

METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS PRELIMINAR DEL RIESGO SÍSMICO DE GRANDES PRESAS

Alejandra Daziano^{1,2}, Gustavo Pérez¹, Abel Jacinto¹,

¹ Instituto de Estructuras "Ing. Arturo M. Guzmán", Universidad Nacional de Tucumán.

² CONICET, Av Rivadavia 1917, Cdad. de Bs. As., Argentina.

Resumen. Actualmente, en Argentina existen nuevos proyectos de presas y presas con más de 50 años de antigüedad. Las demandas de seguridad por parte de la sociedad son cada vez mayores y existe la necesidad de disponer de información ordenada para llevar adelante evaluaciones de seguridad basadas en análisis de riesgo. Se presenta en este trabajo una metodología para analizar el riesgo sísmico de las grandes presas de Argentina.

Palabras Clave: Riesgo, Sismo, Presas

1 Introducción

La seguridad de presas es una disciplina de elevada complejidad que involucra evaluaciones detalladas de todos los aspectos relacionados a la obra. Este análisis demanda gran responsabilidad porque en la mayoría de los casos, la rotura de una presa puede tener consecuencias catastróficas.

En lo que se refiere a seguridad de presas, existen dos enfoques que actualmente coexisten y se complementan. Por un lado el enfoque tradicional, basado en inspecciones regulares, análisis de instrumentos de auscultación y cumplimiento de normativa vigente (si existiera). Este enfoque está caracterizado por la determinación de "factores de seguridad" para la verificación en condiciones extremas. Por otra parte, desde finales de la década del 90 se trabaja en el enfoque multidisciplinario o sistémico, basado en el análisis y evaluación de riesgo. El riesgo se define como resultante de la probabilidad y consecuencias de la falla. Se reconoce en forma explícita el hecho de que la seguridad no es absoluta y que siempre existirá un riesgo residual necesario de controlar y mantener en el nivel más bajo razonablemente posible [1].

En particular, las presas, además de ser verificadas en condiciones normales de operación, pueden verse afectadas por dos eventos extremos: de carácter hidrológico o de carácter sísmico. Cada situación requiere el análisis pertinente y en este trabajo se aborda el tema de la seguridad frente a sismos.

El objetivo de este trabajo es presentar un método simple que permita valorar los riesgos sísmicos potenciales de las presas argentinas y cuyos resultados puedan utilizarse como punto de partida para análisis de riesgo más rigurosos.

2 Descripción del método

Del análisis de los métodos disponibles para evaluar riesgo sísmico de presas, se seleccionó el propuesto por Bureau [2] porque combina la peligrosidad derivada del sitio de emplazamiento con la vulnerabilidad propia de la estructura de forma simplificada y compatible con la información disponible.

El Factor de Riesgo Total (TRF) se compone de aspectos estructurales y socio-económicos que se combinan con la peligrosidad a la que se encuentra expuesta la estructura. De acuerdo al TRF se definen cuatro clases de riesgo: Reducido, Moderado, Elevado o Extremo. Para los índices se conservan las siglas correspondientes a su denominación en inglés.

El método consiste en la determinación de 5 parámetros:

- Factor de Daño Asumido (ADF)
- Factor de Peligrosidad Aguas Abajo (DHF)
- Factor de Riesgo por Capacidad del embalse (CRF)
- Factor de Riesgo por Altura de presa (HRF)
- Factor de Riesgo por Antigüedad de la estructura (ARF)

Factor de Daño Asumido (ADF). La utilización del ADF es una variante del método, descrita por Bureau y Ballentine [3]. El método original utiliza un Factor de Daño (PDF) que se determina en base al Índice de Severidad Sísmica (ESI) y a curvas de fragilidad construidas para cada tipo de presa. En ausencia de estimaciones específicas del movimiento de suelo para cada presa, para definir la vulnerabilidad sísmica se emplea un Factor de Zona Sísmica (SZF) combinado con el Factor de Valoración de Daño de la Presa (DRF). Esto lleva al concepto de Factor de Daño Asumido (ADF) que se utilizará en lugar del Factor de Daño (PDF). El SZF puede definirse en base a reglamentaciones vigentes. El DRF depende del tipo de presa, clasificadas por materiales y metodología con las que fueron construidas, y se define en base a observaciones del desempeño de diferentes estructuras frente a sismos pasados. A cada una de las presas consideradas se le asigna un Indicador de Tipo de Presa (DTI) y su correspondiente DRF.

Tabla 1. **Indicador de Tipo de Presa y Factor de Valoración de Daño.**

Tipo de Presa	DTI	DRF
Arco (VA) - Arco Gravedad	1	1
Arco Múltiple (MV) - Arco Contrafuerte	1	3
Gravedad de Hormigón (PG)	2	2
Contrafuertes (CB)	2	3
Mampostería	2	4
Homogéneas (ER), compuestas	3	3
Mat. Suelos con Pantalla de H° (CFRD)	4	1
Mat. Suelos con Núcleo (TE)	4	2
Relleno Hid. - Relaves	5	6
Desconocido	6	5

Para cuantificar la peligrosidad sísmica, se adopta en este trabajo la zonificación del INPRES-CIRSOC [4] y se le asigna valores al SZF de manera que sean compatibles con la escala del método original. Los SZF se muestran en la Tabla N° 2.

Tabla 2. **Zonificación sísmica de Argentina y Factor de Zona Sísmica.**

ZONA	PELIGROSIDAD SÍSMICA	ACELERACIÓN MÁX DEL SUELO [g]	SZF
0	Muy reducida	0.04	1
1	Reducida	0.1	2
2	Moderada	0.18	3
3	Elevada	0.25	4
4	Muy elevada	0.35	5

El SZF es un indicador menos confiable de peligro local que el ESI. Para los lugares caracterizados por el SZF, éste y el Factor de Valoración del Daño (DRF) se combinan para evaluar el riesgo local asociado a un tipo específico de presa. El resultado es una nueva cantidad, el Factor de Daño Asumido (ADF), que se utiliza en lugar del PDF y se obtiene de la siguiente manera:

$$ADF=DF+SZF \quad (1)$$

El ADF es un indicador menos robusto que el PDF debido principalmente a que el DF es un indicador pobre del potencial de daño. Además, los factores por zonas de los códigos generalmente subestiman el peligro sísmico para sitios ubicados cerca de fallas activas o potencialmente activas. Por otra parte, sobreestiman dicha peligrosidad para sitios localizados lejos de las fuentes.

El SZF se aplica en aquellos lugares donde las condiciones de fundación son buenas y no están directamente atravesados por una falla activa. Si los sitios están a menos de 5km de una falla activa, se deberá adoptar un SZF mínimo de 5. También será prudente asignar un SZF un punto más si se supiera o se sospecha que existen materiales dudosos en la fundación, tales como limos y arenas saturados de baja densidad u otros depósitos sueltos.

Factor de Peligrosidad Aguas Abajo (DHF). Además del tipo de presa y la peligrosidad del sitio de emplazamiento, existen otros factores que son significativos para la evaluación global del riesgo aguas abajo; entre ellos se encuentra el desarrollo aguas abajo, tanto en cantidad de personas como en potenciales pérdidas materiales. En el método original, el DHF se obtiene como la siguiente suma:

$$DHF = ERF + DRF \quad (2)$$

Donde ERF es el Factor de Evacuación y está basado en la población en riesgo, si se conoce, y DRF es el Factor de Riesgo Aguas Abajo, que se utiliza cuando se dispone de información suficiente en lo que respecta al valor de propiedades privadas, comerciales, industriales o estatales, ubicadas en la zona de potencial inundación.

Tabla 3. Factores de riesgo por evacuación y por riesgo aguas abajo.

FACTOR DE RIESGO	EXTREMO	ELEVADO	MODERADO	REDUCIDO
	Contribución al Factor de Riesgo Total (factores de peso)			
EVACUACIÓN [personas] ERF	> 1000 12	1000 - 100 8	100 -1 4	Ninguna 1
RIESGO AGUAS ABAJO - DRF	Elevado 12	Moderado 8	Bajo 4	Ninguno 1

Para definir el ERF y el DRF se necesita de información detallada de la rotura de presa, mapas de inundación y estudios económicos, definidos para cada caso particular. En caso de no disponer de esta información para las presas, se asigna directamente un valor ponderado de DHF, tal como se muestra en Tabla 4, simplificación que resulta totalmente válida para este nivel de análisis.

Tabla 4. Factor de peligrosidad aguas abajo.

NIVEL	PÉRDIDA DE VIDAS HUMANAS	PÉRDIDAS ECONÓMICAS, AMBIENTALES O SISTEMAS PRINCIPALES	DHF
Reducido	No se esperan	Bajas, limitadas a propiedades individuales	2
Moderado	No se esperan	Si	12
Elevado	Probabilidad de una o más	Probables (no estrictamente requeridas)	24

Factor de Riesgo por Capacidad, Altura y Antigüedad (CRF, HRF, ARF). El Factor de Riesgo por Capacidad (CRF) y el Factor de Riesgo por Altura (HRF) indican que tipo de presas de gran altura o grandes embalses pueden descargar cantidades significativas de flujo sin control en caso de sismo y exponer grandes áreas a inundaciones. De la Tabla N° 5 se pueden obtener las contribuciones de ambos factores al Factores de Riesgo Total.

Tabla 5. **Factores de riesgo por capacidad y altura de presa.**

FACTOR DE RIESGO	EXTREMO	ELEVADO	MODERADO	REDUCIDO
	Contribución al Factor de Riesgo Total (factores de peso)			
CAPACIDAD [hm ³] CRF	> 62	62 - 1.2	1.2 - 0.12	< 0.12
	6	4	2	0
ALTURA [m] HRF	> 24	24 - 12	12 - 6	< 6
	6	4	2	0

En este análisis también se consideran las fechas en que una presa fue construida, reparada o modificada. Las presas más antiguas suelen ser más vulnerables por su posible deterioro, mantenimiento insuficiente, utilización de técnicas de construcción obsoletas, deficiente compactación, colmatación del embalse o tratamiento precario de la fundación. Por otra parte, pueden existir presas que fueron mejoradas como resultado de problemas sísmicos previamente identificados. Entonces, a pesar de que muchas de las presas más antiguas fueron construidas con un nivel de competencia que satisface los requerimientos modernos, se considera un Factor de Riesgo por Antigüedad (ARF), en ausencia de información más precisa. Se obtiene de la Tabla N° 6.

Tabla 6. **Factor de riesgo por antigüedad.**

AÑO DE CONSTRUCC.	< 1900	1900-1925	1925-1950	1950-1975	1975-2000	> 2000
ARF	6	5	4	3	2	1

El año de construcción será sustituido por la fecha de la última reparación o modificación cuando se disponga de esa información.

Factor de Riesgo Total (TRF). Los factores de riesgo antes definidos se combinan para obtener el Factor de Riesgo Total (TRF) para cada presa en estudio (ecuación 3). El TRF incluye las contribuciones de los factores de riesgo asignados a cada estructura, su vulnerabilidad sísmica y el riesgo aguas abajo. Este factor global permite la rápida comparación de los potenciales riesgos asociados a la totalidad de las presas y facilita la asignación de prioridades para evaluaciones de seguridad más detalladas. Los factores son considerados de la siguiente manera:

- Influencia de la estructura: se describe como la suma de los factores por capacidad, altura y antigüedad (CRF+HRF+ARF)
- Riesgo Aguas Abajo: se cuantifica por el factor DHF o por la suma de los factores de evacuación y daño (ERF+DRF)
- Valoración de la vulnerabilidad: es una función de la peligrosidad sísmica del lugar y del desempeño observado en otras presas similares. Está definida por el ADF, que depende a su vez del SZF.

El factor de riesgo total se obtiene con la siguiente fórmula:

$$\text{TRF} = [(\text{CRF} + \text{HRF} + \text{ARF}) + \text{DHF}] \times \text{ADF} \quad (3)$$

Finalmente, se puede asignar a cada presa un nivel de riesgo, definido en cuatro clases, dependiendo del Factor de Riesgo Total obtenido.

Tabla 7. **Clases de Riesgo.**

TRF	CLASE DE RIESGO
2 - 25	I (Bajo)
25 - 125	II (Moderado)
125 - 250	III (Elevado)
250 - 500	IV (Extremo)

3 Conclusiones

La evaluación de seguridad basada en análisis de riesgo requiere indudablemente de una cantidad importante de información actualizada, disponible y ordenada. Sin embargo, la metodología descrita permite efectuar una primera categorización en clases de riesgo sísmico teniendo en cuenta parámetros básicos como por ejemplo altura de la presa, capacidad del embalse y año de construcción. Incluso la peligrosidad sísmica puede considerarse a partir de la equivalencia con la zonificación propuesta en la reglamentación vigente y el potencial riesgo aguas abajo puede ser estimado con datos que no requieren investigaciones profundas.

Es importante entender que el TRF no representa una predicción del comportamiento de la presa bajo determinado sismo, sino que es una forma conveniente de comparar el riesgo potencial asociado a un conjunto de presas y asignar prioridades para posibles evaluaciones más detalladas.

El ordenamiento resultante de la aplicación de este método no es definitivo, sino que debe actualizarse cada vez que se efectúen modificaciones en las condiciones aguas abajo, en las obras que se ejecuten o bien se produzcan avances en los estudios, tanto en lo referido a los modos de fallo de la presa como en la amenaza sísmica.

4 Referencias

1. Giuliani, F.: Gestión en Seguridad de Presas. Consideración explícita del riesgo. VII Congreso Argentino de Presas y Aprovechamientos Hidroeléctricos. San Juan. Argentina (2013)
2. Bureau, G. J.: Dams and Appurtenant Facilities in Earthquake Engineering Handbook, edited by Chenh, W. F. and Scawthorn, C., CRS press, Bora Raton 26.1–26.47 (2003).
3. Bureau, G.J., Ballentine, G.D.: A comprehensive seismic vulnerability and loss assessment of the State of South Carolina using HAZUS. Part VI. Dam inventory and vulnerability assessment methodology. 7th National Conference on Earthquake Engineering, July 21–25, Boston, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA (2002).
4. INPRES. Reglamento INPRES-CIRSOC 103, Normas Argentinas Para Construcciones Sismorresistentes - Parte I y II, Edición (1991).
5. Tosun, H., Zorluer, Í., Orhan, A., Seyrek, E., Savas, H., and Turköz, M.: Seismic Hazard and Total Risk Analyses for Large Dams in Euphrates Basin, Turkey, Engineering Geology, vol. 89, 155–170, (2007).
6. Singh, M., Kijko, A., Van den Berg, L.: Seismic Risk Ranking for Large Dams in South Africa. Acta Geophysica, vol. 59, no. 1, pp. 72-90, (2011).
7. Moldovan, I. A., Constantin, A. P., Popescu, E., & Placinta, A. O.: Earthquake risk clases for dams situated in the south-western part of Romania (Danube, Olt, Jiu ans Lotru rivers) Romanian Reports in Physics, 64(2), 591-608, (2012)