

Revisión de la estabilidad de presas mexicanas con riesgo

Víctor Hugo ALCOCER-YAMANAKA^{a,b} y Rodrigo MURILLO-FERNÁNDEZ^{a,b,1}

^a *Comisión Nacional del Agua*

^b *Universidad Nacional Autónoma de México*

Resumen. Se diagnosticó preliminarmente que más de cien presas se encontraban en riesgo, entre las cuales cerca de cuarenta mostraron deficiencias en sus cortinas de tierra y enrocamiento, por lo cual se revisó su estabilidad. Se presentan las características generales de aquellas que manifestaron anomalías en sus terraplenes y los resultados de los estudios de estabilidad bajo diferentes condiciones de servicio. En algunas se realizó análisis probabilista de la estabilidad y se compara los resultados. Conforme a la normatividad vigente de seguridad de presas, algunas no satisfacen los requerimientos actuales, sin embargo, de acuerdo a los estudios de riesgo, tienen muy baja probabilidad de que ocurra una falla.

Palabras Clave. Presas, estabilidad, análisis determinista y probabilista

1. Introducción

En México existen más de 6200 presas y bordos de protección que proporcionan servicios de abastecimiento para diversos fines, así como protección contra avenidas [1]. Esta infraestructura es variada en tamaño y estructuración; está a cargo de diversos actores desde pequeños productores agropecuarios hasta instituciones gubernamentales. Corresponde a la Comisión Nacional del Agua (Conagua), vigilar que las obras construidas sobre los cauces de propiedad federal, no produzcan afectaciones a la población por mal funcionamiento y que las aguas sean distribuidas conforme a los derechos establecidos. Por estas razones, vigila que la infraestructura hídrica y otras construcciones sobre los cauces, no alteren el comportamiento de las corrientes de manera desfavorable y es la responsable de autorizar las que se construyen, así como de su adecuado funcionamiento y seguridad. La propia Conagua maneja directamente alrededor de 400 obras para abastecimiento de agua potable, riego y protección contra inundaciones.

Para evitar que una operación inadecuada o que el deterioro de las estructuras se convierta en una amenaza para la población y sus bienes, se tiene implementado el Programa Nacional de Seguridad de Presas, mediante el cual se realizan revisiones del estado estructural y funcional de las presas, con el cual se han realizado en los últimos 5 años más de 2500 inspecciones, principalmente a las grandes presas definidas por la International Commission on Large Dams [2] como aquellas que tienen una cortina con altura mayor que 15 desde su desplante o aquellas entre 5 y 15 m que almacenen más de

¹ Correspondencia del autor, Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Insurgentes Sur 2416, Ciudad de México CP 04540, México; E-mail: rodrigo.murillo@conagua.gob.mx.

3 hm³. También se revisan aquellas menores que representan peligro o que tienen antecedentes de un mal comportamiento hidrológico o estructural.

De esta forma, se determinó que más de un centenar de presas podría representar amenazas de tipo hidrológico, estructural, funcional o por falta de ordenamiento territorial y se estableció un programa de estudios y evaluación para determinar el riesgo que representan. En este trabajo se mencionan únicamente aquellas cortinas de tierra que se consideró con riesgo en su estabilidad.

2. Trabajos realizados

En todas ellas se estableció un programa de caracterización consistente en la revisión exhaustiva y levantamiento topográfico de sus estructuras y embalse, reconocimiento geológico y campaña de exploración de la cortina y cimentación, ensayos de laboratorio para caracterizar las propiedades de los materiales, estudios hidrológico e hidráulico, revisión de la estabilidad de la cortina bajo cargas normales y extremas (avenidas y sismos), determinación de las zonas de inundación para descargas normales de avenidas con periodo de retorno de 100 años y bajo la posibilidad de ruptura o descarga por periodo de retorno de 10,000 años, evaluación de la población bajo riesgo aguas abajo y elaboración de dictamen sobre su seguridad.

Bajo este esquema se han revisado 61 presas, de las cuales tienen riesgo de inestabilidad 24 con cortinas de tierra y 9 con cortinas rígidas. Otras obras requerían rehabilitación y fueron reparadas. Cabe destacar que algunas son obras antiguas, con más de 200 años de existencia, por lo que se decidió realizar la revisión de la estabilidad de taludes de algunas cortinas de materiales térreos adicionales, para un total de 39. Se realizó la revisión de su funcionamiento hidráulico y de la capacidad de sus órganos de desagüe, ya las cargas hidráulicas de operación normales más los efectos dinámicos o condición extrema se han modificado con el tiempo. De ellas solo se comentan los casos más relevantes.

3. Principales anomalías

Algunas cortinas habían manifestado grietas, deformaciones importantes y unas pocas tuvieron una brecha o erosiones de importancia, por lo cual se dio énfasis a la revisión de la estabilidad y a la posibilidad que sus terraplenes tuvieran de suelos susceptibles a la erosión o dispersión.

Es conveniente señalar que en algunos casos los materiales utilizados y los procedimientos constructivos no fueron los más convenientes, ya que en Malpaís, La Cantera, San Agustín y Dolores, se utilizó el producto del desazolve del vaso para sobreelevar la cortina o bien se colocó sobre los taludes, lo cual provocó agrietamiento y desplazamientos entre el terraplén original y los azolves o en estos últimos. En otros casos, como en los Diques de Chihuahua, así como en Atemajac y La Salitrera, los materiales utilizados son una mezcla heterogénea de fragmentos de roca con suelos que se colocaron sin un control de compactación; en otros casos, se sospechó y confirmó en uno de ellos, la presencia de suelos dispersivos [3] o erosionables [4], que favorecen la tubificación.

En todos los casos se determinaron las dimensiones de las estructuras y las propiedades de los materiales, se realizaron las redes de flujo correspondiente al NAMO,

NAME y vaciado rápido; en aquellos casos que su finalidad es control de avenidas se analizó también la estabilidad con embalse vacío más sismo y con llenado rápido. Los factores de seguridad que deben satisfacer las cortinas son los mostrados en la Tabla 1 y las características de las obras que manifestaron anomalías en su estabilidad se reportan en la Tabla 2.

Tabla 1. Factores de Seguridad Admisibles [5] [6].

Condición	FS	Talud	Nivel de agua en el vaso
Operación Normal	1.50	Ambos	Embalse con nivel al NAMO
Operación Inusual	1.30	Ambos	Embalse con nivel al NAME
Operación Inusual por vaciado rápido	1.20	Ambos	El embalse desciende del NAMO al NAMIN
Operación Inusual por llenado rápido	1.20	Ambos	El embalse asciende del NAMIN al NAME
Operación Extrema por sismo	1.10	Ambos	Embalse lleno con nivel al NAMO

Tabla 2. Características de las presas [1].

Presa	Estado	Altura m	Estructura	Cimentación	Taludes A Ar	Taludes A Ab	Capacidad hm ³
Malpaís	Mich.	8.40	Homogénea	Arena	1.5:1	1.5:1	23.74
Pedro Carano	Mich.	13.00	Homogénea	Transición	1.6:1	2:1	1.360
La Cantera	Oax.	13.50	Homogénea	Roca	3.5:1	2.5:1	0.730
La Cantera		13.30	Azolve		1.5:1		0.730
Atemoztli	Tamps.	8.10	Homogénea	Conglomerado	3:1	3:1	2.400
La Salitrera	Gto.	13.50	Homogénea	Aluvión	1.5:1	1.5:1	0.110
San Agustín	Dgo.	8.20	Homogénea	Arena arcillosa	2.5:1	2.05:1	0.140
Anachepa	Zac.	9.50	Homogénea	Toba riolítica	4.35:1	3:1	0.060
La Pileta II	Ags.	9.00	Homogénea	Aluvión	1.6:1	1.6:1	0.726
Las Adjuntas	Ags.	5.25	Homogénea	Suelo	1.5:1	3:1	0.508
El Tullillo	Ags.	6.00	Homogénea	Suelo aluvial	1.1:1	2:1	0.620
D Puerto de la Paz	Chih.	6.10	Homogénea	Conglomerado	1.38:1	1.5:1	0.050
D La Biblia	Chih.	13.00	Homogénea	Lutitas	1.43:1	1.38:1	0.0068
Piedra Blanca	Coah.	6.10	Homogénea	Lutitas	3:1	3:1	1.500
San Antonio P.	Coah.	8.50	Homogénea	Arcilla dura	3.08:1	3.08:1	1.407
La Guajolota	Chih.	10.16	Homogénea	Ignimbrita	3:1	3:1	0.360

Los procedimientos para determinar la estabilidad de los taludes fueron los usuales; se estableció un modelo geométrico estructural conformado en capas horizontales con sus propiedades representativas como las mostradas en la Tabla 3 y mediante el uso de software comercial, se obtuvo la red de flujo bajo distintos niveles de almacenamiento (Figura 1) y el análisis de estabilidad en término de esfuerzos efectivos con los métodos de Bishop y Morgenstern-Price [7] (Figura 2), para los niveles de agua en el embalse indicados y sus variaciones.

Tabla 3. Propiedades representativas de los materiales en cortinas [3] [8] [9] [10].

Presa	Clasificación SUCS	γ_m (kN/m ³)	ϕ (°)	c (kPa)	k (cm/s)
Malpaís	SM	18.0	31	10	1.42E-04
La Cantera	CL	19.9	31	220	4.70E-05
Azolve en la Cantera	ML-SM	18.0	19	54.9	1.70E-03
La Salitrera	CL-ML	15.0	35	5	5.48E-04
D Puerto de la Paz	SP-SM	16.0	30	5	3.67E-05
D La Biblia	GC	17.0	21	66	

Los resultados de estos estudios arrojaron que algunas cortinas no satisfacen los Factores de Seguridad requeridos y que en varios casos son menores que la unidad, como se indica en la Tabla 4.

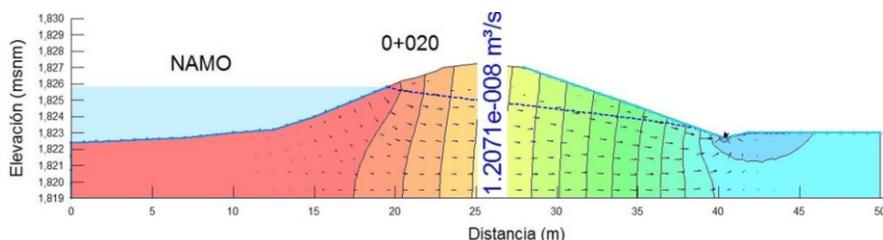


Figura 1. Red de flujo de una cortina homogénea para el NAMO.

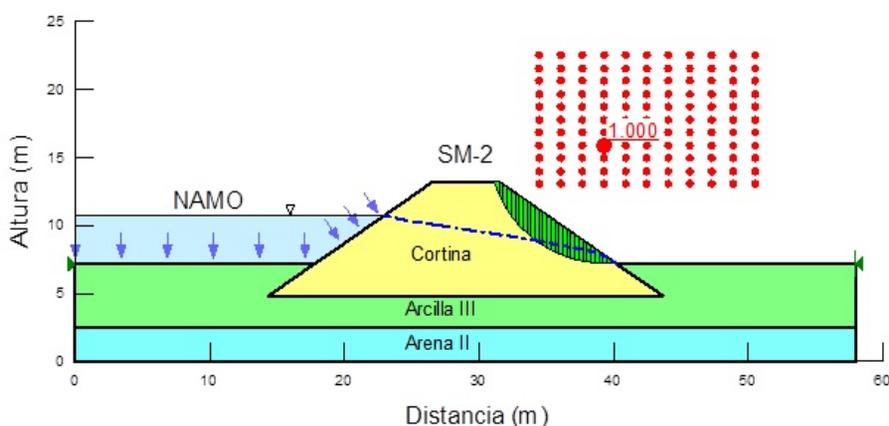


Figura 2. Resultado del análisis de estabilidad con flujo establecido al NAMO y sismo.

Tabla 4. Factores de seguridad de algunas presas.

Presa	Condición	NAMO	NAMO	NAME	NAME	Vaciado	Vaciado	NAMO	NAMO
		A Ar	A Ab	A Ar	A Ab	A Ar	A Ab	Sismo A Ar	Sismo A Ab
Malpaís		1.461	1.223	1.645	1.108	1.022	1.228	1.085	1.000
La Cantera				8.041	1.670	1.584	1.729	2.240	1.112
Azolve La Cantera								0.960	0.766
La Salitrera		1.815	1.310	3.105	0.975	0.861	0.976	1.724	1.201
D Puerto de la Paz		1.850	1.430	2.920	1.230	2.210	1.380	1.280	1.110
D La Biblia		2.900	1.230	3.870	1.250	2.820	1.230	1.660	0.980

Conforme se muestra en la Tabla 4, los factores de seguridad mínimos que no cumplen con los recomendados están indicados con negritas, lo cual se debe fundamentalmente a que las cortinas tienen taludes escarpados o bien los materiales fueron colocados sin un adecuado proceso de compactación.

Con motivo de la emisión de la Norma de Operación Seguridad de Presas NMX-AA-175 [11] durante la realización de los análisis de estabilidad, se procedió a efectuar además, una evaluación probabilística de la estabilidad de algunas cortinas.

4. Comparación entre los resultados por los métodos determinista y probabilista

Se determinaron los mecanismos más probables de falla, los niveles del agua en el embalse y su probabilidad de ocurrencia de acuerdo al comportamiento hidrológico de cada cuenca, se desarrollaron los árboles de eventos que podría conducir a la falla, los cuales por lo general tienen como eventos perturbadores los niveles altos de agua en el vaso, sus variaciones o la ocurrencia de sismos, considerando sus probabilidades.

Para la evaluación probabilista de la estabilidad, el procedimiento aplicado fue la determinación de la probabilidad anual de eventos perturbadores como cargas hidráulicas del vaso (llenado o variación repentina de niveles), así como cargas dinámicas por Sismo con $Tr = 950$ años o el Sismo Máximo Creíble (MCE) [12]. Se determinaron las propiedades aleatorias de los materiales de las cortinas y se efectuaron análisis de sensibilidad para verificar las de mayor influencia, seguido de análisis probabilistas de la seguridad de la cortina mediante el método generalizado de estado límite [7] para la determinación de la estabilidad de las cortinas.

El modelo estructural de los terraplenes por capas fue similar al estudio determinista y con los resultados de la exploración, pruebas de laboratorio, la aplicación de los conocimientos y experiencia de los geotecnistas involucrados, fueron determinadas sus propiedades probabilistas y sus rangos de variación aplicando métodos de Monte Carlo o Taylor para generar distribuciones de probabilidad de tipo normal o lognormal de los pesos específicos, la cohesión y el ángulo de fricción, como los mostrados en la Figura 3.

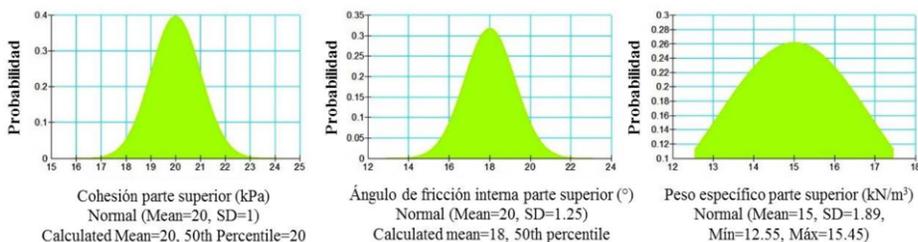


Figura 3. Geostatística de las propiedades de los suelos con sus distribuciones de probabilidad y parámetros de la distribución normal.

Se hicieron combinaciones de las solicitaciones más probables y de las propiedades de los suelos para estudiar la sensibilidad de la estabilidad de las cortinas, ante las variaciones de las propiedades de los materiales, para todas las combinaciones posibles. Un resultado típico obtenido del análisis de estabilidad de taludes para el estudio de la sensibilidad a las propiedades mecánicas, el peso específico y las aceleraciones sísmicas se muestran en el ejemplo de la Figura 4, en la cual se presentan en las abscisas los valores de los rangos de sensibilidad de cada uno de los parámetros que se hicieron variar y en el eje de las ordenadas el valor del factor de seguridad determinado para los casos analizados.

En algunas cortinas, la propiedad más relevante, como era de esperarse, resultó ser la cohesión por sus amplios rangos de variación, mientras que en aquellas cortinas construidas sin un adecuado control de los materiales y de su colocación, tienen mayor influencia los parámetros de resistencia al cortante e inclusive el peso específico, debido a los cambios de la composición y del grado de compactación de los suelos.

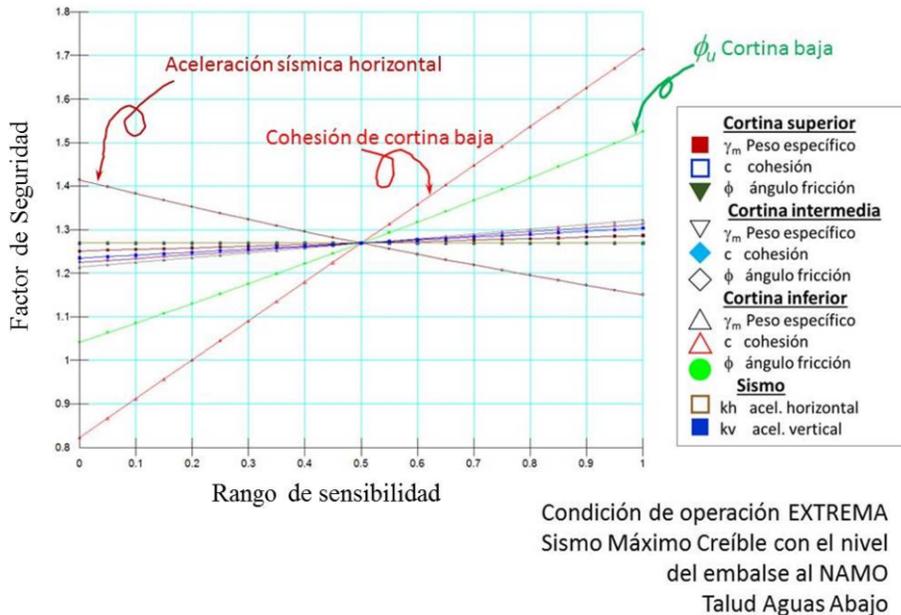


Figura 4. Análisis de sensibilidad del talud seco con agua al NAMO más sismo.

De esta manera, se presenta en la Figura 5 un ejemplo de los resultados de los análisis probabilistas de la seguridad de las cortinas en condiciones de operación extrema, con el embalse a nivel del NAMO más el Sismo Máximo Creíble (MCE), en el cual se efectuaron miles de iteraciones para determinar el Factor de Seguridad Mínimo ante la variación de propiedades de los materiales y sismo, así como su probabilidad de ocurrencia.

En la Tabla 5 se muestra la comparación de factores de seguridad determinísticos y probabilísticos de algunas presas. En aquellas en las cuales se observó un mal comportamiento, los análisis de estabilidad determinista confirmaron que no satisfacían los requisitos de seguridad, con valores del FS inferiores a los recomendados. Al realizar las evaluaciones probabilistas, los factores de seguridad resultaron en algunos casos aún menores. Sin embargo, la probabilidad que se presente la combinación de cargas con propiedades de peso específico y resistencia desfavorables, fue nula en la mayoría de los casos, como los análisis de NAMO más sismo aguas abajo, con $FS < 1.0$ y probabilidad de falla $P_f = 0$, que no se muestran en la tabla.

Como se aprecia en estos resultados, las obras realizadas sin un correcto procedimiento de construcción y sin control de los materiales y su compactación son las que tienen factores de seguridad menores a los recomendados, mientras que las presas construidas con control de los materiales y su compactación, como La Estrella [4], La Guajolota y La Providencia [13], resultaron en condiciones satisfactorias de seguridad para ambos procedimientos.

Por los antecedentes de la región noreste del país, en algunas obras se sospechó de la presencia de materiales con respuesta desfavorable y se revisó la posibilidad que los suelos fueran dispersivos, como fue el caso de las presas Atemoztli, Tamps., La Estrella y Rancherías en N. L. Las pruebas realizadas consistieron en la prueba del terrón y la del doble hidrómetro. Se confirmó que Atemoztli posee suelos dispersivos en su cortina y

que las otras dos tienen materiales de baja dispersividad [3] [4]. En otros casos se revisó la falla por tubificación de algunos materiales, sin embargo los resultados no fueron concluyentes.

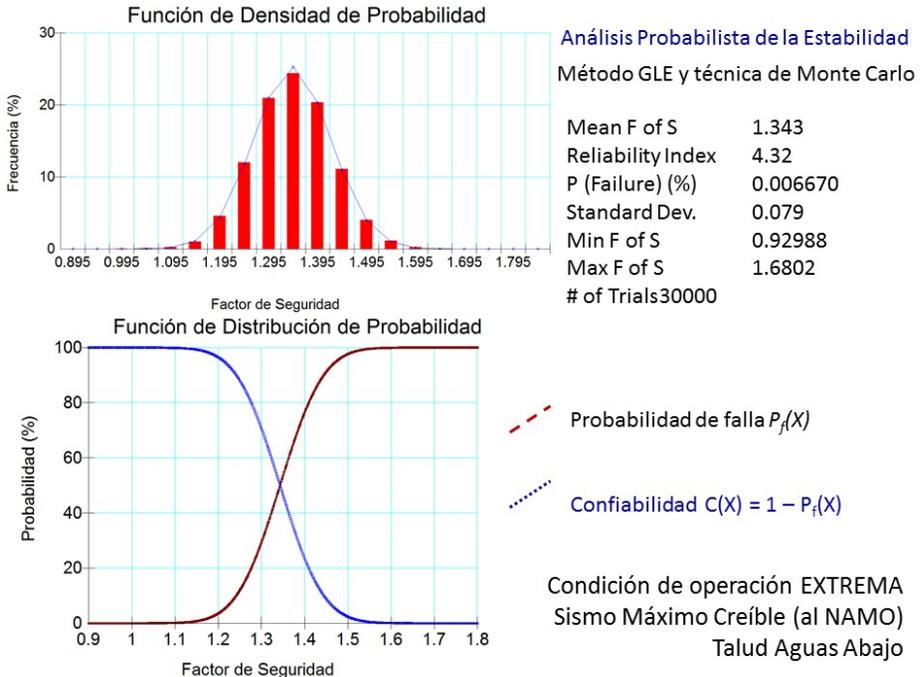


Figura 5. Análisis probabilista de estabilidad del talud aguas abajo con nivel de agua al NAMO y Sismo Máximo Creíble.

Tabla 5. Comparación entre Factores de seguridad deterministas (Det.) y probabilistas (Prob.).

Embalse	Talud	NAMO			NAME			NAMO a NAMIN				
		A Arr	Pf	A Ab	Pf	A Arr	Pf	A Ab	Pf			
P. de la Paz	Det.	1.85	1.43	2.29	1.23	2.21	1.38					
	Prob.	1.64	0	1.25	0	2.40	0	1.33	0	0.92	4.7E-04	1.24
La Biblia	Det.	2.90	1.23	3.87	1.25	2.82	1.23					
	Prob.	1.12	0	1.06	0	0.86	3.3E-04	0.82	5.0E-04	1.15	0	1.20
Nogales	Det.	3.14	2.48	3.46	1.76	1.85	1.88					
	Prob.	1.82	0	1.06	0	1.49	0	0.94	1.7E-04	1.63	0	0.91
La Estrella	Det.	3.93	1.69	5.35	1.63	3.43	1.99					
	Prob.	3.94	0	1.69	0	5.35	0	1.64	0	3.68	0	1.44
Guajolota	Det.	5.27	2.50	7.89	2.39	3.36	2.56					
	Prob.	3.50	0	1.68	0	5.48	0	1.54	0	1.48	0	1.47
Providencia	Det.	9.04	6.21	15.4	6.21	6.55	6.21					
	Prob.	6.70	0	4.65	0	10.54	0	4.65	0	4.93	0	4.65

A Ar = aguas arriba, A Ab = aguas abajo, Det.= determinista, Prob.= probabilista, Pf= Probabilidad de falla

5. Conclusiones

Mediante estudios enfocados a analizar la problemática que presentan algunas presas en su comportamiento, ya sea por causas hidráulico-hidrológicas, geotécnicas o de otro tipo, ha sido posible descartar o comprobar la posibilidad de que ocurra una falla por deslizamiento de taludes. Las obras realizadas sin una adecuada ingeniería de presas en su diseño y construcción tienen factores de seguridad menores a los recomendados, mientras que las presas construidas con un adecuado diseño, selección de materiales y control de compactación sí los satisfacen. La comparación entre algunos análisis deterministas y probabilistas, confirma que con ambos métodos las presas con deficiencias en su realización, no cumplen con los requisitos de seguridad y deberán ser reconstruidas o deshabilitadas.

La evaluación probabilística clarifica los factores con mayor influencia en la estabilidad y permite alinear las acciones para reducir el riesgo. Resulta evidente, como era de esperar, que la inclinación del talud y la heterogeneidad de los materiales influyen notablemente en los resultados.

En el análisis de riesgo general de las presas, se determinó que la cadena de eventos relacionados para que sucedan afectaciones sin intervención, tiene probabilidades nulas o muy bajas para que ocurra una falla por estabilidad de las cortinas, por lo cual la aplicación de la Norma de Operación Segura de Presas permite obtener un diagnóstico confiable y así determinar cuáles son las medidas de mitigación más convenientes a aplicar en cada caso.

Referencias

- [1] Conagua (2019). Sistema de Seguridad de Presas. <https://www.gob.mx/conagua/articulos/sistema-de-seguridad-de-presas-186396?idiom=es>
- [2] International Commission on Large Dams (2019). https://www.icoldd-cigb.org/GB/dams/definition_of_a_large_dam.asp
- [3] Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (2014). Estudios para la caracterización y diagnóstico de seguridad de las presas Atemoztli, Tamps. y La Salitrera Gto.
- [4] Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (2016). Estudios especializados a presas de almacenamiento, derivadoras y bordos en alto riesgo del noreste del país, La Estrella, N. L., San Antonio de la Pegajosa y Piedra Blanca, Coah.
- [5] Bureau of Reclamation (2011). *Design Standards No. 13 Embankment dams, Chapter 4: Static Stability Analysis*. Managing Water in the West. United States Department of the Interior.
- [6] Conagua (2000). *Manual de Capacitación en Seguridad de Presas*. Comisión Nacional del Agua. Subdirección General Técnica, Gerencia de Ingeniería Básica y Normas Técnicas. México.
- [7] Geoslope (2018). <https://www.geoslope.com>
- [8] Instituto de Ingeniería UNAM (2013). Estudios para la caracterización y diagnóstico de seguridad de las presas Malpaís y Pedro Carano, Mich.
- [9] Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (2013). Estudios para la caracterización y diagnóstico de seguridad de la presa La Cantera, Oax.
- [10] Instituto de Ingeniería UNAM (2016). Estudios especializados a presas de almacenamiento, derivadoras y bordos en alto riesgo del noroeste del país, Represo Nogales, Son., Diques La Biblia y Puerto de la Paz, Chih.
- [11] Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SCFI) (2018). <https://www.sinec.gob.mx/SINEC/Vista/Normalizacion/BusquedaNormas.xhtml>
- [12] ICOLD (International Commission on Large Dams) (2016). Bulletin 148, *Selecting Seismic Parameters for Large Dams*, Paris.
- [13] Instituto de Ingeniería UNAM (2017) Estudios especializados a presas de almacenamiento, derivadoras y bordos en alto riesgo, presas La Guajolota, Chih. y La Providencia, Dgo.