



Notas Técnicas

# Análisis de los resultados de la evaluación del riesgo sísmico y las funciones de vulnerabilidad de la red del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados



Financiado por



---

© 2016 Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento/Banco Mundial  
1818 H St. NW  
Washington DC, 20433 EE.UU.  
Teléfono: 202-473-1000  
Sitio web: [www.worldbank.org](http://www.worldbank.org)

Esta obra ha sido realizada por el personal del Banco Mundial con contribuciones externas. Las opiniones, interpretaciones y conclusiones aquí expresadas no son necesariamente reflejo de la opinión del Banco Mundial, de su Directorio Ejecutivo ni de los países representados por este.

El Banco Mundial no garantiza la exactitud de los datos que figuran en esta publicación. Las fronteras, los colores, las denominaciones y demás datos que aparecen en los mapas de este documento no implican juicio alguno, por parte del Banco Mundial, sobre la condición jurídica de ninguno de los territorios, ni la aprobación o aceptación de tales fronteras.

#### **Derechos y autorizaciones**

El material contenido en este trabajo está registrado como propiedad intelectual. El Banco Mundial alienta la difusión de sus conocimientos y autoriza la reproducción total o parcial de este informe para fines no comerciales en tanto se cite la fuente.

Cualquier consulta sobre derechos y licencias, incluidos los derechos subsidiarios, deberá enviarse a la siguiente dirección: World Bank Publications, The World Bank Group, 1818 H Street NW, Washington, DC 20433, EE. UU.; fax: 202-522-2625; correo electrónico: [pubrights@worldbank.org](mailto:pubrights@worldbank.org).

Foto de la portada: Getty Images  
Diseño de la portada: FCI Creative

---

## ANTECEDENTES

Con apoyo del Banco Mundial, el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) emprendió el desarrollo de un proyecto de estimación de riesgo sísmico de su infraestructura que incluye 65 tanques de almacenamiento de agua ubicados en las ciudades de San José y algunas poblaciones conurbanas. Gracias al apoyo financiero del Programa de Asociación para el Agua (WPP) del Banco Mundial y del Gobierno de Australia, AyA también pudo contar con la asistencia técnica de la empresa mexicana Especialistas en Evaluación de Riesgos Naturales (ERN).

El resultado de este proyecto fue una estimación del riesgo con dos indicadores: la Pérdida Anual Esperada (PAE), y la Pérdida Máxima Probable (PML). El primero de estos indicadores se evalúa tanto para la cartera completa como individualmente por cada componente dentro de la red infraestructura de AyA, mientras que el segundo indicador es un estimador de la cartera completa.

Los resultados globales o agregados a nivel de cartera han servido para que AyA conozca la situación del riesgo de sus activos expuestos a la acción de sismos. Sin embargo, una revisión de los valores de PAE obtenidos para componentes individuales puso de manifiesto algunos resultados anómalos, por lo que se propuso realizar un análisis más profundo de todas las etapas de la evaluación del riesgo para identificar las fuentes de estos resultados. Este documento presenta los análisis realizados, los hallazgos, y pasos pendientes de realizar para alcanzar el objetivo.

Este documento ha sido elaborado por Antonio Zeballos, Consultor Sénior en Vulnerabilidad Estructural y Análisis del Riesgo, bajo la dirección y supervisión de Fernando Ramirez-Cortés y Oscar A. Ishizawa, Especialistas Sénior en Gestión del Riesgo de Desastres, como parte de las Notas Técnicas desarrolladas en el marco del Programa para América Latina y el Caribe de Evaluación Probabilística del Riesgo (CAPRA por sus siglas en inglés) del Banco Mundial.

Revisión técnica del texto realizada por Juan Carlos Lam, Especialista en Gestión del Riesgo de Desastres, y Gonzalo L. Pita, PhD., Consultor Sénior en Vulnerabilidad Estructural y Análisis del Riesgo.

# RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO PARA LA INFRAESTRUCTURA DE AGUA Y SANEAMIENTO EN COSTA RICA

El documento “Evaluación sísmica de los sistemas de agua potable y saneamiento de la Gran Área Metropolitana, San Isidro e Higuito – Plataforma CAPRA Modelación Probabilística de Escenarios de Riesgo para Centroamérica” elaborado por la Dirección de Investigación y Desarrollo de la Subgerencia de Ambiente, Investigación y Desarrollo del AyA, presenta los resultados de la evaluación del riesgo realizado a la infraestructura de la empresa en las zonas del Área Metropolitana de San José y las poblaciones conurbanas de San Isidro e Higuito, empleando la Plataforma CAPRA, herramienta desarrollada por el Banco Mundial.

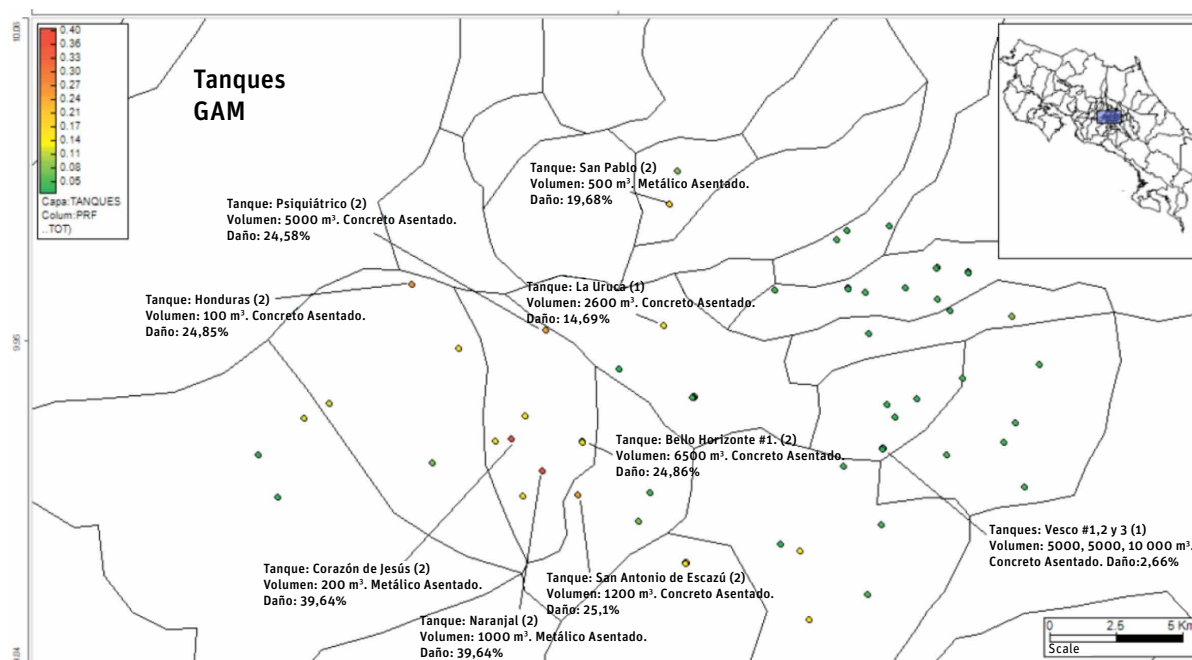
De acuerdo con este documento, luego de evaluar ponderadamente más de 29,000 escenarios sísmicos probables, los valores de PAE obtenidos para algunos tanques reservorios de agua se muestran en el cuadro 1.

**Cuadro 1** PAE obtenido para algunos tanques reservorios

Nombre	Volumen (m <sup>3</sup> )	Tipo	Daño Esperado
Corazón de Jesús	200	Metálico Asentado	39,64%
Naranjal	1000	Metálico Asentado	39,58%
San Antonio de Escazú	1200	Concreto Asentado	25,10%
Bello Horizonte	6500	Concreto Asentado	24,86%
Honduras	100	Concreto Asentado	24,86%
Siquiátrico	5000	Concreto Asentado	24,58%
La Uruca	2600	Concreto Asentado	14,69%
San Pablo	500	Metálico Asentado	19,68%
Vesco #1, 2 y 3	5000, 5000, 10000	Concreto Asentado	2,66%

Se observa que, tanto tanques de concreto armado como metálicos, presentan valores de PAE muy elevados, y además cierta proximidad entre ellos (ver figura 1).

**Figura 1** Ubicación de los tanques



Estos resultados llaman la atención por dos razones:

- Son valores mucho más altos que los usuales para este tipo de evaluaciones. Por ejemplo, los valores de PAE de tanques estimados en el estudio realizado a la empresa SEDAPAL de Lima variaron entre 1.8% y 11%.
- Los resultados no representan la realidad de estos elementos. Un elemento que tiene una PAE de 39% sugiere que su situación es tal que, en promedio, cada año algún evento sísmico lo daña de tal manera que se requiere una inversión equivalente al 39% de su valor para volver a ponerlo en la misma situación antes del evento. Claramente esto no ha ocurrido en el caso de estos tanques. La mayoría de los tanques que aparecen en la lista han permanecido totalmente operativos durante los últimos 20 o 30 años, y han soportado eventos sísmicos moderados sin evidenciar daños graves.

En vista de esto, se procedió a revisar todos los aspectos en la evaluación de riesgo de tanques, para comprender la razón de estos resultados. El procedimiento fue el siguiente:

1. Visita de campo,
2. Revisión de información de efectos de sitio,
3. Revisión de información de amenaza, y
4. Revisión de funciones de vulnerabilidad.

---

## VISITA DE CAMPO

Se realizó una visita de campo del 4 al 6 de febrero del 2013, en donde además se aprovechó la visita a San José para verificar otros aspectos de la evaluación del riesgo, como los efectos de sitio. El día martes 5 de febrero se visitaron 2 tanques, uno de concreto (Cementerio Escazú, conocido como Cruz Roja) y uno metálico (Naranjal), ambos representativos de los tipos de tanque de AyA y que registraron PAEs inusualmente altas.

El tanque Naranjal es un tanque metálico de acero asentado sobre una plataforma de concreto, ubicado en una zona de mucha pendiente. El aspecto general del tanque es bueno, no son evidentes fisuras ni inestabilidades de las paredes, como tampoco se aprecia pérdida de contenido. Las uniones de soldadura se ven sanas y no muestran signos de deterioro por fatiga, y a simple vista se aprecian de buena calidad sin presencia de óxido ni rastros de burbujas en ellas (Figuras 2, 3, 4, y 5). Para este tanque, la evaluación del riesgo indica una PAE de 39.58%, que dista mucho de representar adecuadamente la situación del tanque.

---

**Figura 2** Vista, desde el exterior, del tanque metálico Naranjal. A simple vista se le ve en buen estado, sin zonas visibles con corrosión ni pérdidas de contenido.



---

**Figura 3** Detalle de las paredes metálicas del tanque Naranjal. Se puede apreciar las láminas que forman la pared del tanque, la unión soldada, y las ondulaciones que naturalmente se presentan en uniones soldadas.



**Figura 4** El tanque Naranjal está asentado sobre una base de concreto reforzado, sin anclas aparentes. Al momento de la inspección el tanque se encontraba prácticamente lleno, y no se apreciaba pérdida de contenido en ningún punto del tanque.



**Figura 5** Las uniones soldadas a simple vista se aprecian en buen estado, aunque siempre es posible encontrar algunos defectos en la aplicación de la soldadura que no son graves.



El otro tanque visitado fue Cementerio Escazú (conocido como Cruz Roja) constituido de concreto armado, de forma rectangular, y con tapa. En este tanque se pudo detectar varios problemas constructivos, principalmente relacionados con las actividades de compactación de rellenos, lo que ha originado movimientos relativos de las veredas respecto del propio tanque que sin embargo no han afectado a éste, y que se ha manifestado sólo en problemas en las conexiones de tuberías. Además de esto, en el techo del tanque se puede ver problemas de pobre colocación de recubrimiento, y en las paredes quedan huellas de filtraciones. De acuerdo con AyA, la construcción de este tanque fue ejecutado por una empresa que incurrió en errores y deficiencias constructivas, que fueron reparadas posteriormente. El tanque se encuentra completamente operativo.

**Figura 6** Vista lateral del tanque de concreto Cementerio Escazú



**Figura 7** Otra vista lateral del tanque de concreto Cementerio Escazú. Nótese las trazas dejadas por filtraciones en la pared.



**Figura 8** Evidencias de problemas de compactación en la vecindad del tanque de concreto Cementerio Escazú.



**Figura 9** Imagen del techo del tanque Cementerio Escazú. Se puede ver resanes realizados en zonas muy bien definidas.



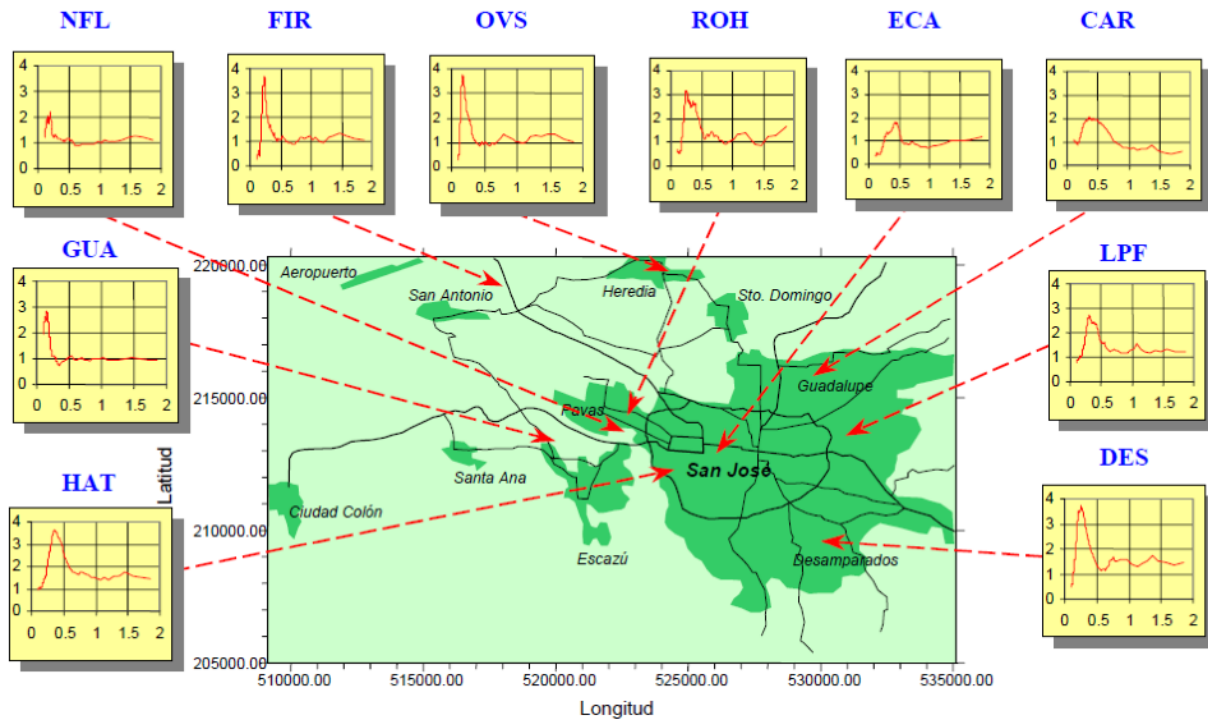
Se desconoce si el estado constructivo de este tanque fue tomada en consideración en la evaluación del riesgo, aunque es probable que no, ya que usualmente en un estudio de este tipo el número de componentes a considerar es tan grande que no es posible inspeccionar cada uno de ellos y tomar en cuenta su estado actual real. Lo que es usual, es considerar funciones de vulnerabilidad representativas del sistema estructural y modificarlas de acuerdo a algunos aspectos como la edad del tanque y su estado general de conservación, tal como se hizo en el estudio de AyA. A pesar del estado en que se encuentra el tanque, es difícil de aceptar que su PAE sea del 15.18% (no mostrada en cuadro 1).



# REVISIÓN DE INFORMACIÓN SOBRE EFECTOS DE SITIO

En vista de la aparente proximidad entre tanques con alto PAE, una posible explicación de estos resultados podría estar asociado a los efectos locales o efectos de sitio. Para analizar esta posibilidad se usaron los estudios de efectos de sitio desarrollados por la Universidad de Costa Rica, que consideraban efectos locales debido a depósitos de suelos (figura 10).

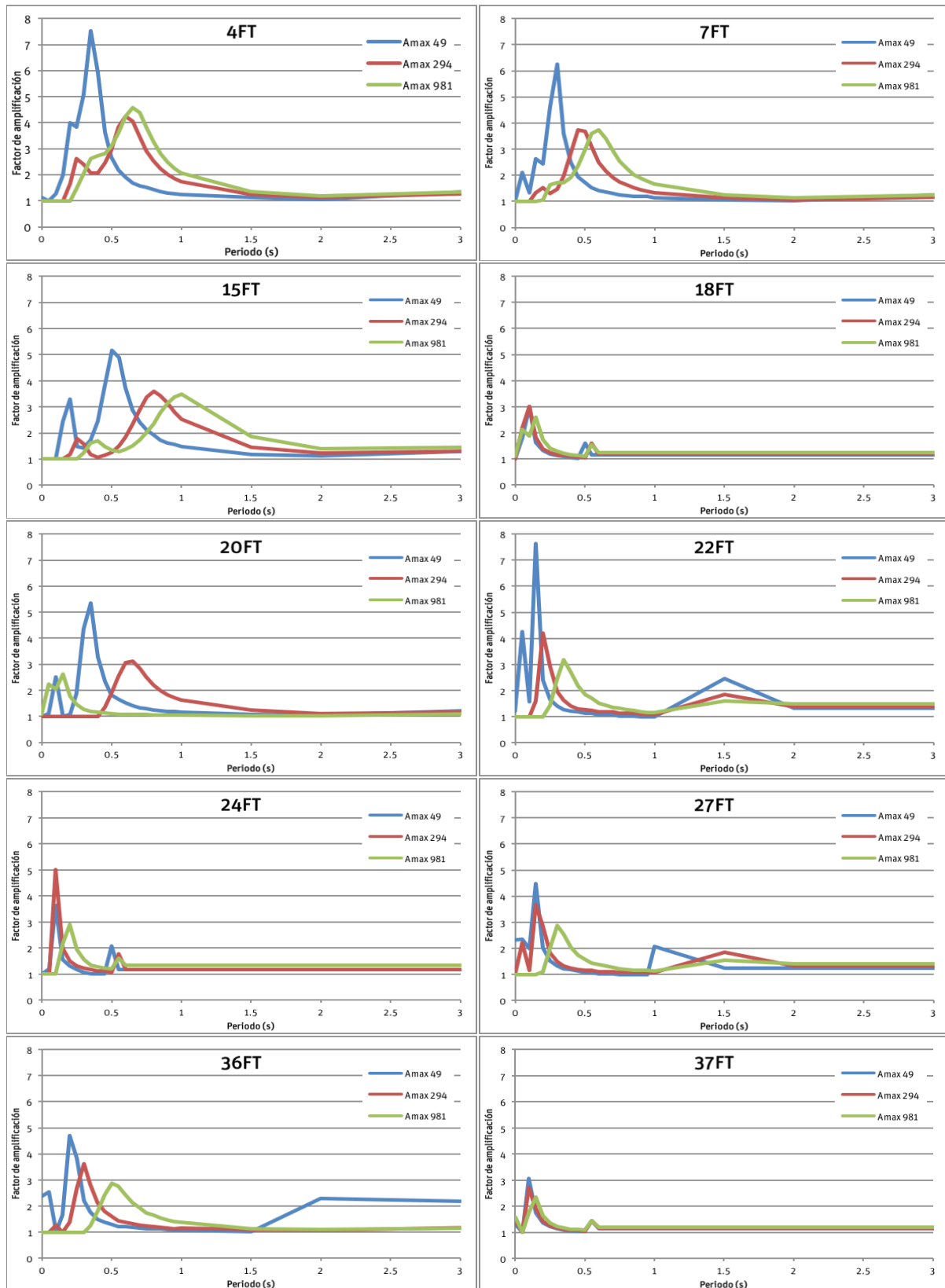
**Figura 10** Funciones de amplificación en diversos puntos de la Gran Área Metropolitana de San José. Las siglas identifican el lugar en donde se realizó la evaluación, las abscisas corresponden a los periodos estructurales y las ordenadas a factores de amplificación de intensidad.



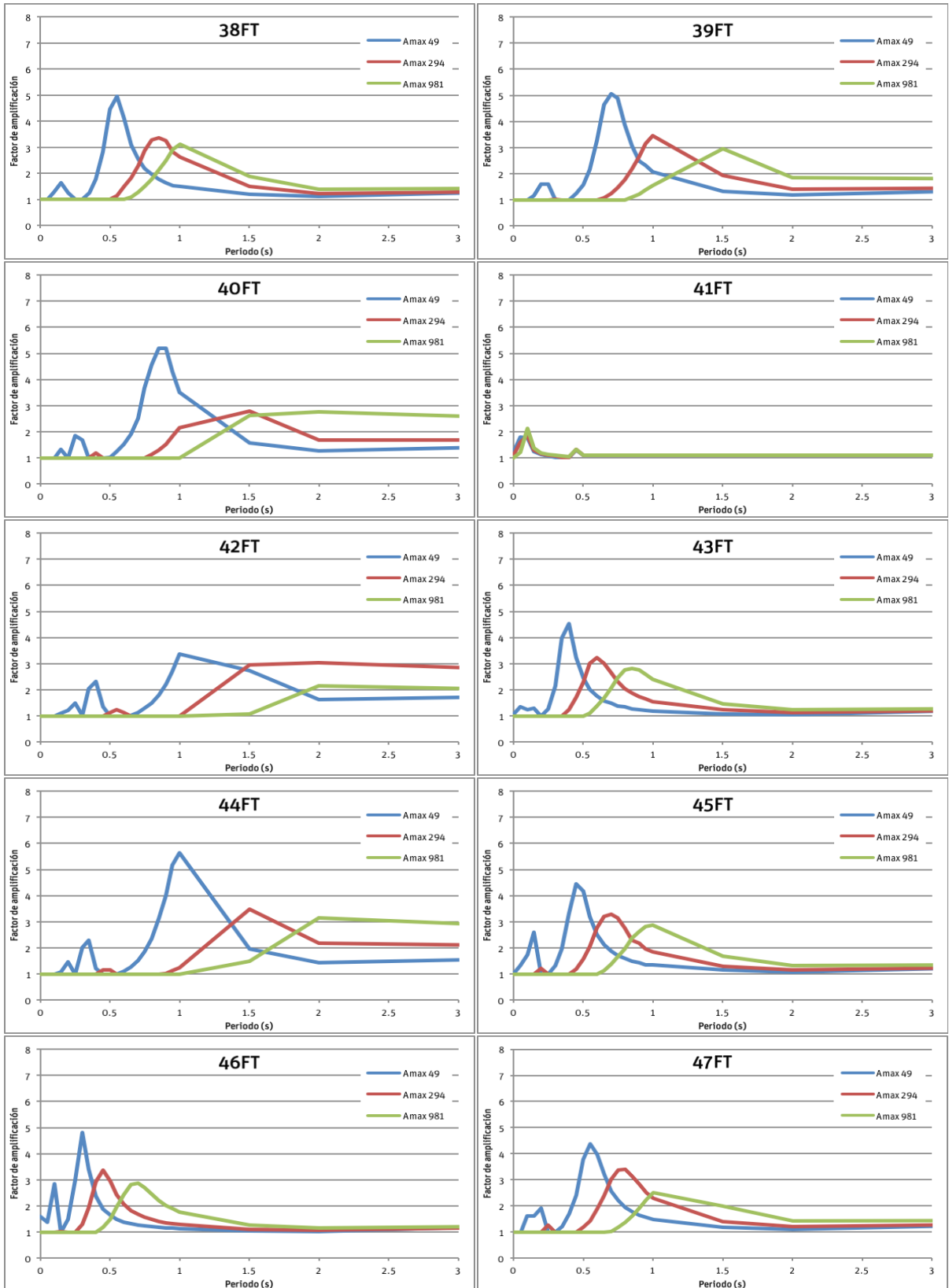
De acuerdo con estos estudios, la amplificación producida por la presencia de suelos varía hasta un poco menos de 4 (figura 10). El valor de esta amplificación depende del tipo y profundidad del depósito de suelo, y del período de vibración estructural del elemento a analizar, en este caso los tanques o reservorios de agua. Para determinar la contribución del tipo de suelo en la estimación del riesgo, se hizo una evaluación del PAE sin considerar las amplificaciones de aceleración causadas por los efectos locales, y se comparó con la evaluación original (sólo para los tanques dentro de la Gran Área Metropolitana). Los resultados indicaron que el incremento en las PAEs debido a la inclusión del efecto de sitio en el estudio original en algunos casos era de casi 7 veces.

Las figuras 11 y 12 muestran los valores de amplificación en función del periodo estructural para distintos niveles de aceleración del suelo determinadas para el estudio por equipo consultor de ERN.

**Figura 11** Funciones de amplificación para distintos tipos de suelo, periodo estructural e Intensidad (Parte 1)



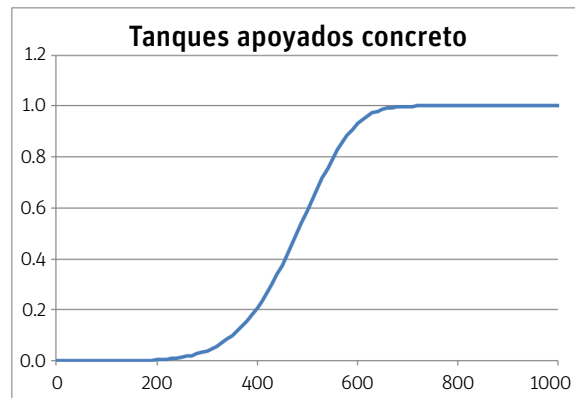
**Figura 12** Funciones de amplificación para distintos tipos de suelo, periodo estructural e Intensidad (Parte 2)



Se puede ver que las máximas amplificaciones debidas al suelo están alrededor de 7.5 (4FT); sin embargo, las funciones de vulnerabilidad empleadas para tanques tienen como medida de intensidad la aceleración máxima del suelo (PGA), es decir la amplificación que le corresponde es la del periodo 0, que toma un valor máximo de aproximadamente 2.4 para los suelos 27FT y 36FT. Esto quiere decir que las amplificaciones causadas por el tipo de suelo en las aceleraciones que sufren los tanques (hasta 2.4), son mucho menores que los incrementos de sus daños esperados (hasta 7). Cabe anotar que el incremento de los valores de daño esperado no son, en general, proporcionales a los incrementos en aceleración, y dependiendo del tipo de curva de vulnerabilidad del tanque, pequeños incrementos en la aceleración pueden traducirse en mayores incrementos en el daño esperado, por lo que los efectos locales pueden explicar un incremento en las PAE, pero no necesariamente explican incrementos tan elevados como los que se presentan en este caso.

La forma típica de una función de vulnerabilidad (que establece una relación entre el porcentaje esperado de daño vs intensidad expresada en PGA) es la siguiente:

**Figura 13** Forma típica de una función de vulnerabilidad, donde la abscisa corresponde a la aceleración máxima del suelo (PGA) y las ordenadas a porcentaje esperado de daño



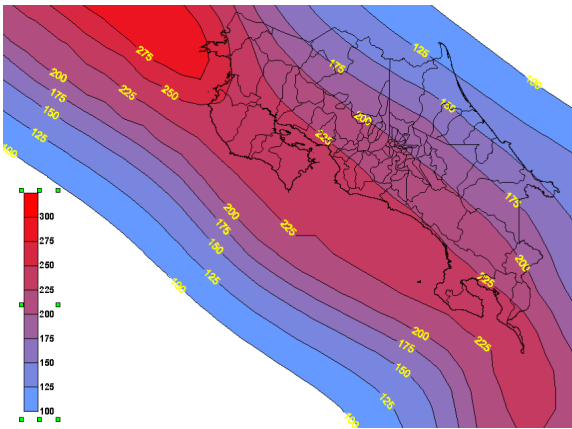
Entonces, para que pequeños incrementos en el valor de aceleración (del orden de 2.4) produzcan grandes incrementos en las pérdidas esperadas, los valores de pérdidas sin amplificar deberían ser significativamente más pequeños que los valores de pérdidas amplificadas. Esto puede ocurrir, en la Figura 13, si la intensidad sin amplificar es menor a alrededor de 200 gales, en cuyo caso el valor esperado de daño es muy cercano a cero, y al amplificarla la intensidad pasa a 500 gales, al cual se asocia un valor de pérdida esperada de cerca al 50%. Este comportamiento tan desproporcionado es característico de sistemas estructurales poco dúctiles, en donde la ocurrencia de una falla catastrófica y súbita es posible. Este no parece ser el caso de las estructuras de los tanques, en los cuales las fuerzas internas que se desarrollan en las paredes del tanque suelen ser momentos flexionantes y fuerzas axiales de tensión (en muy pocos casos compresión).

En conclusión, los valores de amplificación con que se hicieron los cálculos de pérdidas corresponden a los niveles reportados en los informes de estudios, por lo que el fuerte incremento en las PAE de los tanques **no está relacionado** con las amplificaciones producto de efectos locales, sino probablemente con la forma de las funciones de vulnerabilidad.

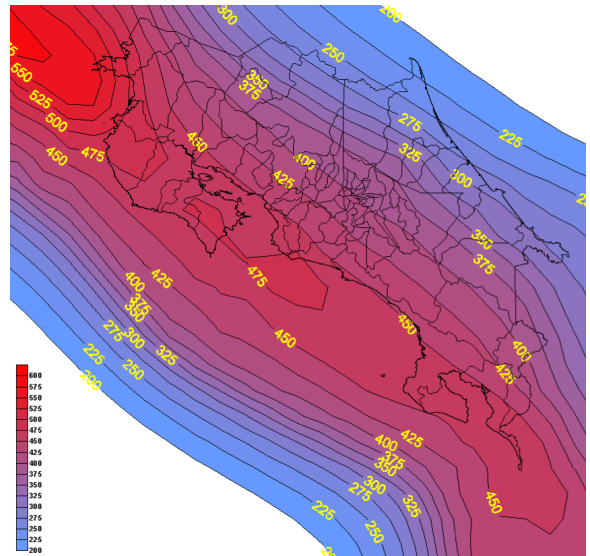
# REVISIÓN DE INFORMACIÓN DE AMENAZA

Es necesario descartar que los niveles de aceleración (amenaza) sean desproporcionadamente altos en el modelo de Costa Rica. Para ello se utilizó el post-procesador de CAPRA para generar curvas de isoaceleración para distintos periodos de retorno (figura 14, 15, 16 y 17).

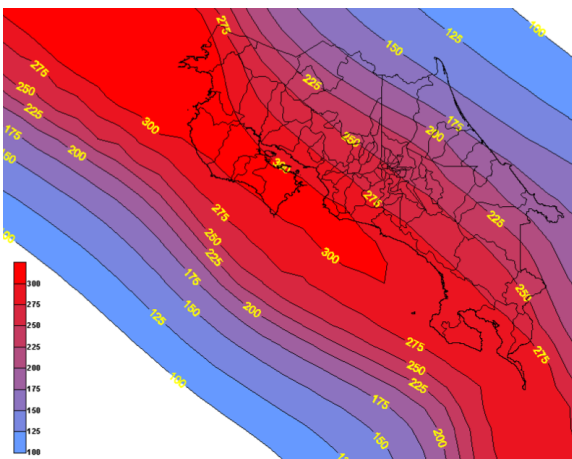
**Figura 14** Curvas de isoaceleración para un periodo de retorno de 50 años



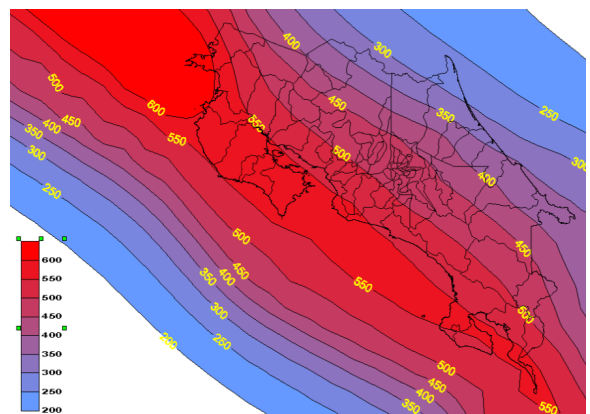
**Figura 16** Curvas de isoaceleración para un periodo de retorno de 500 años



**Figura 15** Curvas de isoaceleración para un periodo de retorno de 100 años



**Figura 17** Curvas de isoaceleración para un periodo de retorno de 1000 años



Los valores de PGA en San José son, aproximadamente, 200 gales para un periodo de retorno de 50 años, 250 gales para un periodo de retorno de 100 años, 400 gales para un periodo de retorno de 500 años, y 475 gales para un periodo de retorno de 1000 años.

De las gráficas anteriores se puede ver que los niveles de intensidad, al menos para la PGA, están en el mismo orden que la amenaza en otras regiones en donde se han realizado estudios de riesgo similares, como Perú, a pesar de lo cual en estos estudios no se han observado valores tan elevados de PAE en tanques.

Por lo tanto, los niveles de amenaza no son la razón de los valores obtenidos de PAE en el estudio de Costa Rica.

# REVISIÓN DE FUNCIONES DE VULNERABILIDAD

Para verificar las funciones de vulnerabilidad propuestas por AyA para el análisis de riesgo sísmico de su infraestructura se ha tomado, en primer lugar, el caso de tanques metálicos asentados sin anclaje.

Para este tipo de estructura, al igual que para todos los demás sistemas estructurales, se ha seguido el método establecido por HAZUS para determinar funciones de daño o funciones de fragilidad. Para determinar funciones de fragilidad, HAZUS propone una colección bastante grande de valores para los parámetros que definen los distintos estados de daño para el análisis. No se han revisado estos parámetros aunque es probable que, dado que las condiciones de amenaza no son iguales en Costa Rica que en los Estados Unidos, los valores deban ser ligeramente reajustados.

Se confirmó que el paso de funciones de fragilidad a funciones de vulnerabilidad ha sido correctamente implementado por AyA. La principal fuente de incertidumbre en esta conversión es, sin duda, los valores referenciales de daño relativo (DR) que se asocian a los distintos estados de daño. Estos valores de DR constituyen el enlace más importante en el paso de funciones de fragilidad a funciones de vulnerabilidad, de ahí su importancia.

Para el caso de tanques de acero asentados y anclados los valores de DR considerados por AyA son los mostrados en el Cuadro 2.

**Cuadro 2** Valores de daño relativo usados para componentes del sistema de agua y saneamiento

Estado de daño	DR	Descripción
Daño leve	20%	Los tanques sufren daños menores sin pérdida de su contenido o funcionalidad. Hay daños menores en el techo del tanque debido al chapoteo del agua, pequeñas grietas en tanques de concreto o arrugas en la paredes de tanques de acero.
Daño moderado	40%	Los tanques sufren daños considerables pero poca pérdida de su contenido. En tanques de acero se presenta inestabilidad de sus paredes (pata de elefante) sin pérdida del contenido, o agrietamiento moderado con poca pérdida de contenido en tanques de concreto.
Daño extensivo	80%	Los tanques resultan severamente dañados y puestos fuera de servicio. Los tanques de acero muestran inestabilidad de sus paredes (pata de elefante) con pérdida de su contenido, deformación de barras en tanque de madera o en las paredes de tanques de concreto.
Daño completo	100%	Los tanques colapsan pierden todo su contenido.

Es necesario aclarar que existen muy pocas referencias de valores de DR que sean de aceptación mayoritaria en los círculos profesionales de ingenieros. Además de esto, la definición de daño proporcionada por HAZUS no ofrece muchos datos técnicos objetivos para relacionar las pérdidas con, digamos, periodos de retorno o alguna otra medida de recurrencia. Ante esto, resulta claro que determinar valores de DR para cada estado de daño será siempre un ejercicio subjetivo asociado a altas incertidumbres. A pesar de esto, en la tabla de valores indicados anteriormente se puede percibir que un valor de DR de 0.2 (20%) para un estado de daño leve puede sonar, de primera impresión, muy alto.

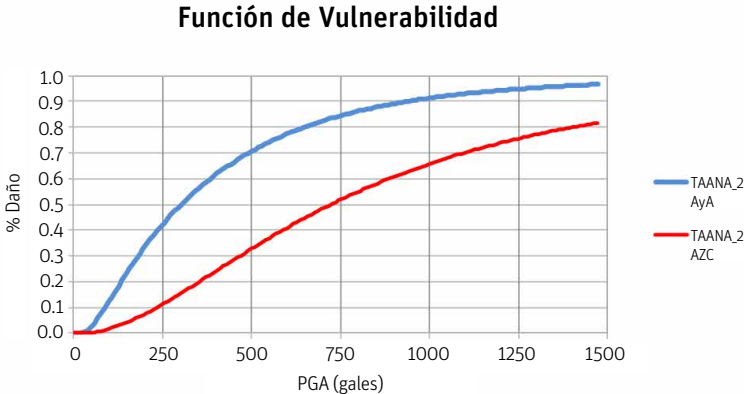
Analicemos este caso en particular. En un estado de daño calificado como leve, una pérdida relativa de 20% en un tanque implica que una quinta parte del valor del tanque está perdido o inutilizable, pero que no se ha perdido nada de contenido o funcionalidad. Esta combinación de estados no parece ser congruentes, por lo que se esperaba un valor mucho más pequeño de daño relativo. Para ejemplificar esto se propondrá un valor de daño relativo igual a 2% para daño leves. De la misma manera se puede analizar todos los demás estados de daño (cuadro 3).

**Cuadro 3** Valores de daño relativo propuesto para ilustrar cambios en las funciones de vulnerabilidad

Estado de daño	DR (AyA)	DR (AZC/propuesta ilustrativa)
Daño leve	20%	2%
Daño moderado	40%	15%
Daño extensivo	80%	50%
Daño completo	100%	100%

Con estos valores propuestos, las curvas de vulnerabilidad se modifican de la manera mostrada en la figura 18.

**Figura 18** Funciones de vulnerabilidad para tanques metálicos asentados no anclados, propuestas por AyA (color azul) y para este informe (color rojo).



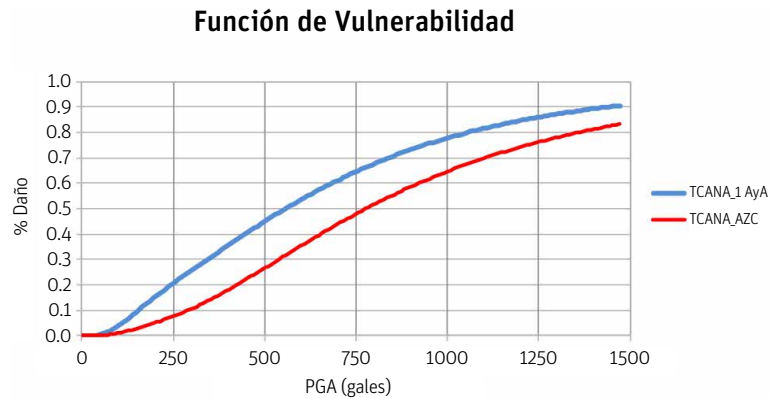
La curva en azul es la originalmente empleada por AyA, mientras que la curva en rojo es la determinada con los valores de daño relativo propuestos para este informe. Esta modificación genera una curva que, en lo general, toma menores valores de daño relativo que la original, aunque la pendiente de la curva en algunos sectores se mantiene, lo que significa que el mecanismo de falla tiene el mismo comportamiento esencial. Puede ver que, cuando la intensidad del evento es pequeña (digamos menor a 490 gales) los valores de la curva modificada son sensiblemente menores a los de la original, y en particular, cuando se tiene valores de intensidad menores a 250 gales, esta diferencia puede ser de un orden de magnitud. Dado que la PAE es un ponderado de las pérdidas que pueden causar todos los eventos, considerando su frecuencia de ocurrencia anual, entonces es muy probable que estos eventos pequeños pero muy frecuentes tengan una influencia importante en la estimación final de la prima pura, lo que explicaría los valores tan altos de pérdidas en las estimaciones de AyA, que no guardan relación con el estado real de dichos tanques.



Para confirmar esto, se procedió a hacer una evaluación de todos los tanques de la GAM, considerando para el tanque Naranjal (tanque metálico inspeccionado) una función de vulnerabilidad tal como la mostrada en la Figura 18. La PAE de este tanque resultó ser 8.65%, valor que, probablemente, guarda mejor relación con su situación real de amenaza y vulnerabilidad.

Para el otro tanque inspeccionado, originalmente se empleó una función de vulnerabilidad que da como resultado una PAE de 15.18%. Para redefinir la función de vulnerabilidad se usaron los mismos valores de DR que los empleados en el caso del tanque metálico, lo que dio como resultado la función de vulnerabilidad mostrada en la figura 19.

**Figura 19** Funciones de vulnerabilidad para tanques de concreto reforzado asentados no anclados, propuestas por AyA (color azul) y para este informe (color rojo).

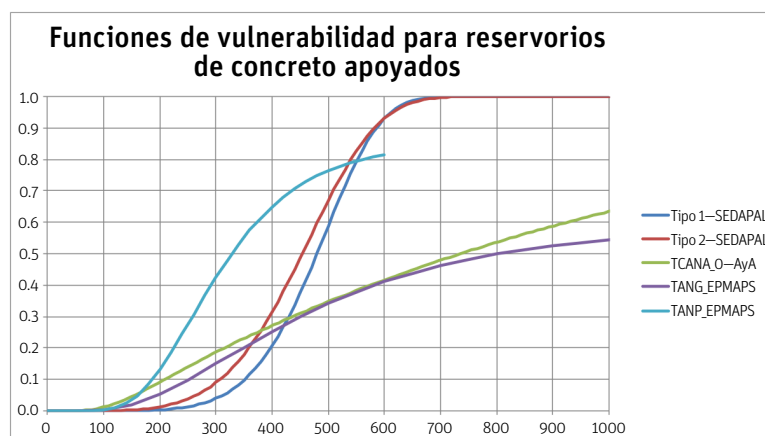


Al igual que en el caso anterior se puede ver una leve reducción de los valores de pérdida relativa obtenidos con la nueva función respecto de la originalmente empleada por AyA. El empleo de esta función de vulnerabilidad conduce a una PAE de 5.93%.

# COMPARACIÓN CON FUNCIONES DE VULNERABILIDAD DE OTROS ESTUDIOS

Además de este estudio desarrollado por AyA, se cuenta con los resultados y funciones de vulnerabilidad de los estudios hechos en Servicios de Agua Potable y Alcantarillado de Lima (SEDAPAL) y en Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS) de Quito. Se analizaron las funciones de vulnerabilidad de los elementos tanques de almacenamiento apoyados, empleados en cada uno de estos estudios. Es necesario aclarar que si bien este análisis es ilustrativo, la comparación de funciones de vulnerabilidad no se puede hacer de forma directa sin tomar en consideración aspectos técnicos específicos de cada país o región, como los reglamentos locales de diseño y construcción, aspectos relacionados con las prácticas constructivas de cada país, y los niveles de amenaza, entre otros.

**Figura 20** Funciones de vulnerabilidad, donde la abscisa corresponde a la aceleración máxima del suelo (PGA) (0-1000 gales) y las ordenadas a porcentaje esperado de daño



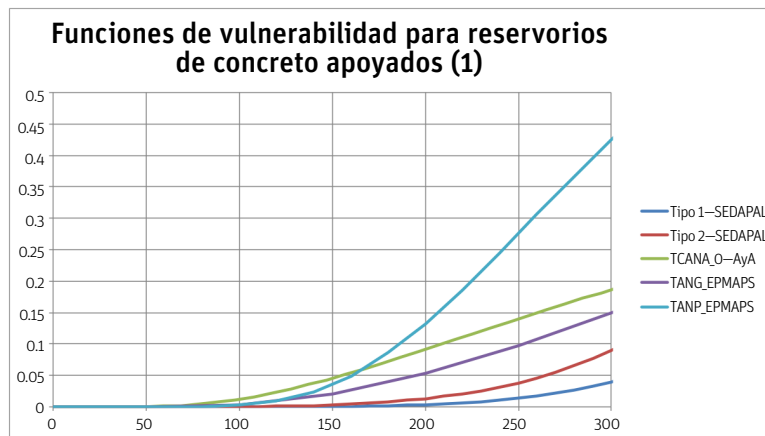
Se compararon las siguientes funciones de vulnerabilidad:

1. Tipo 1 – SEDAPAL. Es una función aplicable a tanques de concreto armado en la red de SEDAPAL, “pequeños”, apoyados sobre el terreno. El estudio no indica si la estructura tiene o no tapa, pero por las características de este tanque es muy probable que no tenga tapa. Estos tanques llamados “pequeños” no se asemejan a los revisados en el estudio de AyA.
2. Tipo 2 – SEDAPAL. Es una función aplicable a tanques de concreto armado de la red de SEDAPAL, “grandes”, apoyados sobre el terreno, y pueden estar con o sin tapa (no lo indica el informe).
3. TCANA\_0 – AyA. Es una función de vulnerabilidad para tanques de concreto apoyados sobre el terreno en la red de AyA.
4. TANG – EPMAPS. Corresponde a tanques (no especifica material, pero se supone que es de concreto) con tapa, apoyados en el terreno.
5. TANP – EPMAPS. Corresponde a tanques (sin especificar material), sin tapa, apoyados sobre el terreno.

Se puede ver que hay una gran diversidad de formas y valores de pérdida para igual intensidad en las diversas curvas, sin embargo pueden distinguirse dos tipos de curvas. Las de SEDAPAL por un lado, y las de AyA y EPMAPS por el otro. Las funciones de vulnerabilidad empleadas en el estudio de SEDAPAL son muy distintas en forma y valores a las curvas de AyA y EPMAPS, lo que probablemente se deba a las diversas referencias empleadas para determinar estas funciones. Las curvas de SEDAPAL muestran curvas características de sistemas estructurales más frágiles que los de AyA y EPMAPS, esto quiere decir que en el estudio de SEDAPAL se ha considerado que la falla de un tanque ocurre de manera relativamente súbita, sin previo aviso y dentro de límites muy definidos de intensidad, mientras que las curvas de AyA y EPMAPS sugieren más bien que los tanques tenderán a fallar de manera progresiva, lentamente, y mostrando en sucesivos ciclos de carga el deterioro asociado a los diversos niveles de daño que se va alcanzando.

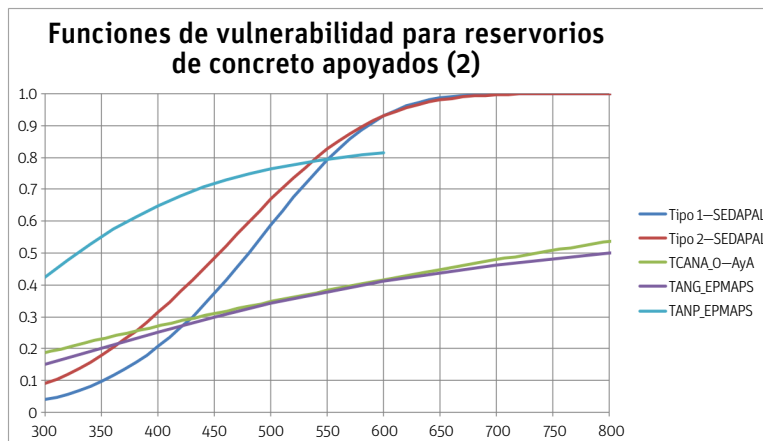
Si se ve en mayor detalle las curvas, para niveles de intensidad moderados o bajos (figura 21), se observa que la curva propuesta por AyA genera, valores más altos que las demás curvas (por el momento dejaremos la curva TANP – EPMAPS de lado). Respecto de algunas de las curvas, principalmente la TIPO 1 – SEDAPAL, los valores de pérdidas para la misma intensidad son notablemente más altos empleando la curva TCANA\_0 – AyA. Dado que es muy probable que el cálculo de las PAE se vea fuertemente influenciado por eventos en este rango de intensidades, es de esperar que los resultados de AyA sean mayores que los que se obtendrían usando las otras funciones de vulnerabilidad.

**Figura 21** Funciones de vulnerabilidad, donde la abscisa corresponde a la aceleración máxima del suelo (PGA) (0-300 gales) y las ordenadas a porcentaje esperado de daño



Ahora, nos fijaremos en el intervalo de intensidad más alto (figura 22). Se puede ver que en un pequeño intervalo inicial, las cosas se mantienen igual que para las intensidades bajas, pero que súbitamente las curvas de SEDAPAL incrementan su pendiente y elevan significativamente los valores de pérdidas, mientras que las curvas de AyA y EPMAPS mantienen una pendiente casi constante. Entonces, para intensidades altas, las funciones de vulnerabilidad de SEDAPAL darán valores de daño mucho más altos que los de AyA y EPMAPS. Esto tiene relevancia en el cálculo de las PMLs, en donde el interés está normalmente puesto en pérdidas muy altas, asociado a eventos muy raros y, por lo tanto, muy intensos.

**Figura 22** Funciones de vulnerabilidad, donde la abscisa corresponde a la aceleración máxima del suelo (PGA) (300-800 gales) y las ordenadas a porcentaje esperado de daño



De acuerdo con esto, se puede concluir que para SEDAPAL los tanques son elementos que trabajan muy bien en intensidades bajas, pero que al incrementarse un poco la intensidad puede producirse daños generalizados de manera violenta, mientras que para AyA y EPMAPS el deterioro es gradual. Es de interés poder establecer cuál de los dos enfoques guarda más relación con el verdadero y real comportamiento de tanques de concreto cuando son sometidos a movimientos de suelo.

En tanques de concreto, las dimensiones de las paredes de los tanques son tales que la posibilidad de falla frágil resulta mínima. Otros tipos de falla parecen poco probables, como el volteo o la fallas a nivel del anclaje mecánico a la base, principalmente debido a que los tanques de concreto se construyen casi siempre de manera monolítica con la base, es decir que la base y las paredes forman un continuo rígido muy pesado, que requeriría de aceleraciones del suelo muy altas para voltearlo o para hacerlo fallar por corte a nivel del encuentro de las paredes con la losa de fondo.

En tanques de concreto las fallas en tanques por sismo parecen estar más asociadas a sobreesfuerzos por tensión (pura o inducida por momentos flexionantes) en las paredes del tanque. En cualquiera de estos casos, las fallas se manifiesta inicialmente como una grieta vertical u horizontal (dependiendo de la dirección en la que se inicie la falla) asociada a grandes deformaciones en tensión del acero de refuerzo. Es decir, a medida que se incrementan las cargas las paredes del tanque se deforman tensionando el material; dado que el concreto tiene una respuesta muy pobre en tensión, es el acero de refuerzo quien de manera importante toma estas tensiones, produciendo el consecuente agrietamiento del concreto. El incremento del tamaño del agrietamiento es proporcional en tanto el acero se comporta en su rango elástico. En cuanto el acero ingresa en su rango de comportamiento no lineal este se plastifica y comienza a experimentar grandes deformaciones y, por lo tanto, grandes incrementos en el tamaño

de la grieta. Este proceso continúa hasta que la deformación del acero alcanza un valor muy elevado, en donde se produce un aparente endurecimiento del acero, el cual es capaz de soportar aún mayores cargas con ligeros incrementos de deformación. Este intervalo de comportamiento es relativamente corto, y generalmente precede a una falla o rotura del acero en tensión.

A la luz de este mecanismo de falla, se podría concluir que ninguna de las curvas mostradas refleja adecuadamente el comportamiento, ya que si bien la estructura es relativamente dúctil, en las curvas de AyA y EPMAPS no se observa la influencia de la fluencia del acero en tensión, y por otra parte, el desarrollo de este mecanismo de falla no es tan violento como para producir funciones con tanta pendiente como las de SEDAPAL. Ahora bien, este mecanismo de falla es puramente estructural, y no toma en consideración otros criterios de falla que pueden ser relevantes, como la pérdida de contenido a través de las fisuras o grietas que aparecen en las paredes de concreto.

---

## RECOMENDACIONES

De acuerdo con esto, se recomienda obtener nuevas funciones de vulnerabilidad, siguiendo el procedimiento de AyA pero tratando de documentar o relacionar mejor los distintos niveles de daño con valores de pérdida relativa y tomando en consideración las características de sismicidad propias de Costa Rica.

En esencia lo que se busca es determinar los valores de DR que mejor describan el comportamiento dinámico de los tanques ante eventos de distintas intensidades. Para lograr establecer esto se debe tomar en cuenta la respuesta de la estructura a sollicitaciones específicas, considerando la existencia de gran cantidad de agua contenida, y los niveles de amenaza del lugar donde se ubicará el tanque (prácticas de diseño y construcción). Todos estos aspectos pueden consultarse en la “Nota Técnica para el Análisis de Vulnerabilidad de Tanques”.

En el caso de estructuras de acero, es necesario considerar que pueden ocurrir fallas frágiles, como la inestabilidad de las paredes (pata de elefante, o pandeo en la parte baja de la pared del tanque, donde la compresión axial debido al momento de vuelco es máxima), fallas por corte de los anclajes, o fallas en las soldaduras. Es usual que los tanques se diseñen siendo muy conservadores para estos modos de falla, favoreciendo el comportamiento dúctil de la estructura. En este caso, al igual que en el caso de tanques de concreto, las paredes del tanque se deformarán radialmente conforme aumentan las cargas de sismo, hasta que el acero alcanza su límite elástico, y el proceso posterior resulta similar al descrito anteriormente, con la diferencia que en estos tanques no hay fisuramiento de las paredes. La posibilidad de que los tanques terminen fallando por tensión de las paredes de acero es relativamente baja debido a la gran resistencia del acero, y entonces resulta factible que los otros modos de falla comiencen a tomar importancia. El tipo de falla más común es el de pata de elefante, y la falla de las costuras de soldadura. Entonces, la función de vulnerabilidad más adecuada a este tipo de estructuras debería mostrar un primer intervalo de poco daño, hasta intensidades relativamente grandes, dependiendo de las especificaciones locales sobre análisis y diseño, y luego un comportamiento frágil (gran pendiente de las curvas); es decir, curvas muy parecidas a las de SEDAPAL, pero en las cuales el incremento de pendiente se manifieste en valores de intensidad más altos. Por supuesto, esto debe calibrarse con los valores de resistencia empleados en el diseño de los tanques.

---

## REFERENCIAS

- Programa de Agua y Saneamiento del Banco Mundial. 2012. “Gestión de Riesgo de Desastres en Empresas de Agua y Saneamiento, Tomo I.” Lima, Perú: Banco Mundial.
- Schmidt, Victor, Maritza A. Mora, Álvaro Climent, Wilfredo Rojas, and Ileana Boschini. 2005. “Microzonificación Sísmica de San José, Costa Rica.” Editorial de la Universidad de Costa Rica 1 edición.
- Mitigation Division, Federal Emergency Management Agency. 2003. “HAZUZ-MH MR3.” *Multi-Hazard Loss Estimation Methodology, Earthquake Model*. Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency.
- Ordaz, Mario. 2008. “Relaciones entre Curvas de Fragilidad, Matrices de Probabilidad y Funciones de Vulnerabilidad.” México, D.F.
- Compagnoni, Maria E., Oscar Curadelli, and Carlos A. Martinez. 2012. “Análisis del Comportamiento Dinámico de Tanques Cilíndricos bajo Excitación Sísmica.” *Mecánica Computacional* Vol XXXI: 2219–30.









**GRUPO BANCO MUNDIAL**  
Desarrollo Social, Urbano y Rural y Resiliencia



Financiado por



**GFDRR**  
Global Facility for Disaster Reduction and Recovery



Australian Government  
Department of Foreign Affairs and Trade