos de válvulas y compuertas que ejerzan control sobre los desagües profundos y aliviaderos. Se verificará el estado de conservación de los tableros eléctricos y sistemas electrónicos de control.

Las condiciones de la alimentación eléctrica han de ser revisadas enfocándose en la fiabilidad del suministro eléctrico en condiciones de operación normal y de contingencia. Se evaluará la presencia de sistemas de alimentación redundantes como grupos electrógenos alimentados con combustible ubicados en las casetas de accionamientos de válvulas y compuertas, así como grupos electrógenos portátiles.



h) Evaluación de la seguridad de Accesos y Comunicaciones

La evaluación de la seguridad de Accesos y Comunicaciones consistirá en describir el estado de conservación, disposición y estructura de la red de accesos viales y peatonales a los dispositivos de control y zonas involucradas en la gestión de la seguridad de la presa; la infraestructura de comunicaciones entre el equipo encargado de la presa con el titular y autoridades competentes en materia de administración de situaciones de contingencia, también ha de ser analizada en este aparte.

i) Análisis cualitativo de Modos de Fallo

El análisis cualitativo de modos de fallo que se propone como herramienta complementaria de este protocolo de evaluación de la seguridad de una presa es con la finalidad de incluir en el análisis la mayor cantidad de información adicional que refleje con mayor precisión las singularidades de cada presa.

A efectos de este análisis, se entenderá por modo de fallo aquella sucesión de eventos que desencadenen un fallo total de presa. Esta sucesión estará asociada a un determinado escenario de solicitud y constará de un evento desencadenante, una serie de eventos de desarrollo y culminará por la rotura de la presa.

La aplicación del mismo en un caso real, demuestra la utilidad práctica de esta metodología y deja de manifiesto una serie de necesidades que deben irse solventando para alcanzar un estado del conocimiento y de la técnica en el país acorde con los estándares internacionales en gestión de la seguridad de las presas y embalses. (Rosales, 2009)

2.3 Método 3: Análisis de riesgo y confiabilidad en presas de tierra

Este método desarrollado por Pérez (2009), realiza el análisis de riesgo y confiabilidad en presas de tierra tomando en cuenta las siguientes variables de contribución:

- frecuencia sísmica,
- precipitación y
- mantenimiento,



las cuales pueden originar la ocurrencia ya sea de:

- un desbordamiento,
- o el deslizamiento del talud de la cortina aguas abajo,
- tubificación
- o la formación de brechas en el cuerpo de la cortina.

En particular, en este método se desarrollaron los aspectos relacionados con el análisis de riesgo y confiabilidad, atendiendo tanto a los factores que contribuyen a generar una falla, como a los modos en que ésta se puede presentar en presas de tierra.

El objetivo principal del método es analizar el riesgo y la confiabilidad de una de las principales obras de infraestructura, las presas de tierra. Esto, con base en las metodologías actuales y mediante la construcción de un modelo matemático general, que permita representar el comportamiento de las presas de tierra ante diversos eventos que podrían poner en riesgo la estabilidad de la estructura. Cabe mencionar que el estudio se limita a la ocurrencia de fenómenos de carácter natural sobre la cortina de la presa, ya que es la principal estructura que es susceptible de daño, al presentarse uno o diversos eventos.

Como los métodos anteriores, esta metodología primeramente hace una revisión del estado del arte en materia de seguridad, riesgos y confiabilidad en presas.

A diferencia de las herramientas actuales que emplean distribuciones discretas para la caracterización de variables, en el modelo aquí propuesto se usan distribuciones continuas. Con esto, se busca ampliar el alcance del modelo, minimizando simultáneamente los datos de entrada e incrementando la flexibilidad del modelo para simular una gran variedad de escenarios.

El modelo propuesto combina la aplicación de las Redes Bayesianas Continuas (RBC) y el Juicio Estructurado de Expertos (JEE), que son herramientas científicas recientes, que se han desarrollado a nivel internacional, y que han contribuido a resolver problemas en distintas áreas como: química, construcción, aeronáutica, vulcanismo, e incluso presas. (Pérez, 2009)



Las Redes Bayesianas (RB) son una representación gráfica de dependencias para razonamiento probabilístico en sistemas expertos. Esta herramienta es clara y flexible, ya que permite la elaboración de modelos conceptuales y cuantitativos, características por las cuales las teorías matemáticas han hecho uso constante de ellas. Están integradas por nodos, que representan a las variables, y Arcos (ejes o flechas) que los unen y representan dependencias condicionales entre ellas. Los nodos pueden representar cualquier tipo de variable, desde un parámetro medible (o medido), hasta una variable latente o una hipótesis. Los arcos y los nodos de una RB forman el esqueleto del modelo, haciéndolo flexible y fácil de entender.

En la figura 14 se muestra una red (a) y una red bayesiana (b). Como se puede apreciar, el conjunto de nodos (A-E), cuentan con arcos que tienen dirección (dirigidos) en ambos casos. Sin embargo, en el primero (a) los arcos generan un ciclo (B-C-E-D-B), ya que las flechas eventualmente salen y vuelven a llegar al mismo nodo (B), por lo que se presenta un comportamiento cíclico. Para el caso (b), la dirección de las flechas es acíclica, ya que en ningún caso los ejes regresan a su origen, por lo que se está ante la presencia de una RB.

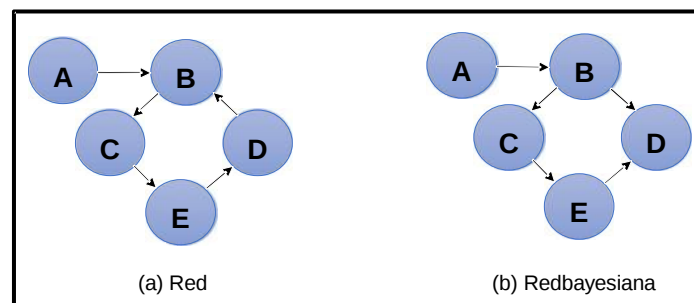


Figura 14. Representación esquemática de una red y una red bayesiana

Los dos principales tipos de redes bayesianas son las discretas y las continuas, siendo el segundo la base en la que se fundamenta el modelo desarrollado por (Pérez, 2009).

Las Redes Bayesianas Continuas permiten representar distribuciones multidimensionales de probabilidad con variables continuas y no discretas. Las RBC son grafos dirigidos acíclicos, pero ahora a cada nodo se le asigna una distribución continua de probabilidad (ver figura 15).

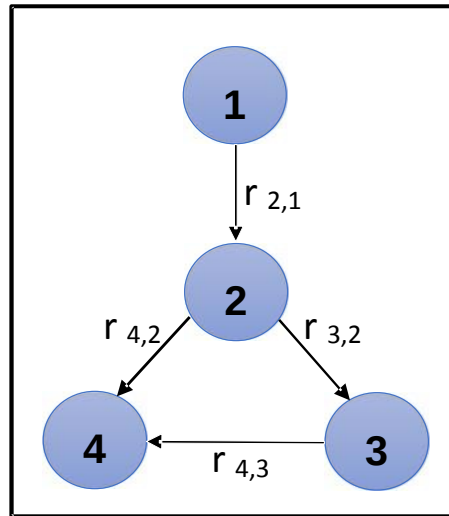


Figura15. Esquema de una red bayesiana continua

Las correlaciones mostradas indican la intensidad de la fuerza entre las variables 1 y 2 ($r_{2,1}$), entre las variables 2 y 3 ($r_{3,2}$), entre las variables 3 y 4 ($r_{4,3}$) y así sucesivamente; leyéndose como: correlación de 2 dado 1, correlación de 3 dado 2 y correlación de 4 dado 3 respectivamente.

El Juicio Estructurado de Expertos es una herramienta que se basa en el método científico, y que permite cuantificar las distribuciones marginales de probabilidad que no pueden ser generadas a partir de datos medibles o experimentos (Pérez, 2009).

El JEE permite llegar a un consenso racional con base en el método científico, a través de la evaluación y validación de juicios emitidos por diferentes expertos. Esto, partiendo de la premisa de que los especialistas cuentan con los conocimientos teóricos y prácticos, sobre un tema específico, y que dominan las teorías y valores de ciertos parámetros de interés, mismos que no pueden ser experimentalmente medidos. La incapacidad para cuantificar dichos parámetros responde a la presencia de restricciones de diferente índole, como la inaccesibilidad a datos.

La motivación del JEE, es la insuficiencia o inexistencia de información en determinado campo de la ciencia. Por ello es necesario que el investigador obtenga datos directamente con los expertos en un tema, mediante una metodología sistemática, capaz de procesar las opiniones de los individuos, de manera que la información obtenida sea válida. Al realizar el ejercicio, los resultados deberán reflejar la incertidumbre de cada experto, y la



información proporcionada por ellos, debe ser obtenible a través de un experimento real, que no se efectúa debido a las implicaciones o consecuencias que tendría.

La figura 16, muestra un esquema de la metodología utilizada. La cual hace una revisión de la literatura relacionada con el análisis de riesgo, confiabilidad, y con la seguridad de presas, misma que es abundante a nivel internacional.

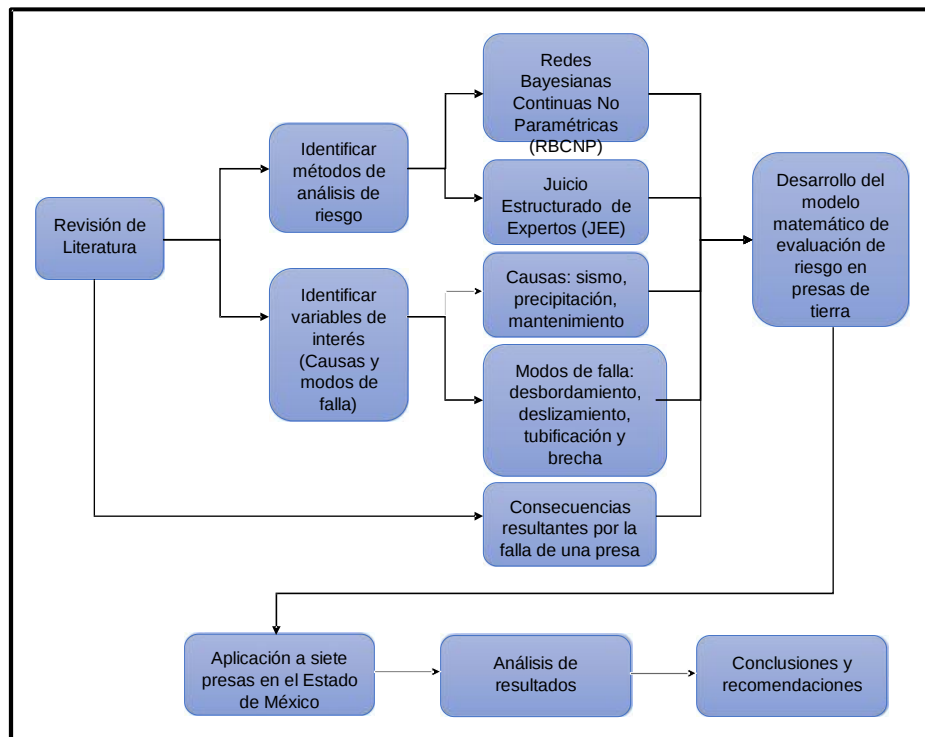


Figura 16. Metodología utilizada por (Pérez, 2009)

El modelo y sus variables

La estructuración de un modelo cualitativo es fundamental para la buena comprensión de un evento, en el cual intervienen distintas variables. Básicamente, el modelo presenta las relaciones que guardan dichas variables entre sí, proporcionando una idea de las causas y efectos de distintos fenómenos. Además de representar cualitativamente la relación entre las variables, también lo hace cuantitativamente.

Para diseñarlo, primero se revisó la literatura referente a fallas de presas de tierra, la cual permitió definir las variables de interés que intervienen en su colapso. Como se puede observar, el modelo se encuentra dividido en tres niveles, cada uno correspondiendo a



los factores de contribución, modos de falla y consecuencias respectivamente (de arriba hacia abajo). (Pérez, 2009)

En la figura 17 se muestra el modelo propuesto por (Pérez, 2009), los niveles en los que se encuentra dividido se pueden distinguir claramente por el color de los nodos.

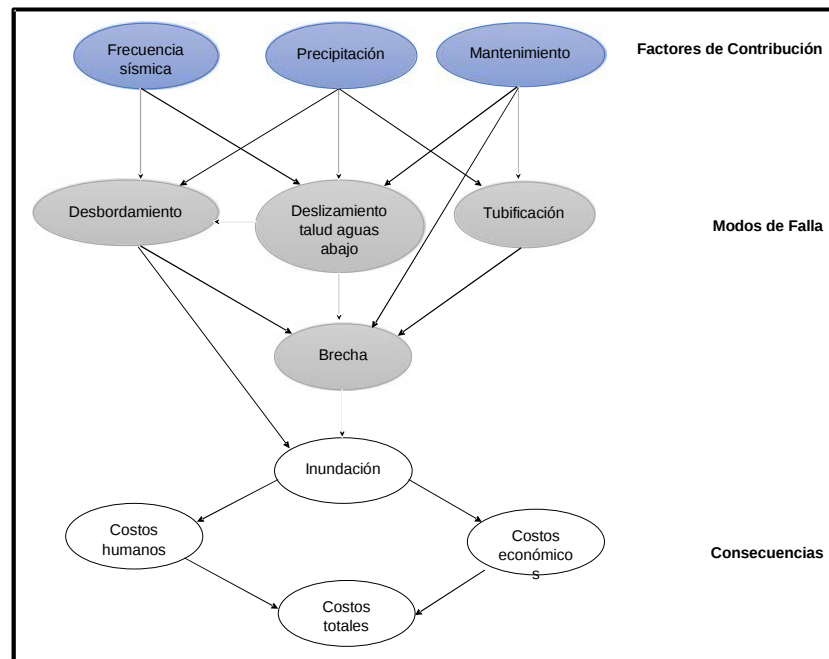


Figura 17. Modelo para el análisis de riesgo propuesto por (Pérez, 2009)

Las RBC y el JEE fueron elegidos como herramientas útiles para desarrollar un modelo matemático capaz de predecir el comportamiento de las presas bajo estudio, con base en las variables de interés identificadas. (Pérez, 2009)

De este modo, se estructuró el modelo matemático para evaluar los riesgos en presas de tierra. Una vez definido, se recolectó la información necesaria para obtener tanto los valores de las variables, como de los coeficientes de correlación entre ellas. Cabe mencionar que la información se obtuvo directamente, cuando hubo disponibilidad de datos (estadísticas), e indirectamente en caso contrario.

La combinación de ambos enfoques, RBC y JEE, permitió entonces nutrir el modelo con datos relevantes para el caso del Estado de México, lo que a su vez contribuyó a simular las distintas fallas a las que pueden estar expuestas las cortinas seleccionadas. Los resultados generados después de aplicar el modelo en repetidas ocasiones, a dichas



presas, fueron entonces ordenados y analizados. Por último, se generaron una serie de conclusiones y recomendaciones que pueden servir como base, para que los administradores tomen decisiones fundadas en datos “duros”, contribuyendo a disminuir la incertidumbre que existe en el manejo de las presas bajo su cargo. (Pérez, 2009)

2.4 Comparación entre los métodos estudiados

Luego de caracterizar los métodos para la evaluación de la seguridad integral de presas, en este apartado se realiza una comparación entre ellos, pudiendo establecer las similitudes y diferencias entre ellos, así como las ventajas en su aplicación.

La siguiente tabla muestra una comparación entre los métodos investigados.

Tabla 8. Comparación entre los métodos investigados

	Método 1	Método 2	Método 3
Objetivo principal	Desarrollar una herramienta completa que permita realizar análisis de riesgos sobre cualquier presa o sistema de presas	Formular una herramienta para el análisis de la seguridad de presas con miras a uniformizar criterios y formalizar una guía técnica	Analizar el riesgo y la confiabilidad de presas de tierra
Variables que engloba	- solicitudes: avenidas y sismos - niveles de embalse - órganos de desagüe - laminación - modos de fallo - probabilidades de fallo	- Accesos, - Entorno geológico, - Parámetros, - Coronación, - Cuerpo de Presa, - Instrumentación, - Desagües, - Aliviaderos Superficiales, - Instalaciones Electromecánicas,	- frecuencia sísmica, - precipitación y - mantenimiento,



	• hidrogramas de rotura • consecuencias	• Tomas y • Zona inundable.	
Novedades o complementos que emplean	Diagramas de influencia como representación más compacta que los árboles de evento para representar los modelos de riesgo	Análisis complementario cualitativo de modos de fallo	• Redes Bayesianas Continuas • Juicio Estructurado de Expertos

Luego de este análisis, se decidió aplicar en el Capítulo 3 de la presente investigación el Método 2: Protocolo para la evaluación de la seguridad de presas. En Cuba existe un antecedente de utilización de este método en la investigación de Leiva (2017), fue aplicado a la presa Palmarito perteneciente a la cuenca Sagua la Grande, la misma cuenca a la que pertenece la presa Alacranes. Este método cumple todas las condiciones para ser aplicado a embalses cubanos. Es un método bastante completo, engloba todas las variables que inciden en la seguridad integral de presas, por su carácter lineal es relativamente sencillo de aplicar, no hace uso de herramientas o programas computacionales que pudieran ser inaccesibles para utilizarlos en Cuba. Además, se realizó un estudio complementario que vincula los métodos 2 y 3 analizados que permitió evidenciar los principales escenarios y modos de falla más probables en la presa Alacranes.



Capítulo 3





CAPÍTULO 3. Evaluación mediante un ejemplo con los datos disponibles la seguridad integral de la presa Alacranes

En este capítulo se aplicará el protocolo definido en el capítulo 2 al caso de estudio Embalse Alacranes. Se cubrirán todos los aspectos posibles en virtud de la información recopilada, efectuando análisis pormenorizados de cada aspecto de la seguridad de la presa y se enunciarán las conclusiones pertinentes en cada caso.

3.1 Características principales del Embalse Alacranes

La Presa Alacranes está ubicada al noreste de la provincia de Villa Clara, sobre el río Sagua La Grande en las coordenadas N:324,0 E: 590,0 (ver figura 18).



Figura 18. Foto satelital embalse Alacranes

La cortina tiene una longitud de 1600 m, una altura máxima de 22 m y su cota de coronación es 38,6 m, con parapeto.

En la margen derecha tiene un dique de 1300 m de longitud y una altura máxima de 12 m, con taludes 1:2,5 aguas arriba y aguas abajo.

Datos del embalse:

- Nombre: Alacranes
- Categoría de Proyecto: III
- Año de terminación: 1972
- Fuente de alimentación: Río Sagua la Grande
- Usos: Riego, abastecimiento industrial.



La presa Alacranes (ver figura 19), está actualmente en la etapa de explotación. Su construcción comenzó en el año 1969 y finalizó en el año 1972, mismo año en que entró en funcionamiento.

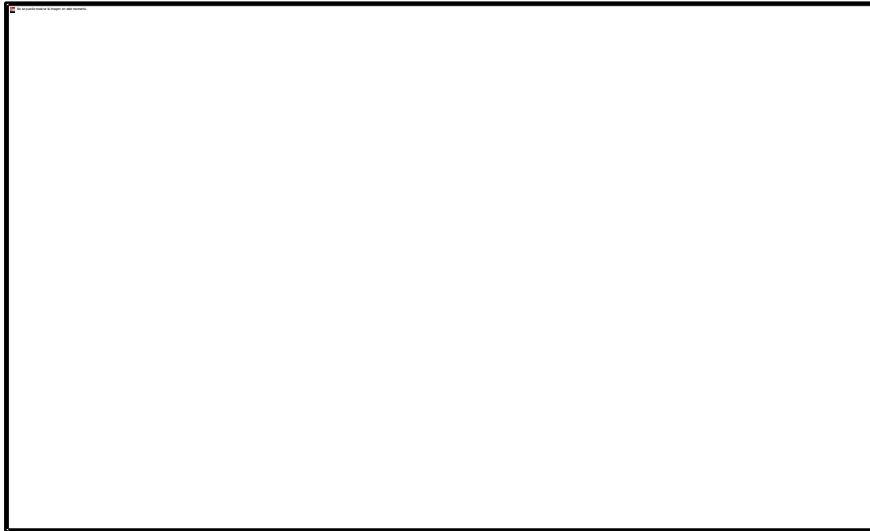


Figura 19. Vista aérea del embalse Alacranes

3.2 Procedimiento para la evaluación de la seguridad integral de la presa Alacranes

Consideraciones previas

a) Sobre la Titularidad

El titular de la presa Alacranes es el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH).

b) Sobre la explotación

La explotación de la presa es llevada a cabo por la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico de Villa Clara del Grupo Empresarial de Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos (GEARH), entidad perteneciente al INRH. Para efectos de la seguridad de la presa, la explotación debe ser llevada a cabo siguiendo procedimientos que salvaguarden la integridad de las estructuras. Es imprescindible que el titular designe un equipo calificado que se haga responsable del manejo del embalse, promueva inspecciones periódicas y evaluaciones de seguridad, custodie y actualice los Archivos Técnicos y elabore las Normas de Explotación de la presa entre otras múltiples funciones.



Clasificación de la presa

La clasificación de la presa Alacranes de acuerdo a las categorías referidas en el protocolo de evaluación de la seguridad de presas es la siguiente:

a) En función de sus dimensiones

En función de sus dimensiones, entra en el criterio de clasificación de **grandes presas** de la ICOLD considerando que:

- $H_{\text{máxima}} = 24.5 \text{ m}$
- $\text{Volumen}_{\text{total}} = 352.4 \text{ hm}^3$
- Capacidad de descarga = $2175 \text{ m}^3/\text{s}$

b) En función del daño potencial

La presa Alacranes es el segundo embalse del país en cuanto a volumen de agua almacenada, solo superada por la presa Zaza, por lo que tiene una importancia estratégica. Suministra el agua a una gran parte del complejo agroindustrial del norte de Villa Clara. Una eventual rotura de la presa, ocasionaría una gran cantidad de pérdidas de vidas humanas y daños a la economía, ya que aguas abajo de la misma se encuentra la ciudad de Sagua la Grande con una población de más de 35000 habitantes e importantes industrias para el desarrollo económico del país. Por otra parte, es previsible que ocurran daños considerables a la infraestructura de riego a la agricultura y de abasto a la industria.

Como función del daño potencial y en vista de lo anteriormente expuesto, esta presa se clasifica como Categoría A.

c) Clasificación en función de su tipología

Alacranes es una presa de materiales sueltos de sección mixta, el material que compone su estructura es de tipo rocoso con núcleo de arcilla, tanto en la cortina principal como en el dique auxiliar (ver tabla 9).

Otros datos de interés

La presa tiene el talud mojado revestido de lozas de hormigón prefabricado con parapeto de 1 m de altura desde la estación 4+75 hasta la estación 11+25. El filtro recostado al pie del talud se llevó de la cota 25m según proyecto hasta la cota 28m (berma) por razones

estéticas. En la zona de la toma de agua se construyó un colchón de drenaje según especificaciones de proyecto.

Tabla 9. Parámetros de la cortina y dique auxiliar Alacranes

Parámetros	Cortina No.1	Dique
Tipo	Mixta	Mixto
Material	Arcilla y rocoso	Arcilla y rocoso
Longitud de la corona (m)	1600	1310
Ancho de la corona (m)	6	6
Ancho de base máximo (m)	164.90	83.0
Cota de base del cauce (m)	14	27
Cota corona (m)	38.5	38.5
Altura máxima (m) desde fondo del río	24.5	11.5
Tipo revestimiento talud mojado	Rajón y lozas	Rajón
Tipo revestimiento talud seco	Capa vegetal, césped	Capa vegetal, césped
Tipo de dentellón o similar	Arcilla	Arcilla
Tipo de filtro talud mojado	Rajón	Rajoncillo
Tipo de filtro talud seco	Rajón	Macadan, rajoncillo
Prisma de drenaje	Rajón	Material diluvial

En las figuras 20 y 21 se observa las secciones típicas de la cortina y del dique auxiliar.

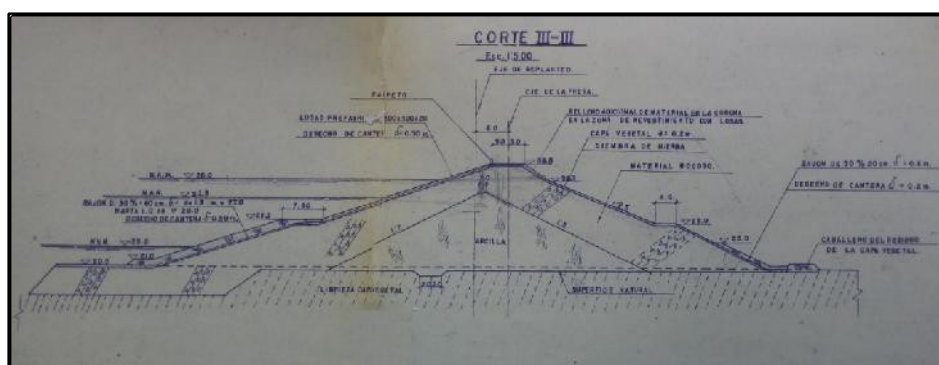


Figura 20. Sección típica de la cortina principal.



Figura 21. Sección típica del dique auxiliar

Revisión del archivo técnico

Para la revisión del Archivo Técnico se recopiló y catalogó toda la información disponible en formato digital y en físico (ver tabla 10).

Según los archivos de proyecto consultados, esta obra fue concebida para el riego de caña de azúcar y pastos en los sistemas Armonía y Macún, así como para el abasto a la industria Química de Sagua, pero posteriormente se incluyó transferir 101 hm^3 al sistema Sagua la Chica para el riego de 15000 ha de aquel sistema; con este objetivo se construyó en la década del 90 el Canal Magistral Alacranes-Pavón.

En la Figura 22 se muestra un esquema de las entregas que realiza el embalse, aunque todas aquellas entregas que se realizan por la obra de toma Nro.1 están paralizadas hace algún tiempo porque dicha obra permanece sellada por la construcción de una pequeña central hidroeléctrica.



Figura 22. Esquema de las entregas del embalse Alacranes



Tabla 10. Principales parámetros embalse Alacranes

Hidrológicos			
Cuenca: Sagua la Grande			
Río: Sagua la Grande			
Coordenadas del cierre: N: 323,77 E: 590,36			
Área de la cuenca	km²	2030	
Longitud del río principal	km	117	
Escurrimiento medio	hm³	604.90	
Escurrimiento 25 %	hm³	791.30	
Escurrimiento 75%	hm³	341.2	
Escurrimiento 95 %	hm³	160.3	
Gasto máx. en el cierre 0,5%	m³/s	4700	
Embalse			
	Cota (m)	Área (km)	Volumen (hm³)
NAM	36.00	114.0	680.0
NAN	32.32	74.60	352.4
NM	23.00	0.277	14.0
Constructivos y de diseño			
Tipo de presa: Mixta. Material rocoso con núcleo de arcilla			
Long. de la cortina: 1600 m Cota corona: 38.5 m Altura máxima: 24.5 m			
Long. dique auxiliar: 1310 m Cota corona: 38.5 m Altura máxima: 11.5 m			
Tipo obras de toma: Galería con torre de control y compuertas			
Gasto máximo obra toma No. 1: 35 m³/s			
Gasto máximo obra toma No. 2: 15.11 m³/s			
Tipo de aliviadero: Frontal, lateral de trincheras, perfil práctico con vacío			
Longitud sección vertedora: 140 m			
Gasto máximo del aliviadero 0,5% : 2175 m³/s			
Hidro-económicos			
Entrega garantizada: 325,0hm³			
Tipo de regulación: Hiperanual			
Coeficiente de regulación: 0.90			

De la revisión del archivo técnico se pudo rescatar y obtener valiosa información sobre esta presa (ver figuras 23, 24 y 25)



Figura23. Planta general de la presa Alacranes



Figura24. Perfil longitudinal del aliviadero



Figura25. Sección típica de la obra de toma No. 1

Inspección técnica

a) Accesos

La presa está ubicada Sur Suroeste de la ciudad de Sagua La Grande. Se accede por la carretera de Santa Clara a Sagua la Grande en el km 40.3 a la izquierda después de



poblado de Sitiecito. El acceso a la cortina es por un camino en regular estado que va desde la carretera Santa Clara-Sagua hasta el hombro derecho.

b) Entorno geológico

Vaso: Las orillas son tranquilas y suaves cubiertas con sedimentos deluviales, geológicamente el embalse posee condiciones favorables. Las calizas cavernosas que forman la loma del Mamey llegan a la orilla del embalse solamente en las cercanías del cierre. Hacia el oeste el fondo y los valles del embalse están formados por paquetes interestratificados de roca sedimentarias y rocas intrusivas de composición básica-ultrabásica con una configuración complicada en el plano.

Hacia el sur posee gran extensión las arcillas del paleógeno, por los valles de los ríos Sagua y Yabú y en sus cauces afloran rocas sedimentarias intrusivas de edad más antigua que yacen debajo de las arcillas.

Toda el área del embalse está cubierta por una capa arcillosa de origen aluvial-deluvial y en los valles de los ríos por arcillas eluviales. Esta arcilla que cubre el fondo del embalse sirve de pantalla natural contra la filtración.

- Empotramiento Izquierdo: Longitud de 600m. Corresponde a la ladera sur de la loma del Mamey compuesta por calizas marinas estratificadas en capas gruesas y cavernosas con capas intermedias de esquistos arcillosos y calizas no cársicas que aíslan las zonas cársicas.
La zona de intemperismo y agrietamiento intenso de las rocas en esta zona son de 2m en el comienzo y 10m al final, en las cercanías del contacto con la intrusión. Las rocas son duras y muy resistentes.
- Fondo del Valle: La longitud 1 200m es la zona del fondo del valle del río Sagua la Grande está limitada por las bases de las laderas de las lomas estando formadas en casi toda su extensión por rocas duras intrusivas, la superficie de la zona es la primera terraza sobre el cauce de inundación, están formados por sedimentos aluviales de tres tipos. Arriba yacen arcillas con una potencia de 3-4m, más abajo arena arcillosa de 3-4m de potencia, en la parte interior de los sedimentos aluviales yacen arenas de granos varios muy arcilloso con una potencia de 1, 5-2m, con gran cantidad de capas intermedias de arcilla y arena arcillosa.



Existe una zona de dislocación tectónica antigua, se encuentra en la estación 12+00, en ella ocurrió la trituración de las rocas intrusivas hasta un estado semejante a la argilita, posee un aspecto semiduro y está muy compactada.

- **Borde derecho del valle:** Se encuentra entre las estaciones 14+00 y 23+00 es una cordillera estrecha que sirve de divisoria entre los ríos Sagua la Grande y Yabú. La cota media de la superficie es de 34-45m. Tiene una pequeña elevación con cota de 45m que no se inunda. Esta cordillera está compuesta por calizas que se interstratifican con argilitas y areniscas. La potente zona de intemperismo es de 15-25m. Las rocas aquí están muy agrietadas, el coeficiente de filtración medio es de 0.5m/día y en la zona no intemperizada 0.1m/día. Las rocas madre están cubiertas por una capa de sedimento eluviales-aluviales con una potencia de 1-3m.

- **Divisorias Base:** Se encuentra entre las estaciones 23+00 y 35+00. Esta divisoria es muy suave y su cresta está en la cota 30-34m. Las rocas madre son calizas, argilitas, aleurolitas y esquistos arcillosos, entre ellas se destacan paquetes de rocas fundamentalmente calcáreas argilita-aleurolíticas y tipo mixto. En dependencia de la composición de las rocas subyacentes poseen una potencia variada.

La potencia de la zona de intemperismo de la roca madre es de 8-10m, el coeficiente de filtración medio 0-5m/día y en la zona no intemperizada de 0.1m/día o menos.

- **Empotramiento derecho:** Se encuentra entre las estaciones 33+00 y 37+50. La cresta de la divisoria aumenta suavemente hasta la cota 44, aquí se encuentra el empotramiento derecho de la presa.

Geológicamente la zona es más sencilla, las rocas madre son calizas con aisladas capas intermedias de arcillas de la zona de intemperismo, posee una potencia de 10-12m. El coeficiente de filtración medio es de 0.5m/día y la zona no intemperizada entre 0.1-0.2 m/días o posiblemente menos. Las rocas madre están cubiertas por una capa eluvial-deluvial de poca potencia.

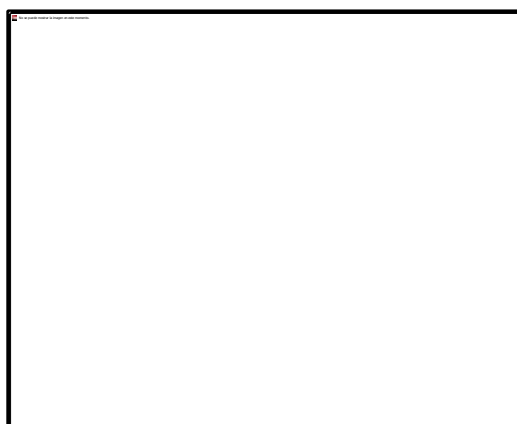
En la siguiente tabla se resume, a grandes rasgos la geología de la presa.

**Tabla 11. Geología de la presa**

Parte de la presa	Geología
Vaso	Arcilla, rocas sedimentarias y rocas intrusitas
Empotramiento izquierdo cortina principal	calizas marinas estratificadas en capas gruesas cavernosas, esquistos arcillosos y calizas no cársicas
Base de la cortina principal	arcilla, arena arcillosa y rocas intrusitas de variedades peridotitas grabodiabasas y milonitas trituradas
Empotramiento derecho cortina principal	calizas interestratificadas en argilitas y areniscas
Base del dique auxiliar	rocas calizas, argilitas, aleurolitas y esquistos arcillosos

c) Taludes

El talud seco tanto de la cortina como del dique presenta encharcamiento en el pie del mismo (ver figura 26). El agua encharcada puede ser tanto de filtraciones como de lluvia. El encharcamiento prolongado puede afectar la estabilidad de la cortina por lo que se debe mantener las observaciones periódicas y canalizar las zonas encharcadas para garantizar el drenaje en las mismas. Además, el talud seco de la cortina principal presenta filtraciones que tienen lugar a través de la cortina cuando el nivel del embalse sobrepasa la cota del núcleo, caso este que es bien conocido por los especialistas de Recursos Hidráulicos los cuales han propuesto como posibles soluciones para el problema la construcción de impermeabilización de núcleo, mediante el método de pared en suelo o la construcción de una trinchera con bentonita hasta el núcleo.

**Figura 26. Encharcamiento en el talud seco de la cortina**



El filtro del talud seco de la cortina principal está cubierto de hierbas y arcilla en toda su longitud, debido a la falta de mantenimiento, se propone restablecer los parámetros de proyecto del filtro como posible solución.

En el talud seco del dique auxiliar se produjo, producto de las fuertes lluvias de mayo de 2018, un deslizamiento de 50 m aproximadamente a continuación de la berma que se construyó en el año 2016, el cual fue reparado restableciéndose los parámetros de proyecto (ver figura 27). Existe la presencia de marabú en zonas aisladas de dicho dique.



Figura 27. Reparación del deslizamiento en el talud seco del dique auxiliar

En el talud mojado de la cortina principal existe deterioro de la protección con rajón debido a la erosión de la roca por la acción de las olas, la roca es de baja calidad y no es idónea para esa protección lo que ha llevado a su meteorización (ver figura 28)



Figura 28. Deterioro de la protección con rajón en el taludmojado de la cortina principal

El taludmojado del dique auxiliar, al menos la parte visible del mismo se encuentra en buenas condiciones, no se observa ningún indicio de asentamiento o deslizamiento, solo señalar la presencia de arbustos en el mismo.

d) Coronación

Sobre la coronación existe una carretera de tierra por la cual se puede transitar. En la cortina principal hay instalados piezómetros, existen marcas superficiales que permiten la medición de los asentamientos, con lo cual, la observación superficial arroja información relevante sobre este aspecto. Esta presenta algunos baches producto del paso de algunos vehículos por la corona donde se acumulan las aguas pluviales. El dique auxiliar no cuenta con estos dispositivos de medición, con lo cual, la observación superficial no arroja información relevante sobre asentamientos.

e) Instrumentación

A través de la instrumentación la presa puede ser observada durante la inspección, la cortina principal posee equipos para medir las filtraciones y también posee marcas superficiales para medir los asentamientos. Consta de marcas (cotas topográficas) en el talud aguas arriba que permiten llevar el registro de los niveles del embalse. Posee una red de piezómetros instalada.



De la red de piezómetros instalada se encuentran rotos o tupidos los siguientes: 3;7;11;25;26;29 y 45. Con el volumen 647.45 hm^3 alcanzado el 29/5/2018 sobrepasaron la línea de corriente superior los piezómetros 6;16;19;20;43 y 47. El tubo del pp-39 en el año subió 4.5 cm.

El dique auxiliar no posee instrumentación instalada, esto propicia el desconocimiento de información relevante sobre el mismo.

f) Desagües

La presa no cuenta con desagües de fondo ni de emergencia, en casos de vaciado del embalse esta función tiene que ser realizada por las obras de toma.

g) Aliviadero

El aliviadero ha perdido parte del recubrimiento en el canal de salida, para su solución es necesario aplicar un recubrimiento con un mortero de cemento. Se evidencia la falta de mantenimiento con pintura y anticorrosivo.

En el aliviadero se produjo una socavación de 18 m de largo, 9 m de ancho y 1.2 m de profundidad en el muro derecho a la salida debido a los grandes vertimientos ocurridos por las intensas lluvias del mes de mayo de 2018, la cual todavía no se ha rellenado. (ver figura 29)



Figura 29. Socavación en el muro derecho del aliviadero



h) Instalaciones electromecánicas

En la obra de toma 1 existen salideros de aceite en el pupitre de mando y en las tuberías del sistema hidráulico de la compuerta de segmento, falta alumbrado dentro y fuera de la caseta de mando, falta aceite hidráulico en el depósito y el sistema manual no funciona desde hace varios años.

Las columnas de esta obra de toma presentan agrietamiento que podrían ver ocasionado el fallo estructural de las mismas, por lo que fue necesario reforzarlas con una jaula de acero como se muestra en la figura 30.



Figura 30. Columnas reforzadas en la obra de toma Nro.1

En la obra de toma 2 se aprecia vibración en la compuerta izquierda con aberturas superiores a 12 cm, la grúa puente está fuertemente afectada por la corrosión, falta el altímetro de la compuerta de operación derecha. A pesar de realizarse una inversión para llevar una línea eléctrica hasta este lugar, aún no se ha conectado y las compuertas continúan accionándose de forma manual.



i) Tomas

Toma No. I

Esta toma permanece sellada debido a los trabajos que se están realizando para la construcción de una pequeña central hidroeléctrica en este embalse por lo que no se pudo verificar su capacidad de descarga ni la detección de posibles obstrucciones.

Toma No. II

La toma Nro. II no presenta indicios de obstrucción. Se verificó su capacidad de entrega de agua, siendo la correcta.

Fallos o salideros en estas tomas no comprometerían la seguridad del embalse, pero sí tendrían implicaciones sobre el suministro de agua al sistema de riego y a la industria.

j) Zona inundable

Este embalse tiene una gran zona inundable que podría causar grandes daños aguas abajo del mismo. La figura 31 muestra una imagen de los lugares que se podrían inundar en caso de crecidas.



Figura 31. Zona inundable embalse Alacranes



Evaluación de la seguridad hidrológica-hidráulica

a) Seguridad hidrológica

Las estructuras hidrotécnicas, que cumplen la función de evacuar los volúmenes en demasías de las avenidas que llegan a los embalses, son diseñadas a partir de la evaluación hidrológica de los gastos máximos para distintas probabilidades, así como los volúmenes de agua que se generen. Esos estudios llamados tránsito de avenidas tienen en cuenta una serie de parámetros físicos-geográficos de las cuencas y la intensidad extrema de precipitaciones y el escurrimiento y fueron elaborados tomando como base la información disponible en las estaciones de aforo y las metodologías propuestas para cada región.

A partir del tránsito de avenidas (ver anexo 2) para las probabilidades del 0.5%, 1% y 5% se confeccionaron los hidrogramas de avenidas para dichas probabilidades (ver figura 32).

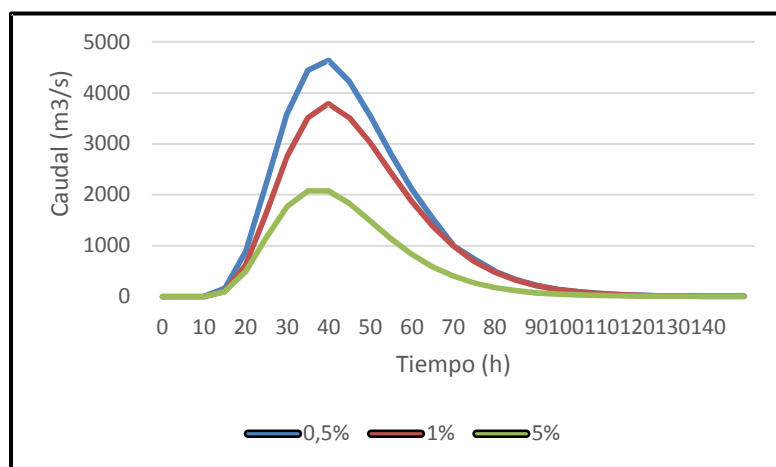


Figura 32. Hidrograma de avenidas para distintas probabilidades

b) Seguridad hidráulica

En este sentido, tratándose de una presa con un único aliviadero automático frontal, lateral de trincheras, de perfil práctico con vacío, sin ningún tipo de control por compuertas, la descarga vendrá condicionada exclusivamente por la geometría del cimacio y la aproximación del aliviadero.



Aliviadero:

Las condiciones de aproximación y la geometría del aliviadero permiten la evacuación de los caudales esperados para los niveles de la creciente de proyecto y de aguas máximas.

La figura 33 muestra la curva de descarga del aliviadero, donde para cada valor de caudal se muestra la altura correspondiente sobre el cimacio vertedor.

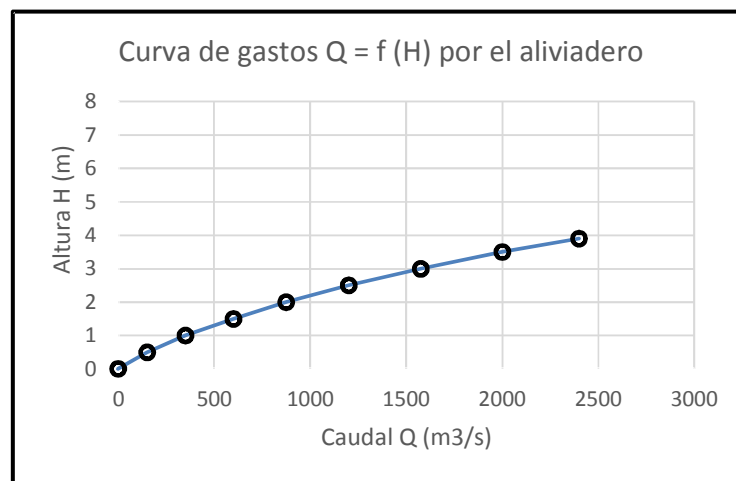


Figura 33. Curva de descarga del aliviadero

Obras de toma:

La obra de toma No 1 de tipo torre con galería y compuertas, está ubicada en la cortina principal de la presa y está proyectada para un caudal máximo de 35 m³/seg, la entrega se realiza a través del mismo curso del río Sagua la Grande hasta la derivadora Sagua.

La obra de toma No 2 de tipo torre con dos galerías y compuertas, está ubicada en el dique auxiliar de la presa, proyectada para un caudal máximo de 15.11 m³/seg, abastece el Canal Magistral Alacranes-Pavón.

Desagüe de fondo: Esta presa no cuenta con desagüe de fondo.



Evaluación de la seguridad estructural

a) Descripción estructural

La cortina principal de la presa Alacranes tiene una longitud de 1600 m con una altura máxima de 24.5 m. Es de tipo mixta, de material gravoso con núcleo de arcilla. Filtro sobre el talud desde la berma al pie del talud seco, con colchón de drenaje sobre galería de la obra de toma, capa vegetal y césped en el resto del talud. Talud mojado revestido con losas de hormigón y parapeto desde la estación 4+75 a la 11+25 y el resto con enrocamiento a volteo. Su sección transversal se puede observar en la figura 34.

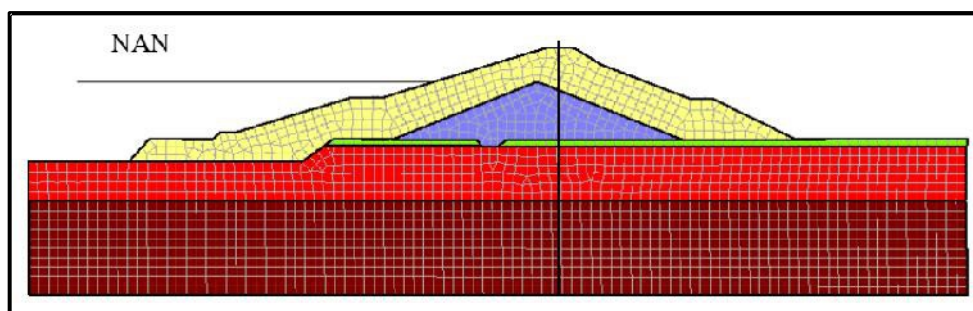


Figura 34. Sección transversal de la presa Alacranes, tomada de Barbier (2017)

El talud aguas arriba posee una pendiente de 1:3 y una berma en la cota 28.20 m, revestido con losa de hormigón y rajón por debajo de la berma; el talud aguas abajo es de 1:2,5 con una berma en la cota 28 m.

En la margen derecha tiene un dique de 1300 m de longitud y una altura máxima de 12 m, con taludes 1:2,5 aguas arriba y aguas abajo.

En la tabla 12 se muestran las propiedades de los materiales de construcción.

Tabla 12. Propiedades de los materiales de construcción

Parte de la cortina	Poisson	E (kg/cm ³)	C (kpa)	γ (kn/m ³)	θ (°)	θ' (°)
Espaldón	0.35	98	29	27.5	17	17
Núcleo	0.35	131	29	17	17	17
Filtro	0.35	200	24	0	14	14
Cimiento	0.35	200	12	12	7	7
Base	0.35	500	27	27.5	19	19



Chequeo de la estabilidad de taludes de la cortina

Para la presente investigación fueron consultadas las informaciones registradas por varios autores que han investigado recientemente la estabilidad de taludes de la cortina principal del embalse Alacranes. (Barbier, 2017, Fernández, 2010)

En condiciones corrientes de carga una presa de tierra debe tener un factor de seguridad mínimo de 1.5; sin embargo, en condiciones extraordinarias de carga, como cuando se proyecta para crecidas extraordinarias seguidas de descensos rápidos del nivel del agua, se considera adecuado, comúnmente, un Factor de Seguridad de 1.2 a 1.25 (ver tabla 13) (Barbier, 2017).

Tabla 13. Criterios de diseño recomendados para los análisis de la estabilidad de los taludes en presas de tierra

Factor de Seguridad	Significación
Menor que 1.0	Inseguro
1.0–1.2	Seguridad dudosa
1.3–1.4	Satisfactorio para cortes y terraplenes, dudoso para presas
1.5 o mayor	Seguro para presas

Mediante el empleo del software SLOPEW, Fernández (2010) definió los factores de seguridad mínimos en una sección del talud aguas arriba del embalse Alacranes, utilizó varios criterios (Bishop, Janbu y Fellenius) que se corresponden con un fallo general de los taludes (ver figura 35).

El talud mojado no presenta problemas graves con la estabilidad ya que el factor de seguridad obtenido es mayor que el mínimo exigido para este tipo de obras ($1.55 > 1.5$), pero está en los límites por lo que se asume que hubo un problema en la concepción del proyecto, que pudo haber sido en la selección correcta de los suelos o problemas económicos. Pues durante la revisión de los materiales que conforman la memoria constructiva se aprecia que el talud de aguas arriba inicialmente fuese concebido con una cubierta de losas prefabricada a todo lo largo de la estructura a diferencia del estado actual donde solo aproximadamente un 50% de la cortina está cubierta por este elemento (Fernández, 2010).

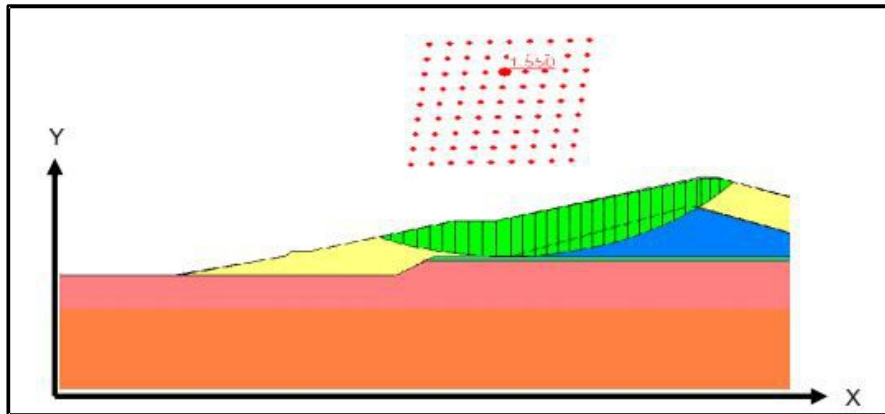


Figura 35. Representación gráfica de una falla general del talud aguas arriba por el método de cálculo Bishop y su correspondiente coeficiente de seguridad para la sección de proyecto, tomada de Fernández (2010)

La modelación de la estabilidad del talud seco de la cortina principal fue realizada por Barbier (2017), se empleó también el software SLOPEW y como criterios para definir los factores de seguridad los métodos de Fellenius, Bishop y Jambu.

En la figura 36 se puede apreciar la modelación del talud seco de la cortina principal del Embalse Alacranes, se obtuvo el factor de seguridad mínimo mediante la utilización del método de Bishop.

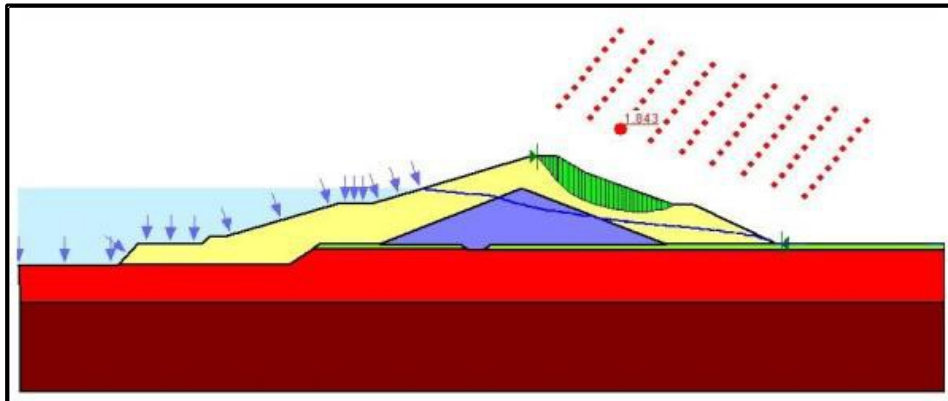


Figura 36. Representación gráfica del chequeo de estabilidad del talud aguas abajo por el método de Bishop y su correspondiente coeficiente de seguridad (Barbier, 2017)

Por el método de cálculo de Bishop se obtuvo un factor de seguridad de 1.843, concluyendo entonces que la sección no presenta problemas graves de estabilidad de



taludes, ya que el factor de seguridad obtenido es mayor que el mínimo exigido para este tipo de obras ($1.84 > 1.5$).

Además, en la tabla 14 se muestran los resultados obtenidos en la investigación de Barbier (2017) en la modelación del talud seco por los tres métodos de cálculo.

Tabla 14. Resultados de la modelación por los tres métodos de cálculo, Barbier (2017)

Método de cálculo	Factor de seguridad
Fellenius	1.664
Jambu	1.584
Bishop	1.843

Luego de estos análisis se puede llegar a la conclusión de que el talud seco es estable, a pesar de presentar este, frecuentemente, la aparición de grietas en su espaldón.

De todo lo anterior se puede plantear que la geometría adoptada para la sección es lo suficientemente estable, pues no se encuentran posibles círculos de falla con factores de seguridad menores que los permisibles.

Evaluación de la seguridad de las instalaciones electromecánicas

Existe corrosión en las estructuras metálicas de las obras de toma I y II (ver figura 37)



Figura 37. corrosión en las estructuras metálicas de las obras de toma I y II



En los hidromecanismos que accionan las compuertas se aprecia falta de mantenimiento y engrase, además necesitan tapa en la parte superior para que no se contamine el aceite.

El mal funcionamiento de estas instalaciones tiene implicaciones sobre el suministro de agua al sistema de riego y a la industria, sin embargo, no representa un riesgo apreciable para la seguridad hidráulica de la presa.

Evaluación de la seguridad de los accesos y comunicaciones

a) Accesos:

La presa es fácilmente accesible desde la carretera Santa Clara-Sagua, por un camino en regular estado de aproximadamente 3 km desde la carretera hasta el hombro derecho de la cortina principal.

b) Comunicaciones:

Hay instalado un sistema de comunicación por planta de radio que permite enviar o recibir información relacionada con la gestión y seguridad de la presa aun cuando fallen los sistemas tradicionales en caso de situaciones climáticas adversas.

La cobertura de telefonía celular en la zona es aceptable.

Dicho lo anterior, queda claro que existe un canal expedito de comunicación que permita al titular de la presa la toma efectiva de decisiones relativas a la seguridad con una capacidad de respuesta veloz toda vez que se presenten circunstancias extraordinarias que pongan en compromiso la seguridad de la presa.

Evaluación de la seguridad funcional

El Grupo Empresarial de Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos perteneciente al Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, es el encargado de la explotación de la presa. Se elaboran normas de explotación y manuales de procedimientos para diferentes escenarios. El equipo de la inspección técnica de las obras es el personal capacitado para operar los sistemas de desagüe, este personal permanece 8 horas diarias en las instalaciones, y cuando hay alertas ciclónicas trabajan 24 horas. Se puede asumir que el tiempo de respuesta entre la ocurrencia de un evento, y la puesta en práctica de alguna maniobra importante con el sistema de desagüe será inferior a 24 horas.



3.2 Estudio de escenarios más probables que producirían la falla de la presa Alacranes

El estudio de la seguridad integral de la presa Alacranes arrojó que las principales vulnerabilidades pueden ocurrir en el apartado de la seguridad estructural. Mediante la vinculación del método 1 y del método 3 consultados en el capítulo 2, se logró establecer los principales escenarios que conllevarían a la rotura de la presa.

Se identificó el escenario hidrológico como el más propenso a ocasionar modos de fallo en la cortina del embalse. Para una mejor comprensión del mismo, este escenario se dividió en dos nuevos escenarios o factores de contribución: por una parte, la ocurrencia de intensas lluvias y por la otra, la ocurrencia de una prolongada sequía (ver figura 38)

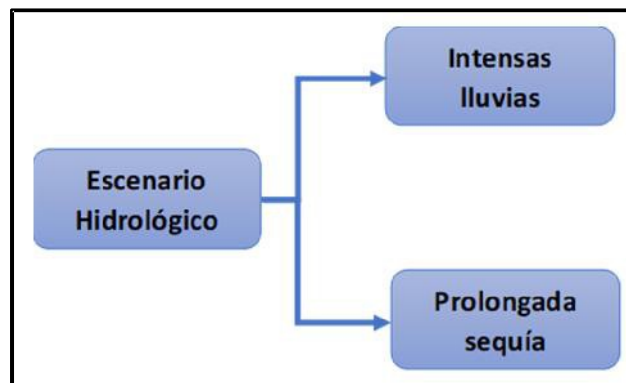


Figura 38. Escenarios o factores de contribución considerados en la investigación

A través de la unión de estos dos métodos fue posible la elaboración de los árboles de eventos correspondientes a estos dos nuevos escenarios: las intensas lluvias (ver figura 39) y la prolongada sequía (ver figura 40).

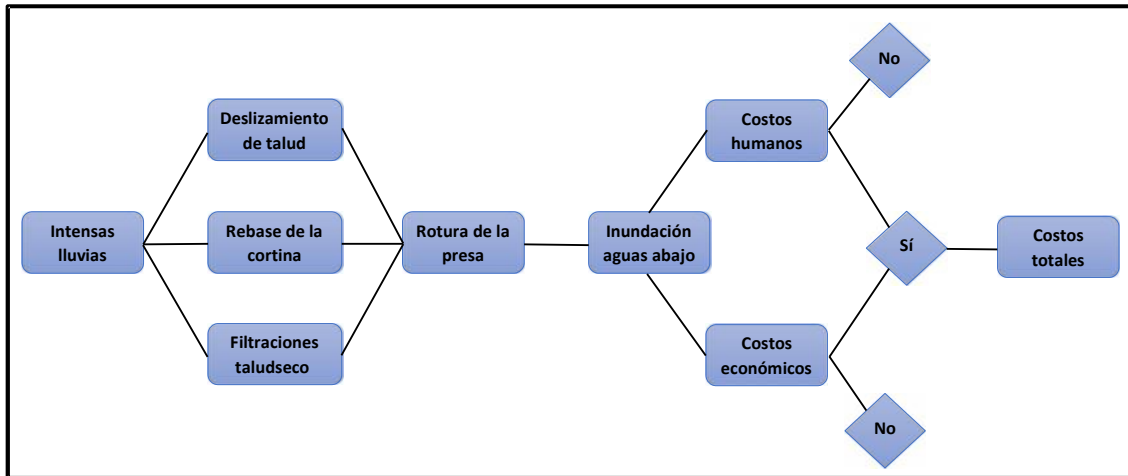


Figura39. Árbol de eventos para el escenario de lluvias intensas

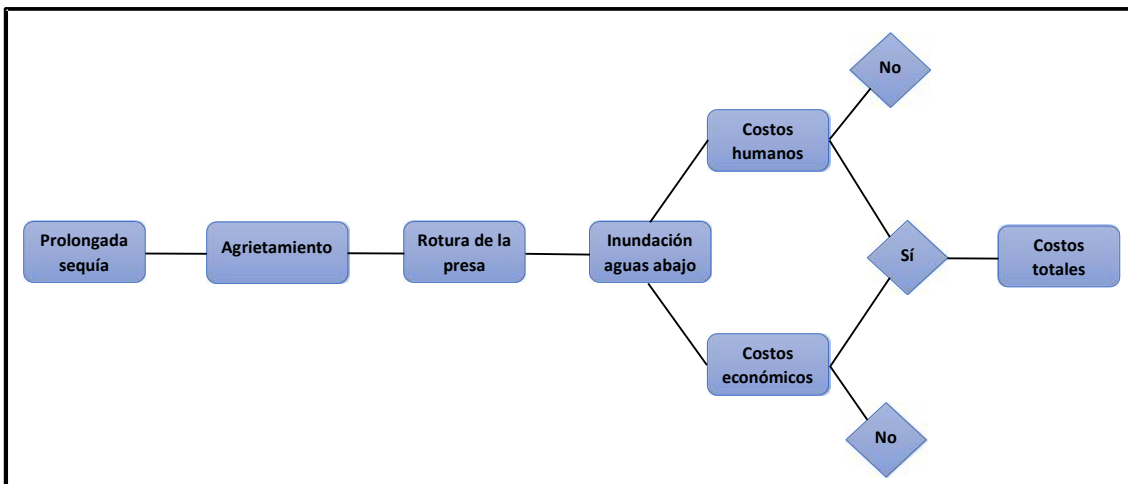


Figura40. Árbol de eventos para el escenario de prolongada sequía

Estos escenarios conllevan a la ocurrencia de modos de falla como los ocurridos durante los años de explotación de la presa Alacranes:

- Filtraciones (1973 y 2018),
- Deslizamiento de talud (1974, 1980, 2012 y 2018),
- Agrietamiento (2005) (González et al., 2017, Ramos, 2018).

Para los casos de presas de tierra cuyo objetivo principal sea el almacenamiento, constituiría una falla grave, aunque no catastrófica, la infiltración del agua del embalse, ya sea a través de la cimentación o la cortina, que impida que el mismo alcance su objetivo de almacenar agua (González et al., 2017), pero de no controlarse a tiempo las



filtraciones, desencadenarían una serie de modos de fallas que si constituirían un peligro potencial para la seguridad de la presa.

Dentro de la causa de deslizamiento de talud, según los estudios de varios autores (Barbier, 2017, Fernández, 2010, González et al., 2017, Ramos, 2018), el talud seco es el que más problemas ha presentado, por lo tanto, se considera a este como el más propenso a fallar.

A estas causas de falla que presentó en algún momento de su explotación el embalse Alacranes, se le adicionó en este estudio la falla por rebosamiento de la cortina, por ser una de las más peligrosas y de mayor porcentaje de ocurrencia tanto en Cuba como en el mundo.

Dichas causas de falla, de no observarse y preverlas a tiempo, pudieran llevar a la rotura de la cortina de la presa causando incontables daños humanos y materiales.



Conclusiones y Recomendaciones





CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

1. Se logró aplicar una metodología de trabajo para la evaluación de la seguridad integral de la presa Alacranes, apoyada en el estudio de los datos existentes a través de un análisis de riesgo y confiabilidad de esta obra.
2. Mediante la revisión bibliográfica se actualizó el estado del arte sobre la seguridad integral de presas y se definieron las tendencias fundamentales sobre este tema.
3. Se identificaron las principales causas que atentan contra la seguridad de la presa Alacranes.
4. Aplicando el protocolo de la seguridad integral de presas en la evaluación de la Presa Alacranes se consideró que el aspecto que más vulnerabilidades presentó fue el de la seguridad estructural, pero se considera que está entre los parámetros aceptados en Cuba y en el mundo, por lo que no afecta el correcto funcionamiento de la obra.



Recomendaciones

1. Realizar estos estudios sobre la seguridad integral de presas en otros embalses de la provincia y del país para generalizar esta metodología.
2. Otorgar valores cuantitativos a las variables que influyen en la seguridad integral de una presa y mediante la utilización de un software de código abierto conocer cuáles tienen mayor probabilidad de conducir al fallo de estas obras.
3. Estudiar metodologías para la evaluación de los costos económicos que produciría una eventual falla de la presa Alacranes.



Referencias bibliográficas





REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (NC), O. N. D. N. 2013. NC 974: 2013. Presas, diques de protección, canales y obras asociadas-Categorías para nuevos proyectos o para el rediseño de estructuras existentes en un escenario climático cambiante. La Habana, Cuba.
- ÁLVAREZ, L. 1998. La estabilidad de cortinas de presas de tierra mediante la solución de los estados tenso-deformacionales y la aplicación de la teoría de seguridad. Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- ARMAS, N. R. 2002. Criterios para diseñar presas de tierra: prioridad y secuencia.
- ARMAS, R. y HORTA, E. 1987. Presas de tierra, Ciudad de La Habana, Editorial ISPJAE.
- BARBIER, Y. I. 2017. Modelación de la estabilidad del talud aguas abajo en la cortina del cierre principal del embalse Alacranes. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- CANTERO, L. E. y VELAZCO, E. A. 2010. El fallo de presas de tierra en Cuba: una visión sobre el tema. 15 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura. La Habana, Cuba.
- CASTRO, F. 1964. Discurso pronunciado por el Comandante Fidel Castro Ruz, Primer Ministro del Gobierno Revolucionario y Primer Secretario del Partido Unido de la Revolución Socialista de Cuba, en la conmemoración del II Aniversario de la Creación del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos. Ciudad de La Habana, Cuba: Editorial Periódico «Granma».
- DEL RÍO, M. 2016. Sifonamiento en presas de tierra: causas y métodos de solución. Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría" (CUJAE).
- DÍAZ, T. 2010. Procedimiento para la investigación ingeniero geológica de las patologías en presas de tierra. Tesis presentada en opción al Título Académico de Master en Geología. (Mención en geología ambiental), Universidad de Pinar del Río "Hermanos Saíz Montes de Oca".
- FERNÁNDEZ, L. 2010. Comportamiento de las presas de tierra: Caso de Estudio Embalse "Alacranes". Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- FERRER, R. 2018. Fidel: padre de la voluntad hidráulica en Cuba. Radio Reloj [Online]. Available: <http://www.radioreloj.cu/es/revista-semanal/fidel-padre-la-voluntad-hidraulica-cuba-2/> [Accessed 6 de marzo de 2019].
- GIULIANI, F. L. 2004. Enfoque sistémico de la seguridad de presas.
- GONZÁLEZ, Y., GUEDES, O. y RODRÍGUEZ, S. 2017. Las fallas en presas de tierra. Caso de Estudio: falla por estabilidad de taludes en función de las condiciones de drenaje. La Habana, Cuba: Centro de Investigaciones Hidráulicas, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría" (CUJAE).
- ICOLD 1995. Dam Failure Statistical Analysis. In: (ICOLD), I. C. O. L. D. (ed.).
- ICOLD 2011. Guidelines for Use of Numerical Models in Dam Engineering. In: DAMS, C. O. C. A. O. A. A. D. O. (ed.).



- INRH 1991. Regulación de proyectos # 001/91. Ciudad de La Habana.
- INRH 2016. Principales indicadores y datos de infraestructura hidráulica. La Habana, Cuba: Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos.
- LEIVA, I. 2017. Tendencias actuales en el análisis de la integridad de presas de tierra. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- ONEI 2017. Anuario Estadístico de Cuba 2016. Construcción e inversiones.
- ORSEP 2018. Lineamientos de seguridad de presas, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.
- PÉREZ, B. 2009. Análisis de riesgo y confiabilidad en presas de tierra: Un caso en el Estado de México. Universidad Autónoma del Estado de México.
- RAMOS, D. 2018. Análisis del Sistema de Control Técnico de la presa Alacranes. Santa Clara, Cuba: Empresa de Aprovechamiento Hidráulico Villa Clara.
- RESTELLI, F. 2016. La Seguridad de Presas en Argentina. 30 de mayo de 2016 ed.
- ROSALES, J. D. 2009. Desarrollo de un protocolo para la evaluación de la seguridad de presas en Venezuela: Aplicación al embalse Tres Ríos "El Diluvio". Tesis presentada en opción al Grado Científico de Master en Ciencias, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Valencia.
- SÁNCHEZ, F. J. 2007. Seguridad de presas: Aportación al análisis y control de deformaciones como elemento de prevención de patologías de origen geotécnico. Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.
- SANTAYANA, F. P. D. 2010. Las presas de materiales sueltos y sus patologías. Jornada de Erosión Interna de Presas.
- SARDUY, F. 2010. Recursos hídricos en Cuba. Santa Clara, Cuba: Empresa de Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos de Villa Clara.
- SERRANO, A. 2011. Desarrollo de una herramienta completa de análisis y evaluación de riesgos en seguridad de presas. Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Politécnica de Valencia.
- SHERARD, J. L. 1963. Earth and Earth Rock Dams, La Habana, Cuba, Instituto del Libro.



Anexos





ANEXOS

Anexo 1. Presas de materiales sueltos que presentaron fallas en Cuba

Nombre de la presa	Año de construcción	Año de falla	Otros años en que falló	Altura (m)	Volumen NAN (hm ³)	Causa	Daño causado	Operan	Edad de la presa al momento de la falla (años)
Hidro-regulador Durán	1991	2008		6,92	3,12	rebase de la cortina	colapsó	si	17
Hidro-regulador Las Flores	1994			6,40	3,15	rebase de la cortina	colapsó	si	
La Atalaya	1975			7,07	7,75	rebase de la cortina	colapsó	si	
Máximo	1980	1985		22,50	70,55	rebase de la cortina	colapsó	si	5
Porvenir II	1984	1985		12,40	10,00	rebase de la cortina	colapsó	si	1
Ortiz	1989	1993		8,00	7,00	rebase de la cortina	colapsó	si	4
Las Lajas	1990	1993		11,00	7,28	rebase de la cortina	colapsó	si	3
San José (Lavado 4)		1993				rebase de la cortina	colapsó	si	
Mal País II	1968	1976		10,00	8,27	rebase de la cortina	colapsó	no	8
San Blas						sifonamiento	colapsó	no	
Las Cabrerías		1994		12,20	12,40	sifonamiento	colapsó	no	
Viet-Nam Heroico	1966			19,00	43,22	sifonamiento	colapsó	si	
Paso Viejo	1990	1991		21,90	12,24	sifonamiento	colapsó	si	1
Del Medio-Las Nuevas	1971	1990		15,20	44,50	deslizamiento de talud	colapso intencional	si	19
Las Casas II	1969			6,20	4,75	rebase de la cortina	colapso intencional	si	
Hatillo(Santa Rita)	1991	1990		22,30	5,84	sifonamiento	colapso intencional	si	0
Herradura	1986	1988		23,70	58,31	deslizamiento de talud	no colapsó	si	2
La Ruda	1978	1996		20,50	10,20	deslizamiento de talud	no colapsó	si	18
La Cidra	1975	1979		23,50	38,50	deslizamiento de talud	no colapsó	si	4
Las Nieves	1987	2002	2013	16,55	4,21	deslizamiento de talud	no colapsó	si	15
El Salto	1980	1980		20,00	9,50	deslizamiento de talud	no colapsó	si	0
Alacranes	1972	1974	1980/2012	24,50	352,40	deslizamiento de talud	no colapsó	si	2
Minerva	1971	2015		38,00	123,00	deslizamiento de talud	no colapsó	si	44



Anexo 1. Presas de materiales sueltos que presentaron fallas en Cuba (Continuación)

Nombre de la presa	Año de construcción	Año de falla	Otros años en que falló	Altura (m)	Volumen NAN (hm³)	Causa	Daño causado	Operan	Edad de la presa al momento de la falla (años)
Lebrije	1970	1988	2002	39,50	82,39	deslizamiento de talud	no colapsó	si	18
La Venera	1976	1976		10,56	3,40	deslizamiento de talud	no colapsó	si	0
Minas I	1984	2000	2003/2007	11,80	6,40	deslizamiento de talud	no colapsó	si	16
Najasa II	1990	1994		18,30	87,00	deslizamiento de talud	no colapsó	si	4
San Pedro	1991	1994	2001	19,40	27,80	deslizamiento de talud	no colapsó	si	3
Santa Rosa 84	1976	-		10,46	6,48	deslizamiento de talud	no colapsó	si	
Cauto del Paso	1991	2012		30,00	330,00	deslizamiento de talud	no colapsó	si	21
Ojo de Agua	1975	2008		15,50	3,31	deslizamiento de talud	no colapsó	si	33
Bio	1989	2000		25,20	67,50	deslizamiento de talud	no colapsó	si	11
Nipe	1977	2008		35,00	112,20	deslizamiento de talud	no colapsó	si	31
C. M. Céspedes	1967	2004	2007	52,00	243,00	deslizamiento de talud	no colapsó	si	37
A. Cubano-Búlgara	1986	1990		24,00	137,60	deslizamiento de talud	no colapsó	si	4
La Ruda	1978	1979		20,50	10,20	rebase de la cortina	no colapsó	si	1
Abreus	1986	1990		12,50	50,00	rebase de la cortina	no colapsó	si	4
Dique Barroso	1984	1994		5,51	9,75	rebase de la cortina	no colapsó	si	10
Copo de Chato	1974			17,70	2,48	rebase de la cortina	no colapsó	si	
San Juan de Dios	1989			9,14	7,15	sifonamiento	no colapsó	si	
Cauto del Paso	1991	1991		30,00	330,00	sifonamiento	no colapsó	si	0
Zaza	1972	1972	79/81/99	38,50	1020,00	sifonamiento	no colapsó	si	
Santa Inés	1987	1988		9,80	3,08	sifonamiento	no colapsó	si	1
Libertad	1991	1991		16,80	41,30	sifonamiento	no colapsó	no	0
Del Medio-Las Nuevas	1971	1990		15,20	44,50	sifonamiento	no colapsó	si	19
Ejército Rebelde	1976	1976		29,10	97,70	filtraciones	no colapsó	si	0
Alacranes	1972	1973		24,50	352,40	filtraciones	no colapsó	si	1
Máximo	1980	1980		22,50	70,55	filtraciones	no colapsó	si	0
El Yeso	1988	1988		13,18	4,15	filtraciones	no colapsó	si	0
Cautillo	1990	1990		42,20	84,42	filtraciones	no colapsó	si	0
Higuanojo	1977	1977		40,00	24,40	agrietamiento	no colapsó	si	0
Alacranes	1972	2005		24,50	352,40	agrietamiento	no colapsó	si	33



Anexo 2. Tránsito de avenidas para diferentes probabilidades, embalse Alacranes

Tiempo (h)	Hidrógrafo de entrada para diferentes probabilidades (m ³ /s)		
	0.50%	1%	5%
0	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00
15	160.50	106.00	98.50
20	879.00	621.00	489.00
25	2210.67	1635.67	1148.33
30	3591.33	2755.67	1764.00
35	4446.33	3517.33	2075.00
40	4644.50	3790.08	2074.16
45	4226.33	3517.00	1830.33
50	3556.67	3025.00	1488.67
55	2809.00	2438.33	1138.67
60	2115.33	1872.00	832.00
65	1535.33	1384.33	586.67
70	1002.67	993.33	402.67
75	746.00	696.00	270.00
80	504.67	478.33	177.67
85	336.00	324.00	115.67
90	221.00	216.33	74.00
95	144.00	143.00	46.67
100	92.67	92.67	36.33
105	59.33	59.33	21.67
110	37.33	37.33	11.00
115	24.00	23.67	7.00
120	14.67	14.67	4.67
125	9.30	9.33	2.67
130	6.00	6.00	1.33
135	3.67	3.67	0.73
140	2.67	2.93	0.33