

**POTENCIAL DESTRUCTIVO DE LOS SISMOS DE PURISCAL DE 1990
Y LOS DAÑOS EN CONSTRUCCIONES DE LA ZONA**

Ing. William Vargas M.
Ing. Guillermo Santana, Ph. D.
Laboratorio de Ingeniería Sísmica
Universidad de Costa Rica

RESUMEN

Se presentan los registros de aceleraciones de los sismos ocurridos en la zona de Puriscal. Las mediciones se llevaron a cabo entre el 31 de mayo y el 30 de junio de 1990, con instrumentación del Programa de Medición de Sismos Fuertes del Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica. Se caracterizan los registros mediante los parámetros de aceleración pico, duración, frecuencia característica y aceleración pico efectiva. Se resumen las observaciones de daños en viviendas de mampostería y las pruebas de calidad de materiales realizadas en algunas de esas viviendas. Se analizan en conjunto los factores más importantes que determinaron la magnitud de los daños observados.

ABSTRACT

Records of strong-motion accelerations produced by the seismic swarm in the Puriscal zone in the south-west end of the Valle Central, Costa Rica are shown. The records were obtained by the Strong-Motion Instrumentation Program of the Earthquake Engineering Laboratory of the University of Costa Rica in the town of Santiago de Puriscal between May 31 and June 30, 1990. Significant earthquakes are characterized by the peak acceleration, duration, characteristic frequency and effective peak acceleration. Observations of damage to masonry houses and material quality tests performed in some of those houses are resumed. The most important factors in defining the magnitude of observed damage are analyzed from an overall point of view.

INTRODUCCION

Desde los últimos días de marzo de 1990, la zona de Puriscal, al extremo suroeste del Valle Central de Costa Rica experimentó la ocurrencia de un "enjambre" de sismos. Los de mayor magnitud (entre 4 y 5 en la escala de Richter) ocurrieron entre el 29 de mayo y el 30 de junio y provocaron daños severos en construcciones de mampostería de la zona. El Laboratorio de Ingeniería Sísmica instaló una estación acelerográfica, designada con el código PRS, en la ciudad de Santiago el 31 de mayo con el objetivo de registrar la actividad. La estación contó con dos acelerógrafos, ambos marca Kinematics, uno digital (tipo SSA-1) y el otro analógico (tipo SMA-1).

A partir de esa fecha y hasta el 30 de junio, 16 sismos fueron registrados por el acelerógrafo digital. Los datos de localización y magnitud de estos sismos, de acuerdo con el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI), se listan en la tabla 1 y se grafican en el mapa de la figura 1.

El primer sismo de la lista, ocurrió antes de la instalación de la estación PRS, y fue registrado por algunas de las estaciones acelerográficas permanentes en el Valle Central.

De este conjunto de sismos se han escogido para este análisis aquellos que produjeron las aceleraciones horizontales más altas, superiores al 10 % de la aceleración de la gravedad. Los registros fueron corregidos por línea base, mediante un ajuste de mínimos cuadrados. Ninguna otra corrección de los datos fue realizada, por lo que los resultados de este estudio deberán ser considerados como preliminares.

Los sismos escogidos para el análisis son los designados en la tabla 1 con los números 03, 04, 10, 11 y 13. Los sismos 03 y 11 tuvieron epicentros muy cercanos a la estación PRS y el sismo 13, de magnitud 5.0, es el más lejano, como puede apreciarse en la figura 1 y en la tabla 2. Esto permite evaluar la variación del potencial destructivo de los sismos al alejarse de sus fuentes.

POTENCIAL DESTRUCTIVO DE LOS SISMOS

Los registros de aceleraciones de sismos fuertes son la mejor herramienta para evaluar su potencial destructivo sobre las obras civiles. Esto se hace evidente cuando se considera la ecuación del movimiento de una estructura simplificada sometida a la acción de un sismo, como se muestra en la figura 2. La respuesta de la estructura al movimiento del terreno queda representada por la ecuación:

$$m(\ddot{x} + \ddot{z}) = -f(x, \dot{x}, t) \quad (1)$$

En esta ecuación, el término a la derecha es la fuerza restauradora de la estructura, la cual es una función del desplazamiento relativo $x(t)$ y su derivada así como de las propiedades de los materiales de construcción. Para un sistema elástico lineal con amortiguamiento viscoso, esa función tendrá la forma,

$$f(x, \dot{x}, t) = kx + c\dot{x} \quad (2)$$

en donde k es la rigidez y c el amortiguamiento del sistema.

Si se reescribe la ecuación, puede verse que el movimiento de una estructura sometida a las vibraciones sísmicas en su base es equivalente al de una estructura fija en su base y sometida a una fuerza dinámica numéricamente igual a la aceleración del terreno multiplicada por la masa de la estructura.

$$m\ddot{x} + f(x, \dot{x}, t) = -m\ddot{z}(t) \quad (3)$$

Por lo tanto, para comprender las fuerzas en la estructura es necesario concentrarse en el análisis de la aceleración del terreno más que en otros parámetros.

El movimiento del terreno puede ser descrito mediante su amplitud, duración y contenido de frecuencias.

Para sismos destructivos las amplitudes pueden variar entre

0.15 g y más de $1 g$ y las duraciones entre 2 y más de 30 segundos. En general, el contenido de frecuencias es amplio puesto que la liberación de energía del movimiento es aproximadamente uniforme dentro de un intervalo de frecuencias entre 0.5 y 5 Hz. A frecuencias más bajas la energía tiende a disminuir, dependiendo de la duración del movimiento. Los sismos de mayor magnitud tienen mayor duración (cercana o superior a un minuto) y liberan más energía a bajas frecuencias. Las frecuencias altas muestran una tendencia a atenuarse por encima de los 5 ó 10 Hz, dependiendo de la distancia a la fuente del sismo y las condiciones geológicas del sitio. Las frecuencias más altas se registran en sitios de roca y en las cercanías de las fuentes sísmicas.

En condiciones geológicas uniformes, la amplitud y el contenido de frecuencias altas del movimiento se reducirán al alejarse de la fuente y la duración y el contenido de frecuencias bajas aumentará. Esto significa que las estructuras más rígidas son las que experimentarán cargas más altas en las zonas epicentrales de los sismos y las estructuras más flexibles tendrán las demandas más altas en las zonas relativamente alejadas del epicentro.

Metodologías para la caracterización de los sismos

Para caracterizar el potencial destructivo de un sismo se han desarrollado diferentes métodos que pueden ser clasificados en tres categorías: parametrización con valores máximos o valores pico, métodos espectrales y métodos energéticos.

Parametrización con valores máximos:

Tradicionalmente la forma más usada para caracterizar la fuerza de un sismo ha sido la parametrización con valores máximos, especialmente el de **aceleración máxima o aceleración pico** de un registro. Esto se debe a su conveniencia, facilidad de cálculo y porque puede ser interpretado como el valor máximo de la fuerza por unidad de masa que experimentan las estructuras.

Si bien este es un indicador importante, tiene muchas limitaciones, puesto que muestra una gran variabilidad y está asociado fundamentalmente con los componentes de frecuencia alta del movimiento. Por lo tanto, tiene poca relación con el potencial destructivo del sismo sobre las estructuras diseñadas ingenierilmente, para las cuales las frecuencias bajas del movimiento son más importantes. La aceleración máxima es un mejor indicador del potencial destructor de un sismo sobre construcciones muy rígidas y frágiles, usualmente no diseñadas, tales como las casas de adobe o mampostería sin reforzar.

Otros valores máximos empleados para caracterizar un sismo son los de **velocidad y desplazamiento**. La velocidad máxima está determinada por las componentes del movimiento cuyas frecuencias están entre los 0.5 y 1.5 segundos y el desplazamiento máximo está asociado con períodos comprendidos entre los 2 y 10 s. La velocidad máxima no tiene una relación directa con las fuerzas que experimentan las estructuras sino más bien con la energía que debe ser disipada por medio de deformaciones. El desplazamiento máximo está relacionado con los desplazamientos que deben sopor-

g es la aceleración de la gravedad (981 cm/s^2)

tar las estructuras muy flexibles, con períodos naturales de vibración de 10 s o superiores.

Estos dos últimos parámetros no son tan usados como el de aceleración máxima en parte porque es necesario procesar los acelerogramas para determinarlos y este procesamiento involucra algunos errores difíciles de controlar.

Métodos espectrales:

Los métodos espectrales se basan en el cálculo del **espectro de respuesta**. Este cálculo se realiza con base en la respuesta de un oscilador amortiguado (figura 3), de un grado de libertad, al movimiento del terreno provocado por un sismo y descrito por la historia de aceleraciones $\ddot{z}(t)$.

La ecuación del movimiento de este oscilador en términos de la masa m , la rigidez k y el amortiguamiento c es,

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{z}(t) \quad (4)$$

o, en términos de la frecuencia natural de oscilación y la fracción de amortiguamiento crítico,

$$\ddot{x} + 2\omega_n \xi \dot{x} + \omega_n^2 x = -\ddot{z}(t) \quad (5)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{Frecuencia natural (rad/s)}$$

$$\xi = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad \text{Fracción de amortiguamiento crítico}$$

El cálculo de la respuesta $x(t)$ para un par de valores de frecuencia natural y amortiguamiento puede ser realizado con relativa facilidad y a partir de los resultados se definen los espectros de respuesta más comunes:

$$\text{Desplazamiento} \quad S_D(\omega_n, \xi) = \text{máx}_t |x(t)| \quad (6)$$

$$\text{Velocidad relativa} \quad S_V(\omega_n, \xi) = \text{máx}_t |\dot{x}(t)| \quad (7)$$

$$\text{Aceleración total} \quad S_A(\omega_n, \xi) = \text{máx}_t |\ddot{x}(t) + \ddot{z}(t)| \quad (8)$$

Los espectros de respuesta sirven para caracterizar el movimiento del suelo en función del período o la frecuencia (para valor de amortiguamiento cero) y la respuesta máxima de cualquier sistema de un grado de libertad con valores de frecuencia natural y amortiguamiento definidos. También pueden ser utilizados para predecir la respuesta máxima en cada modo de oscilación de sistemas con varios grados de libertad.

Las gráficas de los valores de los espectros de respuesta en función de la frecuencia o período permiten obtener alguna

información inmediata. La primera inspección visual permite identificar el intervalo de frecuencias de las estructuras que experimentaron las sollicitaciones más altas como producto del movimiento sísmico.

Algunas propiedades del comportamiento de las estructuras sometidas a movimientos sísmicos pueden ser interpretadas intuitivamente con base en los espectros. Para una masa constante, al incrementarse infinitamente la rigidez la estructura tenderá a moverse como un sólo cuerpo rígido con el suelo. Por lo tanto,

$$\omega_n \rightarrow \infty \quad (T_n \rightarrow 0) \quad S_D \rightarrow 0, \quad S_V \rightarrow 0, \quad S_A \rightarrow \max_t |\ddot{z}(t)|$$

En donde T_n es el período natural de vibración $T_n = 2\pi/\omega_n$

De manera similar, al disminuir la rigidez la masa tenderá a permanecer inmóvil mientras el suelo bajo la misma se mueve.

$$\omega_n \rightarrow 0 \quad (T_n \rightarrow \infty) \quad S_D \rightarrow \max_t |z(t)|, \quad S_V \rightarrow \max_t |\dot{z}(t)|, \quad S_A \rightarrow 0$$

Para valores bajos de amortiguamiento, cerca del valor máximo de $x(t)$, las siguientes relaciones son válidas:

$$S_A \approx \omega_n^2 S_D \quad (9), \quad S_V \approx \omega_n S_D \quad (10)$$

Los términos a la derecha de las ecuaciones anteriores se denominan espectro de pseudoaceleración y espectro de pseudo-velocidad, y aproximan a los espectros de aceleración y velocidad, respectivamente. Estas aproximaciones son muy buenas en el intervalo medio de frecuencias del espectro, pero son menos precisas para frecuencias extremas (muy altas o muy bajas).

Algunas de las metodologías de diseño actuales utilizan un valor de **aceleración máxima efectiva** en lugar del tradicional. Este parámetro se define como el 40 % del promedio de valores del espectro de pseudoaceleración comprendidos entre los períodos de 0.1 a 0.5 segundos, para un valor de fracción de amortiguamiento crítico de 0.05 (típico para estructuras de concreto reforzado). La aceleración máxima efectiva pretende ser un parámetro que refleja mejor los efectos de los sismos sobre las estructuras, al tomar en cuenta un intervalo de frecuencias más amplio que el asociado al valor de aceleración máxima registrado.

Métodos energéticos:

La caracterización energética de los sismos se basa en el cálculo de la energía del movimiento o la energía de la respuesta de un oscilador.

La **energía de aceleración** de un sismo se define como

$$W(t) = \int_0^t [\ddot{z}(t)]^2 dt \quad (11)$$

La evaluación de la integral en toda la duración del acelerograma (desde $t=0$ hasta $t=\infty$) da el valor de la energía

total de aceleración W_m .

Con base en la gráfica de $W(t)$ puede definirse la duración $T_{0.9}$, como el intervalo de tiempo entre los valores $0.05W_m$ y $0.95W_m$. Así definida, la duración es el tiempo en el se libera el 90 % de la energía de un sismo, registrado en un acelerógrafo.

Otros parámetros energéticos pueden ser relacionados con la energía de aceleración. Por ejemplo, la energía introducida por unidad de masa W_I a un oscilador como el de la figura 3 se define como

$$W_I = - \int_0^{\infty} \ddot{z}(t) \dot{x}(t) dt \quad (12)$$

Al integrar en todo el intervalo de frecuencias de osciladores posible, se obtiene la energía total introducida W_F

$$W_F = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \ddot{z}(t) \dot{x}(t) dt d\omega_n \quad (13)$$

Al evaluar la ecuación anterior resulta

$$W_F = \frac{\cos^{-1} \xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \int_0^{\infty} [\ddot{z}(t)]^2 dt \quad (14)$$

La integral es W_m y el coeficiente es una función del amortiguamiento que varía entre 1.57 para amortiguamiento 0 y 1.40 para amortiguamiento de 20 % del crítico.

Otros parámetros:

Otros parámetros cuya facilidad de cálculo sea comparable a la de la aceleración máxima han sido desarrollados, entre ellos la frecuencia característica, de Arias y Saragoni, definida como el número de veces que la traza de aceleración cruza la línea base o eje de las abscisas (aceleración 0) durante la duración de la fase de interés del sismo.

Este parámetro complementa el de aceleración máxima, puesto que da una idea aproximada de las frecuencias asociadas con el valor pico. También puede relacionarse la frecuencia característica, o su inverso, con la duración de cada uno de los picos de aceleración, tomados como impulsos. Cuanto más baja sea la frecuencia característica, mayor duración tendrán esos impulsos y, por lo tanto, mayor será la energía asociada con las aceleraciones máximas.

Caracterización de los sismos de Puriscal

Los sismos de Puriscal escogidos para el análisis fueron caracterizados mediante los parámetros de aceleración máxima, energía total de aceleración, duración $T_{0.9}$, frecuencia característica y aceleración máxima efectiva. Los resultados se muestran en la tablas 2 a 6. La frecuencia característica fue calculada para el mismo intervalo definido por la duración $T_{0.9}$.

También se muestran en las figuras 4 a 6 los acelerogramas,

los espectros de pseudoaceleración y las curvas de energía de aceleración para todos los sismos.

De la observación de los acelerogramas se puede deducir que, en general, se trata de sismos de corta duración y contenido predominante de frecuencias altas. Estas características son típicas de los registros de sismos en las cercanías de las fuentes. El registro del sismo 13, del 30 de junio es el de mayor duración, lo cual se relaciona con su magnitud ($M=5.0$) y la distancia a la que fue registrado.

Los valores de aceleraciones máximas tomados como único parámetro conducirían a una apreciación errónea del potencial destructivo de los sismos. Si se comparan las aceleraciones máximas con las aceleraciones efectivas es evidente que las aceleraciones máximas del sismo 11 tomadas como indicador único sobrevaloran su potencial destructivo. Para los otros sismos, los valores de aceleración máxima y aceleración efectiva tienden a tener una mejor correlación, especialmente en el caso de los sismos 10 y 13, con epicentros más lejanos de la estación de registro. Esto es consecuencia directa de la atenuación de las frecuencias altas del movimiento, asociadas con los valores pico de aceleración. El alejamiento de la fuente y la consiguiente atenuación de las frecuencias altas hacen que la aceleración máxima tienda a ser más representativa de la aceleración efectiva (definida en el intervalo de frecuencias de 2 a 10 Hz).

Las energías totales de aceleración son inferiores a los valores señalados por Housner y Jennings como los mínimos capaces de producir daños en estructuras diseñadas ingenierilmente. La forma de las curvas indican una liberación prácticamente instantánea de la energía, lo cual es confirmado por los bajos valores de duración $T_{0.9}$. El sismo 11, del cual se registraron los valores más altos de aceleración tuvo la duración más baja, lo cual indica su bajo potencial destructivo.

Las frecuencias características también indican que se trata de sismos con contenido predominante de frecuencias altas, especialmente el sismo 11, que fue registrado muy cerca de su epicentro. Las frecuencias más bajas corresponden al sismo 13, el de mayor magnitud y más distante del sitio de registro. De acuerdo con este parámetro, este sería el sismo con mayor potencial destructivo. Sin embargo, las aceleraciones máximas y la energía total de aceleración no lo ubican como un sismo de potencial destructivo mayor que el de otros de menor magnitud.

Los espectros de respuesta también confirman que los sismos liberaron su mayor cuota de energía a altas frecuencias (períodos bajos). Las edificaciones que se vieron más afectadas fueron, por lo tanto, las más rígidas. La atenuación de las frecuencias altas puede deducirse de la comparación de los espectros de los sismos 04 y 10, de magnitudes similares pero registrados a diferentes distancias. El alejamiento de la fuente conlleva la atenuación de las frecuencias altas y la disminución global del potencial destructivo del sismo, como se puede apreciar en el caso del sismo 13. En consecuencia, los daños se concentran en la zona epicentral y decrecen rápidamente.

DAÑOS EN CONSTRUCCIONES

Los primeros daños en construcciones ocurrieron como consecuencia de los sismos del día 29 de mayo y se concentraron en los alrededores de la ciudad de Santiago. Con la migración de la actividad sísmica hacia el norte y noreste de la ciudad, los daños se produjeron en zonas rurales de menor densidad de población ubicadas en las cercanías de la falla de Picagres. Las localidades más afectadas por los sismos ocurridos entre el 31 de mayo y el 15 de junio fueron San Antonio, Tinamaste, Carit, Picagres y Piedras Negras (ver figura 1). Los sismos del día 30 de junio, que incluyen el de mayor magnitud (sismo 13, $M=5.0$), ocurrieron en otra fuente sísmica, ubicada 7 km al oeste de Santiago, según el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica. Los daños de mayor magnitud en esta zona se localizaron en Barbacoas y Cortezal.

En general, todos estos sitios comparten características topográficas por estar localizados en filas montañosas y valles estrechos. La mayor parte de las construcciones está ubicada sobre laderas con pendientes altas. Desde antes de la ocurrencia de los sismos era conocido el problema de estabilidad de suelos y deslizamientos de tierra que afectan toda la región.

Las construcciones dañadas fueron principalmente viviendas de mampostería ubicadas en condiciones topográficas desfavorables o en terrenos inestables. Sin embargo, los daños no eran consecuencia de la movilización de los grandes deslizamientos de tierra que afectan toda la región y que son responsables en gran parte de los daños en la Iglesia de Santiago.

Desde un principio fue evidente que las viviendas dañadas fueron construidas sin la intervención de un profesional responsable, ya fuera en el diseño o la inspección. Por el contrario, se trataba de construcciones realizadas con muy pocos recursos, por sus mismos propietarios o encargadas a algún "maestro de obras" de la misma zona o a algún pariente que "sabe de construcción". Sin embargo, algunas construcciones realizadas dentro de las normas, con financiamiento de instituciones públicas y supuestamente con inspección profesional también sufrieron daños.

La construcción dañada típica es una vivienda de mampostería de una sola planta, ubicada en un terreno con pendiente alta o sobre un relleno, a la cual se le han agregado posteriormente nuevas paredes para cubrir las necesidades crecientes de espacio. Este tipo de construcción tiene una rigidez alta y es, de acuerdo con el análisis anterior, más vulnerable a los sismos, especialmente en las cercanías del epicentro.

Otras características de la construcción, además de la rigidez, son las que determinan su capacidad para resistir los sismos. En una distribución de planta típica existen paredes (diafragmas) en dos direcciones ortogonales principales. Estos diafragmas están limitados en sus extremos superior e inferior por vigas que los vinculan entre sí.

Para una mejor comprensión del comportamiento de la estructura se considera el movimiento horizontal en cada una de las direcciones en forma separada. Los diafragmas en la dirección paralela al movimiento son los que aportan la mayor rigidez y

resistencia. Los diafragmas en la dirección perpendicular, por ser elementos con un gran peso, desarrollan fuerzas proporcionalmente altas, que deben ser transmitidas a los elementos resistentes mediante vínculos apropiados. Por lo tanto, deben existir uniones apropiadas en las esquinas que contribuyan a la transmisión de las fuerzas. Además, la viga de cimentación y la viga corona son elementos indispensables para distribuir adecuadamente las cargas, puesto que vinculan todos los diafragmas entre sí.

Para que el diafragma que actúa como elemento resistente desarrolle su capacidad es necesario que esté construido con materiales competentes y cuente con el refuerzo apropiado, de manera que pueda transmitir las fuerzas cortantes a la cimentación sin fallar. Tanto el refuerzo vertical como el horizontal son importantes para el desarrollo de la resistencia a cargas en el plano de las paredes de mampostería.

Para garantizar un comportamiento apropiado del sistema en caso de que las cargas superen los límites elásticos de los elementos, estos deben tener también alguna ductilidad.

En las viviendas de mampostería que sufrieron daños se pudieron observar graves deficiencias en las condiciones anteriores. Esto fue particularmente evidente en aquellos casos en que la condición topográfica o la estabilidad del suelo no fueron factores importantes en la magnitud de los daños.

La condición más frecuente fue la deficiencia o ausencia total de refuerzo, tanto en las paredes como en las vigas y las uniones o esquinas. Existían paredes sin ningún refuerzo vertical u horizontal, rematadas por vigas corona cuyo refuerzo longitudinal consistía en varilla No. 2 (6 mm de diámetro, lisa). En algunos casos el refuerzo existía pero no así el vínculo apropiado, puesto que las varillas quedaban interrumpidas en las esquinas y tampoco existían amarres. Esta condición se presentaba tanto en paredes como en vigas.

Los sismos provocaron agrietamiento y separación en uniones de paredes con las deficiencias señaladas. Al quedar desvinculadas, las paredes actúan fundamentalmente como elementos en voladizo vertical, se establece una mayor demanda sobre la cimentación y aumenta la posibilidad de colapso ante sismos posteriores.

En los casos en que una vivienda había tenido ampliaciones sucesivas, tampoco existían vínculos entre cada uno de los diferentes agregados y esta condición provocó su separación, especialmente de aquellas construidas sobre un relleno o una fuerte pendiente.

La calidad de los materiales de construcción también es un factor importante en la determinación de los daños. Para evaluar la resistencia del concreto se realizaron pruebas en conjunto con el Laboratorio de Materiales de la Universidad de Costa Rica. Se hicieron pruebas con esclerómetro en varias construcciones de la zona de San Antonio y Tinamaste. En varios casos la resistencia del concreto fue inferior a la mínima que puede ser medida con el instrumento (100 kg/cm^2) y en otros apenas ligeramente superior a ese valor. Los bloques, el mortero de pega y el concreto de relleno son fabricados en la zona con materiales

provenientes de ríos, por lo que muestran proporciones altas de materiales muy finos, materia orgánica y cantos rodados. Estos factores contribuyen a reducir la resistencia y durabilidad del concreto.

Las paredes construidas con materiales de baja calidad no fueron capaces de resistir las fuerzas cortantes generadas por las cargas en su propio plano y fallaron. La mayor parte de esas paredes mostraba las típicas grietas en diagonal o en equis.

Las características de la actividad sísmica tuvieron una influencia definitiva sobre la magnitud de los daños en la zona de San Antonio y Tinamaste. La ocurrencia de varios sismos de magnitud similar provocó el deterioro paulatino de la mayoría de las construcciones. Los primeros sismos provocaron el agrietamiento y separación de paredes sin refuerzo adecuado y los sismos posteriores provocaron el colapso total o parcial de paredes ya incapaces de resistir las fuerzas inducidas.

CONCLUSIONES

Los daños causados por el enjambre de sismos de Puriscal han atraído la atención de los ingenieros y del público hacia el problema de las construcciones realizadas al margen de la reglamentación en las zonas rurales. Este problema también ha tenido manifestaciones en sismos pasados (Tilarán, 1973; Golfito y Pérez Zeledón, 1983; Cóbano, 1990) y es el causante de gran parte de las pérdidas económicas por sismos en el país.

Las construcciones que más daños sufrieron en la zona de Puriscal fueron las viviendas de mampostería. En este trabajo se analizan las condiciones que determinaron este hecho.

En primer lugar se consideraron las características de los sismos y su potencial destructivo. De los análisis realizados puede concluirse que los sismos causaron las sollicitaciones más altas a las estructuras muy rígidas, tales como las construcciones de mampostería de una sola planta, pero que esas sollicitaciones por sí mismas no eran capaces de producir daños en estructuras que hubieran sido diseñadas o construidas ingenierilmente. Para la zona de Puriscal, el Código Sísmico de Costa Rica, en su apartado 3.5.2.3, establece que el coeficiente sísmico que se utilice para diseñar debe tener un valor de 0.33. Ese valor es superior al promedio de las aceleraciones máximas registradas y de las aceleraciones efectivas de los sismos. Los otros parámetros analizados y los pocos daños que sufrieron las obras bien construidas confirman que el potencial destructivo de los sismos fue relativamente bajo.

Se analizaron también las características de las construcciones que determinaron la magnitud y tipo de daños observados. El uso incorrecto de los materiales o mala práctica constructiva, producto de un desconocimiento de la tecnología apropiada, fue el principal factor causante de los daños. También fueron factores determinantes la mala calidad de los materiales utilizados, las condiciones topográficas adversas y poca estabilidad del terreno en la zona. El problema de la vulnerabilidad de las construcciones rurales, dentro y fuera del Valle Central, es importante de considerar dada la posible ocurrencia de sismos fuertes en esta y otras zonas del país.

REFERENCIAS

1. Chopra, A. K. Dynamics of Structures. A Primer. Earthquake Engineering Research Institute. California, EEUU, 1981.
2. Güendel, F. et al. Informe Preliminar Secuencia Sísmica de Puriscal 26 de marzo - 11 de julio 1990. Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica. Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica, 1990.
3. Gutiérrez, J. Código Sísmico de Costa Rica, 1986. 1a. Edición. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Cartago, 1987.
6. Hudson, D. E. Reading and Interpreting Strong Motion Accelerograms. Earthquake Engineering Research Institute. California, EEUU, 1979.
5. Jennings, P. C. "Engineering Seismology". En Earthquakes: Observation, Theory and Interpretation. Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi", Course LXXXV. North-Holland Publishing Company. Amsterdam, Holanda, 1982.
6. Wiegel, R. L. Earthquake Engineering. Prentice Hall. New Jersey, EEUU, 1970.

TABLA 1.
SISMOS OCURRIDOS EN LA ZONA DE PURISCAL
REGISTRADOS POR LAS ESTACIONES ACELEROGRAFICAS
PERIODO: MAYO - JUNIO 1990

No.	FECHA (GMT)	TIEMPO ORIGEN	LATITUD NORTE	LONGITUD OESTE	PROFUNDIDAD (km)	MAGNITUD
1	29 May 90	19:56:51.37	09°51.32'	84°18.68'	16.00	4.2
2	01 Jun 90	3:28:17.38	09°52.17'	84°19.55'	13.06	4.1
3	07 Jun 90	17:12: 5.95	09°50.63'	84°19.10'	6.00	4.1
4	08 Jun 90	0:32:48.84	09°52.02'	84°19.20'	16.28	4.6
5	08 Jun 90	13:46:28.10	09°51.60'	84°19.73'	18.58	4.1
7	08 Jun 90	15:47:45.97	09°51.05'	84°17.73'	16.11	4.0
8	08 Jun 90	22:35:35.30	09°51.23'	84°18.57'	13.05	3.2
9	08 Jun 90	23:03:47.75	09°50.73'	84°18.04'	6.42	0.0
10	09 Jun 90	0:34:46.09	09°53.32'	84°19.54'	13.73	4.5
11	13 Jun 90	5: 2:32.51	09°50.85'	84°18.61'	5.98	3.9
12	16 Jun 90	2:22:47.95	09°52.73'	84°19.72'	16.58	4.2
13	30 Jun 90	14:51: 7.35	09°51.46'	84°23.43'	8.01	5.0
15	30 Jun 90	14:55:21.46	09°53.79'	84°21.64'	14.51	4.5
16	30 Jun 90	14:57:46.52	09°50.66'	84°23.01'	13.00	4.3
17	30 Jun 90	14:59: 6.94	09°49.38'	84°21.20'	14.29	4.5

Datos de las fuentes sísmicas suministrados por el
Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica
Universidad Nacional Autónoma

TABLA 2
ACELERACIONES MAXIMAS REGISTRADAS
EN LA ESTACION DE PURISCAL
SISMOS DEL PERIODO MAYO-JUNIO 1990

Sismo No.	Fecha	Hora Local	Distancia Epicentral	Aceleraciones máximas	
				Horizontal	Vertical
01	29 mayo	13:57		---	---
02	31 mayo	21:28	2.64	0.047	0.047
* 03	7 junio	11:12	0.70	0.125	0.112
* 04	7 junio	18:32	2.13	0.223	0.395
05	8 junio	07:46	2.04	0.028	0.025
06	8 junio	07:47	9.28	0.023	0.037
07	8 junio	09:47	2.06	0.053	0.031
08	8 junio	16:35	0.77	0.028	0.043
09	8 junio	17:03	1.52	0.025	0.030
* 10	8 junio	18:34	4.62	0.174	0.414
* 11	12 junio	23:02	0.46	0.549	0.631
12	15 junio	20:22	3.71	0.039	0.036
* 13	30 junio	08:51	8.42	0.113	0.070
14	30 junio	08:53		---	---
15	30 junio	08:55	7.36	0.048	0.046
16	30 junio	08:57	7.61	0.034	0.039
17	30 junio	08:59	5.15	0.063	0.065

Distancias en kilómetros
Valores de aceleración en fracción de g
g = aceleración de la gravedad (9.81 m/s²)

TABLA 3

SISMO ENERGIA DE ACELERACION

SISMO No.	HORIZONTAL [(m/s) ² /s]	VERTICAL [(m/s) ² /s]
03	0.388	0.563
04	1.719	1.236
10	1.142	1.599
11	3.405	2.064
13	0.761	0.372

TABLA 5

SISMO FRECUENCIA CARACTERISTICA

SISMO No.	HORIZONTAL [Hz]	VERTICAL [Hz]
03	7.59	18.47
04	7.73	20.23
10	7.48	16.62
11	11.33	23.78
13	6.61	14.43

TABLA 4

SISMO DURACION

SISMO No.	HORIZONTAL [s]	VERTICAL [s]
03	4.48	2.87
04	6.08	4.70
10	4.01	3.67
11	1.50	1.43
13	8.78	10.23

TABLA 6

SISMO ACELERACION PICO EFECTIVA

SISMO No.	HORIZONTAL [g]	VERTICAL [g]
03	0.087	0.065
04	0.169	0.106
10	0.156	0.122
11	0.327	0.148
13	0.099	0.062

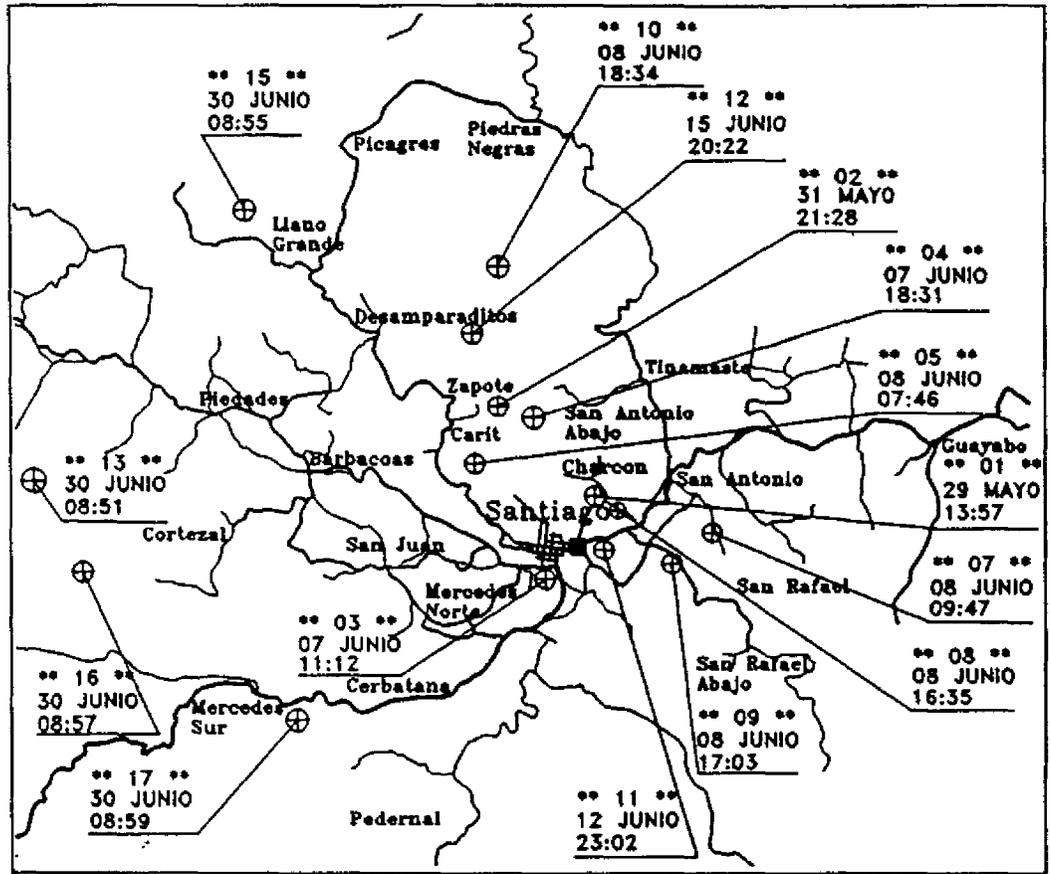


FIGURA 1. MAPA DE LA ZONA DE PURISCAL CON UBICACION DE EPICENTROS DE LOS SISMS REGISTRADOS

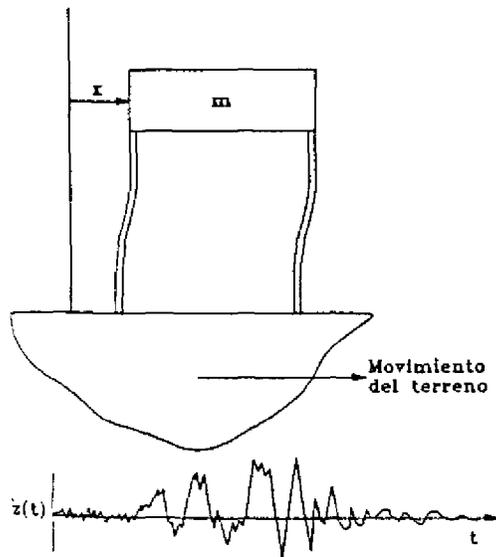


FIGURA 2. ESTRUCTURA DE UN GRADO DE LIBERTAD IDEALIZADA.

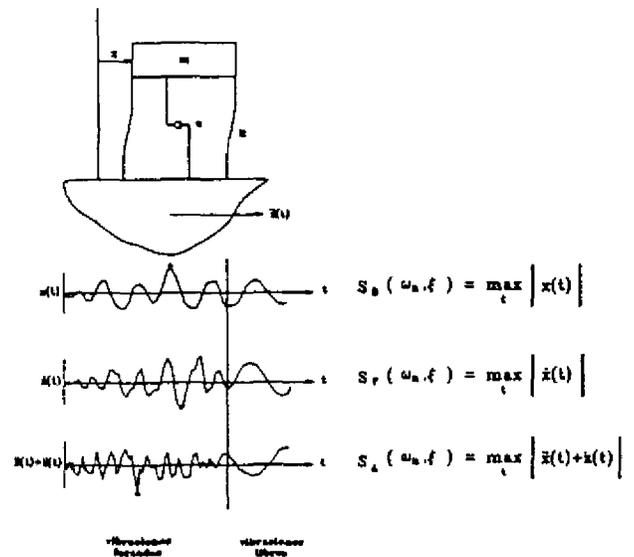


FIGURA 3. DEFINICION DE ESPECTROS

ACELEROGRAMAS DE SISMOS DE PURISCAL

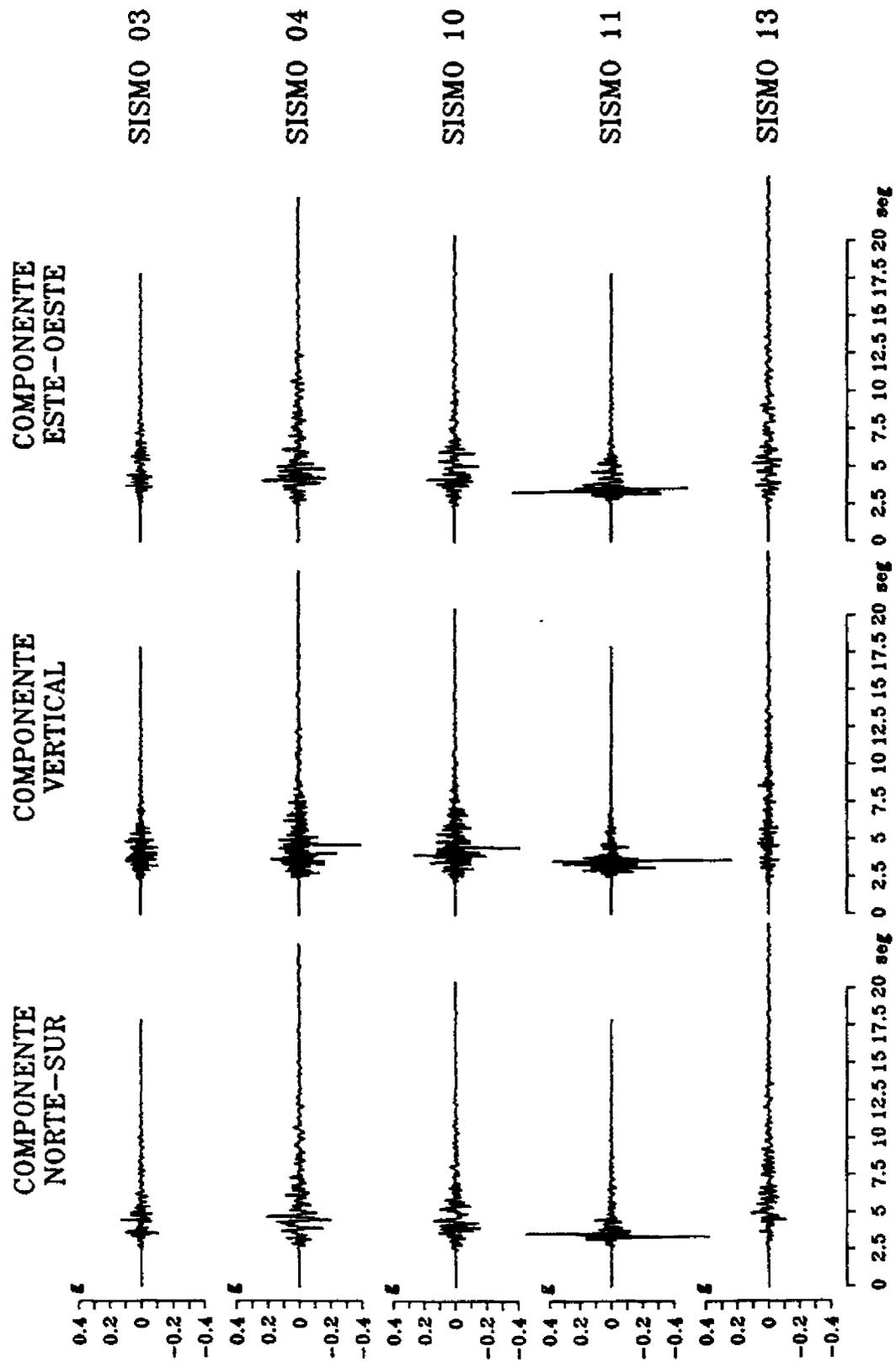


FIGURA 4. ACELEROGRAMAS DE SISMOS UTILIZADOS EN EL ANALISIS

ESPECTROS DE PSEUDO-ACELERACION
SISMOS DE PURISCAL

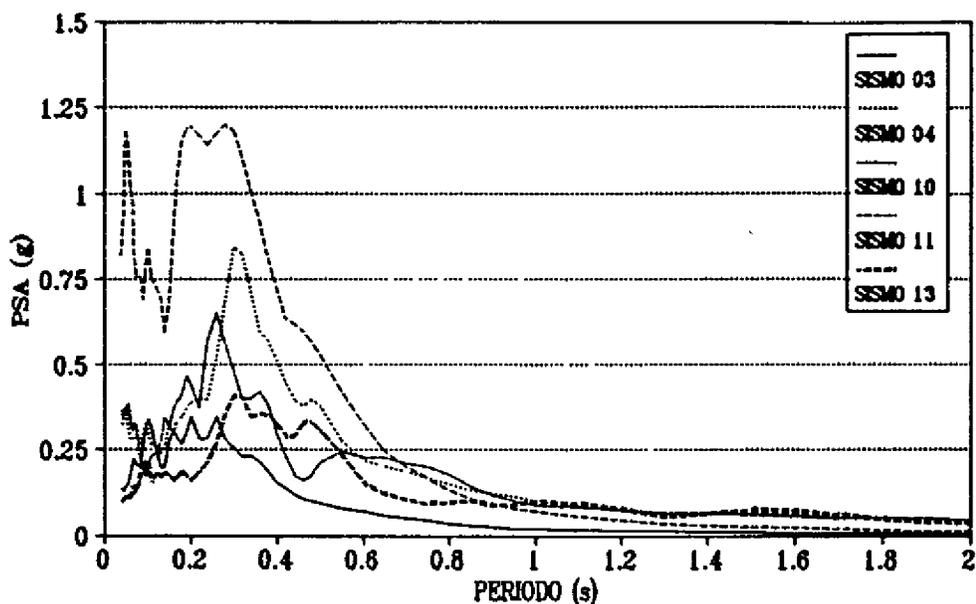


FIGURA 5. ESPECTROS DE PSEUDOACELERACION DE COMPONENTES HORIZONTALES DE SISMOS ANALIZADOS. AMORTIGUAMIENTO 5% DE CRITICO

ENERGIA DE ACELERACION
SISMOS DE PURISCAL

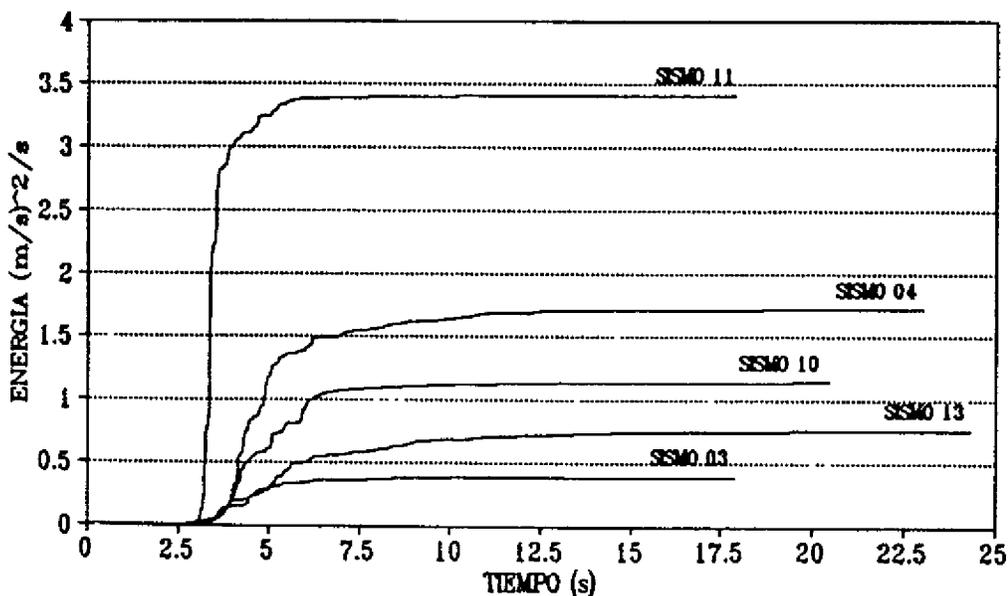


FIGURA 6. CURVAS DE ENERGIA DE ACELERACION DE COMPONENTES HORIZONTALES DE SISMOS ANALIZADOS