

**EL SISMO DE COBANO DEL 25 DE MARZO DE 1990
Y LA ZONIFICACION SISMICA VIGENTE**

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

RESUMEN

Los registros de aceleraciones del sismo de Cóbano, obtenidos por el Programa de Medición de Sismos Fuertes del Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica son caracterizados mediante el parámetro de aceleración pico. Se compara la relación de atenuación utilizada por Mortgat et al. para generar los mapas de isoaceleración del Código Sísmico con las aceleraciones registradas del sismo de Cóbano. Se comparan los periodos de retorno de los mapas con la periodicidad que resulta del análisis de los sismos del presente siglo similares al sismo de Cóbano. Se enfatiza la necesidad de una nueva evaluación de la amenaza sísmica a la luz de la información disponible.

ABSTRACT

Strong-motion records of the Cóbano, Costa Rica Earthquake obtained by the Strong Motion Instrumentation Program of the Earthquake Engineering Laboratory of the University of Costa Rica are characterized in terms of peak ground acceleration parameter. The attenuation relation used by Mortgat et al. to develop the isoacceleration maps of the Seismic Code of Costa Rica is compared to the recorded accelerations of the Cóbano, Costa Rica Earthquake. Return periods of maps are compared to the periodicity given by the analysis of earthquakes of the present century similar to the Cóbano event.

LA ZONIFICACION SISMICA VIGENTE

La zonificación sísmica del país utilizada por el Código Sísmico de Costa Rica, versión 1986 (Gutiérrez, J., 1987), se basó en los mapas de isoaceleraciones del Estudio de Riesgo Sísmico para Costa Rica (Mortgat, Ch. et al., 1977). Esta misma zonificación fue usada en el Estudio de Seguro Contra Terremoto para el Instituto Nacional de Seguros (Sauter F. y Shah H., 1978).

El procedimiento básico empleado en la generación de los mapas de isoaceleraciones del estudio de Mortgat et al. es descrito a continuación.

1. Identificación de las fuentes sísmicas

La localización de las fuentes se determinó con base en la ubicación de hipocentros de sismos pasados y en información geológica y sismológica. Se utilizaron varios catálogos de sismos y se escogieron un total de 764 eventos ubicados entre las latitudes 6°N y 13°N y las longitudes 81°W y 88°W y ocurridos entre 1883 y 1975. Todas las localizaciones de los hipocentros están basadas en mediciones telesísmicas de las diferentes redes mundiales y debieron ser completadas en algunos casos. La informa-

ción geológica y sismológica fue obtenida fundamentalmente de los estudios realizados por G. Dengo (1962) y J. Grases (1975). La metodología empleada asignó fuentes lineales, circulares y rectangulares a los diferentes grupos de sismos.

2. Desarrollo de un modelo de recurrencia de sismos

Se empleó un enfoque bayesiano para obtener la sismicidad de cada fuente, dadas las limitaciones de las bases de datos históricas. La sismicidad es definida como la distribución del número de eventos para cada magnitud por unidad de tiempo. Se supuso que la ocurrencia de sismos sigue una distribución de Poisson, es decir, que el número de sismos por unidad de tiempo es independiente de la magnitud de cada uno. Esto equivale a suponer que los sismos son independientes espacial y temporalmente y que la probabilidad de que dos eventos ocurran en el mismo lugar y al mismo tiempo es nula. Las magnitudes se obtienen a partir del análisis de la distribución de eventos pasados. La sismicidad de cada fuente se obtiene al introducir la distribución de probabilidad de las magnitudes. El enfoque bayesiano permite combinar los datos históricos con información geológica y sismológica.

3. Escogencia de los parámetros del movimiento del terreno

Para el estudio se escogieron la **aceleración máxima (pico) del terreno** y la **duración del movimiento** como las medidas representativas de la intensidad del movimiento en un sitio. La aceleración pico es la amplitud máxima obtenida en un registro del movimiento. La duración fue definida como el intervalo de tiempo durante el cual ocurre movimiento significativo del terreno. Se reconoció la mayor representatividad de las medidas del movimiento que relacionan la intensidad con el contenido de frecuencias, tales como la Intensidad Espectral, (Housner, 1952) pero se escogieron los parámetros mencionados por ser de uso generalizado, por su simplicidad y para poder comparar el modelo con otros que usaban los mismos criterios.

Parte importante de este paso es la escogencia de una relación entre la magnitud de un sismo y los parámetros usados para representar el movimiento del terreno. En este estudio se escogió la relación de atenuación propuesta por Esteva y Rosenblueth en 1964 y modificada en 1970. La ecuación es el resultado del análisis de regresión de los datos disponibles y relaciona la aceleración pico (a , en cm/s^2) del terreno con la magnitud (M) de Richter y la distancia hipocentral (R , en km).

$$a = 5000 * e^{0.8M} / (R+40)^2$$

Se reconocieron las limitaciones de usar cualquier relación de atenuación. Entre las más importantes se señalaron la imposibilidad de representar la complejidad del movimiento del terreno con una relación empírica y la gran dispersión de los datos con los cuales se realizan los análisis de regresión. En el caso de esta relación en particular se señala además la limitación de la suposición de que sitios a igual distancia del epicentro de un sismo registrarán la misma aceleración máxima del terreno, puesto que no toma en cuenta la influencia de factores tales como la

longitud y orientación de las fallas, que afectan el patrón de irradiación de las ondas sísmicas.

Se introdujeron medidas correctivas para las dos primeras limitaciones señaladas. Estas medidas se basan en la observación de que la dispersión de los datos varía proporcionalmente con el valor medio dado por la ecuación. De esta manera la ecuación se utiliza para calcular el valor promedio de una distribución de probabilidades. Puesto que el análisis de los datos no sugirió que alguna distribución en particular fuese más adecuada, se escogió una distribución uniforme con un coeficiente de variación constante, cuyo valor se fijó en 0.3. De esta manera los valores de aceleración pico del terreno se encontrarán distribuidos uniformemente en un intervalo definido por los valores $a_{m\acute{a}x}$ y $a_{m\acute{i}n}$ como sigue:

$$a_{m\acute{i}n}^{m\acute{a}x} = a \cdot (1 \pm q) \quad q=0.3$$

$$a = 5000 \cdot e^{0.3M} / (R+40)^2$$

Según los autores del estudio, el coeficiente de variación de 0.3 es consistente con el nivel de incertidumbre inherente a las relaciones de atenuación y con los valores de aceleración pico obtenidos con modelos desarrollados en el Estudio de Riesgo Sísmico para Nicaragua (Shah et al., 1975).

Para describir la atenuación de la duración del movimiento los autores se basaron en un estudio de Bolt, en el cual se define más claramente el término mismo. Para una frecuencia en particular la **duración acotada** se define como el tiempo transcurrido entre el primero y el último pico de aceleración, en valor absoluto, superior a un nivel dado; y la **duración uniforme** se define como el tiempo total durante el cual la aceleración, a esa frecuencia, excede un valor dado. Las ecuaciones usadas en el estudio son una aproximación a los valores de duración acotada dados por Bolt en 1973 para intervalos de magnitud entre 5.5 y 8.5 y distancias entre 10 y 200 km. Se utiliza la duración acotada con intervalos de aceleración mayores que 0.05 g y frecuencias superiores a 2 Hz. Los valores dados por las ecuaciones son tratados como valores medios de una distribución uniforme, con un coeficiente de variación de 0.5.

4. Estimación probabilística de la aceleración pico (AP) y la duración

Para desarrollar los mapas de isoaceleración e isoduración correspondientes a diferentes períodos de retorno, se obtienen las probabilidades de excedencia de cualesquiera valores de AP y duración en diferentes sitios. Esto se realiza combinando los efectos de las fuentes identificadas (paso 1) en cada sitio mediante las distribuciones de probabilidad que describen la sismicidad de las fuentes (paso 2) con las dos funciones de atenuación (paso 3). Se asume independencia temporal y espacial de los eventos. Las curvas se trazan con interpolación entre los valores obtenidos sobre una cuadrícula.

Los mapas de isoaceleración resultantes se muestran en las

figuras 1 a 4.

LIMITACIONES DEL ESTUDIO DE RIESGO SISMICO

Las principales limitaciones de ese estudio fueron analizadas por R. Pujol en 1981, quien encontró deficiencias en la base de datos y en la metodología empleada.

Entre las deficiencias más importantes de la base de datos se cuentan la repetición de eventos, la omisión de eventos importantes, tales como el terremoto de Cartago de 1910 y la mala localización de otros, tales como el terremoto de Orotina de 1924. En años recientes los investigadores de OVSICORI han determinado que los epicentros de la red mundial presentan una desviación sistemática de varios kilómetros hacia el noreste (Güendel, 1989). Se han desarrollado metodologías para corregir esa desviación y se trabaja en el mejoramiento de la localización de eventos pasados.

Pujol señaló también la irrelevancia de gran parte de los temblores usados, por provenir de fuentes muy alejadas del territorio nacional, especialmente de la zona central.

Otro aspecto destacado es la poca importancia asignada a las fallas locales que son las que realmente pueden causar daños personales y materiales en los principales centros de población del país. De acuerdo con los investigadores de la Escuela Centroamericana de Geología, los sismos generados por el proceso de subducción de la placa del Coco bajo la placa del Caribe son los que alcanzan las magnitudes más altas ($M > 7$) pero históricamente no han causado daños importantes en las zonas centrales del país. Los sismos con origen en fallas locales son potencialmente más peligrosos a pesar de ser de magnitudes más bajas ($M < 7$), puesto que sus epicentros se encontrarían más cerca de las poblaciones importantes y su profundidad sería más somera (Morales L., 1985 y Montero W., 1986). En el Estudio no aparecen fuentes sísmicas en la zona de Cartago, ni en las faldas de los volcanes Poás e Irazú, donde históricamente han ocurrido sismos importantes y donde los estudios geológicos y geomorfológicos y la sismicidad registrada han identificado fallas activas.

Entre las deficiencias metodológicas más importantes, Pujol señala la falta un tratamiento estadístico apropiado para la incompletitud de los datos, que se refleja en valores muy bajos del parámetro β ("pendiente" de los gráficos del logaritmo del número de eventos versus la magnitud) y magnitudes máximas demasiado altas para las fuentes sísmicas del país. También cuestiona la modelación de fuentes de subducción como fuentes lineales, así como también la ausencia de criterios geológicos en la modelación de otras fuentes. Otra deficiencia, que comparten algunas de las metodologías desarrolladas para la evaluación del riesgo sísmico, es la invalidez de la suposición de que la distribución temporal de los sismos sigue un modelo de Poisson, puesto que en realidad la probabilidad de ocurrencia y la magnitud esperada de un sismo aumentan con el tiempo transcurrido desde el último evento. La distribución espacial de los sismos tampoco es totalmente independiente. Normalmente un sismo de gran magnitud es seguido por otros de menor magnitud con epicentros en la misma zona, denominados "réplicas". Otra modalidad es el "enjambre" un

ocurrencia de varios sismos de magnitudes similares entre sí con epicentros en la misma zona.

Estas limitaciones y las deficiencias en la metodología empleada se reflejan en los resultados. En general, los mapas de isoaceleración reflejan básicamente el efecto de los sismos con origen en fuentes de subducción, los cuales, por alcanzar las magnitudes más altas están presentes con mayor frecuencia en los catálogos de las redes mundiales. No ocurre lo mismo con los sismos originados por fallas locales y el caso más notable es la supuesta uniformidad de la sismicidad del Valle Central que es contradicha tanto por la historia como por los registros locales de sismos de los últimos 15 años. La sismicidad del Valle Central no es uniforme sino que se concentra en los bordes del Valle (Morales, 1985).

EL SISMO DE COBANO

El 25 de marzo de 1990, a las 7:23 am hora local, ocurrió el sismo de mayor magnitud que haya afectado la zona central del país desde la crisis sísmica del año 1983. Según el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI), de la Universidad Nacional, el sismo tuvo una magnitud local de 6.8 y su epicentro se localizó en el Océano Pacífico a la entrada del Golfo de Nicoya, 19 km al Sureste de la población de Cóbano, de la cual se tomó el nombre para el sismo. Este sismo fue precedido por otro, ocurrido a la 7:16 am, hora local y de magnitud 5.3 según la misma fuente.

Según los investigadores del OVSICORI, los sismos fueron producidos por el proceso de subducción de la placa del Coco bajo la placa del Caribe. El mecanismo focal de estos sismos, de acuerdo con estos investigadores, es típico del fallamiento inverso de las zonas de subducción (Montero C., 1990; Protti M., 1990). Los investigadores de la Red Sismológica Nacional (RSN) del Instituto Costarricense de Electricidad y la Escuela de Geología de la Universidad de Costa Rica, propusieron un origen diferente para estos sismos. De acuerdo con los investigadores de la RSN, los sismos se produjeron en un conjunto de fallas con rumbo NE y NNE, ubicadas al extremo sureste de la Península de Nicoya, en la placa del Caribe (Montero W. et al., 1990). El mecanismo focal propuesto por estos investigadores es típico de fallas de corrimiento lateral.

La zona de mayores daños incluye las poblaciones de Cóbano, Tambor y Paquera en el extremo sureste de la Península de Nicoya, así como también la ciudad de Puntarenas, el puerto de Caldera y las poblaciones de Mata de Limón, Tivives y Jacó. En todas estas poblaciones hubo daños de consideración y colapso en construcciones deficientes para resistir sismos. De acuerdo a un análisis preliminar, se ha asignado una intensidad de VII en la escala de Mercalli Modificada para estas zonas. También se produjeron fenómenos de licuefacción del suelo en las zonas costeras de suelos granulares y poco consolidados, sin consecuencias graves para las construcciones.

En la ciudad de Puntarenas ocurrieron daños importantes relacionados con fallamiento del suelo en el Palacio Municipal, la Sede Regional de la Universidad de Costa Rica y otras

construcciones aledañas.

El Hospital Monseñor Sanabria y las instalaciones industriales de Fertilizantes de Centroamérica (FERTICA), ubicados en San Isidro de Puntarenas, sufrieron cuantiosas pérdidas económicas por daños no estructurales. El caso del Hospital Msr. Sanabria es analizado en detalle por A. Matamoros y G. Santana (1990).

En el Valle Central la intensidad del sismo fue de grado VI. Se produjeron daños menores en muchas construcciones, especialmente en edificios altos del área metropolitana. No se reportaron casos de fallas estructurales en esta zona.

Los casos más interesantes desde la perspectiva ingenieril fueron recopilados y analizados por los investigadores del Laboratorio de Ingeniería Sísmica (Santana G. et al., 1990).

REGISTROS DE ACELERACIONES DEL SISMO DE COBANO

Al ocurrir el sismo de Cóbano el país contaba con una profusa instrumentación para la medición de sismos. Existen dos redes sismográficas, la red del OVSICORI-UNA y la RSN (ICE-UCR), una red acelerográfica de cobertura nacional, operada por el Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica y un programa de monitoreo de obras especiales con acelerógrafos operado por el Instituto Costarricense Electricidad. Es la primera vez en la historia del país que un sismo es medido en forma tan extensiva y produce información muy útil para la comunidad científica e ingenieril.

Ubicación de estaciones acelerográficas

El Laboratorio de Ingeniería Sísmica mantiene en operación un conjunto de instrumentos de registro de movimientos fuertes o acelerógrafos, distribuidos en todo el territorio nacional. En las figuras 5 y 6 se muestra la ubicación de las estaciones acelerográficas en los mapas correspondientes al territorio nacional y al área de San José. Como se puede notar en el mapa de la figura 5, la zona central del país es la que tiene mayor densidad en instrumentación.

Todos los instrumentos son acelerógrafos marca Kinematics, tipo SMA-1, en los cuales se registran tres canales de aceleración, uno para cada componente del movimiento, sobre película fotográfica de 70 mm. En la tabla 1 se listan los nombres de todas las estaciones acelerográficas con los respectivos códigos y el número de registros (canales) obtenidos para los sismos del 25 de marzo de 1990.

La estación más cercana al epicentro del sismo principal es la de Puntarenas, ubicada en el primer piso del Hospital Monseñor Sanabria. En esta estación se registraron los valores más altos de aceleración. Los demás registros se obtuvieron en Quepos y en el Valle Central (San Ramón, Alajuela, San José y Cartago). La tabla 2 da los nombres de las estaciones que registraron el sismo principal ordenadas por distancia epicentral, una breve descripción de las mismas, la ubicación por coordenadas y el tipo de suelos.

Aceleraciones máximas registradas

Los valores de aceleraciones máximas registradas se resumen

en la tabla 3, además se da información sobre distancia epicentral y orientación de las componentes de aceleración de los instrumentos. Para las estaciones ubicadas en edificios se dan únicamente los valores registrados en la base. Un valor negativo de aceleración máxima indica dirección opuesta a la indicada en la orientación de la componente correspondiente.

LA ZONIFICACION SISMICA A LA LUZ DE LA NUEVA INFORMACION

La relación de atenuación propuesta por Esteva y Rosenblueth en 1970, empleada en el Estudio de Riesgo Sísmico para Costa Rica es comparada con los datos de aceleraciones pico registradas durante el evento sísmico del 25 de marzo de 1990. Los resultados se muestran en la figura 7, en la cual se delimita con líneas de puntos el intervalo de valores para el cual el mencionado estudio supuso una distribución uniforme.

Puede observarse que en todos los casos los valores de la curva son inferiores a los datos registrados. También puede observarse que el coeficiente de variación asumido por el Estudio de Riesgo Sísmico no es adecuado para cubrir la dispersión de los datos en este caso particular.

Se han comparado también los valores de aceleraciones registrados con los de los mapas de isoaceleración en vigencia. Para escoger el período de retorno representativo se ha realizado un estudio de los sismos generados por la interacción de las placas del Coco y del Caribe del presente siglo. Los resultados se muestran en la tabla 4. De acuerdo con esta tabla el período de retorno promedio general, para sismos que hayan provocado daños en las construcciones del Valle Central es de 25 años. Para los sismos con origen en la zona de entrada al Golfo de Nicoya es de 43 ± 8 años (incluido el sismo de Cóbano).

Estudios anteriores (Montero W., 1986) han determinado que para las fuentes sísmicas ubicadas en la zona de subducción, los períodos de retorno de sismos de magnitud M_s superior a 6.75, y profundidad inferior a los 60 km son de 30 años o inferiores en promedio. Específicamente, para la zona de Osa el período de retorno es de 30.0 ± 11.5 años y para la zona de Nicoya de 21.6 ± 11.8 años. Si tomamos los límites superiores los períodos serían de 41.5 y 33.4 años respectivamente. De acuerdo con las cifras anteriores, es esperable que el mapa de isoaceleraciones para períodos de retorno de 50 años refleje en forma ligeramente conservadora los efectos de los sismos que ocurren en la zona de subducción.

De acuerdo con el mapa de isoaceleraciones para 50 años de período de retorno, que aparece en la figura 1, la aceleración pico para la zona de Puntarenas tendría un valor cercano a 16 % de g. Las aceleraciones máximas que produjo el sismo de Cóbano exceden ese valor puesto que se registró un 26 % de g. Este nivel de aceleración registrado correspondería a un período de retorno de 500 años, de acuerdo con la figura 4.

Para el Valle Central, las aceleraciones máximas previstas por el mapa de la figura 1 son de un 15 % de g en promedio. Este valor tiene mayor correspondencia con las aceleraciones registradas, cuyos valores se encuentran entre 7 % y 17 % de g. Sin embargo, estos niveles de aceleración en el Valle Central probable-

mente tengan períodos de retorno menores ($T_R < 50$ años). De acuerdo con la tabla 4, los sismos que tienen origen en el proceso de subducción, tomando en conjunto todas las fuentes, han afectado en forma similar al Valle Central al menos una vez cada 25 años durante este siglo. En la última década, el sismo de Golfito produjo niveles de intensidad en el Valle Central (VI en la escala de Mercalli modificada) similares a las producidas por el sismo de Cóbano. Las aceleraciones máximas registradas en San José para el sismo de Golfito fueron del 5 % de g (Santana G. y Shakal A., 1987).

Además, este mapa no incluye el efecto de las fuentes locales, como ya se ha señalado, por lo que las aceleraciones máximas quedan subestimadas.

METODOLOGIA DE DISEÑO DEL CODIGO SISMICO

La influencia del valor de aceleración máxima en la determinación de los requisitos que deben cumplir las estructuras diseñadas con el Código Sísmico se centra en el cálculo del **coeficiente sísmico**. Las fuerzas sísmicas que se aplican en cada uno de los niveles de una estructura, de acuerdo con el método escogido para el diseño, son directamente proporcionales al coeficiente sísmico.

El valor de la aceleración máxima tomado de los mapas de isoaceleración determina el nivel de sollicitaciones para el cual debe ser diseñada la estructura. Según el Estudio de Riesgo Sísmico, el factor de reducción R que se aplica al valor máximo, representa el promedio espacial de las aceleraciones en el sistema suelo-estructura y esto equivale a considerar implícitamente los efectos de la interacción suelo-estructura.

Otra consideración implícita en la forma de calcular el coeficiente sísmico es que el espectro de diseño básico es escalado para que el valor básico sea el de una aceleración efectiva ($R \cdot a_{max}$). Esta forma de escalar el espectro es conceptualmente similar a la recomendada por el Applied Technology Council (ATC-3-06, 1978). Sin embargo, los valores básicos que usa el ATC para escalar los espectros son comparativamente inferiores a los que resultan de tomar las aceleraciones máximas de los mapas y aplicarles el factor de reducción. La diferencia fundamental radica en que el ATC usa como valor básico una aceleración efectiva diferente. Este parámetro no es proporcional a la aceleración máxima (como ocurre en el Código Sísmico de Costa Rica) sino que está modificado con consideraciones energéticas que buscan minimizar la poca utilidad que la aceleración máxima tiene como parámetro único representativo de la severidad del movimiento.

Como resultado de lo anterior las aceleraciones máximas tomadas de los mapas, a pesar de que subestiman las aceleraciones máximas reales, resultan conservadoras al ser utilizadas como aceleraciones efectivas.

CONCLUSIONES

Los mapas de isoaceleración del Estudio de Riesgo Sísmico tienen varias limitaciones serias. La omisión de las fuentes de fallas locales en la base de datos es tal vez la más importante. Por lo tanto, los mapas reflejan fundamentalmente el efecto de las fuentes de subducción. Sin embargo, las limitaciones señaladas por Pujol, las investigaciones de sismólogos nacionales, y la información generada por el sismo de Cóbano cuestionan la validez de estos mapas, aún bajo esa suposición.

Paradójicamente, al examinar la metodología de diseño recomendada por el Código Sísmico, las aceleraciones máximas resultan valores conservadores.

Desde la fecha del estudio es mucho lo que se ha avanzado en el conocimiento y la información existente sobre la sismicidad y la geotectónica del país. Recientes estudios, como el de Mitigación de Riesgos Volcánicos y Sísmicos de Valle Central realizado en conjunto por la UCR, la UNA y el ICE, han contribuido a mejorar notablemente el conocimiento sobre fallas activas y su potencial sísmico. Asimismo, ya existen registros de aceleraciones producidas por sismos de diferentes fuentes que brindan la oportunidad de revisar la validez de las relaciones de atenuación desarrolladas para otras latitudes y condiciones.

Todo este conocimiento, hace posible una pronta actualización de la zonificación sísmica del país, cuya necesidad ha sido más que demostrada.

Asimismo, es necesario readecuar la metodología de diseño para que sea más congruente con las limitaciones de los datos básicos.

REFERENCIAS

1. Applied Technology Council. Tentative provisions for the development of seismic regulations for buildings. ATC-3-06 Amended. Second printing, April 1984.
2. Dengo, G. Tectonic-Igneous Sequence in Costa Rica. Petrologic Studies: Buddington Volume, Geological Society of America, pp. 133-161, 1962.
3. Grases, J. Sismicidad de la Región Centroamericana Asociada a la Cadena Volcánica del Cuaternario. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela. Diciembre de 1974.
4. Güendell, F. Comunicación personal. Agosto, 1990.
5. Gutiérrez, J. Código Sísmico de Costa Rica. Editorial Tecnológica de Costa Rica, 1987.
6. Matamoros, A. y Santana, G. Análisis de la Respuesta Sísmica del Hospital Monseñor Sanabria. V Seminario de Ingeniería Estructural. Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos, Costa Rica. Noviembre 1990.
7. Montero, W. Períodos de recurrencia y tipos de secuencias sísmicas de los temblores interplaca e intraplaca en la región de Costa Rica. Revista Geológica de América Central. No. 5, Oct. 1986. pp. 35-72.
8. Morales, L.D. Las zonas sísmicas de Costa Rica y alrededores. Revista Geológica de América Central. No. 3, Oct 1985. pp. 69-102.
9. Mortgat, C. et al. A Study of Seismic Risk for Costa Rica The John A. Blume Earthquake Engineering Center. Stanford University. Report No. 25. April 1977.
10. Pujol, R. Limitaciones del Estudio de Riesgo Sísmico para Costa Rica. Seminario de Ingeniería Estructural - 1981 Vol. 1, pp. 63-69.
11. Santana, G. et al. Sismo de Cóbano -25 de marzo de 1990- Efectos sobre suelos y edificaciones. Laboratorio de Ingeniería Sísmica. Universidad de Costa Rica. Noviembre 1990.
12. Santana, G. y Shakal, A. Procesamiento de los registros de aceleraciones del Sismo de Golfito del 2 de abril de 1983 Instituto de Investigaciones en Ingeniería. Reporte INII-38 87. Julio de 1987.
13. Sauter, F. y Shah, H. Estudio de seguro contra terremotos Instituto Nacional de Seguros. San José. Setiembre 1978

TABLA 1
ESTACIONES ACELEROGRAFICAS

| Código | Nombre | Número de Registros |
|--------|---------------------------|---------------------|
| ALJ | Alajuela - CIPET | 3 |
| AUR | San José - Hotel Auroa | 6 |
| BNC | San José - Banco Nacional | * |
| CCH | Cachí | |
| CTG | Cartago | 3 |
| GEO | San José - Geología UCR | 3 |
| GLF | Golfito | |
| GTS | San José - Guatuso | 3 |
| HTO | San José - Hatillo | 3 |
| ICE | San José - Edificio ICE | 3 |
| INS | San José - Edificio INS | 6 |
| ISD | San Isidro | |
| LIB | Liberia - UCR | |
| PTS | Puntarenas | 3 |
| QPS | Quepos | 3 |
| RCP | Cartago - RECOPE | 3 |
| SRM | San Ramón - UCR | 3 |
| STC | Santa Cruz - UCR | |

(*) Los registros no pudieron ser recuperados en forma completa

Abreviaturas:

CIPET: Centro de Investigación y Perfeccionamiento para la Enseñanza Técnica
 ICE: Instituto Costarricense de Electricidad
 INS: Instituto Nacional de Seguros
 RECOPE: Refinadora Costarricense de Petróleo
 UCR: Universidad de Costa Rica

TABLA 2
ESTACIONES QUE REGISTRARON EL SISMO PRINCIPAL

| Nombre, código y descripción de estación acelerográfica | Tipo de Suélo | Coordenadas geográficas |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------|
| Puntarenas, PTS Hospital Monseñor Sanabria Concreto reforzado 10 pisos | Blando Sedimentos costeños cuaternarios | 9.9760 84.7547 |
| San Ramón - UCR, SRM Centro Regional UCR Concreto reforzado 1 piso | Blando-Firme Sedimentos cuaternarios | 10.0877 84.4824 |
| Quepos, QPS Centro de Salud Mampostería reforzada 1 piso | Rocoso Sedimentos terciarios | 9.4311 84.1663 |
| Alajuela - CIPET, ALJ CIPET (Antiguo Cuartel) Concreto reforzado 2 pisos | Firme Depósitos volcánicos cuaternarios | 10.0186 84.2200 |
| San José - Hatillo, HTO Clínica Solón Núñez, CCSS Concreto reforzado 1 piso | Blando Sedimentos aluviales recientes | 9.9160 84.0987 |
| San José - Edificio ICE, ICE Edificio central del ICE Concreto reforzado 13 pisos | Firme Depósitos volcánicos cuaternarios | 9.9403 84.1046 |
| San José - Hotel Aurola, AUR Edificio Hotel Aurola Acero y concreto reforzado 17 pisos | Firme Depósitos volcánicos cuaternarios | 9.9376 84.0775 |
| San José - Edificio INS, INS Edificio Central INS Concreto reforzado 13 pisos | Firme Depósitos volcánicos cuaternarios | 9.9381 84.0757 |
| San José - Guatuso, GTS Escuela de Guatuso, Patarrá Acero y elementos prefabricados 1 piso | Firme Depósitos volcánicos cuaternarios | 9.8703 84.0375 |
| San José - Geología UCR, GEO Escuela de Geología, UCR Concreto reforzado 2 pisos | Firme Depósitos volcánicos cuaternarios | 9.9394 84.0545 |
| Cartago, CTG Parque Central Instalación en campo libre | Blando Sedimentos aluviales recientes | 9.8672 83.9253 |
| Cartago - RECOPE, RCP Tanques de RECOPE, Ochomogo Instalación en campo libre | Firme Depósitos volcánicos cuaternarios | 9.9121 83.9215 |

NOTAS:

Clasificación de suelos con base en el Código Sísmico de Costa Rica, el Mapa Geológico de Costa Rica, escala 1:200 000 y el Mapa Geomorfológico de Costa Rica, escala 1:200 000.

Coordenadas geográficas: Latitud Norte
Longitud Oeste

TABLA 3
ACELERACIONES MÁXIMAS REGISTRADAS

| Nombre y Código de estación | Tipo Estr. | Distancia (km) | Aceleración máxima (g) | Orientación de ejes |
|------------------------------|------------|-----------------|---------------------------|----------------------|
| Puntarenas PTS | A | 48.6 [4.8] | 0.265 -0.137 0.255 | 275 Arriba 185 |
| San Ramón-UCR SRM | B | 76.4 [28.7] | 0.090 0.081 -0.106 | 0 Arriba 270 |
| Quepos QPS | B | 89.0 [85.9] | 0.038 0.021 0.069 | 0 Arriba 270 |
| Alajuela-CIPET ALJ | B | 94.3 [58.3] | 0.147 -0.051 0.166 | 0 Arriba 270 |
| San José-Hatillo HTO | B | 101.4 [74.6] | 0.097 -0.057 -0.088 | 0 Arriba 270 |
| San José-Edificio ICE ICE | A | 101.8 [73.1] | 0.069 -0.037 0.094 | 285 Arriba 195 |
| San José-Hotel Aurola AUR | A | 104.4 [76.0] | -0.068 0.037 -0.063 | 95 Arriba 5 |
| San José-Edificio INS INS | A | 104.6 [76.2] | 0.065 -0.045 0.083 | 190 Arriba 100 |
| San José-Guatuso GTS | B | 106.0 [82.7] | 0.067 -0.035 -0.055 | 0 Arriba 270 |
| San José-Geología UCR GEO | B | 106.8 [78.3] | -0.054 0.044 0.075 | 0 Arriba 270 |
| Cartago CTG | C | 117.8 [94.3] | 0.087 -0.035 0.063 | 0 Arriba 270 |
| Cartago-RECOPE RCP | B | 119.6 [93.1] | 0.069 -0.025 -0.046 | 0 Arriba 270 |

NOTAS:

Valores de aceleraciones máximas relativos a $g=9.81 \text{ m/s}^2$

Distancias: 101.4 Epicentral (según OVSICORI-UNA)
[74.6] A la ruptura (según RSN ICE-UCR)

TIPO DE ESTRUCTURA

- A: Edificio alto (3 o más pisos)
- B: Edificio bajo (menos de 3 pisos)
- C: Instalación en campo libre

TABLA 4
SISMOS DE MAGNITUD SUPERIOR A 6.75
PERIODO 1900-1980

| FECHA | ZONA EPICENTRAL (**) | MAGNITUD(*) | LOCALIZACION DE DAÑOS (*) |
|------------|----------------------------|-------------|-------------------------------|
| 06/21/1900 | Península de Nicoya | 7.2 | |
| 12/20/1904 | Península de Osa | 7.8 | |
| 01/20/1905 | Entrada al Golfo de Nicoya | 6.8 | Oeste del Valle Central |
| 02/27/1916 | Noroeste de Guanacaste | 7.5 | Santa Cruz, Puntarenas |
| 04/24/1916 | Península de Nicoya | 7.3 | |
| 03/04/1924 | Orotina | 7.0 | Orotina, San Mateo, San Ramón |
| 12/21/1939 | Entrada al Golfo de Nicoya | 7.3 | Valle Central |
| 12/22/1939 | Entrada al Golfo de Nicoya | 6.8 | |
| 10/27/1940 | Quepos | 6.8 | |
| 12/05/1941 | Península de Osa | 7.5 | Zona sur, Valle Central |
| 12/06/1941 | Península de Osa | 6.9 | |
| 11/19/1948 | Zona Central Costa Rica | 7.0 | |
| 10/05/1950 | Península de Nicoya | 7.7 | Nicoya, Puntarenas |
| 05/13/1952 | Zona Central Costa Rica | 6.9 | |
| 09/09/1952 | Quepos | 7.0 | |
| 03/12/1962 | Zona Sur Costa Rica | 6.8 | |
| 09/18/1962 | Zona Norte de Costa Rica | 7.0 | |
| 08/23/1978 | Península de Nicoya | 7.0 | |

(*) Miyamura, 1980
(**) Morales, 1985

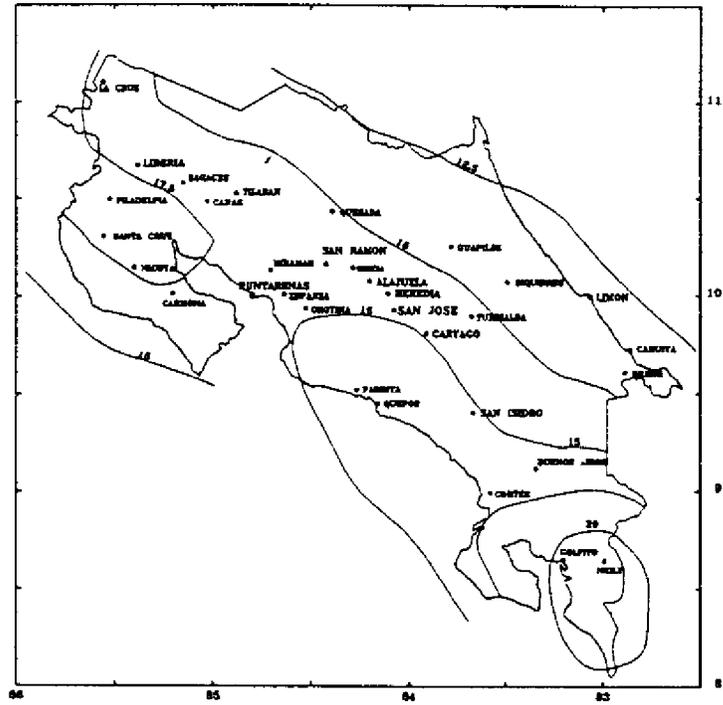


Figura 1. Mapa de isoaceleraciones $a_{m\acute{a}x}$ para 50 años de período de retorno, en % de g.

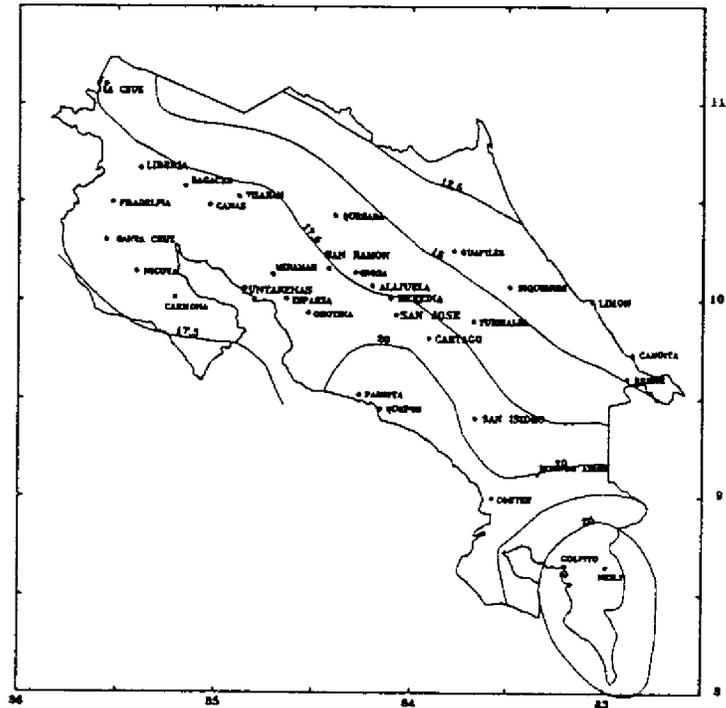


Figura 2. Mapa de isoaceleraciones $a_{m\acute{a}x}$ para 100 años de período de retorno, en % de g.

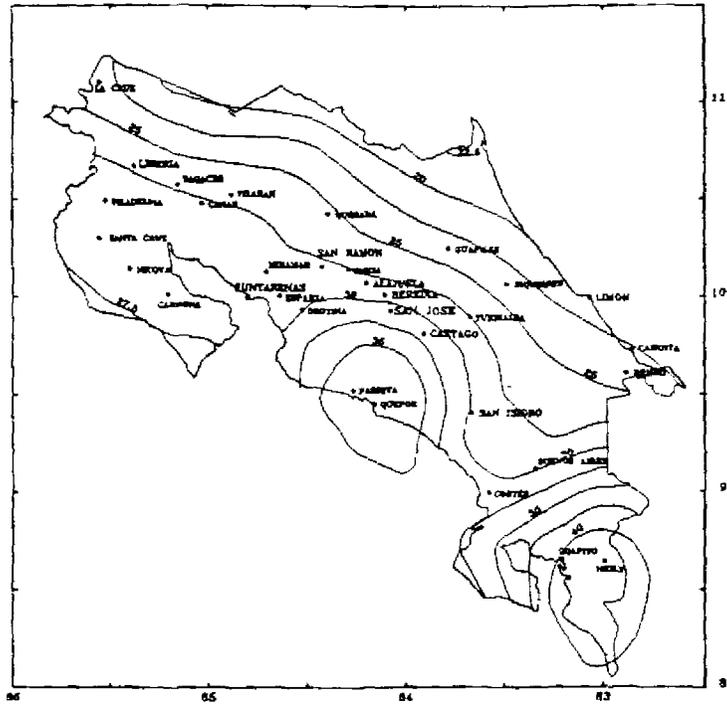


Figura 3. Mapa de isoaceleraciones a_{\max} para 500 años de período de retorno, en % de g .

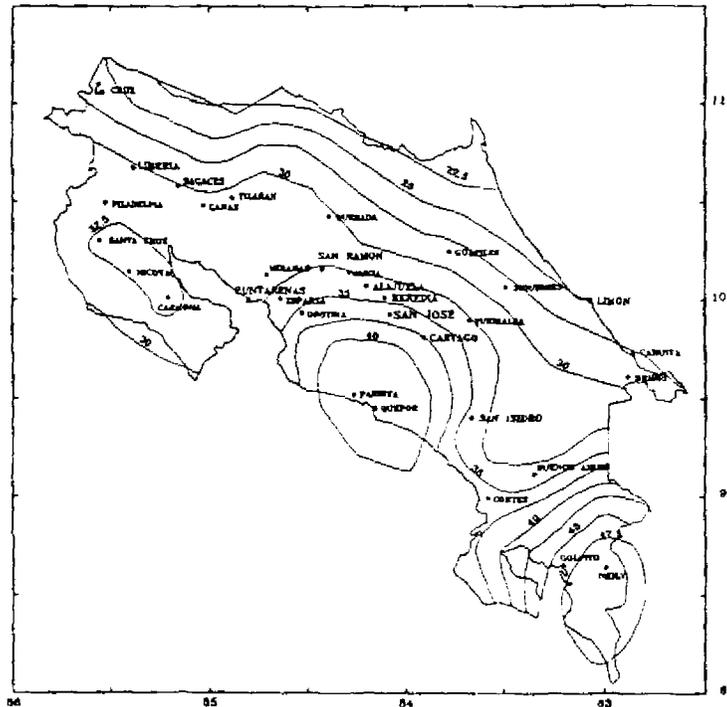


Figura 4. Mapa de isoaceleraciones a_{\max} para 1000 años de período de retorno, en % de g .

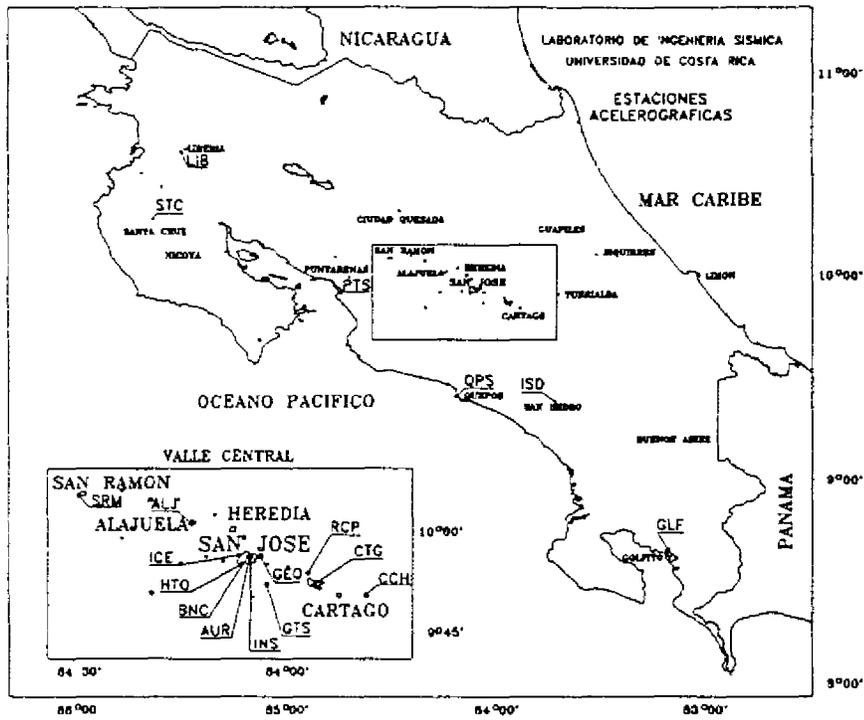


Figura 5. Mapa de ubicación de estaciones acelerográficas.

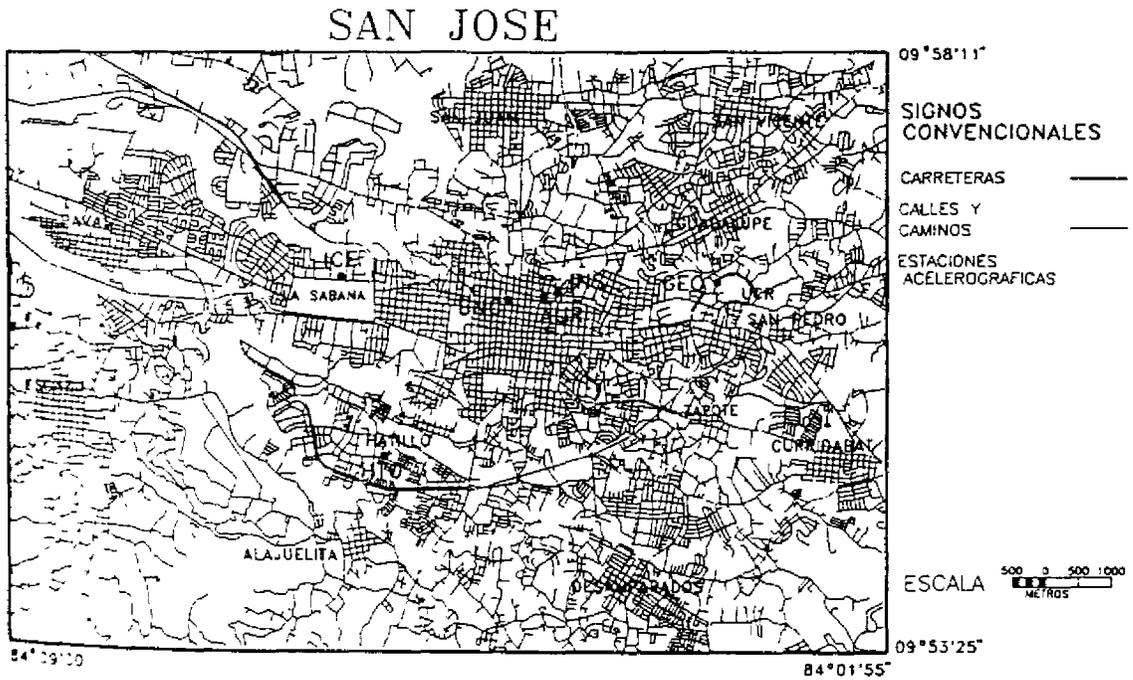


Figura 6. Mapa de ubicación de estaciones en el Area Metropolitana de San José.

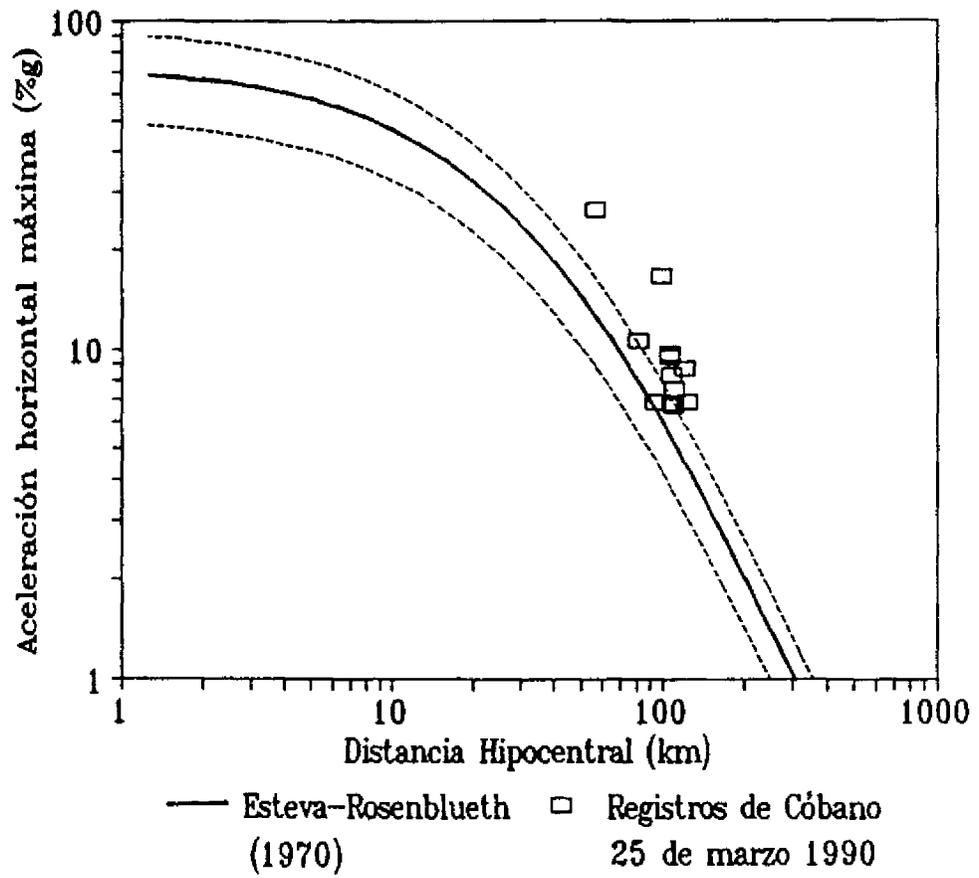


Figura 7. Curva de atenuación de Esteva y Rosenblueth (1970) vs. aceleraciones máximas registradas del sismo de Cóbano.