

INFORMES

TÉCNICOS

Sismo de
Coyuca de
Benítez del
7 de octubre
de 2001,
aspectos
sismológicos
y su impacto
en infraestructura

Carlos A. Gutiérrez Martínez
Leonardo Flores Corona
César López Martínez

DIRECCIÓN DE
INVESTIGACIÓN

Riesgos Geológicos



SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN

Lic. Francisco Javier Ramírez Acuña
Secretario de Gobernación

Lic. Laura Gurza Jaidar
Coordinadora General de Protección Civil

CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES

M. en I. Roberto Quaas Weppen
Director General

M. en C. Carlos A. Gutiérrez Martínez
Dirección de Investigación

Ing. Enrique Guevara Ortiz
Director de Instrumentación y Cómputo

Lic. Gloria Luz Ortiz Espejel
Directora de Capacitación

M. en I. Tomás Alberto Sánchez Pérez
Director de Difusión

Profa. Carmen Pimentel Amador
Directora de Servicios Técnicos

1ª edición, marzo 2007

©SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN

Abraham González Núm. 48,
Col. Juárez, Deleg. Cuauhtémoc,
C.P. 06699, México, D.F.

©CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES

Av. Delfín Madrigal Núm. 665,
Col. Pedregal de Santo Domingo,
Deleg. Coyoacán, C.P.04360, México, D.F.
Teléfonos:
54 24 61 00
56 06 98 37
Fax: 56 06 16 08
e-mail: editor@cenapred.unam.mx
www.cenapred.unam.mx

©Autores: Carlos Gutiérrez Martínez, Leonardo Flores Corona y César López Martínez

Edición: Violeta Ramos Radilla
Portada: Demetrio Vázquez Sánchez y Cynthia Paola Estrada

ISBN:

Derechos reservados conforme a la ley
IMPRESO EN MÉXICO. *PRINTED IN MEXICO*
Distribución Nacional e Internacional: Centro Nacional de Prevención de Desastres

EL CONTENIDO DE ESTE DOCUMENTO ES EXCLUSIVA RESPONSABILIDAD DE LOS AUTORES

Sistema Nacional de Protección Civil
Centro Nacional de Prevención de Desastres

EL SISMO DE COYUCA DE BENITEZ DEL 7 DE OCTUBRE DE
2001, ASPECTOS SISMOLÓGICOS Y SU IMPACTO EN
INFRAESTRUCTURA

Carlos A. Gutiérrez Martínez ¹

Leonardo Flores Corona ²

César López Martínez ¹

¹ Área de Riesgos Geológicos

² Área de Ingeniería Estructural y Geotecnia

CONTENIDO

ABSTRACT	5
I INTRODUCCIÓN	7
1.1 ANTECEDENTES.....	7
1.2 ENTORNO GEOGRÁFICO DE COYUCA DE BENÍTEZ	7
1.3 RECONOCIMIENTO DE DAÑOS EN EL MUNICIPIO.....	9
II SISMOLOGÍA	11
2.1 EVENTO PRINCIPAL Y RÉPLICAS.....	12
2.2 REGISTROS ACELEROGRÁFICOS.....	13
2.3 ESPECTROS DE RESPUESTA.....	18
III LÍNEAS VITALES, SALUD, ESCUELAS Y MONUMENTOS HISTÓRICOS	21
3.1 LÍNEAS VITALES.....	21
3.2 CENTROS DE SALUD	21
3.3 CENTROS DE EDUCACIÓN.....	21
3.4 MONUMENTOS HISTÓRICOS	22
IV DAÑOS EN VIVIENDAS	25
4.1 DISTRIBUCIÓN POR TIPO DE MATERIAL	25
4.2 GEOMETRÍA DE LA VIVIENDA	30
4.3 DAÑOS OBSERVADOS EN LA VIVIENDA.....	33
4.3.1 Vivienda de Adobe	33
4.3.2 Vivienda de Bajareque.....	39
V EDIFICIOS DE USO COMERCIAL	41
VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	45
6.1 CONCLUSIONES.....	45
6.2 RECOMENDACIONES.....	46
REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA.....	47

RESUMEN

El temblor de Coyuca de Benítez, del 7 de octubre del 2001 (Mw 5.9), fue localizado en la Brecha Sísmica de Guerrero, conocida por su alto potencial sísmico. No obstante, dicho evento no contribuyó a liberar energía acumulada en la brecha ya que su origen se debió a una falla superficial, de tipo normal, cercana a la cabecera municipal. La estación acelerográfica más cercana al epicentro registró una aceleración horizontal máxima de 510 cm/s^2 , mientras que en la ciudad de México se registraron valores máximos alrededor de 9 cm/s^2 .

El sismo sólo produjo daños en el municipio de Coyuca de Benítez. Aunque resultaron afectados edificios de uso comercial, monumentos históricos, vivienda, etc., los daños en ésta fueron los más relevantes y numerosos.

Se observaron daños predominantemente en viviendas de adobe y bajareque, llegando a contarse 3930 inmuebles afectados, de los cuales sólo el 4% tuvo daño severo. No se registraron daños en los sistemas de agua potable y alcantarillado. Tampoco se contaron víctimas humanas.

ABSTRACT

The October 7, 2001 Coyuca de Benítez earthquake (Mw 5.9), was located in the Guerrero seismic gap, well known due to its high seismic potential. However, the event did not release energy accumulated in the gap since its origin is related with a shallow normal fault, near the main municipality city. The closest accelerograph to the epicenter registered a maximum horizontal acceleration of 510 cm/sec^2 , while in Mexico City values of about 9 cm/sec^2 were registered.

The earthquake produced damages only in the Coyuca de Benítez municipality area. Although commercial and historical buildings were affected, the damages in housing were the most numerous and relevant.

Damages were mainly observed in adobe and mud walls with horizontal wood elements housing. 3930 houses were affected, 4% of them with severe damage. Water and sewage systems were not affected. No human casualties were registered.

I INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

El 7 de octubre de 2001 a las 21:39:20 h (hora local), ocurrió un sismo con magnitud Mw 5.9 y una profundidad de 8 km, de acuerdo con los cálculos definitivos del Servicio Sismológico Nacional (SSN). Su epicentro fue localizado cercano al área de la cabecera municipal de Coyuca de Benítez y aproximadamente 30 km al noroeste del puerto de Acapulco.

El temblor, que puede ser catalogado como de magnitud moderada, aunque fue sentido con fuerza, sólo causó daños de consideración en algunas comunidades del municipio, principalmente en viviendas de autoconstrucción y/o con mantenimiento deficiente. El movimiento también fue sentido claramente en otras ciudades aunque con intensidad menor, entre ellas Acapulco, Chilpancingo, Iguala y la ciudad de México. En ningún caso se produjeron heridos o víctimas.

Por la cercanía a la zona epicentral, además del sismo principal, en el área de Coyuca de Benítez fueron sentidas decenas de réplicas durante aproximadamente seis meses.

En este informe se resumen los aspectos sismológicos y tectónicos más relevantes, así como la información generada durante las inspecciones efectuadas por personal del CENAPRED y las unidades estatal y municipal de Protección Civil.

Particularmente se señalan las implicaciones de la actividad sísmica observada con respecto al escenario de riesgo sísmico propio de la región y se describen con detalle los efectos en las construcciones observados en dos poblaciones, Atoyacuillo y la cabecera municipal, seleccionadas por presentar construcciones y daños típicos.

1.2 ENTORNO GEOGRÁFICO DE COYUCA DE BENÍTEZ

El municipio de Coyuca de Benítez se ubica en la Jurisdicción de la Costa Grande de Guerrero; limita al Norte con el municipio General Heliodoro Castillo, al Noreste con el de Chilpancingo de los Bravo, al Este con el de Acapulco de Juárez, al Oeste con el de Atoyac de Álvarez, al Suroeste con el municipio de Benito Juárez y al Sur con el océano Pacífico (fig. 1.1).

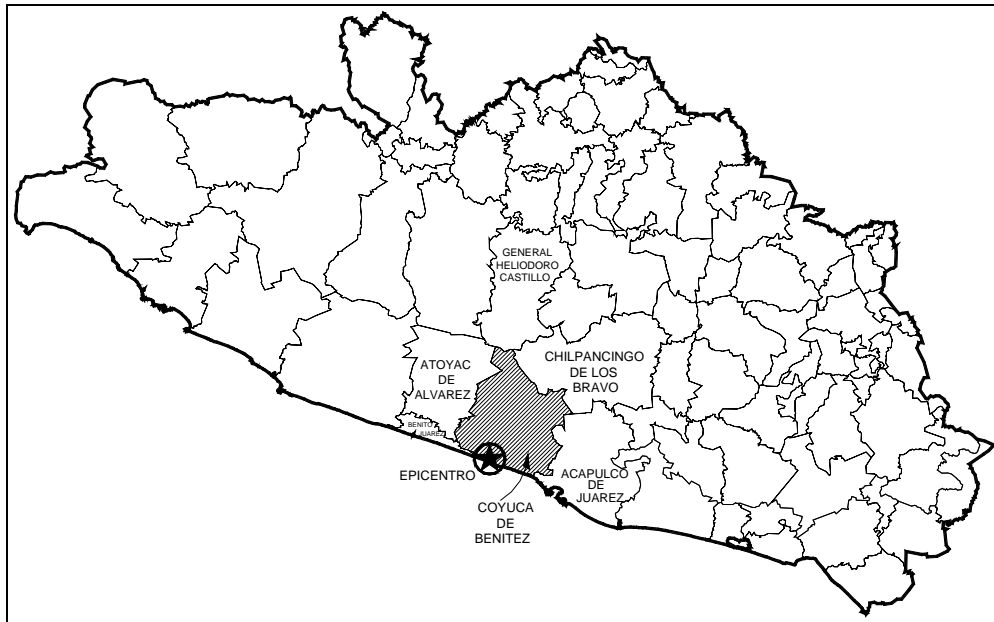


Figura 1.1 Localización del municipio de Coyuca de Benítez en el estado de Guerrero

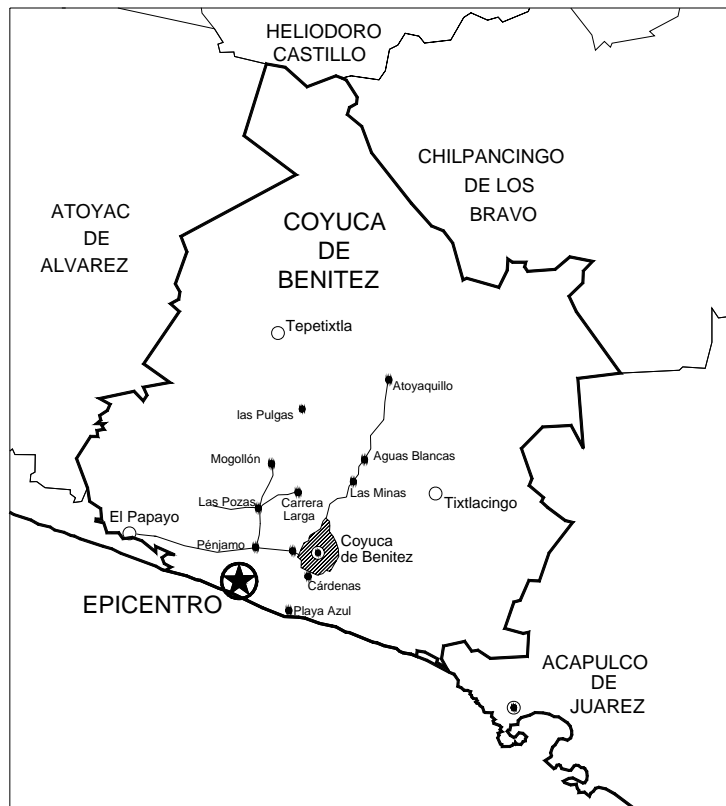


Figura 1.2 Municipio de Coyuca de Benítez y poblaciones cercanas al epicentro

Cuenta con una población de 69,059 habitantes en 165 comunidades. El número de viviendas particulares asciende a 15,311 según los resultados del XII Censo Nacional de Población y Vivienda.

De acuerdo con los datos estadísticos de 2000, el 29% de la vivienda está constituida por muros de adobe, el 13.4% por muros de bajareque (enramado de madera recubierto con lodo), cerca del 48% por muros de tabique, ladrillo, bloque de concreto, piedra o cemento, y el 9.6% restante por otros materiales (madera, cartón, etc.).

1.3 RECONOCIMIENTO DE DAÑOS EN EL MUNICIPIO

El 10 de octubre, personal del CENAPRED realizó una visita a la zona afectada con el propósito de identificar los daños y construcciones más comunes. Para la inspección, se eligieron las dos poblaciones que en ese momento, de acuerdo con el Director Municipal de Protección Civil, habían presentado mayor número de reportes al respecto: Coyuca de Benítez y Atoyaquillo, esta última situada pocos kilómetros al norte de la cabecera municipal.

Este reconocimiento fue complementado posteriormente por la Secretaría de Desarrollo Social que, durante las semanas siguientes, llevó a cabo una amplia inspección en el municipio y cuyos resultados se muestran en el Capítulo 4.

II SISMOLOGÍA

A lo largo de la costa occidental de México, particularmente de los estados de Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas, se encuentra la región sismogénica más importante de nuestro país. En esa región no sólo se tiene actividad sísmica frecuente, sino también de gran escala, alcanzando magnitudes superiores a 7 y con profundidades de origen relativamente someras, en la gran mayoría de los casos, menores que 40 km. La causa fundamental de dicha actividad se debe a la interacción de las placas de Cocos y Rivera con la de Norteamérica, teniéndose entre ellas un movimiento con direcciones opuestas (fig. 2.1) que produce la curvatura y penetración de las placas oceánicas por debajo de la Norteamericana, fenómeno conocido como subducción.



Figura 2.1 Fronteras entre placas tectónicas que definen las principales zonas sismogénicas de México. Se muestran las direcciones de desplazamiento y velocidades relativas

Las costas del estado de Guerrero han mostrado ser escenario de grandes sismos. Como ejemplos relevantes deben mencionarse los sismos ocurridos en 1899 (Ms 7.9)*, 1907 (Ms 7.6), 1908 (Ms 7.5; 7.0), 1909 (Ms 7.2 y 6.9) y 1911 (Ms 7.5). Asimismo, cabe mencionar sismos posteriores como los de 1957 (Ms 7.5) y 1962 (Ms 7.2 y 6.9), causantes de daños importantes en la ciudad de México y Acapulco, respectivamente.

* Ms significa magnitud calculada a partir de registros de ondas superficiales y ha sido usada, desde 1945, para temblores grandes con poca profundidad. La escala de magnitud de momento sísmico Mw, definida en 1977, requiere para su cálculo de registros sísmicos de alta calidad y se emplea cada vez más en reportes sismológicos ya que se obtienen valores precisos de magnitud sin importar el tamaño o profundidad del temblor.

Por lo anterior, el análisis del origen del sismo del 7 de octubre y su relación con el contexto sísmico de la región se hace necesario, entre otras razones, por encontrarse dentro de la llamada Brecha Sísmica de ese estado, región comprendida entre Zihuatanejo y Acapulco en la que, desde 1911, no ocurre un sismo de gran magnitud ($M > 7$).

2.1 EVENTO PRINCIPAL Y RÉPLICAS

El evento principal, ocurrido el 7 de octubre de 2001, a las 21:39 hora local, (8 de octubre, 03:39 GMT) , fue reportado por el Servicio Sismológico Nacional ubicando su epicentro cerca de la cabecera municipal y asignándole una magnitud de 6.1 (M_w 5.9) y una profundidad de 8 km. La posición epicentral y la escasa profundidad hizo que fuera sentido con fuerza, principalmente en esa localidad, y que la gran mayoría de sus réplicas fuera percibida claramente por la población. No se reportaron heridos ni víctimas debido a la actividad sísmica que se reporta.

El sismo principal fue percibido también, aunque con menor intensidad, en Acapulco, Chilpancingo y la ciudad de México.

Uno de los aspectos más relevantes de este evento es que el mecanismo de la fuente sísmica corresponde a una falla normal, estructura geológica debida a esfuerzos de tensión acumulados en la parte superficial de la corteza terrestre (fig. 2.2). Esto lo distingue claramente de la gran mayoría de eventos sísmicos que se originan en la región costera sujeta al fenómeno de subducción y que corresponden a mecanismos de falla inversa (esfuerzos de compresión) originados por la convergencia de las placas tectónicas Cocos y Norteamérica.

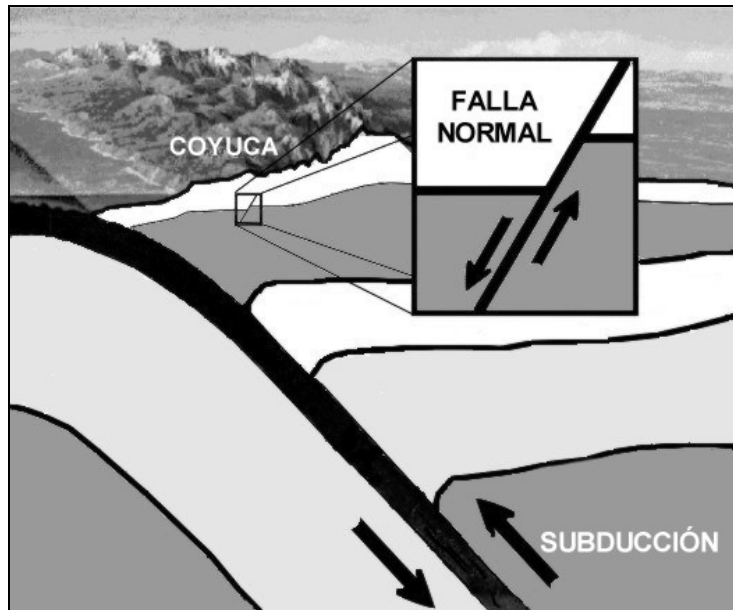


Figura 2.2 Mecanismo de falla normal, debido a esfuerzos de tensión, asociado al sismo del 7 de octubre. El origen del evento no está ligado de manera directa a la interacción de placas en la zona de subducción, dominada por esfuerzos de compresión

Aunque el temblor de Coyuca se localizó en la región de la Brecha Sísmica de Guerrero, no se puede afirmar que sea precursor o sustituto del sismo que, según se ha estimado, puede originarse en la brecha, con magnitud cercana a 8.2 (Singh y Ordaz, 1994).

Tras el evento principal se presentó una gran cantidad de réplicas, con magnitudes generalmente de 4 y menores. Adicionalmente a las réplicas que ha reportado el SSN, la población ha percibido un gran número de movimientos. La Unidad Municipal de Protección Civil reportó más de 50 réplicas en los dos días siguientes al evento. Éstas no fueron necesariamente localizadas por el SSN pues, aunque son eventos claramente sentidos en el área epicentral, no son lo suficientemente grandes para que se registren en al menos tres estaciones debidamente distribuidas para permitir su localización razonablemente precisa.

2.2 REGISTROS ACELEROGRÁFICOS

Además de los registros obtenidos por el Servicio Sismológico Nacional (SSN) del Instituto de Geofísica de la UNAM, necesarios para el cálculo de magnitud y localización hipocentral, se obtuvieron registros en numerosas estaciones de las redes acelerográficas que actualmente operan en el centro y sur de la República.

El evento principal fue registrado por 18 estaciones acelerográficas del Instituto de Ingeniería de la UNAM (IdeI-UNAM), cuatro acelerógrafos del Sistema de Alerta Sísmica del Centro de Instrumentación y Registro Sísmico (CIRES) de la Fundación Javier Barros Sierra y 12 del CENAPRED.

Tabla 2.1 Estaciones de registro y aceleraciones máximas en estaciones en la zona epicentral, en la ciudad de México y otras intermedias

Estaciones CIRES		Aceleraciones Máximas, cm/s ²		
Número	Nombre	Canal V	Canal N-S	Canal E-O
4	Cacalutla	62.256	89.844	82.520
5	Pénjamo	456.787	507.813	510.010
6	El Jardín	95.703	170.41	267.09
7	San Pedro	55.664	87.646	57.126
Estaciones I de I				
ACAC	Centro Cultural	133.32	164.6	118.6
ACAD	Diana	111.1	334.5	221.13
ACAR	Ciudad Renacimiento.	268.61	256.74	255.53
ACAZ	Zanja	51.68	82.3	78.48
AGCA	Agua Caliente	32.3	40.3	39.57
ATYCO	Atoyac	35.35	39.51	55.66
CAYR	Cayaco	47.85	80.39	55.51
COYC	Coyuca	230.17	319.25	305.65
COPL	Copala	4.71	7.89	8.02
OCLO	Ocotillo	60.03	75.63	66.15
NUXCO	Nuxco	8.23	13.3	17.98
SLUI	San Luis	6.96	10.23	8.03
SMR2	San Marcos	17.91	16.95	15.81
SUCHO	Suchil	10.99	9.65	7.63
VIGA	Las Vigas	30.79	39.81	29.54
VNTA	Venta	44.54	38.6	26.57
TEAC	Teacalco	6.45	11.35	8.64
TNLP	Tonalapa	15.84	24.64	27.88
Estaciones CENAPRED				
ACAJ	Acapulco	36.06	43.28	42.63
CNPJ	Cenapred	1.77	2.57	2.65
CHIL	Chilpancingo	17.21	14.72	14.02
IGUA	Iguala	3.78	4.74	4.10
CUER	Cuernavaca	3.62	6.90	6.25
COYS	Coyoacán	2.68	4.7	6.59
ZARS	Zaragoza	3.06	7.92	6.27
UNKS	U. Kennedy	1.88	4.9	3.98
RMAS	Roma-A	5.38	7.64	9.17
RMCS	Roma-C	5.13	8.60	6.01
ESTS	Estanzuela	0.81	1.51	1.50
IMP	Inst. Mex. del Petróleo	3.28	8.34	9.43

1 gal = 1 cm/s². La aceleración de la gravedad terrestre es igual a 981 cm/s².

Destacan algunos valores de aceleración horizontal máxima del terreno, justo en el área epicentral: 510 y 319 gal, obtenidos en la estación Pénjamo (CIRES) y Coyuca (IdeI), respectivamente. Valores como éstos usualmente provocan daños significativos en construcciones, sobre todo aquellas de bajo costo.

En la ciudad de México, las máximas aceleraciones se registraron en estaciones ubicadas en el Instituto Mexicano del Petróleo, en el norte de la ciudad, en la colonia Roma y el área de la avenida Ignacio Zaragoza, en la zona oriente.

En las figs. 2.3 a 2.6 se muestran los componentes Este-Oeste de registros de aceleración obtenidos en diferentes tipos de suelo de la ciudad de México. Se seleccionaron para ello las estaciones CENAPRED (Zona I), IMP (Zona II) y Roma y Zaragoza (Zona III), respectivamente.

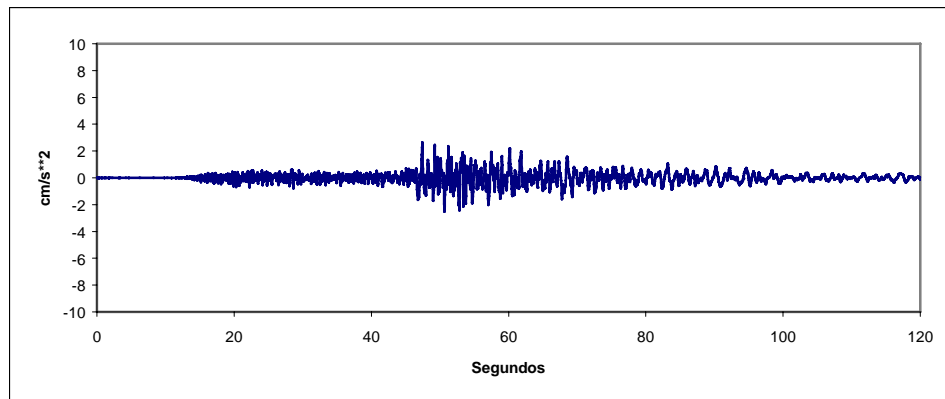


Figura 2.3 Registro del sismo de Coyuca de Benítez en la estación CENAPRED

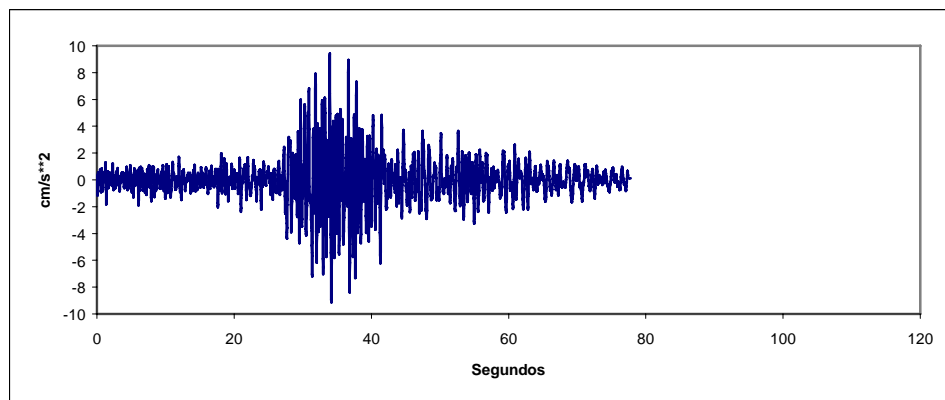


Figura 2.4 Registro del sismo de Coyuca de Benítez en la estación IMP (Instituto Mexicano del Petróleo)

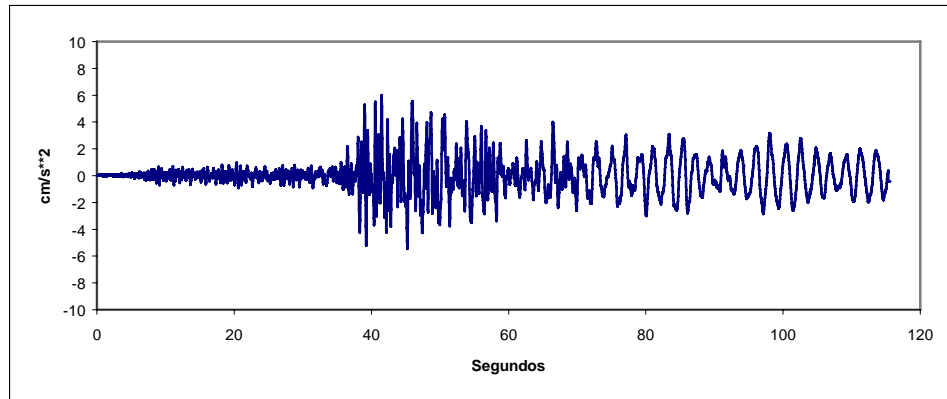


Figura 2.5 Registro del sismo de Coyuca de Benítez en la estación Roma-C

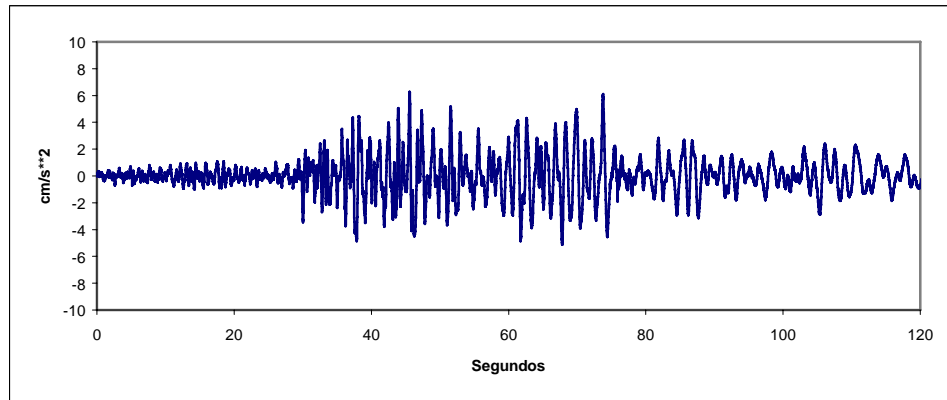


Figura 2.6 Registro del sismo de Coyuca de Benítez en la estación Zaragoza

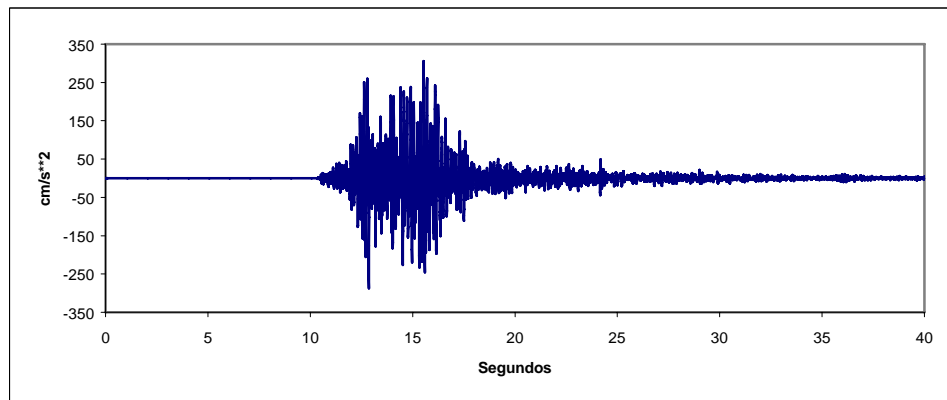


Figura 2.7 Registro acelerográfico (componente E-O) del sismo de Coyuca de Benítez en la estación Coyuca ubicada sobre roca firme

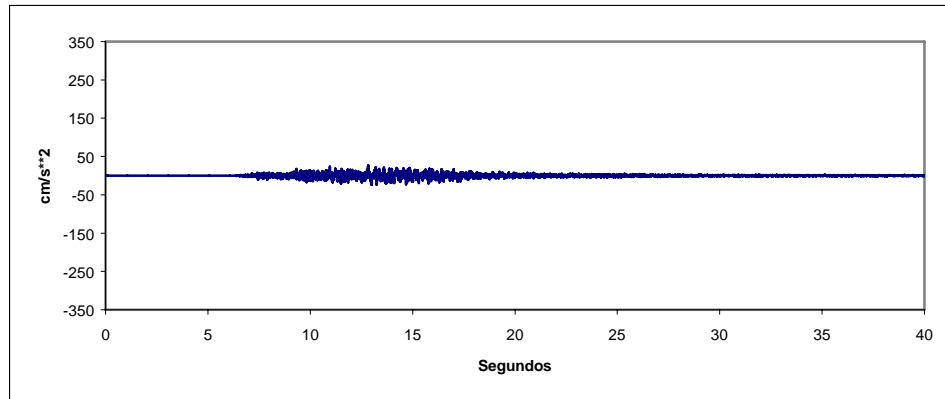


Figura 2.8 Registro acelerográfico (componente E-O) del sismo de Coyuca de Benítez en la estación La Venta ubicada sobre roca firme

Las figuras 2.7 y 2.8 muestran los componentes Este-Oeste de los acelerogramas registrados en la región epicentral, en sitios de roca firme. Cabe señalar el alto nivel de aceleración en la estación Coyuca, ubicada en el área epicentral.

Utilizando los datos de aceleración de las estaciones listadas en la Tabla 2.1, se elaboró un mapa de contornos de igual aceleración que cubre el municipio de Coyuca de Benítez y la región central de Guerrero (fig. 2.9), así como la ciudad de México (fig. 2.10).

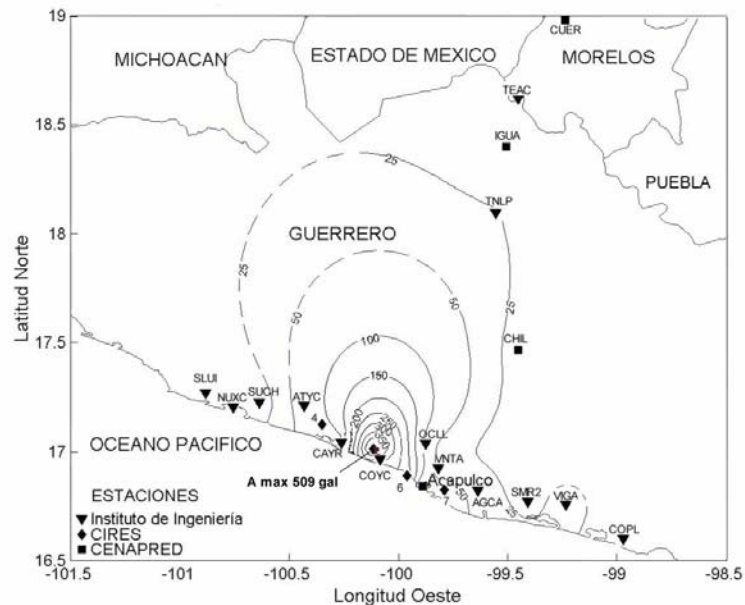


Figura 2.9 Curvas de isoaceleración en el área de Coyuca de Benítez y parte central de Guerrero. A_{max} se obtiene de aplicar la fórmula $A_{max} = [(A_{NS}^2 + A_{EW}^2)/2]^{1/2}$

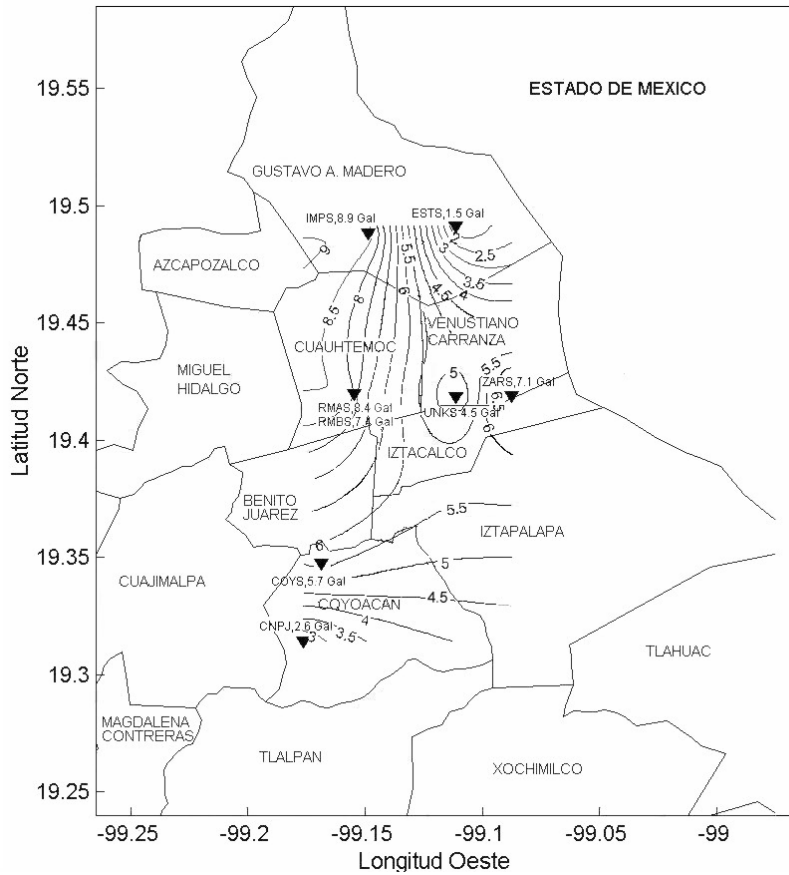


Figura 2.10 Mapa de isoaceleraciones en la ciudad de México

2.3 ESPECTROS DE RESPUESTA

En la fig. 2.11 se muestran los espectros elásticos de respuesta para pseudoaceleraciones y desplazamientos, para 5% de amortiguamiento, obtenidos para el registro acelerográfico de la estación Coyuca. Como comparación, en la figura 2.12 se muestran los espectros correspondientes a la estación La Venta, que se encuentra a unos 25 km al Este del epicentro.

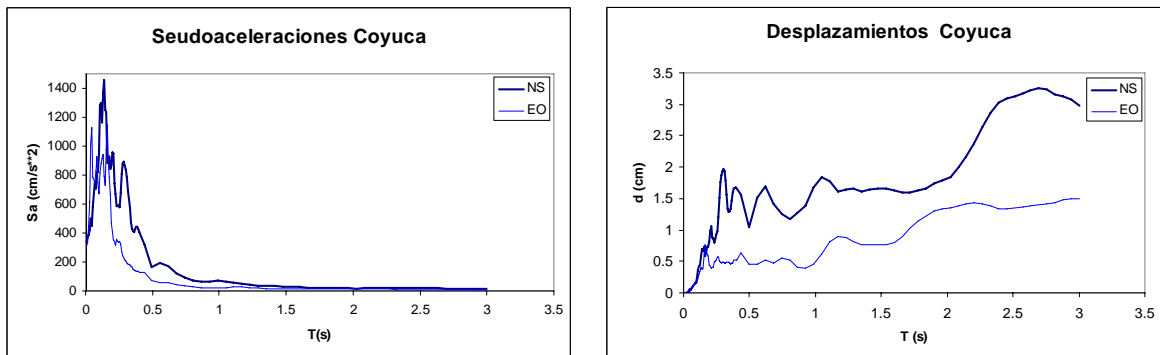


Figura 2.9 Espectros de respuesta de pseudoaceleraciones y desplazamientos para los componentes NS y EO, en la estación Coyooca

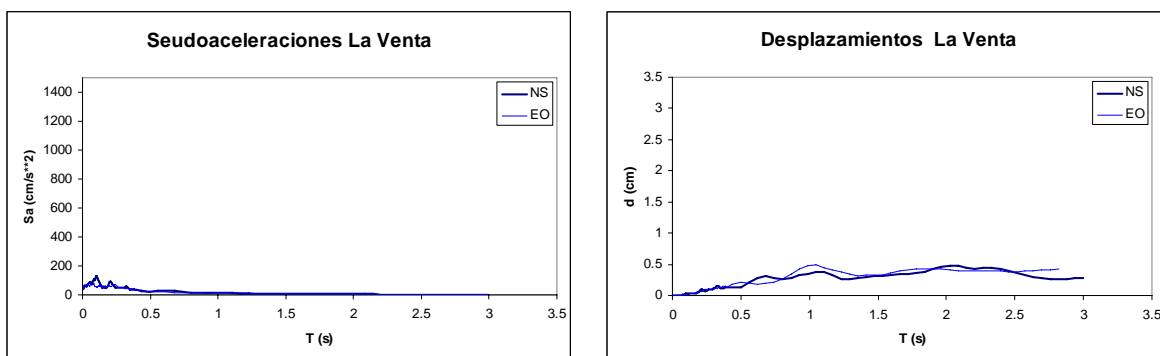


Figura 2.10 Espectros de respuesta de pseudoaceleraciones y desplazamientos para los componentes NS y EO, en la estación La Venta

Resultó de gran valor contar con varios instrumentos de registro en la zona y, en especial, un acelerógrafo muy cerca del epicentro. Las aceleraciones indicadas por los espectros en Coyooca son sumamente elevadas, equiparables al espectro para el sismo de diseño del lugar (CFE, 1993). Además, se observa la notable atenuación de las aceleraciones entre el registro obtenido en Coyooca y el registro de La Venta, a una distancia aproximada de 30 km. Este fenómeno, probablemente común en eventos similares, puede explicar el daño concentrado en zonas específicas aun ante sismos de magnitud moderada.

Se aprecia que el máximo valor en los espectros de pseudoaceleraciones en la estación Coyooca difiere entre la dirección N-S y la E-O por un factor de 1.3, pero se presentan para diferentes periodos, lo cual sugiere un efecto de directividad en la propagación del movimiento sísmico. Los efectos sobre las estructuras se pueden apreciar con las aceleraciones que se generan en el registro del epicentro para sistemas con bajos periodos de vibración, en este caso, menores que 0.5 s. Esta condición se tiene en estructuras bajas y rígidas tal como edificios de pocos niveles, y, en especial, las estructuras a base de muros como lo son las viviendas de mampostería, ya sea ésta moderna o de adobe. En especial, en la vivienda de adobe, las elevadas aceleraciones inducidas, sumadas a la baja resistencia del material y a la estructuración particular de éstas que es poco eficiente para resistir fuerzas sísmicas, ya que no cuenta con un sistema de techo que trabaje como diafragma rígido, fueron los responsables del daño observado en este tipo de construcción.

III LÍNEAS VITALES, SALUD, ESCUELAS Y MONUMENTOS HISTÓRICOS

La información recabada sobre daños en las líneas vitales fue proporcionada por la Dirección General de Protección Civil del estado de Guerrero, así como por la Unidad Municipal de Protección Civil de Coyuca de Benítez.

3.1 LÍNEAS VITALES

De acuerdo con las inspecciones realizadas por parte de Protección Civil del municipio e informes de los propios habitantes no se detectaron daños en los sistemas de agua potable y alcantarillado

Como consecuencia del sismo, se produjo un incendio en una subestación eléctrica, el cual, aunque fue controlado oportunamente, causó inquietud entre la población. Se tuvo conocimiento de la caída de algunos postes de alumbrado eléctrico en la ciudad de Acapulco. En general, el suministro eléctrico no se interrumpió.

No se reportaron daños en caminos vecinales, carreteras, ni puentes. Sin embargo, en algunos cortes sobre el camino entre las comunidades de Aguas Blancas y Atoyaquillo se observaron tres derrumbes de material arcillo-arenoso que, aunque de escaso volumen, obstruyeron uno de los dos carriles de tránsito.

3.2 CENTROS DE SALUD

En el municipio cuenta con 24 unidades de salud de primer nivel con un total de 46 camas clasificadas como no censables (uso temporal), 29 consultorios y 37 médicos. El siguiente municipio más cercano al epicentro es el de Acapulco de Juárez, que cuenta con 93 unidades de primer nivel, y siete de segundo nivel con las que se cuenta con 624 camas censables (uso permanente) y 492 no censables; además, existen 394 consultorios y un total de 649 médicos (Fuente: Cifras Municipales en Salud. Base de Información, 1999).

Los centros de salud, desde clínicas de salud y consultorios médicos, hasta hospitales (en Acapulco) no reportaron daño estructural alguno y permanecieron trabajando normalmente, con excepción de un caso debido a una fuga de oxígeno en un hospital de Acapulco por lo que fue necesario evacuar una sección.

3.3 CENTROS DE EDUCACIÓN

En el municipio de Coyuca de Benítez se cuenta con seis escuelas primarias, dos escuelas secundarias una preparatoria y un Cebetis. No se reportó ningún daño en los edificios destinados a educación. Éstas estructuras fueron revisadas por personal de la Secretaría de Educación Pública.

3.4 MONUMENTOS HISTÓRICOS

El único monumento para el que se consideró necesaria una inspección detallada fue el templo de San Miguel Arcángel, el cual es la iglesia principal de la cabecera municipal.

Esta iglesia fue construida en 1947, según se indica en una placa en la fachada. Está constituida por una planta rectangular con bóveda de cañón y una cúpula formada por ocho secciones como husos que dan la curvatura de semiesfera (figura 3.1). El altar se orienta hacia el Este. A la entrada del templo se encuentra el coro que es un entrepiso que se extiende desde la fachada hasta el primer nivel de columnas o contrafuertes.

La fachada principal es sumamente sencilla; cuenta con un portón, la ventana del coro y un par de ventanas más. A los lados de la fachada posee dos torres para campanarios. La torre izquierda cuenta con dos niveles de campanarios arriba del cuerpo de la torre, la de la derecha tiene dos niveles, pero el nivel superior lo ocupa un reloj. En general, los muros del templo son robustos y sin aberturas para ventanas.

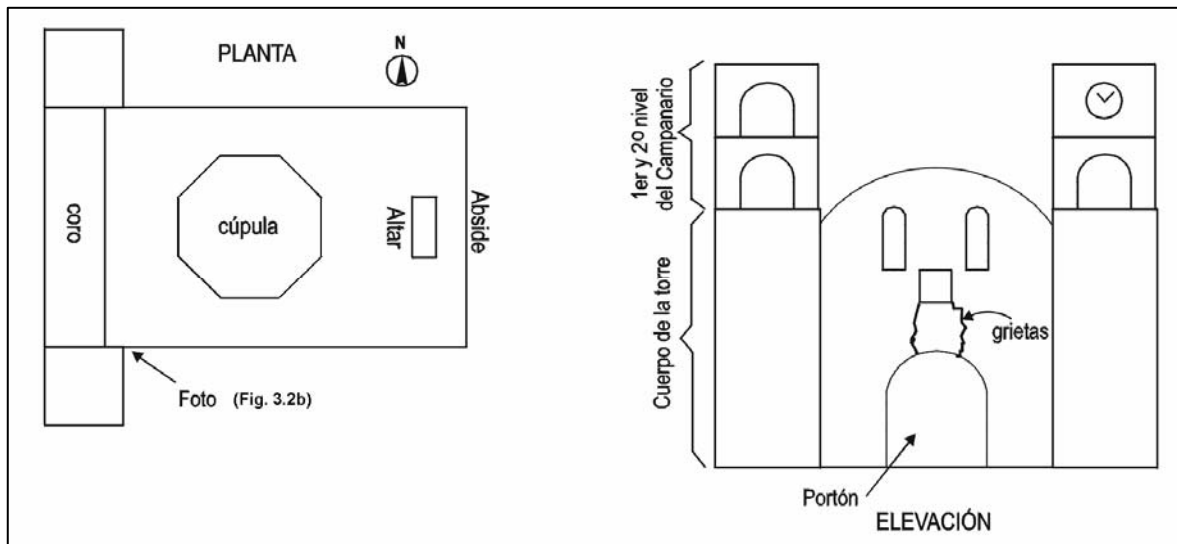


Figura 3.1 Planta y fachada principal de la iglesia de San Miguel Arcángel

Gracias a que una parte del intradós de la bóveda de cañón muestra un desprendimiento, se pudo apreciar que esta bóveda está hecha de concreto reforzado. La bóveda posee también algunos arcos presumiblemente del mismo material, dispuestos transversalmente a lo largo de la nave. Los muros del templo, así como la fachada, torres y el muro del ábside son de mampostería de piedra.

El daño que se pudo observar fue el típico que se presenta en estructuras de este tipo (ver Meli, 1998; y Alcocer *et al.*, 1999). En la base de la cúpula, por el interior, se observó un agrietamiento desde la clave, bajando por un lado de la pechina. En la fachada se presentaron dos agrietamientos que corren desde la ventana del coro hasta el arco del portón (fig. 3.1).

Se observó también agrietamiento en el cuerpo de la torre Sur, en su cara Este, el cual inicia en el contacto de la torre con la nave y baja, ligeramente inclinada, a media altura del cuerpo de la torre (fig. 3.2). En ambos casos el agrietamiento se debe a la respuesta de la estructura al movimiento sísmico, en donde la masa de la torre, o de la torre y parte de la fachada tratan de oscilar hacia fuera del eje de la nave. La debilidad del material para soportar esfuerzos de tensión provoca el agrietamiento en cuerpo de torres y en fachadas. En estas últimas la grieta recorre un plano de debilidad que es uniendo las ventanas con la abertura del portón.

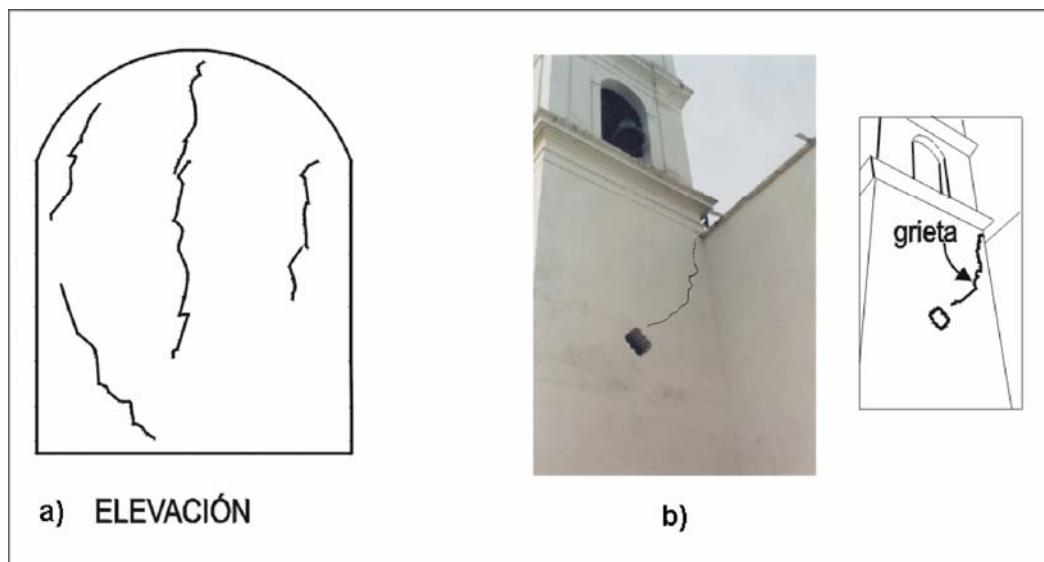


Figura 3.2 Esquema del agrietamiento en: a) el muro del ábside y b) en el cuerpo de la torre sur

El agrietamiento más importante se presentó en el muro del ábside (detrás del altar) con los agrietamientos esquematizados en la figura 3.2.

Los agrietamientos observados no ponen en riesgo la estabilidad de la estructura. El dictamen de las condiciones estructurales y las recomendaciones de rehabilitación serán dados por el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH). Sin embargo, de las experiencias obtenidas en la reconstrucción de los monumentos históricos afectados por el sismo de Tehuacán de 1999, se puede anticipar que la reparación incluirá la consolidación de grietas mediante inyección.

IV DAÑOS EN VIVIENDAS

Los daños que causó este sismo se concentraron esencialmente en la vivienda rural, predominantemente construida a base de adobe. En segundo término se tuvo daño en otro tipo de vivienda de materiales débiles como es la de bajareque o “embarro” (enramado de madera recubierto con lodo), y en mucho menor medida en el caso de mampostería de tabique o ladrillo sin refuerzo.

4.1 DISTRIBUCIÓN POR TIPO DE MATERIAL

En la tabla 4.1 se presenta el tipo de material predominante para la vivienda, en porcentaje del total de viviendas que existían en 2000.

Tabla 4.1 Tipo de material predominante en vivienda del municipio de Coyuca de Benítez

Tipo de material	Porcentaje
Piso de tierra, paredes de embarro o bajareque	10.9 %
Piso de cemento o firme, paredes de bajareque	2.4 %
Piso de madera, mosaico y otros y paredes de bajareque	0.01 %
Piso no especificado y paredes de bajareque	0.03 %
<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>	
Piso de tierra, paredes de adobe	16.0 %
Piso de cemento o firme paredes de adobe	13.1 %
Piso de madera, mosaico y otros y paredes de adobe	0.1 %
Piso no especificado y paredes de adobe	0.04 %
<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>	
Piso de tierra, paredes de tabique, ladrillo, bloque, piedra o cemento	6.5 %
Piso de cemento o firme, paredes de tabique, ladrillo, bloque, piedra o cemento	39.1 %
Piso de madera, mosaico y otros, paredes de tabique, ladrillo, bloque, piedra o cemento	2.2 %
Piso no especificado, paredes de tabique, ladrillo, bloque, piedra o cemento	0.1 %

Resumiendo los datos de la tabla 4.1, para el material usado en muros, se tiene 29% adobe, 13.4% bajareque, 48% entre tabique, ladrillo, bloque de concreto, piedra o cemento, y 9.6% de otros materiales (madera, cartón etc.).

En la comunidad de Coyuca de Benítez, se pudo apreciar un amplio uso de la mampostería confinada de tabique de barro recocido (ladrillos), y, en menor término, el uso de mampostería confinada de tabicones de concreto (cemento-arena) y bloques huecos de concreto. Sin embargo, en la periferia de la misma población se encuentran colonias que se han ido sumando a la zona urbana de la cabecera municipal. En estas comunidades se usan materiales para las viviendas como adobe, bajareque y madera.

En la población de Atoyaquillo, que sirve de ejemplo de las comunidades rurales más marginadas, se pudo estimar burdamente que el 90% de las viviendas son de adobe, mientras que el 10% restante se compone de bajareque como material en muros, salvo el caso observado de una vivienda de mampostería confinada con piezas de concreto.

De acuerdo con un resumen de daños elaborado por la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), se tiene un total de 3930 viviendas con daño en diferentes niveles, en 79 comunidades inspeccionadas. Del total de viviendas, 2740 presentaron daño leve, 1028 parcial y 162 daño total.

Los niveles de daño se caracterizan de la siguiente manera:

- Leve Afectación predominantemente en acabados, caída de teja. Daño no significativo en elementos estructurales
- Parcial Elementos estructurales con daño reparable. Colapso y desprendimientos de algunos muros
- Total Daño no reparable en elementos estructurales. Se requiere la reposición de la vivienda

En las semanas posteriores, la SEDESOL llevó a cabo una inspección con mayor amplitud en la totalidad de comunidades dentro del municipio. En la tabla 4.2 se muestra, de manera resumida, el nivel de daño para cada localidad.

Tabla 4.2 Número de viviendas dañadas en poblaciones del municipio de Coyuca de Benítez, según SEDESOL

LOCALIDAD	TIPO DE DAÑO			TOTAL DE VIVIENDAS
	LEVE	PARCIAL	TOTAL	
Agua Zarca (1)	41	13	0	54
Aguas Blancas (2)	70	222	57	349
Atoyaquillo (3)	86	26	11	123
Bajos del Ejido (4)	37	2	0	39
Barrio Nuevo (5)	20	9	0	29
Barrio Nuevo La Laja (6)	17	0	0	17
Cahuatitán (7)	29	2	0	31
Carrera Larga (8)	23	51	13	87
Col. 1º de Enero (9)	14	1	3	18
Col. Brasilia (10)	6	2	0	8
Col. Campesina Norte (11)	56	9	1	66
Col. Campesina Sur	67	8	4	79
Col. Centro	415	99	21	535
Col. Cerro de la Campana	13	25	0	38
Col. Cerro del Fortín	10	7	0	17
Col. CETIS (12)	10	2	1	13
Col. El Panteón	1	0	0	1
Col. ETI	43	14	2	59
Col. Lázaro Cárdenas (13)	0	1	0	1
Col. Los Garrobos	17	4	0	21
Col. Obrera	11	2	0	13
Col. San Martín (14)	6	0	0	6
Col. Talavera	7	0	1	8
Col. Tierra y Libertad (15)	20	9	3	32
Col. Tierra y Libertad II (15)	5	1	1	7
Col. Venustiano Carranza	68	3	1	72
Col. V. Carranza Ampl.	1	0	0	1
Col. Zumpango	40	2	2	44
Coyuca (16)	55	29	6	90
El Bejuco (17)	44	14	1	59
El Carrizal (18)	7	0	0	7
El Cayaco (19)	5	0	0	5
El Embarcadero (20)	9	30	0	39
El Papayito (21)	20	4	0	24
El Papayo (22)	16	1	0	17
El Porvenir (23)	18	0	0	18
El Pozquelite (24)	4	0	0	4
El Terrero (25)	26	0	0	26

Continúa

Tabla 4.2 Número de viviendas dañadas en poblaciones del municipio de Coyuca de Benítez, según SEDESOL

LOCALIDAD	TIPO DE DAÑO			TOTAL DE VIVIENDAS
	LEVE	PARCIAL	TOTAL	
El Zapatero (26)	1	1	1	3
El Zapote (27)	17	2	0	19
El Zapotillo (28)	12	2	2	16
Encino Prieto (29)	9	0	0	9
Espinalillo (30)	36	48	8	92
Guamuchito	5	4	0	9
Huerta Vieja (31)	3	0	0	3
Huertecillas (32)	1	0	0	1
La Barra (33)	3	3	0	6
La Humedad (34)	9	0	0	9
La Laja (35)	25	8	0	33
La Lima (36)	12	1	0	13
Las Compuertas (37)	71	16	0	87
Las Lomas (38)	15	27	10	52
Las Lomitas (39)	77	10	0	87
Las Pulgas (40)	26	1	0	27
Las Tranquitas (41)	6	1	0	7
Los Cimientos (42)	27	0	0	27
Los Nopales (43)	41	3	0	44
Luces del Mar (44)	0	2	1	3
Paso Real (45)	11	35	2	48
Pénjamo (46)	70	8	0	78
Platanillo (47)	40	0	0	40
Pueblo Viejo (48)	28	1	0	29
San Antonio	2	1	0	3
San José	4	0	0	4
San José Mogollón (49)	21	1	0	22
San Juan del Río (50)	16	34	0	50
San Nicolás (51)	61	29	6	96
San Salvador Pozas (52)	200	16	0	216
Santa Cruz del Río (53)	12	0	0	12
Santa Rosa de Lima (54)	11	0	0	11
Tepetixtla (55)	33	125	0	158
Tixtlancingo (56)	385	25	1	411
U. H. Las Palmitas (57)	18	2	0	20
Valle del Río (58)	41	3	0	44
Yerba Santita (59)	32	22	3	57
Yetla (60)	22	5	0	27
TOTAL	2,740 (69.7%)	1028 (26.2 %)	162 (4.1%)	3,930 (100%)

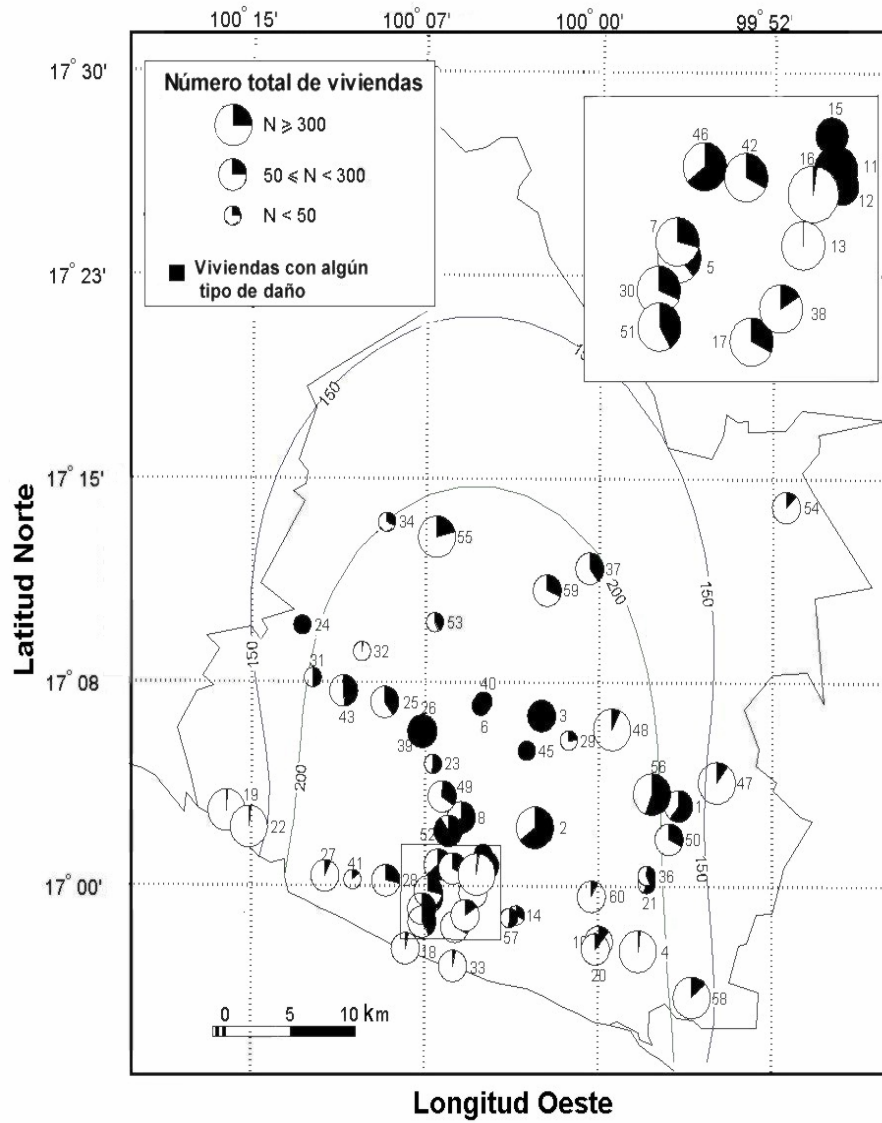


Fig. 4.1 Proporción de viviendas afectadas con algún tipo de daño. Se muestran adicionalmente las curvas de isoaceleración de 150 y 200 gal, las que usualmente engloban las áreas con daño significativo por sismo

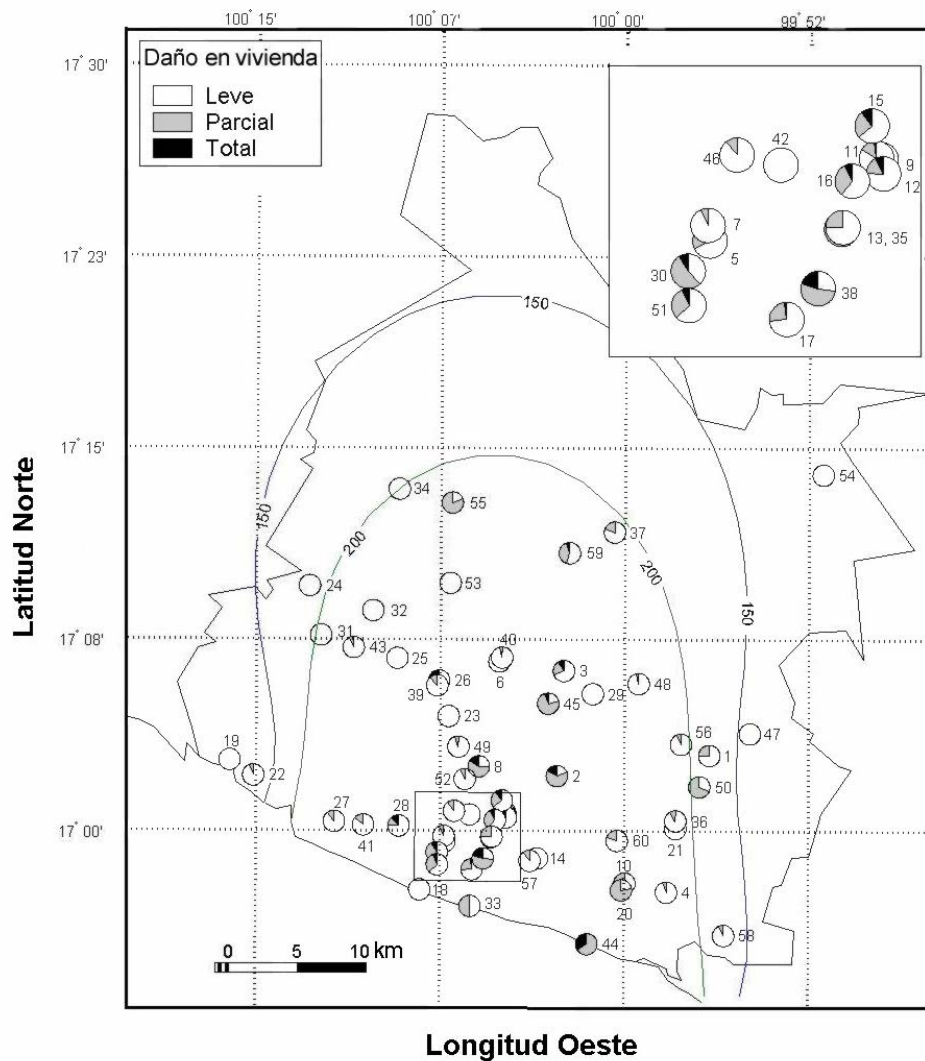


Fig. 4.2 Distribución de los niveles de daño por población

En las figuras 4.1 y 4.2 se muestra la proporción de viviendas afectadas con respecto al total y el tipo de daño por población, respectivamente. Los números que acompañan cada círculo sirven para identificar las poblaciones en la Tabla 4.1. Se debe señalar que sólo se ilustran aquellas poblaciones que aparecen en la cartografía publicada por INEGI.

4.2 GEOMETRÍA DE LA VIVIENDA

En el caso de la mampostería confinada, ampliamente usada en la zona urbana de la cabecera municipal, se identificó que está formada, principalmente, por tabiques de barro recocido hechos a mano, y confinados con castillos y dalas de concreto reforzado, cuyas dimensiones de su sección son las del muro. Se pudo observar una adecuada distribución de estos elementos de refuerzo donde los elementos verticales o castillos se colocan en los extremos y a separaciones máximas de, aproximadamente, 4 m. En el caso de dalas o cadenas intermedias, se usan a menor separación de la que establecen los reglamentos más actualizados (DDF, 1995), usándose en algunas ocasiones cadenas a media altura del entrepiso.

El sistema de piso y techo en las estructuras de mampostería confinada están resueltos, generalmente, por losas macizas de concreto reforzado apoyadas en los muros o en dalas sobre las aberturas (puertas y ventanas). En general, no se colocan castillos alrededor de las aberturas de ventanas. Estas construcciones de mampostería confinada tienen de uno a tres niveles, y la configuración, número de habitaciones y distribución arquitectónica son variables.

En el caso de la vivienda tipo rural de adobe y bajareque, se reconoció una configuración altamente repetitiva. Están compuestas por un cuerpo principal de un solo nivel, con forma rectangular en planta, y con dimensiones que van de 4×6 m a 5×8 m y sin muros divisorios intermedios (fig. 4.3). Por lo general, la abertura en forma de puerta se coloca en la parte central de los muros largos, y se cuenta con una o dos ventanas a los lados de la puerta.



Figura 4.3 Geometría de la vivienda típica de adobe

El espesor de muros, en las construcciones más antiguas (casas viejas en la cabecera municipal) es de 45 a 50 cm. Sin embargo, en Atoyaquillo todas las viviendas que se inspeccionaron (las de mayor daño y las de colapso) tenían espesores de muro de 30 cm mediante el uso de piezas de adobe de 7×30×45 cm. En todos los casos observados el aparejo de las piezas era cuatrapeado (hiladas recorridas media pieza con respecto a la hilada inferior), con el plano de las piezas horizontal (el espesor en dirección vertical). En el caso de los muros de 30 cm el espesor se da directamente con los 30 cm de las piezas.

El cerramiento arriba de las aberturas de puertas y ventanas se logra con vigas de madera, con longitudes de apoyo de entre 20 y 40 cm.

El sistema de techo también resulta tener una configuración repetitiva. Los techos en las viviendas tipo rural (adobe, bajareque, madera) son siempre a dos aguas, cargadas en la cumbre, o parteaguas, por una viga de madera que corre sobre el eje mayor de la construcción. Dicha viga se apoya en los muros cabeceros extremos y en apoyos intermedios aproximadamente a cada 2 a 3 m, por lo que puede haber de uno a tres apoyos intermedios. Estos apoyos intermedios consisten de una viga de madera apoyada en los muros largos, y con un puntal vertical de madera en el centro que transmite la carga concentrada de la viga de cumbre; por lo tanto, aunque aparentan ser armaduras triangulares, realmente se tiene un trabajo a compresión del puntal vertical y de flexión para la viga transversal (fig. 4.4).



Figura 4.4 Sistema de techo típico

Entre estas pseudo-armaduras, se apoyan vigas paralelas a las mismas, o listones, con separaciones de 60 cm en el caso de techos de teja, hasta 1 m o más cuando se usan techos de lámina acanalada (de metal, asbesto o cartón). Perpendicular a las vigas y pseudo-armaduras se apoyan largueros de tiras o listones de madera con separaciones de 40 cm hasta 1 m, según los casos explicados antes. En la mayoría de los casos se usa madera de sección rectangular de dimensiones comerciales (4×6, 4×4, 2×4, o 2×2 pulgadas); pero en algunos casos la techumbre se hace con troncos, y ramas obtenidos del lugar).

En muchos casos el sistema de techo se extiende 2 a 3 m hacia fuera apoyado en columnas de madera o en castillos de concreto, formando un pórtico. Las vigas de madera de los apoyos intermedios o pseudo-armaduras triangulares se apoyan directamente sobre las piezas de adobe, lo cual provocó algunos daños locales por la concentración de esfuerzos.

Los techos se recubren con teja de barro recocido, por lámina acanalada de asbesto, lámina metálica y lámina de cartón. Como una estimación cualitativa se puede hablar del uso de teja en un 65% de la vivienda de adobe, y el resto repartido entre los distintos tipos de lámina acanalada. En especial, la vivienda de bajareque tiene siempre techos ligeros de lámina acanalada. En uno de los

casos se observó la lámina de cartón sujeta a la madera del techo mediante clavos y corcholatas separados a cada 40 cm. No se observó ningún caso de losa de concreto en casas de adobe.

En el caso de la vivienda de bajareque, un arreglo típico es el uso de ramas aproximadamente rectas que se colocan unas verticalmente y otras horizontales, separadas a cada 10 cm aproximadamente. Las ramas son de aproximadamente 2 a 3 cm de diámetro y se refuerza este enramado con pequeños troncos de 10 cm de diámetro colocados verticalmente a cada 60 cm. La conexión entre elementos verticales y horizontales se realiza en general con clavos de acero. Es probable que también se amarren las ramas entre sí, en algunos casos. Estas retículas se llenan de lodo; se observaron espesores de 15 a 20 cm de espesor total (fig. 4.5). Las casas de bajareque siempre cuentan con techos ligeros que siguen un sistema similar al de los muros, con enramados.



Figura 4.5 Vivienda típica de bajareque (nótese el enramado en el muro cabecero)

En un trabajo realizado por Salgado y colaboradores, se estudiaron propiedades de la vivienda económica en el estado de Guerrero (Salgado et al., 1999). En dicho trabajo se recabaron datos estadísticos de las características geométricas de las viviendas. En la tabla 4.3 se presentan los resultados promedio para la región de Costa Grande que comprende los municipios de Atoyac de Álvarez, Benito Juárez, Coahuayutla de José María Izazaga, Coyuca de Benítez, José Azuela, Petatlán, Tecpan de Galeana y La Unión de Isidoro Montes de Oca.

Tabla 4.3 Características geométricas promedio de la vivienda en la región de Costa Grande (Salgado, 1999)

Material	Largo total, m	Ancho total, m	Altura menor, m	Altura mayor, m	Espesor de muro, m	Σ Muros en sentido corto, m	Σ Muros en sentido largo, m
Adobe	9.5	6.8	3.1	4.0	0.39	13.9	17.1
Bajareque	7.5	4.8	2.6	3.5	0.18	9.6	13.4

Según los datos de la referencia citada el área promedio de la vivienda es de 66 m² para el adobe y de 36 m² en las de bajareque, con una densidad de muros en cada dirección del 10% y del 6%, respectivamente.

4.3 DAÑOS OBSERVADOS EN LA VIVIENDA

En la cabecera municipal los daños se presentaron principalmente en las construcciones de adobe, tanto en las colonias de la periferia como en algunos casos aislados de construcciones de adobe en el centro de la población.

4.3.1 Vivienda de Adobe

Los principales tipos de daño en estructuras de adobe, que se ilustran en la figura 4.6, fueron:

- Caída de recubrimientos debido a la vibración, flexión y agrietamiento de los muros;
- Grietas verticales en las esquinas, provocado por la tendencia al volteo fuera de su plano de los muros;
- Caída o deslizamiento de tejas, en especial en la parte de la cumbrera de los techos;
- Agrietamientos inclinados por tensión diagonal en segmentos de muros, en muros cabeceros e incluso en muros largos;
- Otro tipo de agrietamientos en muros, como por ejemplo las grietas horizontales en la base de la parte triangular en los muros cabeceros, grietas sobre cerramientos, grietas verticales en la parte central de muros y grietas horizontales en la base de muros.
- Colapso de muros. En general fallaron por volteo los muros completos, ya sea muros cabeceros, o los muros largos;
- Daño local en el muro por el apoyo de las vigas de las pseudo-armaduras.

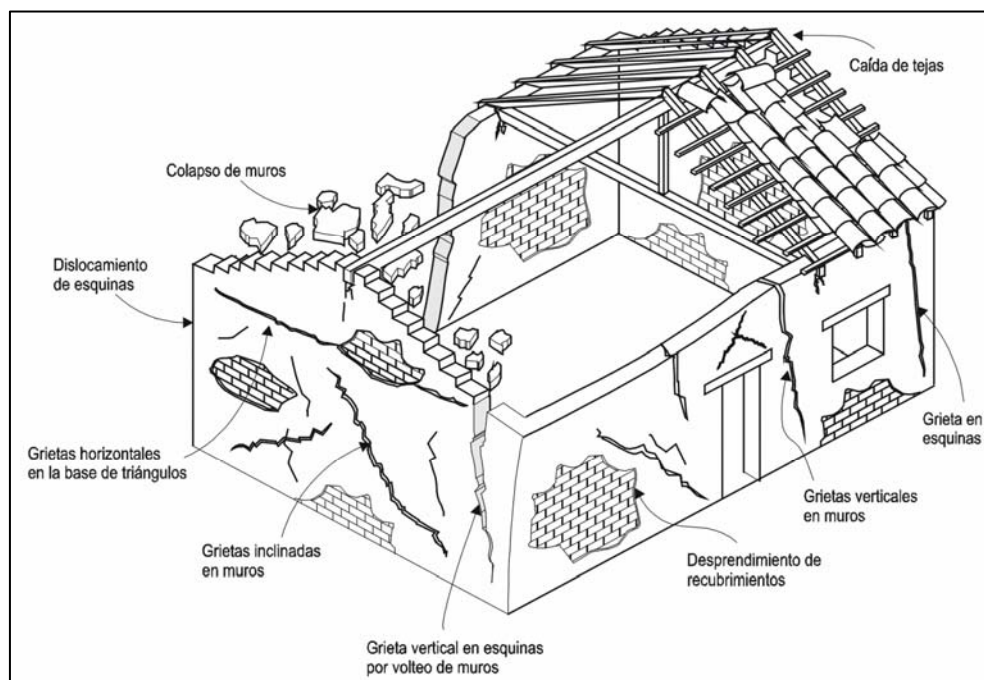


Figura 4.6 Daño típico observado en la vivienda de adobe

No se observó colapso de techos por sí mismo, sino más bien algunos colapsos del techo debido a que antes falló el muro de apoyo. Por lo mismo, no se observó corrimiento de vigas de madera, ya que éstas en general quedan embebidas en la última hilada de adobes.

El tipo de daño más frecuente fue la caída de recubrimientos (fig. 4.7). Esto podría considerarse como daño no estructural, sin embargo, fue un factor psicológicamente muy importante ya que generó temor y una total desconfianza en la seguridad de las viviendas. Los grandes trozos de recubrimiento de mortero pobre o yeso (40 ó 50 cm de lado) cayeron sobre las camas, utensilios de cocina, ropa, y demás enseres, lo que ocasionó que muchos pobladores recurrieron a los albergues, o acamparan en áreas públicas.



Figura 4.7 Daño en los muros y caída de recubrimiento

La adherencia de los recubrimientos contra el adobe es muy pobre, ya que, aunque éste quede bien adherido al material superficial del adobe, se desprende una capa de este material térreo que queda pegada al recubrimiento. Esta situación se agrava por la falta de mantenimiento, por la baja calidad del recubrimiento y por la humedad que pueda existir en los muros. En un caso específico, en Coyuca de Benítez, uno solo de los muros de una vivienda tenía problemas de humedad atribuibles a las instalaciones sanitarias de la casa vecina; este muro perdió todo el aplanado, mientras que a los otros muros, que estaban secos, se les desprendió muy poco recubrimiento (fig. 4.8).



Figura 4.8 Desprendimiento del recubrimiento a) muro con humedad, b) muro seco de la misma vivienda

Los otros tipos de daño más comunes fueron el agrietamiento vertical en las esquinas de las viviendas, en la unión de muros longitudinales con transversales, y la caída o desacomodo de tejas. Este tipo de daño se ha visto constantemente en vivienda de adobe sometida a sismo, y se ha verificado en estudios analíticos y experimentales. Flores y otros han hecho un recuento de estos estudios y visitas de campo, donde se concluye que es uno de los principales daños y el inicio del colapso de los muros por volteo (Flores *et al.*, 2001).



Figura 4.9 Grietas verticales en esquinas

La caída de las tejas fue otro tipo de daño frecuente que se explica por la falta de adherencia y anclaje de las piezas y a los niveles de aceleración horizontal y vertical en estas comunidades cercanas al epicentro. Este tipo de daño también podría considerarse no estructural, pero sin lugar a dudas pone en riesgo la seguridad de los habitantes de una vivienda durante el evento sísmico, representando posteriormente un problema de habitabilidad. Se debe mencionar que durante los días siguientes al evento se presentaron lluvias.

La parte de la techumbre de teja que principalmente pierde las piezas es una hilera longitudinal en la cumbrera. Es posible suponer que, ya que las tejas de la cumbrera no tienen otras piezas sobre ellas, es aquí donde se inicia la caída de las tejas al saltar debido a las aceleraciones verticales. También se pudo observar evidencia de que grupos de tejas deslizaron y cayeron a los lados de las viviendas.

Se presentaron varios casos de colapso parcial o total. En general, los colapsos se presentaron por el volteo completo de los muros fuera de su plano. Esta falla se inicia por el agrietamiento vertical en las esquinas que deja a los muros aislados vibrando fuera de su plano, además de una contribución por el coceo de los techos empujando horizontalmente hacia fuera en la parte superior de los muros largos.

En las figuras 4.10 y 4.11 se muestran casos de colapsos parciales y totales. Estas fotos son de viviendas de la comunidad de Atoyaquillo (ver fig.1.2). La vivienda en esta comunidad se encontró particularmente vulnerable, ya que los muros contaban con espesores de tan sólo 30 cm, el cual es un espesor cercano al mínimo que se usa en viviendas de adobe en todo el país, especialmente considerando que la zona costera de Guerrero y de estados vecinos se encuentra entre las de más alto peligro sísmico de México. Como caso especial, la vivienda de la figura 4.6 b) estaba recién terminada y todavía había cierta humedad en las piezas. Esta vivienda contaba con unas dalas de concreto en la parte superior de los muros, pero se trataba de concreto simple, sin ningún refuerzo. Se considera que de haber tenido un par de barras de refuerzo longitudinal bien ancladas en las intersecciones no hubiera colapsado el muro.



Figura 4.10 Colapsos parciales y totales



Figura 4.11 Colapsos de muros

En un estudio sobre el comportamiento dinámico de las viviendas de adobe (Bazán, *et al.*, 1978) se encontró que el modo dominante de vibrar produce momentos de volteo fuera del plano de los muros, principalmente los muros largos, con los mayores desplazamientos en la parte central superior. Este movimiento es restringido por los muros transversales mientras no se alcance la resistencia del material en las esquinas. En el estudio se determinó que los mayores momentos flexionantes se generan en los extremos del muro en la parte superior hasta que se produce el agrietamiento por la debilidad a esfuerzos de tensión del adobe, grieta que progresa en las esquinas de arriba hacia abajo.

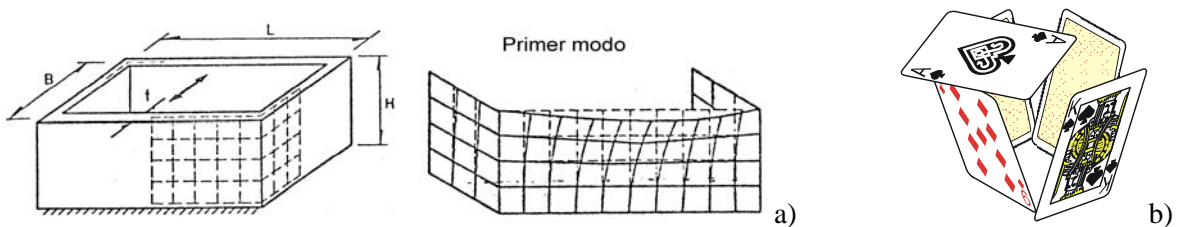


Figura 4.12 a) Modelo de análisis de elemento finito y primer modo de vibrar; b) Idealización del colapso por falta de liga entre los muros transversales

Una manera sencilla de describir el efecto de la falta de liga entre muros sería mediante una construcción hecha con cinco naipes. Ante un ligero movimiento en la base ocurre el colapso porque no hay liga entre ellos (fig. 4.12.b). El agrietamiento de las esquinas libera a los muros de la restricción de los muros perpendiculares y estos oscilan libremente tendiendo a voltearse fuera de su plano, lo cual frecuentemente resulta en el colapso de la estructura. Para evitar este mecanismo de falla es necesario ligar los muros. Una opción es emplear elementos de concreto reforzado como dalas, o dalas y castillos, o bien mallas de acero y recubrimiento de mortero. La finalidad de estos refuerzos es mantener unidos a los muros.

Se observaron también otros tipos de agrietamientos, como los agrietamientos inclinados por tensión diagonal y grietas horizontales debido a flexiones de volteo de los muros fuera de su plano. En la figura 4.13 se presenta un ejemplo de lo anterior.



Figura 4.13 Agrietamientos horizontales e inclinados (capilla de Atoyaquillo)

El colapso de los techos se asoció al colapso de los muros de soporte. En la figura 4.14 se muestra un ejemplo.



Figura 4.14 Colapso de techos por la caída de muros de soporte

Finalmente se observaron daños locales como fue el aplastamiento del adobe de apoyo de las vigas de pseudo-armaduras de los sistemas de techo (fig. 4.15).



Figura 4.15 Daño local en el apoyo de las vigas del sistema de techo

4.3.2 Vivienda de Bajareque

En las viviendas de bajareque se observaron daños locales y un colapso parcial (figura 4.16). En general, se tuvieron menos daños en estas estructuras que en las de adobe, lo cual se puede explicar por el menor peso y, por lo tanto, menor masa inercial de estos elementos, además de la posibilidad de ligar mejor las conexiones entre muros y un cierto grado de resistencia a la tensión proporcionado por las ramas. Sin embargo, también se observaron daños y colapsos en éstos, que pueden ser atribuibles, en los casos observados, a una conexión defectuosa entre muros y/o entre ramas y pobre mantenimiento.



Figura 4.16 Daños de estructuras de bajareque

V EDIFICIOS DE USO COMERCIAL

Con respecto a otros tipos de estructuras distintas de las viviendas tipo rural, sólo se informó del caso del Mercado Municipal de Coyuca de Benítez. Posee una estructura de planta rectangular, planta baja y un nivel para el primer piso. Este primer piso sólo se extiende por las crujías de la periferia del mercado por lo que presenta un gran espacio abierto. El techo, que cubre toda la extensión, está resuelto con losa de vigueta y bovedilla y firme de concreto apoyados en vigas de concreto reforzado. El sistema de techo se apoya en columnas de concreto de 45×45 cm, que forman marcos con las trabes de 25×70 cm. En la figura 5.1 se muestra esquemáticamente la planta del edificio.

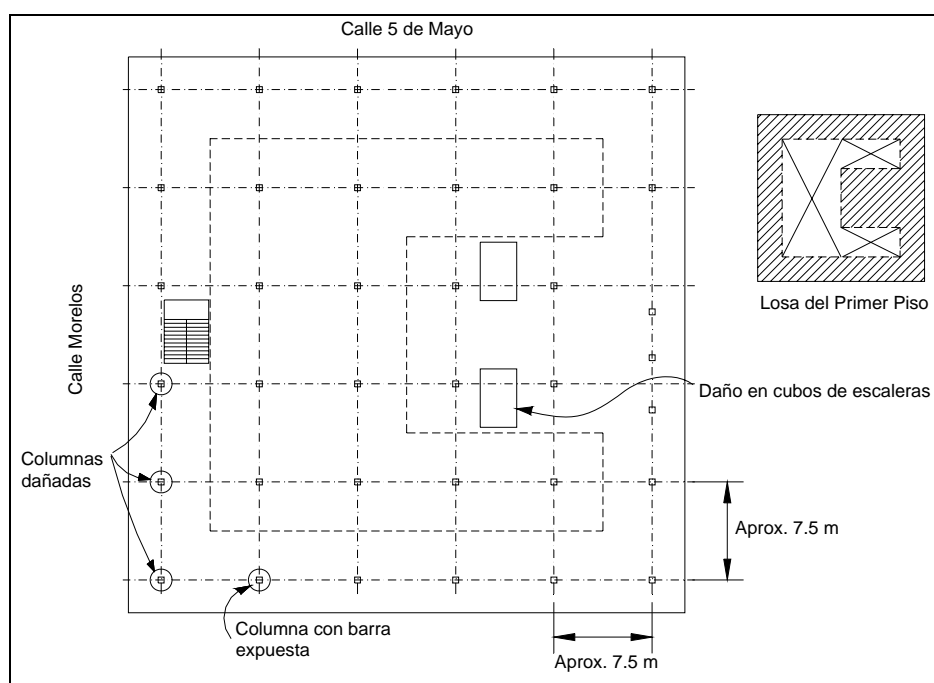


Figura 5.1 *Planta del Mercado Municipal*

Solamente fue posible la inspección visual del edificio por lo que no se contó con planos estructurales. De esta inspección se pudo deducir aproximadamente el sistema usado. Aparentemente el sistema de piso del nivel superior se resolvió con una losa de concreto apoyada perimetralmente en muros de mampostería de la planta baja. La estructura de concreto es relativamente flexible, por lo que las acciones laterales como en un sismo afectan severamente a los muros de mampostería.

Este movimiento del supuesto sistema estructural del techo queda restringido por la losa y muros de la planta baja pero solamente en los marcos de la periferia. Esta restricción, más la restricción impuesta en las columnas por un mobiliario de mampostería y mesa de losa de concreto en los puestos del nivel superior, dejaron a las columnas de la periferia trabajando como columnas

cortas. Efectivamente, los tramos superiores de las columnas de periferia marcadas en la figura 5.1 tuvieron agrietamientos inclinados por tensión diagonal y grietas inclinadas en la zona de las esquinas de las columnas causadas por problemas de cortante y adherencia. Adicionalmente se presentó el aplastamiento incipiente de las esquinas de algunas de estas columnas evidenciando una falla por flexocompresión biaxial y por adherencia del acero de refuerzo. En la figura 5.2 se muestran las columnas dañadas.



Figura 5.2 a) Columnas cortas en los marcos periféricos del mercado; b) Barra expuesta

En la misma figura 5.2.b se muestra una barra expuesta de 32 mm de diámetro (del número 10), y se observa que la separación de estribos es de 30 cm. Esta separación de estribos se encuentra totalmente fuera de las actuales especificaciones para columnas de concreto, tanto para refuerzo por cortante (que debería ser como máximo de 20 cm) como para confinamiento del núcleo (máximo 10 cm).

Indudablemente se tuvieron daños en los muros de mampostería de piezas de barro extruido, que no cuentan con ningún refuerzo. Las piezas son doble hueco circular de $6 \times 12 \times 24$ cm. Los cubos para escaleras de acceso a la azotea fallaron inmediatamente cuando el sistema de techo se apoyó contra ellos (fig. 5.3), así como los muros de planta baja que tuvieron que soportar las fuerzas laterales transmitidas por las mencionadas columnas de los marcos de periferia.

A diferencia de la vivienda rural, que es esencialmente de autoconstrucción, este tipo de estructuras sí debe responder a un diseño profesional, especialmente considerando el alto número de vidas que dependen de su estabilidad y la zona sísmica en donde se encuentra (costa de Guerrero).



Figura 5.3 Daño en los muros de mampostería: a) Cubos de acceso a la azotea; b) Muro de planta baja

Con base en la inspección visual de la estructura se considera que no se encuentra en peligro inminente ante cargas gravitacionales. Sin embargo, debido a la configuración estructural usada y a la evidencia de defectos en el detallado sismorresistente, la estructura es altamente vulnerable ante la ocurrencia de un sismo de mayor magnitud. Es altamente recomendable realizar una evaluación profesional de las condiciones de seguridad estructural, aplicando los coeficientes sísmicos y demás requisitos de la reglamentación vigente aplicable a la zona.

En su caso, el sistema de rehabilitación deberá ser simétrico y adecuadamente distribuido en la planta y, en general, restringir los desplazamientos laterales y resistir las fuerzas horizontales del sismo de diseño. Los aspectos de una adecuada conexión con los elementos existentes, así como la revisión y adecuación de la cimentación por las nuevas cargas que transmitirá la rehabilitación, deberán ser adecuadamente estudiados.

VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del análisis y evaluación de los efectos del sismo de Coyuca de Benítez del 7 de octubre de 2001 aquí presentados, se derivan algunas conclusiones y recomendaciones que se exponen a continuación.

6.1 CONCLUSIONES

Aunque el epicentro del sismo del 7 de octubre del 2001 se localizó en la región conocida como la Brecha Sísmica de Guerrero, el evento no significó la liberación de energía acumulada en dicho sector, al que se le reconoce un alto potencial. La ocurrencia de este evento está asociada a una falla de tipo normal, de poca profundidad y no directamente relacionada con la zona de contacto entre placas tectónicas.

Este evento no fue considerado como precursor del sismo de gran magnitud que se espera de la brecha mencionada.

El sismo, aunque de magnitud moderada, fue percibido en un amplio radio geográfico, que incluyó la ciudad de México. Fue sentido con mayor fuerza en el municipio de Coyuca de Benítez debido a la cercanía del epicentro y a la escasa profundidad de la fuente.

En la cabecera municipal se observaron valores de aceleración altos, que en buena medida explican los daños en las construcciones. Sin embargo, a pocos kilómetros de la zona epicentral, los niveles de aceleración disminuyeron significativamente haciendo que el sismo sólo fuera sentido levemente.

Los daños solamente fueron observados en la región epicentral, concentrándose esencialmente en la vivienda de bajo costo y con deficiencias en el mantenimiento.

El total de daños ascendió a cerca de 30 millones de pesos, autorizados por el FONDEN para reparación de viviendas. Los datos disponibles indican un total de 3930 viviendas dañadas, 70% con daño leve, 26% con daño moderado y 4% con daño severo. Asimismo, se contabilizaron 3000 damnificados.

De acuerdo con datos proporcionados por SEDESOL, los poblados con mayor afectación fueron los más cercanos al epicentro, Coyuca con 13% del total de daños, Tixtlancingo con 10.5%, Aguas Blancas con 8.9%, San Salvador de las Pozas con 5.5% y Tepetixtla con 4%.

Los efectos destructivos más relevantes se registraron en la vivienda rural de adobe y bajareque. En la zona epicentral el daño en vivienda de adobe fue notorio. En general, las estructuras construidas con materiales y diseños modernos tuvieron un buen comportamiento. Sin embargo, un caso particular de daño en una estructura de concreto reforzado fue el del mercado municipal, el cual se determinó que no cuenta con una estructuración ni detallado adecuados para resistir un sismo de gran magnitud.

Se tienen alrededor de 160 viviendas con colapso o daño severo que, representan el 1% de la vivienda del municipio. No obstante, se considera factible la rehabilitación de la vivienda con daños moderados y leves mediante técnicas económicas y que no requieren un alto grado de especialización.

6.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda promover la rehabilitación de las viviendas afectadas y, en lo posible, establecer una campaña permanente de refuerzo de toda la vivienda rural de materiales como adobe y bajareque ya que resulta altamente vulnerable. Cabe recordar que en la costa del Pacífico, entre los estados de Jalisco y Chiapas, se tiene la zona sismogénica más importante de México, donde la ocurrencia de eventos con magnitudes superiores a 7 es altamente probable.

Las construcciones de mayor importancia, tales como clínicas, hospitales, escuelas, oficinas públicas, etc., que deben mantenerse en funcionamiento en caso de desastre, deben ser revisadas estructuralmente por especialistas, siguiendo la reglamentación vigente. En particular, el mercado municipal requiere de una evaluación y refuerzo inmediatos.

En el caso de las viviendas se tiene la posibilidad de introducir mejoras en las prácticas constructivas y en el tipo de materiales utilizados. Una cabal aplicación de los reglamentos vigentes, y sobre todo un control más estricto de las autoridades en esta materia permitiría mitigar los efectos en la población de futuros fenómenos de la magnitud del referido y superiores.

Adicionalmente, se deben desarrollar programas de escala controlada (programa piloto) en comunidades rurales en los que participen autoridades, universidades y colegios de profesionistas locales. El programa debería contemplar la caracterización y análisis de vulnerabilidad, la reducción de la misma mediante rehabilitación de la vivienda, así como proyectos específicos de capacitación y evaluación de la población que participará en las actividades de construcción.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

Alcocer S.M., Aguilar G., Flores L., Bitrán D., Durán R., López-Bátiz O.A., Pacheco M.A., Reyes C., Uribe C.M., Mendoza M.J. (1999), “El sismo de Tehuacán del 15 de junio de 1999”, Informe Interno, IEG/02/99, CENAPRED, julio, 159 pp.

Bazán E., Padilla M., Meli R. (1978), “Seguridad de casas de adobe ante sismos. Estudios analíticos”; Informe interno, Instituto de Ingeniería, UNAM, 63 pp.

Bitrán D., Acosta L., Eslava H., Gutiérrez C., Salas M.A. y Vázquez T. (2002) “Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2001”, Centro Nacional de Prevención de Desastres, Serie Impacto Socioeconómico de los Desastres en México, Vol. 3, 102 pp.

CENAPRED. (2001). Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México-Atlas Nacional de Riesgos de la República Mexicana. 225 pp.

Comisión Federal de Electricidad (CFE, 1993), “Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Sismo”, Comisión Federal de Electricidad, México, D.F.

Departamento del Distrito Federal (DDF, 1995), “Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería”, Gaceta Oficial del Departamento del D.F., 27 de febrero, 16 pp.

Flores, L.E., M.A. Pacheco y C. Reyes (2001) “Algunos estudios sobre el comportamiento y rehabilitación de la vivienda rural de adobe,” Informe IEG/03/01, CENAPRED, México, D.F., marzo, 123 pp.

Fundación ICA (1988), “Experiencias derivadas de los sismos de septiembre de 1985”, Fundación ICA y Editorial Limusa, México, 133 pp.

Kostoglodov, V., y J. Pacheco. Cien Años de Sismicidad en México. Instituto de Geofísica, 1999.

Meli, R. (1998). “Ingeniería estructural de los edificios históricos”, Fundación ICA, 220 pp.

Nishenko S.P., and S. K. Singh. Conditional probabilities for the recurrence of large and great interplate earthquakes along the Mexican subduction zone. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **77**, 2096-2114, 1987.

Salgado A., Domínguez L., Castrejón M., Arroyo M., Sánchez D., Fabián S., Daza A., Tumalán A., Jiménez M., Ibarias H., Álvarez S. (1999), “Estudio estadístico de las propiedades sismorresistentes de la vivienda económica en el estado de Guerrero”, Memorias del XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, 17 a 20 de Noviembre, Morelia, Mich., Vol. II, pp. 1002-1007.

Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas (SAHOP, 1977), “Cartilla de reconstrucción para vivienda de adobe”, 76 pp.

Singh, S.K. y M. Ordaz (1994). “ Sismicidad y movimientos fuertes en México: Una visión actual”. Cuadernos de Investigación del CENAPRED No. 18. 61 pp.



Coordinación General de Protección Civil
Centro Nacional de Prevención de Desastres
Av. Delfín Madrigal No.665,
Col. Pedregal de Sto. Domingo,
Deleg. Coyoacán,
México D.F., C.P. 04360
www.cenapred.unam.mx