

Vulnerabilidad y riesgo sísmico en obras hidráulicas: una nueva aproximación metodológica

Liber Galbán Rodríguez

email: liberg@uo.edu.cu

Facultad de Construcciones, Departamento de Ingeniería Hidráulica. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba.

Yoermes González Haramboure

email: yoermes@civil.cujae.edu.cu

Facultad de Ingeniería Civil, Departamento de Ingeniería Hidráulica. Universidad Tecnológica de la Habana, La Habana, Cuba.

Yanet María Urquiza López

email: yanet.eah@stg.hidro.cu

Empresa de Aprovechamiento Hidráulico Santiago de Cuba. INRH, Cuba.

RESUMEN

Las obras hidráulicas forman parte de los servicios vitales que hoy recibe la humanidad, y son cada vez más amenazadas por el impacto de fenómenos naturales como los sismos o terremotos. Por su importancia, desde la ciencia han surgido distintas metodologías para estudiar la vulnerabilidad sísmica de las obras hidráulicas; sin embargo, aún existen dificultades en la concepción de indicadores y evaluaciones integrales de vulnerabilidad que consideren todos sus elementos componentes. Como resultado de este trabajo se ofrece el diseño de un procedimiento para determinar el nivel de vulnerabilidad y riesgos en obras hidráulicas, que permite evaluar estos aspectos por componente e integralmente ante el impacto de los fenómenos sísmicos de gran magnitud, el cual incluye el empleo de indicadores y diversas técnicas de medición de uso actual.

Palabras clave: evaluación, obra hidráulica, metodología, sismo, vulnerabilidad.

Water supply systems seismic vulnerability and risk: a new methodological rough calculation

ABSTRACT

Water supply systems are part of the vital services that humanity receives today, and are increasingly threatened by the impact of natural phenomena such as earthquakes. Due to the importance given to this issue from science, different methodologies have emerged to study the seismic vulnerability of water supply systems; however, there are still difficulties in the design of comprehensive vulnerability indicators and assessments that consider all its component elements. On this occasion, a general analysis is carried out on this issue and a new methodological approach is proposed to assess the vulnerability and seismic risk of water supply systems, considering the aforementioned aspects. As a result of this work, the design of a procedure is offered to determine the level of vulnerability and risks in hydraulic works, which allows evaluating these aspects by component and integrally before the impact of large-scale seismic phenomena, which includes the use of indicators and various measurement techniques in current use.

Keywords: evaluation, water supply system, methodology, earthquake, vulnerability.

INTRODUCCIÓN

Los sismos son fenómenos naturales que impactan con fuerza la infraestructura construida por el hombre. Entre las construcciones más importantes están las obras hidráulicas que garantizan servicios vitales que hoy recibe la humanidad. Esta situación hace que su estudio y evaluación se convierta en una prioridad para la ciencia y la ingeniería actual. Los terremotos generan otros fenómenos geológicos secundarios, que también afectan las obras hidráulicas (fallamiento, desplazamientos, levantamientos tectónicos, subsidencia del terreno, efecto de sitio y la licuación), causando progresivamente otros impactos. A manera de resumen se ofrecen algunos en la tabla 1.

Tabla 1. Ejemplos de fallos registrados tras el impacto de los sismos en las obras hidráulicas.

Obra	Fallos registrados tras el impacto de los sismos
Acueductos y alcantarillados	Agrietamientos de tuberías y galerías, rotura de las uniones, desplazamientos laterales y roturas por deslizamientos, hundimientos y levantamientos, obstrucciones.
Estaciones de bombeo	Agrietamientos generales en la estructura civil, fallos en el sistema eléctrico, rotura de las uniones, hundimientos de la edificación, entre otras.
Pozos de agua subterránea	Agrietamientos generales en la estructura civil del encamisado, desplazamientos laterales diferenciales del eje vertical del pozo, fallos en el sistema eléctrico, rotura de las uniones, entre otras.
Presas	Agrietamientos generales en la estructura civil, fallos en el sistema de compuertas, rotura de las uniones, deslizamientos de taludes, sifonamiento mecánico, licuación, asentamientos de la corona (que conduce al rebase) entre otras.
Ciernas y tanques	Agrietamientos generales en la estructura civil, filtraciones, levantamientos, desplazamientos laterales diferenciales, rotura y colapso, entre otras.

El impacto de los sismos a las obras hidráulicas tiene que ver en primer lugar, con la incidencia de los esfuerzos causados en el terreno por las ondas sísmicas, y consecuentemente sobre la infraestructura civil de la obra hidráulica en cuestión. Esta es la razón por la que en este artículo se hace énfasis en la vulnerabilidad sísmica de las obras hidráulicas ya construidas. Para su cálculo se pueden emplear distintas metodologías y métodos: el Método del índice de vulnerabilidad (Benedetti and Petrini 1984), Método de Scarlat (Scarlat 1996), Método de Cardona (Cardona 1991), Método de Hirosawa (Hirosawa 1992), la Metodología ERAD (Álvarez et al. 2000), entre otras.

Otros métodos o metodologías se encuentran recogidos en normas técnicas ya elaboradas como por ejemplo, las normas que establecen los procedimientos y análisis de las cargas que inciden en las estructuras, los códigos sísmicos, etc. La selección del método depende de las condiciones del escenario y el tipo de vulnerabilidad que se requiere determinar.

La vulnerabilidad también puede calcularse con el empleo de indicadores. Su análisis se incluye dentro de las metodologías antes mencionadas, a partir de la asignación de valores y pesos a estos indicadores, los cuales en su conjunto darán como resultado la vulnerabilidad total del territorio u obra ingeniera en cuestión.

La literatura también reconoce otros estudios particulares de vulnerabilidad ligados a las construcciones de infraestructura asociada al servicio público (alcantarillados, acueductos, redes de distribución de gas licuado, carreteras, canales, túneles, entre otras). Las vulnerabilidades en estos casos igualmente, reconocen las partes integrantes que las componen y generalmente, también se evalúan a través de indicadores. La selección y evaluación de indicadores de

vulnerabilidad es un tema aún en investigación a nivel mundial y, cualquier acercamiento estará sujeto a mejoras continuas. Entre estos estudios se destacan:

Metodología de la American Water Works Association (AWWA).

Esta metodología, como tal, no expresa el grado de vulnerabilidad de los componentes implicados en el impacto, pero si ofrece un valor que puede indicar el porcentaje de la vulnerabilidad de dicho sistema. Este valor por sí solo no da idea de la magnitud del daño.

Metodología de la Organización Panamericana de la Salud (OPS) para estudios de vulnerabilidad de los sistemas de agua y saneamiento.

La OPS, plantea que la forma de determinar el riesgo de que ocurra un daño en una obra hidrotécnica en específico, es mediante la conjunción de amenaza y vulnerabilidad, según la expresión: $Rie = Ai \times Ve$ (OPS 1998); pero no asigna pesos a las manifestaciones de vulnerabilidad en las obras hidráulicas.

Metodología de tiempos de rehabilitación.

Fue desarrollada en el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Ofrece guías para buscar una medida de la vulnerabilidad que informe no solo la capacidad remanente del componente, sino la magnitud del daño y las expectativas de rehabilitación en términos de tiempo. Se aplica a componentes estructurales como estaciones de bombeo, tanques de almacenamiento, plantas de tratamiento o tuberías de conducción y distribución (OPS 1998). Para cuencas hidrográficas, acuíferos o grandes represas, el método requiere análisis especializados.

Metodología para el análisis de riesgo y vulnerabilidad de los sistemas de agua potable y saneamiento en las Empresas Públicas de Medellín, Colombia (E.S.P).

Caracteriza el factor operación, ya que constituye uno de los elementos esenciales en la rápida recuperación del sistema dañado y que, una vez estabilizado, permite recuperar la inversión. Emplea un programa de gestión de riesgos, estableciendo una calificación a la gravedad relativa que exhiben los peligros naturales, este programa define como priorizar las inversiones dirigidas a disminuir la vulnerabilidad de un componente dado hasta un nivel aceptable. La cuantificación de la vulnerabilidad asigna valores a la gravedad de las consecuencias, este porcentaje de puntos se aplica a la ecuación 1 (Acevedo 2002):

$$V_{(\%)} = \left(\frac{V_{rx}}{V_{r\text{m}\acute{a}x}} \right) \times 100 \tag{1}$$

La matriz de riesgo y vulnerabilidad que contempla esta metodología es asumida de las teorías generales de evaluación de riesgos (figura 1).

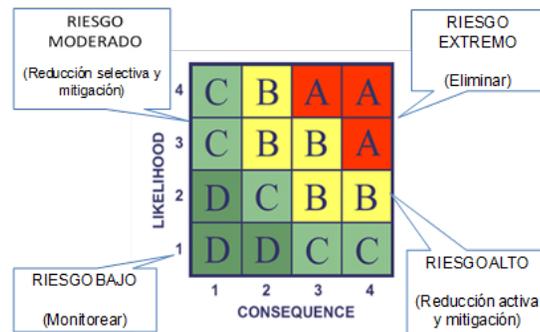


Figura 1. Matriz general de riesgos.

Esta metodología además evalúa las consecuencias del evento teniendo en cuenta de forma general el principio de causa y efectos. La desventaja fundamental de esta metodología radica en la no descripción del estado físico y operatividad de los sistemas de agua y saneamiento ante el impacto de un peligro, además de no establecer prioridades o pesos para los niveles de estado de vulnerabilidad de sus componentes.

Metodología para la evaluación del desempeño de un sistema de distribución de agua municipal usando WaterCAD y Epanet

Agunwamba et al. (2018), propone el empleo de las herramientas WaterCAD y Epanet. Se trata de encontrar vulnerabilidades en el funcionamiento del sistema a partir de la modelación de las presiones hidráulicas con el uso de programas profesionales, lo cual también deja en evidencia otras variables presentes en su funcionamiento.

El estudio realizado demostró que, estas metodologías a pesar de tocar elementos importantes, en muchos casos obvian la incidencia de los problemas de vulnerabilidad de las estructuras hidráulicas, los tipos de materiales empleados en su construcción o el sistema tecnológico específico, así como el comportamiento particular de sus partes componentes; y en otros, el uso de indicadores para su evaluación y la asignación de pesos a los niveles de vulnerabilidad en las formulaciones, aspectos que deben ser atendidos. La experiencia internacional de desastres registrados, confirma que una obra hidráulica puede fallar por cualquiera de sus componentes (Galbán y Sánchez, 2016); por tanto, se hace necesario un procedimiento de estudio de vulnerabilidad ante fenómenos sísmicos para las obras hidráulicas que considere estas singularidades.

PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO INTEGRAL PARA EVALUAR LA VULNERABILIDAD Y EL RIESGO SÍSMICO EN OBRAS HIDRÁULICAS

Galbán y Sánchez (2016), especifican la interacción general que tienen los elementos hidráulicos y civiles que muchas veces forman parte de las obras hidráulicas y recomiendan el uso de indicadores para evaluar esta interacción con los fenómenos sísmicos. Esta visión constituye una manera adecuada para integrar estos elementos a la evaluación de vulnerabilidad y riesgo sísmico de las obras hidráulicas. A partir de estas consideraciones, se expone una variante metodológica general que reúne los indicadores propuestos por estos autores y otros, para realizar el análisis de peligro, vulnerabilidad y riesgos sísmicos en obras hidráulicas que comprende los pasos siguientes (figura 2).

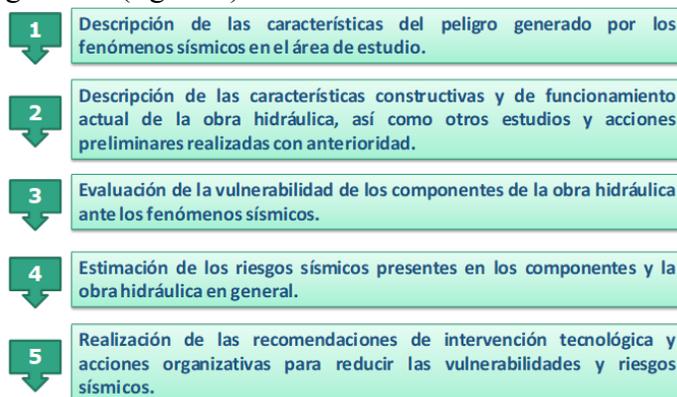


Figura 2. Procedimiento metodológico de trabajo diseñado. (Elaborado por los autores)

Teniendo en cuenta que se trata de obras hidráulicas ya construidas, se plantea la evaluación de la vulnerabilidad sísmica a partir de la realización de mediciones no destructivas con equipamiento especializado, empleándose además la inspección visual detallada, y el resultado de investigaciones ingeniero geológicas u otras precedentes ya realizadas a la obra y sus alrededores; así como elementos relacionados al proyecto inicial de su construcción.

Se sugiere estandarizar los indicadores de peligro, vulnerabilidad y riesgos, clasificándolos en una escala de cero a uno siguiendo los niveles planteados en la tabla 2, lo que se justifica con la necesidad de uniformar las informaciones de salidas de los informes, mapas y otros documentos.

Tabla 2. Clasificación y valores para estandarización de PVR (Galbán 2014)

	1er.Nivel	2do. Nivel	3er. Nivel	4to. Nivel
Peligro	Ninguno – Bajo (0 – 0,25)	Moderado (0,26 – 0,5)	Alto (0,51 – 0,75)	Muy alto (0,76 – 1)
Vulnerabilidad	Ninguna – Baja (0 – 0,25)	Moderada (0,26 – 0,5)	Alta (0,51 – 0,75)	Muy alta (0,76 – 1)
Riesgo	Ninguno – Bajo (0 – 0,25)	Moderado (0,26 – 0,5)	Alto (0,51 – 0,75)	Muy alto (0,76 – 1)

DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PELIGRO GENERADO POR LOS FENÓMENOS SÍSMICOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO.

Se describen las principales características de los fenómenos sísmicos que potencialmente pueden afectar la obra hidráulica y cómo deben evaluarse, para ello, se detallan los fenómenos sísmicos en la zona de estudio según las fuentes bibliográficas y se realiza el análisis del peligro según la magnitud probable de ocurrencia y el análisis de frecuencia.

Para el análisis del peligro pueden emplearse fuentes ya estudiadas. Un elemento importante que puede ayudar a la interpretación de peligros sísmicos, son los estudios previos realizados por distintas instituciones, muchos de los cuales cuentan con mapas donde se realiza una zonificación de los mismos; emplearlos para mostrar estos peligros es una herramienta muy útil para apoyar las investigaciones. Por otro lado, estos mapas no siempre reflejan elementos que para las obras ubicadas en el terreno son significativos, por ejemplo, en una región sísmica activa ocurren muchos sismos de baja magnitud cada año, los cuales poco a poco debilitan las estructuras, y a la hora de realizar estimaciones específicas de peligro, debido a la frecuencia con que ocurren, se convierten en un factor decisivo aun cuando su magnitud general es baja o moderada.

En caso de no tener a disposición estos estudios se deberán realizar nuevos estudios de peligro, proponiendo para ello el análisis de distintos indicadores en la región de estudio que ocupa la obra hidráulica, y finalmente emitir un criterio acerca de la magnitud del peligro y la frecuencia con que se manifiestan. Entre estos indicadores pueden considerarse los propuestos por Milanés et al (2017) descritos en la tabla 3.

Para la realización del análisis de peligro se tienen en cuenta dos aspectos fundamentales: la frecuencia de ocurrencia y la magnitud probable del impacto. En el caso de la determinación de la frecuencia probable de ocurrencia, se realiza mediante los parámetros de la tabla 4 donde se presenta la matriz de valoración de las frecuencias. Para la aplicación de la escala o valor promedio, se tiene en cuenta la proposición realizada por Toro (2002).

Tabla 3. Indicadores básicos para determinar el peligro sísmico de una región o área determinada (Milanés et al. 2017).

Elemento	Indicador	Grado de evaluación/valor promedio ($\geq 0 - \leq 1$)			
		Bajo (0.12)	Moderado (0.37)	Alto (0.62)	Muy alto (0.87)
Peligro	Aceleración sísmica (m/s^2)	Menor que 150	Entre 150 y 200	Entre 200 y 250	Mayor que 250
	Tipo de suelo	Roca de cualquier tipo, sedimentaria o cristalina (Suelos rígidos)	Rocas medianamente compactadas (Depósitos estables de suelos no cohesivos o arcillas duras)	Rocas de baja compactación (Depósitos de arcillas blandas o medias y arenas)	Sedimentos cuaternarios de reciente formación (rocas blandas)
	Velocidad de propagación de las ondas transversales (m/s)	Menor a 150	Entre 150 – 450	Entre 450 – 800	Mayor de 800
	Tiempo de recurrencia (años)	Más de 1000	Entre 500 y 1000	Entre 100 y 500	Menos de 100
	Distancia al epicentro (km)	Más de 500	Entre 500 y 250	Entre 250 y 50	Menos de 50
	Magnitud en la escala de Richter (momento)	De 1 - 4	De 4 - 5	De 5 - 7	Mayores de 7
	Periodo de propagación de la onda (s)	Menor a 0,5	Entre 0,5 – 0,8	Entre 0,8 – 1,2	Mayor a 1,2
	Presencia de estructuras tectónicas activas	En ubicaciones alejadas del área seleccionada	En las cercanías a la ubicación seleccionada	En las proximidades a la ubicación seleccionada	En las inmediaciones de la ubicación seleccionada
	Presencia de niveles freáticos	Más de 15 m de profundidad	Entre 10 y 15 m de profundidad	Entre 3 y 10 m de profundidad	Menos de 3 m de profundidad
Fenómenos geológicos secundarios o inducidos	Licuación	Suelo en estado sólido	Suelo en estado húmedo, pero todavía compacto.	Suelo en estado semi licuado (saturado)	Suelo licuado
	Apertura del terreno (cm)	Menos de 1	Entre 1 y 5	Entre 5 y 10	Aberturas de más de 10
	Movimientos en masa o deslizamientos	Corrimientos lentos y escasos de masas de terreno.	Corrimientos moderados de masas de terreno. Escasos colapsos de rocas.	Corrimientos rápidos y abundantes de masas de terreno, colapsos, derrumbes, caída de bloques rocosos	Corrimientos de grandes masas de terreno, lahares, colapsos, etc.
	Inundaciones costeras producto al impacto de los tsunamis	Escasas, solo se manifiestan en las zonas más bajas	Moderadas en zonas de hasta 5 metros de altura topográfica sobre el nivel del mar	Rápidas y abundantes de masas de agua, alcanzan zonas de hasta 15 metros de altura topográfica sobre el nivel del mar	Grandes masas de agua, alcanzan más de 15 metros de altura topográfica sobre el nivel del mar

Tabla 4. Frecuencia probable de ocurrencia (Adaptado de Toro 2002)

Frecuencia	Definición	Ocurrencia	Valor promedio
Remoto	Baja probabilidad de ocurrencia	Una vez entre 40 y 100 años	0.12
Ocasional	Limitada probabilidad de ocurrencia	Una vez entre 5 y 40 años	0.37
Moderado	Mediana probabilidad de ocurrencia	Una vez entre 1 y 5 años	0.62
Frecuente	Significativa probabilidad de ocurrencia	Entre 1 y 10 casos / año	0.87

El análisis de magnitud está basado en el inventario de los diferentes procesos sísmicos identificados. En caso de tener inventario con fecha de ocurrencia, se realizará un análisis estadístico de frecuencia a través de la relación magnitud/frecuencia de impacto de los fenómenos sísmicos. Estos datos se emplearán posteriormente en la evaluación del peligro (tabla 5). Es preciso entender que siempre deberá asumirse por el colectivo de especialistas la magnitud de terremotos que más se manifiesta en el área o que interesa particularmente para la evaluación realizada.

Tabla 5. Análisis de magnitud (Adaptado de Torrente 2016)

Fenómeno	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto
Sismos	Baja magnitud (entre 0 y 3 en la escala Richter) Entre 1 y 10 veces al año. Valor prom. = 0.12	Mediana magnitud (entre 4 y 5 en la escala Richter) Entre 1 y 5 años. Valor prom. = 0.37	Alta magnitud (entre 6 y 7 en la escala Richter) De 20 a 25 años. Valor prom. = 0.62	Gran magnitud (más de 7 en la escala de Momento) Una vez en 465 años. Valor prom. = 0.87

A la hora de evaluar el peligro se promedia la frecuencia y la magnitud, quedando la ecuación 2:

$$P = \frac{(F+M)}{2} \quad (2)$$

Donde: F es la frecuencia y M la magnitud, y se expresa su valor de 0 a 1.

DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS Y DE FUNCIONAMIENTO ACTUAL DE LA OBRA HIDRÁULICA, ASÍ COMO OTROS ESTUDIOS Y ACCIONES PRELIMINARES.

Los estudios de vulnerabilidad se están planteando para proponer planes de prevención ante el impacto de un evento natural en los componentes más vulnerables. Hoy en muchas instituciones se realizan acciones para renovar estructuras y sistemas de agua y saneamiento, sin tener un conocimiento completo de sus componentes, pues muchas veces se ejecutan tras un largo tiempo sin tener un buen mantenimiento o no están disponibles los planos por diferentes causas.

Teniendo en cuenta la experiencia que los ingenieros han recibido, y los daños que ya han ocurrido a las obras hidráulicas, se propone realizar la recopilación y análisis de la información preexistente y la elaboración del informe preliminar

Para recopilar y analizar la información preexistente es necesario realizar los siguientes pasos.

Paso 1: Localización de planos de la obra hidráulica en proceso de evaluación.

Los planos generales, se pueden encontrar en los archivos de la institución propietaria o administradora del inmueble o, en las oficinas encargadas del mantenimiento interno de la instalación.

Muchas veces no es posible localizar estos planos por la antigüedad de la construcción o por razones de descuido administrativo. Ante esta situación es posible también acceder a los archivos de las oficinas de planificación física, o los archivos históricos de la ciudad, poblado, oficina de bomberos, acueductos, u otra donde se pueda obtener. En caso de no lograr resultados, es preciso

acudir a métodos técnicos de identificación de redes y estructuras, como los siguientes: métodos geofísicos (magnéticos, eléctricos y de ultrasonido) y métodos de inspección ingeniera de campo y de reconstrucción manual de planos. En ambos casos hoy día se emplean softwares profesionales como herramientas auxiliares.

Paso 2: Identificación y caracterización de los principales componentes.

Una vez realizado esto es posible identificar y caracterizar los principales componentes de la obra hidráulica, así como su ubicación geográfica. Aquí se ofrece una variante (tabla 6)

Tabla 6. Características técnicas de los componentes de la obra hidráulica.

Componente	Ubicación	Características constructivas	Características técnicas
Componente 1	Coordenadas, cercanías a lugares, etc.	Tipología constructiva, materiales que lo conforman, etc.	Capacidad de funcionamiento por diseño, función dentro de sistema, etc.
Componente...n			

Paso 3: Investigación preliminar sobre acciones realizadas con anterioridad en la obra hidráulica, u otras de interés para la investigación en curso.

Esta etapa comprende la recopilación y análisis de la información preexistente. En general, será desarrollada fundamentalmente en oficina, incluirá visitas de inspección al emplazamiento de la obra con toma de datos, trabajos sencillos de reconocimiento, sondeos previos necesarios para conocer la estructura básica del terreno, visita a instituciones del estado y privadas que estuvieron involucradas en el proyecto, ejecución y control de los trabajos durante su construcción, así como su actual administrador. Las posibles fuentes de información preexistente pueden agruparse del modo siguiente:

Información publicada

- Artículos científicos y libros que se refieran a la obra hidráulica en cuestión.
- Artículos de prensa escrita, reportes breves, etc., que se refieran a la obra hidráulica objeto de análisis.
- Normativa aplicable.
- Documentación de proyectos ejecutivos y geotécnicos de carácter general. En particular, se recomienda la consulta de:
 - Mapa Geológico a escalas entre 1:100 000 y 1:25 000 (o más detalladas si es posible).
 - Mapas de peligros geológicos y/o ambientales (zonación sísmica, deslizamientos, erosión, carso, etc.) a escalas entre 1:100 000 y 1:25 000 (o más detalladas si es posible).
 - Fotografías aéreas o satelitales, donde sea aplicable.
 - Mapas antiguos (en el caso que puedan localizarse).
 - Estudios y/o artículos publicados relativos a proyectos y obras en la zona próxima a la obra hidráulica que es objeto de la investigación.
 - Estudios y/o artículos publicados relativos a la obra hidráulica que es objeto de la investigación.

Información no publicada

Proyecto original de la obra hidráulica, así como la memoria escrita de los trabajos durante su ejecución, lo que permite conocer aspectos como:

- Materiales empleados y sus propiedades físico mecánicas iniciales de los suelos, comportamiento estructural, etc.

- Tecnologías empleadas.
- Métodos de colocación, compactación, construcción, etc.
- Métodos geotécnicos y geofísicos empleados en las investigaciones previas.
- Problemas enfrentados por los constructores durante la ejecución de la obra hidráulica y soluciones aplicadas, etc.
- Planos originales.
- Informes de estudios de vulnerabilidad anteriores.
- Entre otros elementos de interés.

También información diversa que pueda condicionar desde un punto de vista ingeniero como: estructuras existentes, industrias y propiedades próximas que pueden verse afectadas por la falla de la obra hidráulica o cuyo fallo puede afectar la obra hidráulica.

Esta etapa concluye con la redacción del informe preliminar, el cual deberá incluir la programación de los trabajos que se consideran necesarios para completar el estudio de peligro, vulnerabilidad y riesgos sísmicos. Esta programación incluirá: los trabajos de campo y los ensayos de laboratorio

Vistos los aspectos que requieren investigación, confirmación o mayor detalle, se procederá a programar los trabajos del reconocimiento. A esa programación debe dedicársele especial atención pues, de otra forma, puede resultar una información exhaustiva en algunos aspectos mientras que en otros se pueden dejar lagunas importantes.

Se recomienda que la programación de los reconocimientos quede recogida en un documento, en el cual, además de la definición de los mismos, se describan los objetivos concretos perseguidos con cada uno de los trabajos a realizar, la previsión de posibles modificaciones en la campaña (variaciones en la profundidad, reconocimientos complementarios, etc.), en función de los resultados que se obtengan y cualquier otra información o criterio que permita realizar, las adaptaciones necesarias para asegurar que se obtienen los datos requeridos. Para lograr este objetivo es preciso definir distintos parámetros:

- Indicador que se va a medir.
- Escala de trabajo para mapas y perfiles.
- La tecnología que se va a emplear en cada medición.
- El método de medición.
- La concepción del almacenamiento de las mediciones y el aseguramiento de copias de seguridad.
- Las medidas de seguridad para la recolección de muestras en caso que sea posible.
- Construcción de modelos tridimensionales de las estructuras que conforman la obra hidráulica en formato digital con el uso de software profesionales.
- Los especialistas, personal técnico y otros que participen en la medición e interpretación de resultados.

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DE LOS COMPONENTES DE LA OBRA HIDRÁULICA ANTE LOS FENÓMENOS SÍSMICOS.

Una vez definidos los parámetros del plan de reconocimientos se llevan a cabo los trabajos de campo en los que se recomienda que, debido a la complejidad de las obras hidráulicas, sean empleadas escalas para los mapas y perfiles inferiores a 1:2000 para las mediciones puntuales en las estructuras construidas, y superiores en la aplicación de métodos geofísicos en los perfiles y mapas alrededor de estas (para medir agrietamiento en las rocas subyacentes, filtración, límites de rocas y sus propiedades, niveles freáticos, presencia de zonas cársicas, etc.)

En el caso de la tecnología se recomienda emplear siempre equipos de última generación, previamente calibrados y certificados, los cuales deben ser de aplicación no destructiva o no invasiva, debido a que se trata de obras hidráulicas ya construidas.

Una variación sensible provocada por los equipos de medición en las estructuras o componentes de las obras hidráulicas, podría ocasionar o acelerar fenómenos posteriores que influyen en la inestabilidad, y por tanto en su fallo. Hoy día con el desarrollo tecnológico alcanzado existen distintos equipos para mediciones de este tipo que se encargan de aplicar con ello distintos métodos: geofísicos, geotécnicos, estructurales, mediciones geodésicas, mediciones manuales y mediciones visuales.

Los métodos geofísicos tienen su campo de aplicación más idóneo cuando es necesario investigar, de un modo rápido y económico, áreas extensas o alineaciones de gran longitud. Los trabajos de campo e interpretación de las medidas deben ser efectuados por personal muy calificado, previo estudio detallado de la información del terreno que se haya podido obtener por otros procedimientos. Los métodos geofísicos en su conjunto pueden ser empleados para determinar varios indicadores, muchas veces coinciden en su aplicación, por lo que el equipo de especialistas que participa en las mediciones deberá tener en cuenta su combinación a fin de obtener resultados más precisos y confiables.

En el caso de los métodos geotécnicos de campo a emplear deben ser métodos “in situ” y, al igual que los geofísicos, permiten obtener fundamentalmente las propiedades físico mecánicas de las rocas y los suelos, con la variación de que es posible realizar sondeos mecánicos en las zonas exteriores a las obras hidráulicas para verificar tanto la litología como sus propiedades, además de observar el comportamiento de niveles freáticos, medición de la velocidad de movimiento de las aguas subterráneas, entre otros aspectos. En términos generales se recomienda determinar el mayor número de parámetros geotécnicos, especialmente los relativos a resistencia al corte, compresibilidad, permeabilidad, porosidad, humedad, entre otros.

Los sondeos deben realizarse en puntos seleccionados donde mayor interés tenga la información que se puede conseguir y, además, aprovechar su ejecución para obtener de ellos el mayor número de datos posible. Atendiendo a este último aspecto se recomienda especificar la obtención de la información mínima siguiente:

- Fechas de realización y datos de identificación del sondeo y del sondista que lo realizó.
- Coordenadas y cota de boca. Es imprescindible el replanteo preciso de la boca de los sondeos y especialmente su cota.
- Parte del sondeo donde figuren el equipo empleado, el procedimiento y los ritmos de avance, las profundidades donde se han tomado muestras o realizado ensayos, los tramos entubados y tipo y tamaño de la entubación, así como cualquier incidencia de interés, tales como la pérdida del caudal de agua de perforación, niveles de agua, caídas o desprendimientos de la pared del sondeo, etc. A estos efectos se indica que existen equipos de sondeo con registro automático de algunos de estos parámetros, cuya utilización es recomendable.
- Caja porta testigos suficientemente robusta y debidamente ilustrada donde, además de identificarse el sondeo correspondiente, se marquen con números claramente visibles las profundidades iniciales y finales del testigo de cada maniobra.
- Fotografías a color de las cajas de testigos hechas de frente de manera que se aprecien bien los detalles del terreno de caja en caja. En ocasiones puede ser conveniente la realización de fotografías de detalle de ciertos testigos aislados.

- Columna litológica, realizada por un titulado superior experto en geotecnia en la que, con ayuda gráfica, se recoja la descripción del terreno en cada nivel, los parámetros de avance del sondeo, la ubicación de muestras y ensayos, la situación del nivel freático en el sondeo y el porcentaje de testigo recuperado. Dependiendo del tipo de terreno y de reconocimiento realizado, podrá especificarse el incluir en estas columnas litológicas otros detalles de interés particular.

Los reconocimientos se realizan estableciendo determinadas fases. La intensidad y duración de estas fases deberá adaptarse a las circunstancias específicas de cada caso. Igualmente pueden realizarse otros ensayos para verificar la resistencia estructural de hormigones, elementos hidráulicos y prefabricados. En el caso de los métodos estructurales no invasivos se encuentran los métodos ultrasónicos, muy de moda actualmente por las posibilidades que brindan de ofrecer tridimensionalmente las características de hormigones, aceros y otros materiales en su estado construido, y con ello determinar o mapear tridimensionalmente las zonas de mayor vulnerabilidad. Estos son muy útiles para las mediciones de indicadores estructurales. Las experiencias internacionales en este tipo de tecnología ultrasónica están principalmente dirigidas a obras estructurales compactas, su uso en estructuras hidráulicas es de reciente introducción, sobre todo está de moda el uso de georradares. La tecnología ultrasónica también es empleada para registrar variaciones en la temperatura subacuática, velocidad de las corrientes de agua, fisuras, los niveles de azolve de embalses, etc., lo que resulta muy útil para determinar zonas de filtración, entre otros parámetros.

Además de estos métodos está la observación directa y medición directa por métodos manuales, los cuales se refieren, por ejemplo, a indicadores como nivel piezométrico en pozos, inclinación de vegetación, agrietamiento exterior en hormigones y estructuras, presencia de salideros, obstrucciones, entre otros. Los métodos manuales y visuales directos son los más antiguos y han sido ampliamente empleados alrededor del mundo y, suelen combinarse con métodos matemáticos de probabilidad y estadística y con la opinión de expertos, lo que los hace finalmente más precisos.

Por las características de las obras hidráulicas, en ocasiones es necesario realizar observaciones subacuáticas para comprobar el estado de hormigones sumergidos, cimentaciones de las obras de toma, compuertas; así como, las filtraciones en el fondo de los embalses, lo que dificulta aún más la investigación y requiere de la participación de un equipo multidisciplinario de especialistas y técnicos.

Los ensayos de laboratorio permitirán después ampliar esas características determinadas en las investigaciones de campo a rangos de presiones y ambientes diferentes a los de los ensayos “in situ” y que pudieran ser de interés dentro de los objetivos del reconocimiento. Por otro lado, es el momento donde se deben construir efectivamente las columnas estratigráficas con exactitud y bajo el auxilio de diversas técnicas, rectificar los planos de las obras hidráulicas, puntualizar los fallos presentes, entre otras. La investigación de laboratorio corresponde esencialmente a las muestras que pudieron ser tomadas durante la investigación de campo referentes a:

- Muestras de hormigón desprendido en las estructuras hidráulicas, o las tomadas mediante métodos geotécnicos.
- Algunas muestras superficiales de suelo.
- Muestras recolectadas en sondeos mecánicos en las áreas exteriores a las obras hidráulicas para verificar sus propiedades y tipo.

En la recolección, conservación, traslado de la muestra y su manejo en el laboratorio deben cumplirse estrictamente las normas establecidas al respecto para cada país, garantizando así la

confiabilidad de los estudios realizados a estas. Los estudios a las muestras en laboratorio igualmente sirven para verificar las mediciones geofísicas, geotécnicas y estructurales, por tanto, es preciso finalmente establecer una correlación entre ambos tipos de mediciones y ofrecer un resultado que las integre.

Un paso importante en las demostraciones a realizar lo constituye la representación gráfica: construcción de perfiles, mapeo y modelación tridimensional de los resultados obtenidos en el estudio preliminar de campo y laboratorio; y con ello la evaluación de la vulnerabilidad de las obras hidráulicas.

Luego de realizados estos pasos iniciales, para determinar la vulnerabilidad de las obras hidráulicas, se recomienda como primer paso evaluar de forma independiente determinados indicadores por tipo de partes componentes que la conforman, además de realizar este proceso por zonas si fuera necesario. Se sugiere que los especialistas realicen un resumen a partir de lo planteado en la tabla 7.

Tabla 7. Consideraciones generales en la interpretación de la vulnerabilidad de la obra hidráulica en cuestión.

Componente 1, 2, 3, ..., n.		
Zona	Detalles de vulnerabilidad estudiada	Evaluación del grado de vulnerabilidad (De 0 - 1)
Zona 1 (comprendida entre, coordenadas, etc.)	Indicador 1	
	Indicador 2	
	Indicador ...n	
	Resumen de vulnerabilidad del componente en zona 1	$V_{st} = (V_1 + V_2 + \dots + V_n) / n$
Zona n		

Nota: un procedimiento idéntico para cada zona y cada componente.

En caso de que la obra sea concentrada, como por ejemplo una caseta de bombeo, se sugiere que los especialistas realicen un resumen a partir de lo planteado en la tabla 8.

Tabla 8. Consideraciones generales en la interpretación de la vulnerabilidad de la obra hidráulica concentrada.

Detalles de vulnerabilidad estudiada	Evaluación del grado de vulnerabilidad (De 0 - 1)
Indicador 1	
Indicador n	
Resumen de vulnerabilidad	$V_{st} = (V_1 + V_2 + \dots + V_n) / n$

Para determinar el nivel cualitativo y cuantitativo de la vulnerabilidad sísmica que está expuesta de la obra hidráulica, se realizará a través de los criterios siguientes donde se promedia la vulnerabilidad de los componentes (tabla 9).

Es preciso aclarar que para cada componente de una obra hidráulica deberá existir la descripción detallada de estos criterios. Esta descripción permitirá la toma de decisiones posteriores respecto al tratamiento de la información que se brinda y las posibles soluciones en la reducción de la vulnerabilidad.

Tabla 9. Criterios finales de vulnerabilidad para componentes.

Vulnerabilidad	Descripción general	Valor
Baja	El componente no presenta afectaciones visibles, funciona correctamente.	0 – 0,25
Moderada	El componente presenta afectaciones leves que no impiden su funcionamiento.	0,26 – 0,50
Alta	El componente presenta afectaciones perceptibles que dificultan su funcionamiento.	0,51 – 0,75
Muy alta	El componente presenta afectaciones que impiden de forma total su funcionamiento.	0,76 - 1

Como paso necesario se deberán aplicar métodos no convencionales para determinar la vulnerabilidad efectiva de la obra hidráulica, debido a que esta puede fallar por cualquiera de sus partes componentes, en ello deberá estar implícita la opinión de los distintos especialistas que participan en el estudio pudiendo auxiliarse de métodos como: Tormenta de ideas, estadística multivariada, método de experto, modelación dinámica de las estructuras con el empleo de software profesionales.

La aplicación de estas técnicas permite, conociendo el peligro sísmico, determinar el nivel cualitativo de los riesgos a que está expuesto cada componente y la obra hidráulica en general, así como los posibles fallos que experimentará durante una sacudida sísmica.

ESTIMACIÓN DE LOS RIESGOS SÍSMICOS PRESENTES EN LOS COMPONENTES Y LA OBRA HIDRÁULICA EN GENERAL.

Al igual que para la determinación de la vulnerabilidad, para determinar los riesgos sísmicos o posibles daños de las obras hidráulicas se recomienda evaluar de forma independiente por tipo de partes componentes que la conforman, además de realizar este proceso por zonas si fuera necesario. Se sugiere que los especialistas realicen un resumen a partir de lo planteado en la tabla 10.

Tabla 10. Consideraciones generales en la interpretación de la vulnerabilidad de la obra hidráulica en cuestión.

Componente 1, 2, 3, ..., etc.				
Zona	Detalles del peligro sísmico estudiado para la zona	Detalles de vulnerabilidad estudiada	Evaluación del grado de vulnerabilidad (De 0 - 1)	Resumen del grado de riesgo
Zona 1 (comprendida entre, coordenadas, etc.)	Valor en la escala de 0 - 1	Indicador 1	Valor en la escala de 0 - 1	$R_s = (P + V) / 2$
		Indicador ...n		
	Valor promedio de riesgos: $R_{st} = (R_1 + R_2 + \dots + R_n) / n$			Valor promedio
Zona ...n				

Nota: un procedimiento idéntico para cada zona y cada componente.

En caso de que la obra sea concentrada, como por ejemplo una caseta de bombeo, se sugiere que los especialistas realicen un resumen a partir de lo planteado en la tabla 11.

Para estimar si los riesgos son bajos, moderados, altos o muy altos se sugiere emplear la siguiente matriz, de manera que sirva como criterio esencial para los especialistas, y puedan así emitir criterios de intervención para reducir la vulnerabilidad estableciendo prioridades (figura 3)

Tabla 11. Consideraciones generales en la interpretación de la vulnerabilidad de la obra hidráulica concentrada.

Detalles del peligro sísmico estudiado para la zona	Detalles de vulnerabilidad estudiada	Evaluación del grado de vulnerabilidad (De 0 - 1)	Resumen del grado de riesgo
Valor en la escala de 0 - 1	Indicador 1	Valor en la escala de 0 - 1	$R_s = (P + V) / 2$
	Indicador n		
Valor promedio de riesgos: $R_{st} = (R_1 + R_2 + \dots + R_n) / n$			Valor promedio

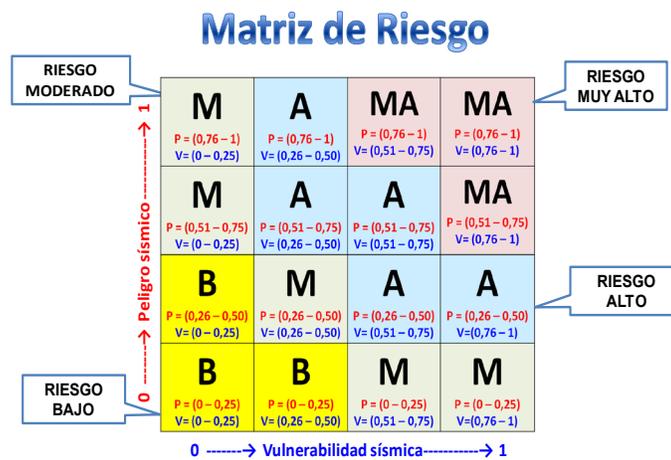


Figura 3. Matriz para la interpretación de riesgos sísmicos.

A partir de la experiencia práctica nacional e internacional, se procede a estimar de acuerdo a las vulnerabilidades detectadas, cuál o cuáles serían los fallos que podrían ocurrir si el componente específico de la obra hidráulica es impactado por un sismo de gran magnitud. En este sentido el empleo de software profesionales para la modelación de estructuras y obras hidráulicas existentes en el mercado, constituyen herramientas de apoyo a este proceso, además de la experticia de los especialistas que trabajan en el proceso.

RECOMENDACIONES DE INTERVENCIÓN TECNOLÓGICA Y ACCIONES ORGANIZATIVAS PARA REDUCIR LAS VULNERABILIDADES Y RIESGOS SÍSMICOS.

Una vez determinado el peligro sísmico existente en el área de ubicación de la obra hidráulica, sus vulnerabilidades intrínsecas y el nivel de riesgos, es preciso realizar los siguientes pasos lógicos:

- A partir del resumen de riesgo de cada componente, establecer un plan de prioridades de intervención a la obra hidráulica en función de disminuir, por fases y componentes, las vulnerabilidades encontradas.
- Ejecución de acciones de corrección para fortalecer la estructura hidráulica en proceso de análisis.

Los planes de reducción de riesgos deberán estar diseñados de manera que en ellos se inserte el cumplimiento de lo legalmente establecido en el país. Un plan puede llevarse a cabo, por

ejemplo, incluyendo acciones para la capacitación permanente de la población, profesionales, especialistas y decisores.

Muchas veces, debido al daño potencial que puede causar en los sitios expuestos determinados peligros, el costo de inversión por la aplicación de distintas medidas de reducción de riesgos supera los beneficios básicos que se esperan, comparados con su costo en sitios con menores peligros; además, también existen construcciones u obras de infraestructura que resultan vitales por sus funciones o por los daños sucesivos que puedan causar a la sociedad, por ejemplo, la interrupción del servicio de agua potable, la rotura de presas, roturas en el sistema de alcantarillado, entre otras. En estos casos se hace necesario garantizar el mayor nivel de seguridad posible en el diseño y construcción de las medidas de reducción de riesgos, para lo cual se requieren estudios ingenieros detallados, de manera que las probabilidades de fallo posteriores sean mínimas. Estos estudios, así como la propia ejecución de la obra según su complejidad y medidas de reducción que requieran, generalmente son costosos, por lo que se hace necesario establecer una relación entre los verdaderos beneficios, los detalles de las investigaciones y la clasificación de la obra.

CONCLUSIONES

Las obras hidráulicas han sido impactadas por los sismos históricamente, causando afectaciones sensibles al desarrollo de la humanidad, lo que ha estado marcado por la presencia de vulnerabilidades intrínsecas que tienen que ver con los materiales empleados para su construcción, la tecnología utilizada y deficiencias en su ejecución.

Actualmente existen distintas metodologías para evaluar la vulnerabilidad que presentan distintas obras hidráulicas, las que, a pesar de tocar elementos importantes, obvian en muchos casos el comportamiento particular de sus partes componentes y el uso de indicadores, aspectos que deben ser atendidos, pues la experiencia internacional confirma que una obra hidráulica puede fallar por cualquiera de sus componentes al ser impactada por un sismo.

Se diseñó un procedimiento para determinar el nivel de vulnerabilidad y riesgos en obras hidráulicas, que permite evaluar estos aspectos por componente e integralmente ante el impacto de los fenómenos sísmicos de gran magnitud. Su diseño incluye el empleo de indicadores y diversas técnicas de medición que se encaminan a preservar la integridad de la obra hidráulica durante la realización de los trabajos.

RECONOCIMIENTO

Los autores desean expresar que los preceptos expuestos en este trabajo forman parte de las investigaciones realizadas en el marco del Proyecto No. 9646- Fortalecimiento de la formación profesional en ingeniería hidráulica para la región oriental de Cuba. (2021 - 2024), del Programa Sectorial de Educación Superior y Desarrollo Sostenible, convocado por el Ministerio de Educación Superior (MES) de la República de Cuba.

REFERENCIAS

- Agunwamba J., Ekwule O. and Nnaji C. C.** (2018). Performance evaluation of a municipal water distribution system using WaterCAD and Epanet. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development* 8 (3): 459–467. <https://doi.org/10.2166/washdev.2018.262>
- Álvarez E., Ruiz J. y Muñoz S.** (2000). “Metodología para la Evaluación Rápida por Análisis Dinámico de Sistemas Constructivos en Zonas Sísmicas, Ingeniería Estructural y Vial”. Revista “Ingeniería Estructural y Vial”, Serie 3, CUJAE, La Habana, Cuba

- Benedetti D. and Petrini V.** (1984). “Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura: Proposte di un método di valutazione, L'industria delle Costruzioni”. Vol. 149, pp. 66-78, Roma, Italia.
- Cardona O.** (1991). “Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones y centros urbanos”, VII Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sismo-Resistente - IX Jornadas Estructurales, SCI/AIS/MOPT, Bogotá. Colombia.
- Galbán R.** (2014). “Procedimiento para la gestión y reducción de riesgos geológicos en la provincia Santiago de Cuba”. Tesis de Doctorado. Facultad de Construcciones, Universidad de Oriente. Santiago de Cuba.
- Galbán L. y Sánchez L.** (2016). “Indicadores para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de presas de tierra”. Revista de Obras Públicas. 163 (3582): 10-27. ISSN, 0034-8619, España.
- Hirosawa M.** (1992). "Retrofitting and Restation of Buildings in Japan", IISEE Lecture Note of Seminar Course, Tsukuba, Japan.
- Milanés C., Galbán L. y Olaya N.** (2017). “Amenazas, riesgos y desastres: visión teórico-metodológica y experiencias reales”. Editorial Universidad de la Costa (EDUCOSTA), ISBN: 987-958-8921-44-0. Colombia.
- OPS** (1998). “Mitigación de desastres naturales en sistemas de agua potable y alcantarillado - Guías para el Análisis de vulnerabilidad”. Washington, D.C., OPS Publicaciones (Serie Mitigación de Desastres). 110 p. ISBN 92 75 32250 3.
- Scarlat A.** (1996). “Approximate Methods in Structural Seismic Design”, E & FN Spon, London, UK. ISBN 13: 9780419187509.
- Toro A.** (2002). “Metodología para el análisis de riesgos y vulnerabilidad de los sistemas de agua potable y saneamiento”, Memorias del III Curso Internacional, Microzonificación y su aplicación en la Mitigación de Desastres, Lima, Perú.
- Torrente R.** (2016). Vulnerabilidad Geoambiental de la presa Parada. Tesis de grado para obtención de título de Ingeniero Hidráulico. Archivos del Departamento de Ingeniería Hidráulica, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores

Liber Galbán Rodríguez. <https://orcid.org/0000-0002-2377-9008>

Realizó contribuciones en la interpretación de los datos. Participó en el diseño de la investigación, análisis de los resultados y en la revisión y redacción del informe final.

Yoermes González Haramboure. <https://orcid.org/0000-0001-8613-6264>

Trabajó en el procesamiento de los datos haciendo contribuciones en su análisis e interpretación. Participó en la búsqueda de información y en la redacción final.

Yanet María Urquiza López. <https://orcid.org/0000-0003-3793-4790>

Participó en el diseño de la investigación, análisis de los resultados y en la revisión y redacción del informe final.