



## SIMULACIÓN FÍSICO-NUMÉRICA PARA EVALUAR EL COMPORTAMIENTO SISMO RESISTENTE EN PRESAS DE TIERRA

**Michael Alvarez González** <sup>(1)</sup>, **Ing. José Ernesto Martínez Valdés** <sup>(1)</sup> y **Dr. Lamberto Alvarez Gil** <sup>(2)</sup>

1. Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Villa Clara (IPH VC) Libertadores 201 e/ Jesús Menéndez y Danielito. Santa Clara. VC. Cuba. Teléf.: + 53 (42) 202330 Fax: 202330, e-mail: [michael@vc.hidro.cu](mailto:michael@vc.hidro.cu) o [eiphvc@enet.cu](mailto:eiphvc@enet.cu)

2. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Carretera a Camajuaní, Km 5½, Santa Clara. VC. Cuba, e-mail: [lambertoag@uclv.edu.cu](mailto:lambertoag@uclv.edu.cu)

### RESUMEN

En la presente investigación se expone a consideración un compendio resultados alcanzados por un grupo multidisciplinario de especialistas que han acumulados experiencia demostrada en el ejercicio de investigaciones y soluciones ingenieras relacionadas a las patologías en el campo de la ingeniería hidráulica, analizadas en múltiples escenarios extremos que permiten evaluar la respuesta estructural del conjunto hidráulico o de la obra objeto de estudio, durante la ocurrencia de un sismo y su respuesta al comportamiento de las partes estructurales que integran la obra en tiempo real durante la simulación de ocurrencia del sismo. Además, se proponer un material genérico que permita identificar herramientas de análisis avanzadas para evaluar los peligros, vulnerabilidades y riesgos de las obras existentes o en proceso de diseño ingenieril ante la posible ocurrencia de un sismo, con un ambiente virtual en el que se hace posible determinar los diferentes grados de respuesta asociados al comportamiento de la estructura en eventos extremos de diferentes magnitudes.

### ABSTRACT

The present paper exposed a summary reached results by a multidisciplinary specialists group with the accumulated and demonstrated experience in the surveying exercise and technical solutions related to the pathologies in the hydraulic engineering field, analysed in extreme multiple scenarios that allow to evaluate the structural response of the earth dams, during the occurrence of an earthquake and their structural parts response integrate to the work in real-time during the earthquake simulation of occurrence. Also, It's propose a generic material to identify advanced analysis tools to evaluate the dangers, vulnerabilities and risks form the existent works or in process of engineer design before the possible occurrence of an earthquake, with a virtual domain in the one that becomes possible to determine the different response grades associated to the structure behaviours in the extreme events of different magnitudes.

### INTRODUCCIÓN

El presente documento se basa en un compendio de criterios normativos de alcance nacional e internacional y elementos técnicos acumulados en la experiencia de grupos multidisciplinarios en la creación de diseños ingenieriles de presas de tierra y supervisión ejecutiva de su construcción por más de 30 años sin presentar experiencias situaciones de riesgo sometido al fallo o colapso de la obra diseñada o en construcción.

Partiendo del conocimiento acumulado en el empleo de escenarios de simulación virtuales para evaluar la efectividad de un diseño ingenieril mediante herramientas diversas, tales como el Método de los Elementos Finitos (MEF) y Sistemas de Información Geográfica (SIG) se decide proponer por objetivo principal el realizar una muestra de la aplicación del MEF en el campo de la evaluación sismo resistente de la cortina del Embalse Palmarito y de su sistema tecnológico estructural que posee tipológicamente constructivo la cortina de este embalse (ver figura 1).

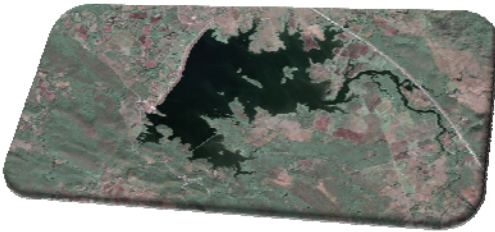


Figura 1. Imagen satelital del Embalse Palmarito, Villa Clara, Cuba.

Teniendo en cuenta la amplia versatilidad de aplicar simulaciones en el campo de la ingeniería del diseño y proyectos a gran, mediana y pequeñas escalas, se hace espacio en este campo, esta modesta contribución al relatar genéricamente los resultados investigativos alcanzados al simular un sismo en la cortina del Embalse Palmarito y evaluar en tiempo real al comportamiento de la estructura durante su proceso de explotación.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Basado en las experiencias investigativas alcanzadas en el ámbito internacional se decide asumir las recomendaciones realizadas por Hernández (2012) al recomendar un procedimiento general de análisis de una presa de tierra y enrocamiento sometida a un evento sísmico por siguientes pasos:

- Se determina la sección de la presa y el sismo de diseño.
- Se calcula la distribución inicial de esfuerzos en el terraplén antes de que ocurra el temblor.
- Seleccionar las propiedades dinámicas no lineales de los materiales constitutivos.
- Se calculan los esfuerzos dinámicos inducidos en el terraplén por el sismo de diseño.
- Se determinan los efectos que puedan tener los esfuerzos dinámicos sobre cada elemento
- Se evalúa el factor de seguridad del terraplén durante o después de la acción del sismo.
- Si el terraplén es estable, se calculan las deformaciones permanentes.

En un primer momento, acorde a las recomendaciones previas, se dispuso de toda la información necesaria en lo referente al embalse, sea fundamental las propiedades físico-mecánicas de los materiales empleados en la cortina de tierra, la sección típica que caracteriza la estructura y los parámetros fundamentales de la obra para la cual se asume la sección típica representada en la figura 2, identificando básicamente una cortina del tipo de pantalla con un drenaje horizontal con salida a pozos de alivio y a la superficie aguas abajo fuera del área de interés que se pretende caracterizar.

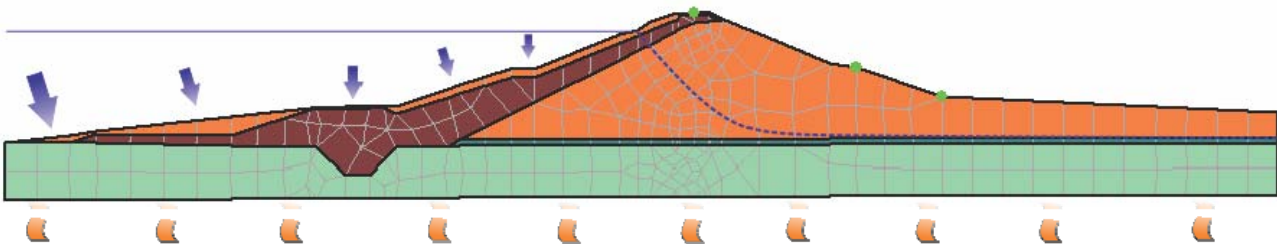
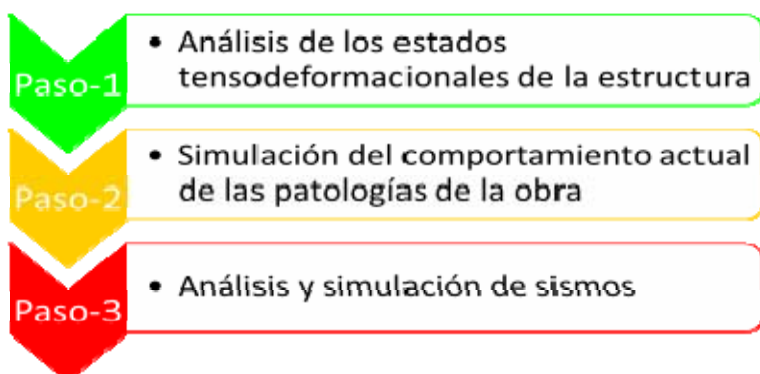


Figura 2. Sección típica utilizada en la simulación del Embalse Palmarito, Villa Clara, Cuba.

Representando en forma de flechas azules la presión que es ejercida por el nivel del agua sobre la cortina del embalse definida desde el Nivel de Aguas Normales (NAN) y la curva teórica de la Línea de Corriente Superior (LCS) en azul discontinuo; en forma de flama se grafica la zona por donde se simula la entrada de la honda de propagación sísmica a la estructura.

Para el presente caso el autor consideró oportuno hacer una segmentación agrupada en tres pasos genéricos (ver figura 3), en los cuales no se niegan los elementos que integran el procedimiento recomendado por Hernández, sino que son agrupados y se le incluye el Paso 2, considerando que la obra objeto de estudio se encuentra en proceso de explotación y bajo la categoría de Riesgo por Vigilancia Hidro-meteorológica debido a las patologías de filtraciones que se han registrado históricamente en el complejo hidráulico desde la afectación por un evento extremo en la que se le afectó el cubrimiento de enrocado en el talud aguas arriba (Carmona, 2001).



En el caso particular de avalar la necesidad de este nuevo ítem, sugiere desde el proceso de determinación de los estados tenso-deformacionales de la obra al percibir en los registros históricos de las deformaciones geodésicas una dispersión del fenómeno de deformación, haciendo este evento hidrometeorológico un análisis resultante que difiere en sus resultados antes y después de la ocurrencia del mismo; por lo que se

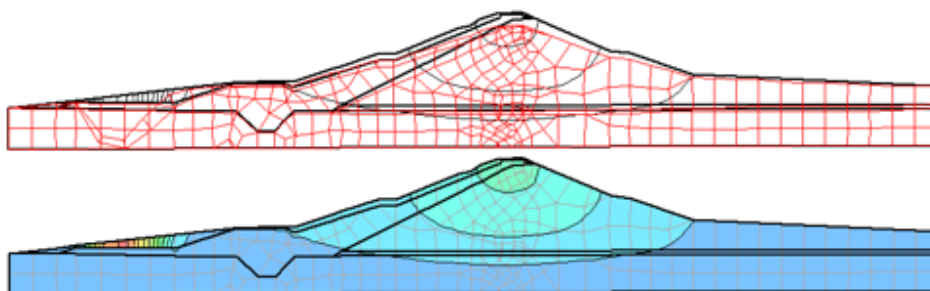
**Figura 3. Secuencia de análisis y simulación empleada** considera necesario evaluar la respuesta de la estructura bajo el comportamiento actual en la que se encuentra (Álvarez, 2010a, 2010b).

Además, el simple hecho de encontrarse en la región central del país, en una zona donde los coeficientes establecidos para el diseño de presas de tierra son mínimos por ser una zona geológica estable en la que no se han registrado históricamente sismos, condiciona que el factor de seguridad para este tipo de evento sea prácticamente despreciable o cero (0); a diferencia de los nuevos cambios registrados por la Red Nacional de Monitoreo Sísmico que ha identificado pequeños movimientos telúricos en zonas donde nunca habían existido referencias alguna de este suceso.

En el caso de todos los procesos de simulación se hace la propuesta de emplear un modelo bidimensional para describir el comportamiento de la estructura y evaluar las deformaciones volumétricas permanentes por medio de los asentamientos permanentes toda la sección objeto de estudio, así como el factor de seguridad para el talud aguas abajo en tiempo real durante la ocurrencia virtual durante una carga cíclica no uniforme, como la que ocurre un sismo.

## RESULTADOS

En este primer momento se realiza una caracterización de los estados tenso-deformacionales (ver figura 4) en la que se identifica la variación de la malla empleada respecto a la sección original y las tensiones que son propagadas al interior de la estructura al incluir el empuje del agua sobre el talud húmedo.



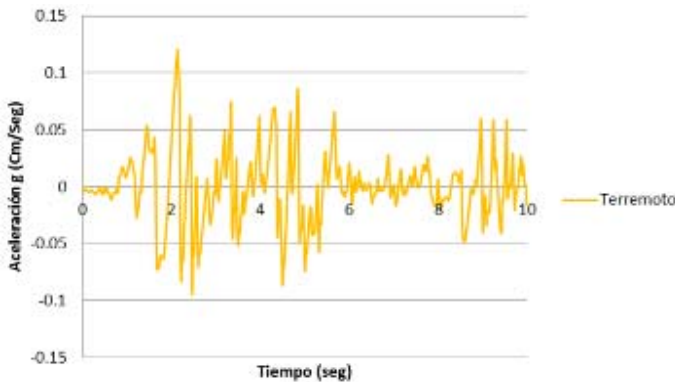
**Figura 4. Análisis tenso-deformacional realizado a la sección típica del Embalse Palmarito, Villa Clara, Cuba.**

En el segundo paso son incluidos los registros de las deformaciones geodésicas como elementos de calibración del modelo fisicomatemático empleado y control de la respuesta tenso-deformacional como respuesta reológica del material de la cortina. Este paso es determinante en cuanto a la actualización del estado patológico en el que se encuentra la estructura desde un análisis correlativo carga-deformación (Barrios, 2010; Cuevas, 2013) según se muestra en la figura 5 al realizar una aproximación sucesiva mediante la complejidad progresiva del procedimiento de cálculo de los modelos seleccionados.



Figura 4. Análisis del comportamiento de la patología de filtraciones en la sección típica del Embalse Palmarito.

En este caso se logra como primer resultado significativo un margen de error de correspondencia no mayor del 3% en cuanto al comportamiento histórico real de la patología de filtraciones, asociada a un 100% de correspondencia al estado deformacional contenido en los registros históricos de los datos geodésicos en las marcas superficiales de la sección de estudio que le fueron introducido al proceso de cálculo como condiciones de borde a cumplir por el modelo.



Previo a iniciar el Paso-3, se hace una representación gráfica del sismo para identificar la intensidad y duración del mismo mediante la variabilidad de la aceleración (g) en una escala de tiempo en segundos. Lo cual indica que es de corta duración y de magnitud II en la escala de Richter al no poseer valores picos por encima de 0.2 (ver figura 5).

Figura 5. Representación gráfica del sismo.

Los resultados gráficos con el valor admisible de máxima deformación para la estructura, según el diseño original, en la componente principal de las abscisas (X) se identifican dos valores picos, uno muy próximo al límite y otro que supera el valor admisible. Este detalle generalmente induce, por hipótesis, la probabilidad de fallas estructurales en el cuerpo de la obra; por lo que se hace necesario evaluar el comportamiento de las deformaciones permanentes en las ordenadas (Y), identificando que los valores registrados no presentan variaciones diferenciales superiores a los 0.002 m y distan en más de 0.07 m del valor admisible por parámetros para las deformaciones en Y.

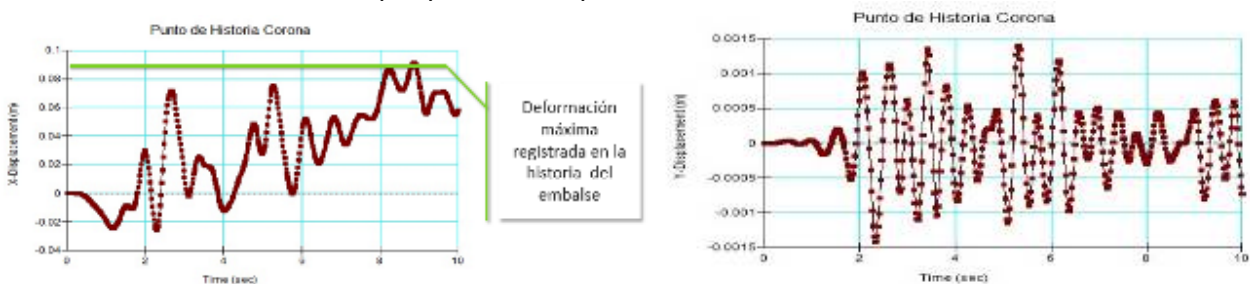
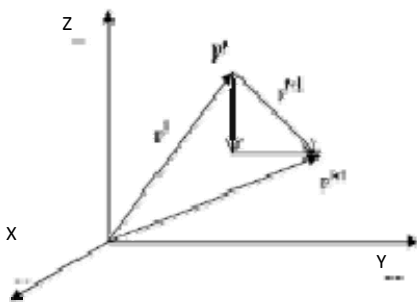


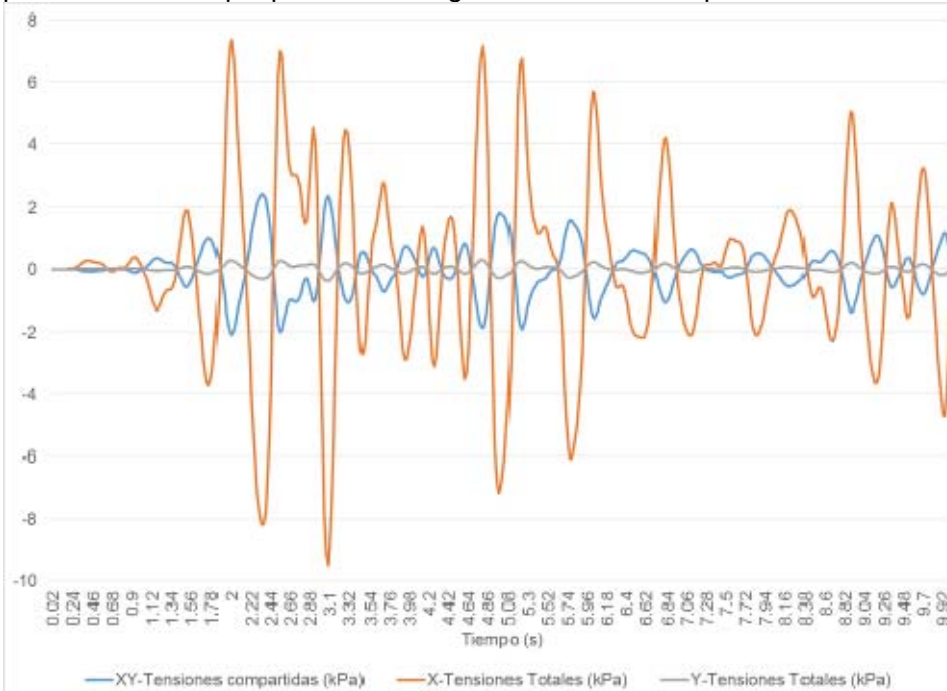
Figura 6. Representación gráfica de los desplazamientos permanentes registrados en la corona del embalse.



**Figura 7. Representación gráfica del radio vector de deformación.**

Como un elemento adicional de control para verificar la hipótesis de que no se aprecian afectaciones que desencadenen posibles fallas se verifica el valor del radio vector de deformación resultante (GEOCUBA, 2004; Barrios, 2010; Cuevas, 2013) acorde a la representación en la figura 7 para obtener un valor de 0.06 m de 0.03 que posee actualmente el embalse y con capacidad de diseño para 0.48 m, por lo que se acepta la hipótesis de negación previamente asumida.

En un segundo momento se procede a realizar una representación gráfica del comportamiento de las tensiones en el tiempo durante la ocurrencia del sismo (ver figura 8), en la que se identifican valores picos en las tensiones generadas en las abscisas acorde a los valores de las aceleraciones registradas, a diferencia de las tensiones en la componente de las ordenadas que varían en un rango próximo a  $\pm 1$  discretamente, para obtener una tensión resultante compartida entre las principales componentes sin superar los 2.5 kPa, por lo que la estructura amortiza progresivamente las tensiones y minimiza la probabilidad de posibles valores que puedan crear grietas internas o superficiales en el cuerpo de la obra.



**Figura 8. Representación gráfica de los desplazamientos permanentes registrados en la corona del embalse.**

Además, se realiza un chequeo al comportamiento de las presiones de poro en el cuerpo de la estructura y en la base (ver figura 9), registrándose un aumento en la base posterior al punto de inyección y anclaje de la pantalla y al concluir la berma en el talud seco, donde se disipan las presiones por el correcto funcionamiento del filtro al no permitir la propagación de este fenómeno al interior del cuerpo de la estructura. Elemento este que se verifica al realizar una representación gráfica del empuje hidráulico en la estructura y se confirma el proceso de disipación que genera una discontinuidad de las presiones entre la estructura superior a la cota del filtro y la base al no permitir una propagación por el exceso de presión en la base.

Finalmente se decide chequear el comportamiento del Factor de Seguridad (FS) del talud aguas abajo o talud seco para verificar si el estado límite de equilibrio para las fuerza actuantes ante un



probable fallo del talud. Por lo que se decide iniciar los análisis por el comportamiento del FS al comparar su relación con las aceleraciones que son registradas en la corona del embalse.

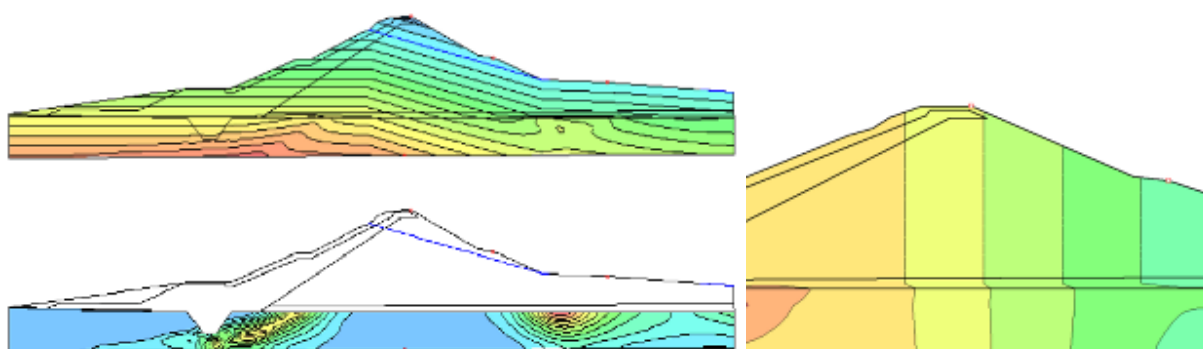


Figura 9. Representación gráfica de las presiones de poro en cuerpo y en la base del embalse y la presión de empuje hidráulico registrado.

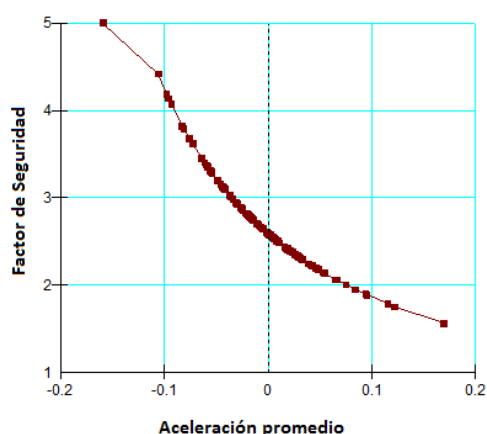


Figura 10. Representación gráfica del Factor de Seguridad vs Aceleración Promedio registrado en la corona del embalse Plamarito.

(1.4) según normas técnicas vigentes en Cuba (MICONS, 2005a, 2005b), sin que alguno de los valores del FS rebase los criterios de falla inminente.

En este caso se identifica como es reducido el comportamiento del FS bruscamente en el proceso de aceleración para valores negativos (en dirección aguas arribas), con una progresión menos acelerada al registrar valores de aceleración positiva. Por lo que se evidencia que los momentos más críticos son registrados en los valores positivos con los mínimos valores del FS sin que esto implique una posible falla a partir de los valores mínimos recomendados para el diseño de presas de tierra (ver figura 10).

También se verifica el comportamiento progresivo en el tiempo para corroborar las variaciones de la aceleración contra la respuesta del FS en la figura 11. Siendo evidente

la relación inversa que se produce en la variación del FS ante un valor de aceleración registrado. Además se realiza un control de límite admisible para los valores mínimos de posibles fallas por los criterios de Bishop (1.2) y Fellenius

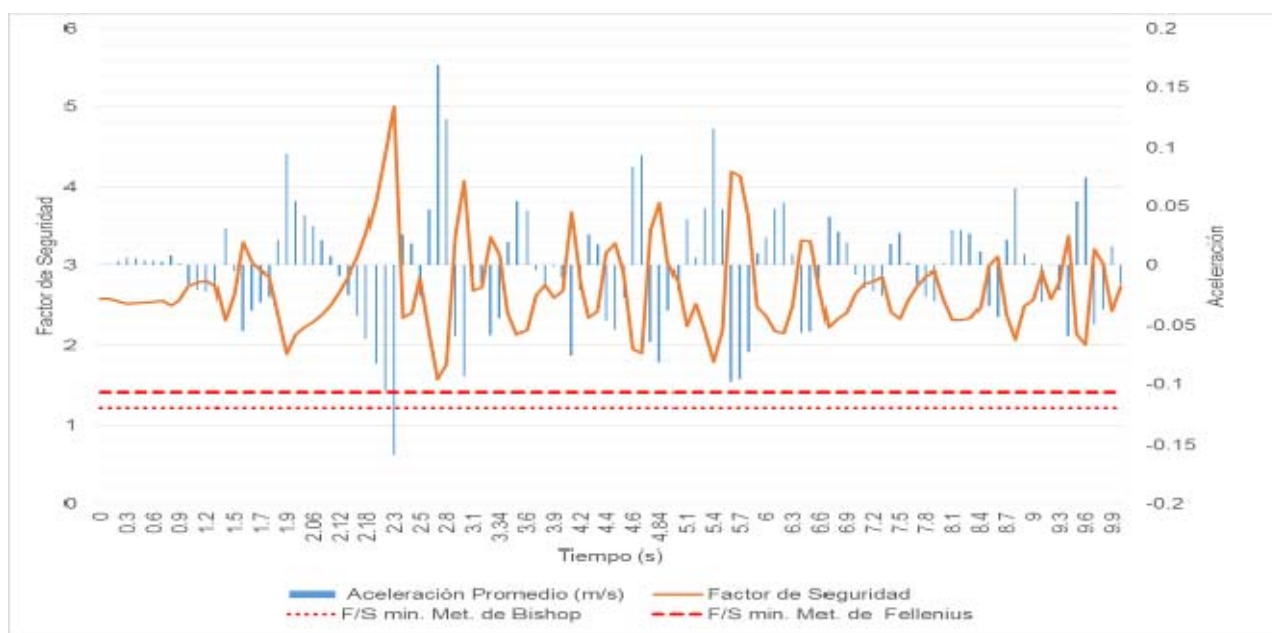


Figura 11. Representación gráfica del FS vs aceleraciones registradas en la corona del embalse.

## DISCUSIÓN

El proceso evaluativo de la respuesta sismo-resistente de la cortina del Embalse Palmarito demuestra la capacidad de disipación de la estructura ante la ocurrencia de un sismo de grado II en la escala de Richter evaluando el estado tenso-deformacional desde un enfoque patológico actualizado acorde a las condiciones en las que se encuentra el embalse durante el proceso de explotación.

Con la aplicación del esquema de análisis propuesto en la evaluación se logra alcanzar una correlación de datos de respuestas de los modelos físico-matemáticos con los datos registrados que supera el 97% de seguridad con un margen de error inferior al 3%, siendo solo evaluado para un solo escenario probable, por lo que se recomendaría realizar este proceso para un espectro mayor que el presentado a la misma obra y de ser posible extenderlo a diferentes tipo de complejos hidráulicos acorde a las estrategias nacionales propuestas por el Instituto Nacional de los Recursos Hidráulicos (INRH) en Cuba.

## CONCLUSIONES

Acorde a los criterios previamente presentados en el cuerpo del presente artículo se arriban a las siguientes conclusiones:

1. La aplicación del Esquema de Evaluación Sismo-resistente para una simulación físico-numérica en presas de tierra es viable dado la versatilidad de criterios a inspeccionar acorde a las posibilidades tecnológicas disponibles e instaladas en la obra objeto de estudio.
2. Permite determinar teóricamente el estado actual tenso-deformacional de la estructura y el comportamiento de las patologías asociadas, en correspondencia a su data histórica, criterio este que permite realizar un proceso evaluativo más complejo pero a su vez se estima una mayor correspondencia con la probable respuesta de la estructura ante la simulación del fenómeno objeto de estudio para el presente documento.
3. El uso de las técnicas de visualización científica empleadas en las gráficas previas incorporan herramientas de análisis adicionales para la toma de decisiones oportunas ante criterios de Peligro, Vulnerabilidad y Riesgo asociado a la infraestructura hídrica nacional al evaluar posibles comportamiento y respuesta de los embalse en el territorio nacional ante la ocurrencia de sismos.



## BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, M. (2010a). Recomendaciones prácticas para interpretar las bases de datos geodésicas de los embalses, deformaciones horizontales. Santa Clara, Villa Clara, Cuba: Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos (IPH) de Villa Clara.
- Álvarez, M. (2010b). Recomendaciones prácticas para interpretar las bases de datos geodésicas de los embalses, deformaciones verticales. Ciudad de Santa Clara, Villa Clara, Cuba: Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Villa Clara.
- Barrios, I. (2010). Evaluación de las patologías existentes en una obra Hidráulica: Caso de Estudio Embalse «Palmarito». Trabajo de Diploma Ingeniería Civil Universidad Central «Marta Abreu» Las Villas, Santa Clara, Villa Clara.
- Carmona, Y. (2001, 18/sept/2013). [Causas por la que se propone Prevención Hidrológica para la Presa «Palmarito»].
- Cuevas, Y. (2013). Análisis de las deformaciones en cortinas de presas de tierra: Caso de Estudio Embalse «Palmarito». Trabajo de Diploma Ingeniería Civil Universidad Central «Marta Abreu» Las Villas, Santa Clara, Villa Clara.
- GEOCUBA, G. E. (2004). Metodología para el control de deformaciones de obras a partir de métodos geodésicos MET 30-27:2004 (pp. 1-2, 3-8,9-12). Ciudad de La Habana, Cuba: Grupo Empresarial GEOCUBA Investigación y Consultoría (GEOCUBA IC), Filial Villa Clara-Sancti Spíritus.
- Hernández, F. (2012). Asentamientos permanentes por sismo en presas de tierra y enrocamiento, Tomado de: <http://www.repositoriodigital.ipn.mx/handle/123456789/5601>
- MICONS. (2005a). Manual Práctico de Hidráulica Tomo I. Ciudad de La Habana, Cuba: Instituto de Hidroeconomía, Ministerio de la Construcción (MICONS).
- MICONS. (2005b). Manual Práctico de Hidráulica Tomo II. Ciudad de La Habana, Cuba: Instituto de Hidroeconomía, Ministerio de la Construcción (MICONS).