



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**FRAGILIDAD SÍSMICA EN
VIVIENDAS DE MEDIANA ALTURA
DE LA CIUDAD DE MÉXICO A PARTIR
DE LOS DAÑOS OBSERVADOS POR
EL SISMO DEL 19S Mw7.1**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Gresli Rubí Casimiro Velásquez

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Miguel Ángel Jaimes Téllez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

RECONOCIMIENTOS

A la máxima casa de estudios, la Universidad Nacional Autónoma de México, mi alma mater, con la cual tengo una deuda infinita, pues me ha acogido todos estos años abriéndome las puertas de sus aulas para mi formación académico, profesional y personal.

A la honorable Facultad de Ingeniería, mi segundo hogar, recinto del conocimiento, valor y amor por la ingeniería. Por permitirme desarrollar mi pasión por la ingeniería civil.

Al Instituto de Ingeniería, por formar parte de los los proyectos de investigación colaborando con los investigadores que residen en el mismo.

Al Dr. Miguel Ángel Jaimes Téllez, por guiarme en todo este tiempo, por toda su paciencia, sus enseñanzas, su tolerancia y por la confianza que he recibido de él desde el momento que me permitió trabajar con él. Agradezco todo su conocimiento y colaboración con este trabajo.

Al numeroso grupo de profesores, que han influenciado en mi trayectoria académica, agradezco sus múltiples enseñanzas de valores, de exigencia, de responsabilidad y disciplina, al igual que, la motivación de esforzarme para concluir mis metas.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por tantas veces que necesité de él y ahí estuvo. Por darme la oportunidad de vivir grandes experiencias a lo largo de mi vida como estudiante, por ponerme no donde yo quería estar, si no donde debía estar. Gracias Dios por las bendiciones hasta ahora que me has dado y por permitir que sea parte de la Ingeniería Civil mexicana.

A mi gran familia, sin duda alguna mi mayor motor. Agradezco a mi mamá la Sra. María Velásquez Basaldúa, la mujer que me enseñó a insistir, persistir y nunca desistir. Gracias mamita por toda tu paciencia y amor, por todos estos años que has fungido como la mejor mamá y papá del mundo. Por las incontables noches de tarea que fuiste mi compañera con un tecito lleno de amor. Gracias por la educación, los valores y consejos con los que me has guiado. Te estaré infinitamente agradecida porque sé que muchas veces te quedaste sin nada para dármelo todo.

Agradezco a mis hermanos y hermanas, quienes me han cuidado desde niña. Les agradezco siempre motivarme y exigirme ser la mejor, gracias por sus múltiples consejos y guiarme siempre por el mejor camino. Gracias por enseñarme el valor de la familia, por todo su tiempo, ayuda y paciencia a lo largo de toda mi trayectoria escolar. A mi cuñada que ha estado conmigo desde niña y me ha apoyado en todo momento. A mis sobrinos, todos me han enseñado muchas cosas, ser siempre amiga, compañera, confidente, y algunas ocasiones dejar de ser tía para ser mamá, gracias por toda su paciencia en estos últimos años y por considerarme siempre. No me resta más que agradecer a todos, su compañía, amor, comprensión, ayuda y todos esos momentos en los que sólo estuvieron para mí sin esperar nada a cambio.

A mis amigos, de todo este camino, que sin duda alguna, han hecho de mí una mejor persona, que me inspiran continuamente y me motivan a nunca darme por vencida. Me gustaría agradecer en especial a mis amigos y compañeros de la vida universitaria, quienes compartieron conmigo tantos momentos buenos y difíciles, de alegrías y algunas veces de tristezas, ansiedad y estrés. Les agradezco cada uno de sus consejos, toda su paciencia y sus palabras de motivación para esforzarme cada vez más. Agradezco toda su ayuda, en mis momentos más difíciles. Gracias por toda su comprensión y confianza, y sobre todo por toda su compañía en este trayecto. Sin duda alguna, gracias por compartir estos 5 años tan intensos a mi lado; siempre estarán en mi corazón.

A la vida por poner las cosas justo a su tiempo, por hacerme coincidir con personas tan excepcionales como las que conocí toda mi trayectoria, por todos esos momentos de temor, duda o tristeza porque de ellos he aprendido a crecer y a madurar.

A mí, por las incontables veces que creí no poder y lo logré, por todas las veces que me sentía perdida y encontré el camino, me agradezco todo el coraje para intentar cambiar y crecer, me agradezco todo el esfuerzo que hice todas esas noches de no dormir, por esas arduas horas de trayecto de casa a la escuela todos los días. Me agradezco porque me he demostrado todas las cosas que puedo hacer pese a todas las dificultades. Y sobre todo por tener el ímpetu de siempre aprender y aprender. Esta es una de las metas que me fijé desde niña, y por fin, lo cumplí.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Breve descripción de daños en sismos recientes de la Ciudad de México.....	1
2. CARACTERIZACIÓN DE LA ACCIÓN SÍSMICA DE ENTRADA.....	5
2.1 Zonificación sísmica	5
2.2 Intensidades espectrales registradas.....	7
2.3 Cálculo de intensidad sísmica en sitios no instrumentados	12
3. CASO DE ESTUDIO: VIVIENDAS DAÑADAS EN LA CDMX	14
3.1 Vulnerabilidad de la Ciudad de México	14
3.2 Definición de la zona de estudio.....	15
3.3 Levantamiento estadístico de daños	17
3.3.1 Metodología	17
3.4 Localización de viviendas dañadas	18
3.5 Periodos dominantes del suelo	21
3.6 Clases de vivienda	23
3.7 Periodos fundamentales de la estructura	24
3.8 Estados de daño.....	25
3.9 Análisis estadístico para intensidades espectrales.....	35
3.10 Edificios con colapso	43
4. CÁLCULO DE FUNCIONES DE FRAGILIDAD	46
4.1 Fragilidad Sísmica.....	46
4.2 Método empírico	48
4.3 Funciones de fragilidad	49
4.4 Variables consideradas	50
4.5 Obtención de las curvas de fragilidad.....	50
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIONES	55
6. CONCLUSIONES	58
Bibliografía.....	59
Anexo A: Estados de Daño.....	62

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1. ZONIFICACIÓN SÍSMICA DE LA CIUDAD DE MÉXICO (NTC-SISMO, 2004).....	6
FIGURA 2.2. ESPECTRO DE RESPUESTA EN ESTACIÓN CU EN SUELO FIRME, PARA LOS SISMOS DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 1985 Y 2017 ($\xi = 5\%$).....	8
FIGURA 2.3. ACCELERACIONES EXPERIMENTADAS EN LAS AZOTEA DE LOS EDIFICIOS CON DIFERENTES ALTURAS PARA LA ZONA SUELO FIRME ALEDAÑAS A LA ESTACIÓN CU.....	8
FIGURA 2.4. ESPECTROS DE RESPUESTA DEL MOVIMIENTO REGISTRADO EN LA ESTACIÓN CU DURANTE EL SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 2017 ($\xi = 5\%$), EN COMPARACIÓN CON EL ESPECTRO DE DISEÑO DEL RCDF Y SUS NTCDS (2017).....	9
FIGURA 2.5. ESPECTRO DE RESPUESTA EN TERRENO BLANDO, ESTACIONES SCT, PARA LOS SISMOS DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 1985 Y 2017 ($\xi = 5\%$).....	10
FIGURA 2.6. ACCELERACIONES EXPERIMENTADAS EN LAS AZOTEA DE LOS EDIFICIOS CON DIFERENTES ALTURAS PARA LA ZONA SUELO BLANDO ALEDAÑAS A LA ESTACIÓN SCT.....	10
FIGURA 2.7. ESPECTROS DE RESPUESTA DEL MOVIMIENTO REGISTRADO EN LA ESTACIÓN CH84 DURANTE EL SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 2017 ($\xi = 5\%$), EN COMPARACIÓN CON LOS ESPECTROS DE DISEÑO DEL RCDF Y SUS NTCDS (2017) ...	11
FIGURA 2.8. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL EN TODA LA CIUDAD CONSIDERANDO EL SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 2017, SE MUESTRAN ACCELERACIÓN MÁXIMA DEL TERRENO Y LOS TRIÁNGULOS REPRESENTAN LAS 75 ESTACIONES ACCELEROMÉTRICAS DE LOS REGISTROS CONSIDERADOS.....	13
FIGURA 3.1. VISTA GENERAL DE LA PLATAFORMA CDMX.....	16
FIGURA 3.2. UBICACIÓN DE LOS EDIFICIOS DE VIVIENDA CON DAÑOS OBSERVADOS DEBIDO AL SISMO DEL 2017. LOS CÍRCULOS NARANJAS REPRESENTAN LAS 405 VIVIENDAS DE LA MUESTRA CON DAÑOS. EL MAPA CONTIENE DE FONDO LA DISTRIBUCIÓN DEL PERIODO DOMINANTE DEL SUELO DE LA CIUDAD DE MÉXICO.....	19
FIGURA 3.3. DISTRIBUCIÓN DE LAS 405 VIVIENDAS EN LAS 16 ALCALDÍAS DE LA CIUDAD DE MÉXICO A) DISTRIBUCIÓN DE LOS EDIFICIOS Y EL PORCENTAJE ACUMULADO, B) PORCENTAJE DE DAÑOS EN LAS 8 ALCALDÍAS MÁS AFECTADAS C) COLONIAS QUE PRESENTARON MAYOR PORCENTAJE DE LOS DAÑOS SEVEROS.....	20
FIGURA 3.4. DISTRIBUCIÓN Y PORCENTAJE ACUMULADO DE LOS EDIFICIOS EN FUNCIÓN DEL PERIODO DOMINANTE DEL SUELO	22
FIGURA 3.5. DISTRIBUCIÓN Y PORCENTAJE ACUMULADO DE LOS EDIFICIOS POR CLASES DE VIVIENDA.....	23
FIGURA 3.6. DISTRIBUCIÓN Y PORCENTAJE ACUMULADO DE LOS EDIFICIOS EN FUNCIÓN DEL PERIODO FUNDAMENTAL DE LA ESTRUCTURA.....	24
FIGURA 3.7. <i>DS1</i> - EDIFICIO BJU32_2017 NO PRESENTÓ DAÑO, A EXCEPCIÓN DE FISURAS EN LOS MUROS DE ALGUNOS NIVELES (IMAGEN OBTENIDA DE HTTPS://BIT.LY/36ES7Y1).....	26
FIGURA 3.8. <i>DS2</i> - EDIFICIO BJU55_2017 SIN DAÑO ESTRUCTURAL, AUNQUE SE OBSERVARON TRABAJOS DE REPARACIÓN EN VARIOS DE SUS MUROS EXTERIORES (IMAGEN OBTENIDA DE HTTPS://BIT.LY/2P1BLBU).....	27
FIGURA 3.9. <i>DS3</i> - EDIFICIO BJU37_2017 PRESENTÓ DAÑO ESTRUCTURAL, LO QUE CONDUJO A SU APUNTALAMIENTO PARA UNA REHABILITACIÓN Y REFORZAMIENTO DEL EDIFICIO (IMAGEN OBTENIDA DE HTTPS://BIT.LY/3628PU3).....	28
FIGURA 3.10. <i>DS4</i> - BJU34_2017 TUVO DAÑOS TAN SEVEROS QUE AMERITÓ SU DEMOLICIÓN (IMAGEN OBTENIDA DE HTTPS://BIT.LY/2NB9AP9).....	29
FIGURA 3.11. <i>DS5</i> - EDIFICIO BJU66_2017 COLAPSÓ DURANTE EL SISMO (2017) (IMAGEN OBTENIDA DE HTTPS://BIT.LY/39xBsXQ).....	30
FIGURA 3.12. DISTRIBUCIÓN Y PORCENTAJE ACUMULADO DE LAS VIVIENDAS POR SU ESTADO DE DAÑO.....	31
FIGURA 3.13. CLASIFICACIÓN DEL NÚMERO DE VIVIENDAS DE ACUERDO CON SU ASIGNACIÓN DEL ESTADO DE DAÑO EN FUNCIÓN DE SU NÚMERO NIVELES.....	32

FIGURA 3.14. DISTRIBUCIÓN Y PORCENTAJE ACUMULADO DE LOS ESTADOS DE DAÑO EN FUNCIÓN DE LA CLASE DE VIVIENDA A) CLASE C1, B) CLASE C2, C) CLASE C3, D) CLASE C4	34
FIGURA 3.15. HISTOGRAMA DE DISTRIBUCIÓN Y PORCENTAJE ACUMULADO DE LOS VALORES DE ACELERACIÓN ESPECTRAL, SA, EXPERIMENTADOS POR LAS ESTRUCTURAS	36
FIGURA 3.16. LOCALIZACIÓN DE LAS VIVIENDAS DAÑADAS LUEGO DEL SISMO DEL 19S DEL 2017. EL MAPA CONTIENE DE FONDO LA DISTRIBUCIÓN DE LOS VALORES DE ACELERACIÓN ESPECTRAL, SA, QUE EXPERIMENTARON LOS EDIFICIOS. LOS CÍRCULOS REPRESENTAN LOS EDIFICIOS DAÑADOS.....	37
FIGURA 3.17. DISTRIBUCIÓN Y PORCENTAJE ACUMULADO DE LOS VALORES DE ACELERACIÓN ESPECTRAL, SA, EXPERIMENTADAS POR LOS EDIFICIOS A) CLASE C1, B) CLASE C2, C) CLASE C3	38
FIGURA 3.18. DISTRIBUCIÓN Y PORCENTAJE ACUMULADO DE LOS VALORES DE ACELERACIÓN ESPECTRAL, SA, EXPERIMENTADAS POR LOS EDIFICIOS DE LA CLASE C1; A) DS1, B) DS2, C) DS3, D) DS4 Y E) DS5	39
FIGURA 3.19. DISTRIBUCIÓN Y PORCENTAJE ACUMULADO DE LOS VALORES DE ACELERACIÓN ESPECTRAL, SA, EXPERIMENTADAS POR LOS EDIFICIOS DE LA CLASE C2; A) DS1, B) DS2, C) DS3, D) DS4 Y E) DS5	40
FIGURA 3.20. DISTRIBUCIÓN Y PORCENTAJE ACUMULADO DE LOS VALORES DE ACELERACIÓN ESPECTRAL, SA, EXPERIMENTADAS POR LOS EDIFICIOS DE LA CLASE C3; A) DS1, B) DS2, C) DS3, D) DS4 Y E) DS5	41
FIGURA 3.21. DISTRIBUCIÓN DE LOS ESTADOS DE DAÑO DE ACUERDO CON LOS VALORES DE SA QUE EXPERIMENTARON A) CLASE 1, B) CLASE 2, C) CLASE 3.....	42
FIGURA 3.22. DISTRIBUCIÓN DE LOS 26 EDIFICIOS COLAPSADOS Y EL PORCENTAJE PRESENTADO EN 5 ALCALDÍAS DONDE SE CONCENTRARON LOS COLAPSOS	43
FIGURA 3.23. UBICACIÓN DE LOS EDIFICIOS DE VIVIENDA CON DAÑOS OBSERVADOS DEBIDO AL SISMO DEL 2017, LOS CÍRCULOS ROSAS REPRESENTAN LAS 26 VIVIENDAS QUE SUFRIERON COLAPSO DURANTE EL EVENTO SÍSMICO	44
FIGURA 3.24 DISTRIBUCIÓN DE LOS EDIFICIOS COLAPSADOS Y PORCENTAJE ACUMULADO A) PERIODO DOMINANTE DEL SUELO, B) VALORES DE ACELERACIONES ESPECTRALES EXPERIMENTADAS, C) NÚMERO DE NIVELES.....	45
FIGURA 4.1 EJEMPLOS DE CURVAS DE FRAGILIDAD PARA CUATRO ESTADOS DE DAÑO	48
FIGURA 4.2 CURVAS DE FRAGILIDAD QUE AJUSTAN LOS DATOS OBSERVADOS (CÍRCULOS, TRIÁNGULOS Y CUADRADOS). CLASE C1, VIVIENDAS DE 1 A 2 NIVELES.....	52
FIGURA 4.3 CURVAS DE FRAGILIDAD QUE AJUSTAN LOS DATOS OBSERVADOS (CÍRCULOS, TRIÁNGULOS Y CUADRADOS). CLASE C2, VIVIENDAS DE 3 A 5 NIVELES.....	53
FIGURA 4.4 CURVAS DE FRAGILIDAD QUE AJUSTAN LOS DATOS OBSERVADOS (CÍRCULOS, TRIÁNGULOS Y CUADRADOS). CLASE C3, VIVIENDAS DE 6 A 10 NIVELES	54

RESUMEN

En este estudio se presenta el cálculo de funciones de fragilidad sísmica en viviendas de la Ciudad de México, a través de la recopilación de daños menores hasta colapso total en las estructuras de vivienda durante el sismo de profundidad intermedia del 19 de septiembre de 2017 Mw7.1. Se realiza la recopilación de daños de más de 400 viviendas mediante: (i) el uso de información de edificios dañados emitida por las asociaciones civiles e instituciones gubernamentales, y (ii) a través de inspecciones exteriores in situ de las viviendas con daños reportadas.

Entonces, para cada vivienda georreferenciada y luego de obtener algunos parámetros estructurales, se calculan los valores de aceleración espectral correspondientes al periodo fundamental de la estructura, el cálculo de esos valores de aceleración espectral se obtiene a través del uso de un esquema de interpolación de intensidades en toda la Ciudad de México ante el evento sísmico.

Se calculan las curvas de fragilidad empírica para las clases más representativas de la muestra asociadas al número de niveles. Para cada clase representativa, se calculan curvas de fragilidad para cada uno de los cuatro estados de daño. La obtención de las curvas de fragilidad se realiza mediante, un análisis de regresión siguiendo una función de distribución lognormal acumulada. Para cada clase representativa asociada al número de niveles, se construyen cuatro curvas para cuatro estados de daño: i) medio DS_2 , ii) alto DS_3 , iii) muy alto DS_4 y iv) colapso DS_5 .

Finalmente, las curvas de fragilidad desarrolladas en este estudio podrían usarse para calcular las funciones de vulnerabilidad para edificios de muestra a nivel de la Ciudad de México en el futuro cercano. Cabe señalar que las funciones de vulnerabilidad son fundamentales para llevar a cabo el análisis de riesgo y la toma de decisiones sobre riesgo sísmico.

ABSTRACT

This study presents seismic fragility functions for low- to mid-rise dwellings in Mexico City, through the collection from minor damage to total collapse in housing structures, after intermediate-depth intraslab earthquake on September 19, 2017 Mw7.1. The damage data collection is twofold: (i) using information of damaged buildings through civil associations and government agencies, and (ii) compiling information through exterior in-site inspections for the same dwellings with reported damage.

For each georeferenced dwelling considering certain structural parameters, their spectral pseudo-acceleration values corresponding to the fundamental period of the structure were calculated using an intensity interpolation scheme throughout the city for the seismic event.

Empirical fragility curves were derived for the most representative dwelling categories depending on the number of levels, using a regression model. The values of the damage states from the analyses were fitted to a lognormal distribution at every intensity level. For each representative dwelling category, fragility curves are built for five damage states: i) Medium damage (DS_2), ii) High damage (DS_3), iii) Very high damage (DS_4) and iv) Collapse (DS_5).

Finally, the fragility curves developed in this study could be used to the computing of vulnerability functions for sample buildings at the Mexico City level in the near future. It should be noted that the vulnerability functions are fundamental to carry out risk analysis and risk decision making.

OBJETIVO

Calcular curvas de fragilidad sísmica de las viviendas de la Ciudad de México basadas en los daños observados debidos al sismo del 19 de septiembre de 2017 de magnitud Mw7.1 de mecanismo intraplaca de profundidad intermedia.

ALCANCES

Se plantea la estimación de fragilidad sísmica mediante la observación de daños en las viviendas de la Ciudad de México a causa del sismo de 19 de septiembre de 2017 Mw7.1. Para cada vivienda se calculan los valores de aceleración espectral correspondientes al periodo fundamental de la estructura utilizando un esquema de interpolación en toda la ciudad ante el evento sísmico. Entonces, mediante modelos de distribución de probabilidad se calculan las curvas de fragilidad empírica para las diferentes clases de vivienda seleccionas acorde al número de niveles.

JUSTIFICACIÓN

Los severos daños a consecuencia de los grandes eventos sísmicos que han afectado a la Ciudad de México, las características del suelo, específicamente la zona de lago, la concentración poblacional y la importancia de la ciudad como punto de inversión conllevan a realizar estudios que ayuden a disminuir pérdidas humanas, financieras y de funcionalidad ante futuros eventos sísmicos. Este estudio se concentra en el análisis de edificios de uso habitacional ya que, tras la ocurrencia de los grandes eventos sísmicos que han azotado a la Ciudad de México, el sector vivienda ha sido el más afectado presentando el mayor porcentaje de daños durante estos eventos (*e.g.*, sismos de 1985 y 2017).

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Breve descripción de daños en sismos recientes de la Ciudad de México

La alta vulnerabilidad sísmica (*i.e.*, la gran susceptibilidad de daño) de las viviendas de la Ciudad de México ha sido evidenciada luego de los sismos del 19 de septiembre de 1985 (Mw8.1) y 2017 (Mw7.1), comprobándose a través de las significativas pérdidas humanas, económicas y de funcionalidad, derivados desde daños leves o moderados hasta daños severos o incluso colapso total de los edificios habitacionales después de esos eventos sísmicos.

Uno de los primeros grandes eventos que azotó a la ciudad post-revolucionaria, sucedió en 1957 con Mw7.5 ocurrido en San Marcos, Guerrero a una profundidad de 25 km, con mecanismo de subducción (Figuroa, 1957). Derivado de este sismo la mayoría de los daños acontecidos en la Ciudad de México se concentraron en la zona centro, en lo que hoy se constituye la alcaldía Cuauhtémoc. Los datos históricos mencionan que el número de víctimas ascendió a una cifra menor de 50 personas fallecidas tan sólo en la Ciudad de México y, además, alrededor de 1,000 edificios resultaron con daños estructurales y no estructurales (Fundación I.C.A. 1992). Este sismo, aunque desafortunadamente no fue registrado por el acelerómetro de la estación CU, el cual fue instalado hasta 1962, es uno de los primeros eventos sísmicos registrados en el suelo blando de la ciudad, específicamente en la Alameda Central.

Por otro lado, el evento sísmico que ha generado los mayores daños, pérdidas económicas y de vidas humanas en la Ciudad de México, ocurrió el 19 de septiembre de 1985 Mw8.1. Este sismo de mecanismo de subducción tuvo su origen en las costas de Guerrero y Michoacán a casi más de 300 km de la Ciudad de México. Este tipo de sismos de subducción son sismos pocos profundos y se concentran entre los 10 y los 40 km de profundidad. Además, este tipo de eventos de subducción ocasionan que el movimiento sísmico tenga un alto contenido de frecuencias bajas (alrededor de 0.5 Hz) (Singh *et al.*, 1990), por lo que, durante este sismo, se generaron mayores intensidades sísmicas, a grosso modo, en suelos blandos de la Ciudad de México, cuyo periodo dominante del suelo, T_s , estaba alrededor de 2 s.

Derivado de este sismo y sus numerosas réplicas, resultaron afectados más de 5,000 inmuebles, 47% con daños menores, 38% con fracturas y el 15% restante con desplomes parciales o totales. En la alcaldía Cuauhtémoc se registró el 56% de los daños, en la Venustiano Carranza el 18%, en la Benito Juárez el 17% y en las restantes alcaldías contienen el 9% (Salcido, 2015). A consecuencia de este sismo y sus réplicas, hubo daños desde severos a colapsos, en más de 700 edificaciones constituidas principalmente de 7 a 15 niveles (Masaki *et al.*, 1996), construidas bajo la normativa de construcciones de los años de 1957 y 1976; reglamentos de construcción que no tomaban en cuenta el diseño sísmico o que lo hacían de manera deficiente, y con historia previa de eventos sísmicos que, en algunos casos, habían provocado daños importantes.

Por otro lado, los principales daños durante ese sismo se observaron en edificios constituidos por losas planas reticulares que, en comparación con cualquier otro tipo de sistema estructural, presentó el mayor porcentaje de daños severos. No obstante, entre las condiciones que generaron los mayores porcentajes de daño, se encuentran, características de irregularidad geométrica en planta, ubicación en esquina, golpeteo entre edificios, problemas de sobrecarga, planta baja débil y algunos casos de daños asociados a modificaciones en el sistema estructural (Hernández, 2017).

Por su parte, de acuerdo con *The Emergency Events Database* (EM-DAT por sus siglas en inglés), el monto total de la pérdida en construcciones dañadas se aproximó a 4,100 mil millones de dólares (EM-DAT 2019), cantidad que actualmente representa casi 9,800 millones de dólares, con una tasa de inflación promedio de 2.59% anual entre los años de 1985 y 2019. Por otro lado, para 1987 la cifra estimada del número de víctimas se acercaba entre 10,000 y 15,000 personas fallecidas (Astiz *et al.*, 1987).

El segundo gran evento que más afectaciones ha provocado en la Ciudad de México, tuvo lugar el 19 de septiembre de 2017 Mw7.1, 32 años después de los sismos de 1985. Este sismo de profundidad intermedia, 57 km, sacudió al centro del país con epicentro en los límites de Morelos y Puebla, a una distancia de sólo 120 km de la Ciudad de México (Cruz *et al.*, 2017). A diferencia del anterior, este tipo de sismos de profundidad intermedia manifiestan un mayor contenido de altas frecuencias (alrededor de 1 Hz), lo cual generó mayores intensidades sísmicas en sitios con periodo dominante del suelo, T_s , entre 0.7 y 1.5 s en la Ciudad de México (*i.e.*, periodo dominante del suelo promedio de 1.3 s).

Por su parte, durante el evento sísmico reciente del 19S de 2017, se registraron 38 edificios parcial o totalmente colapsados en la Ciudad de México, de los cuales, de acuerdo con este estudio como más adelante se presentará, más del 65% corresponden a edificaciones de vivienda. Estos 38 edificios se encontraban ubicados principalmente en 8 alcaldías (*i.e.*, Álvaro Obregón, Benito Juárez, Coyoacán, Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Iztapalapa, Tlalpan y Xochimilco), concentrándose los colapsos en las alcaldías Cuauhtémoc y Benito Juárez con el 31% y 29%, respectivamente. Además, reportes indican que el 91% de los

edificios colapsados fueron construidos antes de 1985 (Galvis *et al.*, 2017), lo que implica que ya habían soportado, además, otro de los sismos más destructivos que han azotado a la ciudad, es decir el sismo de 1985. Por lo que se puede destacar que, existe una cantidad importante de construcciones que podrían tener daño acumulado por eventos sísmicos anteriores, posibles asentamientos diferenciales u otras excitaciones accidentales, lo que incrementa la vulnerabilidad sísmica de estas.

Entre los edificios colapsados durante este sismo reciente, se encontraban principalmente construcciones de 3 a 10 niveles. Para este sismo, el 60% de los edificios colapsados presentaron un sistema estructural a base de columnas de concreto reforzado y losa plana reticular, lo que resulta en un porcentaje mayor en comparación al observado durante el sismo de 1985 que fue del 43.3%. No obstante, el 60% de los edificios colapsados presentaban condiciones de piso débil, mientras que el 44% presentaba posibilidad de golpeteo con edificios contiguos y un 25% se encontraba ubicado en esquinas. De igual manera, este sismo dejó cientos de edificaciones de vivienda con un nivel de daño que ha implicado que los edificios se tengan que someter a un proyecto de rehabilitación o incluso su demolición.

De acuerdo con el EM-DAT se estima que las pérdidas económicas ascienden a 6 mil millones de dólares (esto es, menos del 1% del PIB) (EM-DAT 2019), cantidad que para 2019 representa un monto de casi 6,200 millones de dólares con una tasa de inflación promedio de 2.01% anual. Por su parte, en 2018 la cifra oficial de personas fallecidas se estableció en 369 para todo el país; 228 en la Ciudad de México, 74 en Morelos, 45 en Puebla, 15 en el Estado de México, 6 en Guerrero y 1 en Oaxaca (CNDH 2018).

Es importante señalar que, tanto para el sismo de 1985 como para el del 2017, las edificaciones del sector vivienda han sido las estructuras más afectadas. Por ejemplo, después del sismo de 1985 se registraron más de 400 edificios con colapso total o parcial. De estos edificios, más de la mitad (alrededor del 55%) correspondían a edificios de vivienda, ya sea unifamiliar o multifamiliar (Fundación I.C.A. 1988). Por otra parte, de los 38 edificios colapsados en la Ciudad de México debido al sismo de 2017, más del 65% correspondían a edificios de vivienda. Además, luego del sismo de 1985 se rehabilitaron como prioridad construcciones con daños visibles y que requerían algún tipo de reforzamiento, en comparación con las construcciones que no sufrieron daños aparentes, las cuales no estaban obligadas a cumplir con el código de construcción vigente de esa época.

Con base en lo anterior es importante resaltar, que las viviendas diseñadas con reglamentos de construcciones previos y que pertenecen al grupo B1 y B2, no están obligadas a cumplir con la nueva normativa (*i.e.*, el reglamento de 2017 u reciente no es retroactivo). Esto es, solamente una vivienda que sufrió daños severos después de la ocurrencia de un sismo debe ser revisada para cumplir con la normatividad vigente; sin embargo, aquellas viviendas sin daño o con afectaciones menores no están obligadas a obedecer con la normatividad vigente en la ciudad.

Debido a los daños y grandes pérdidas a consecuencia de estos grandes eventos sísmicos, surge la necesidad de cuantificar y explicar la magnitud y los efectos de este fenómeno sobre los diferentes tipos de estructuras en la Ciudad de México. Para esta finalidad es necesario conocer el comportamiento de los edificios de vivienda de baja a mediana altura ubicados en la Ciudad de México, los cuales sufrieron desde daños menores hasta el colapso total luego del sismo del 19 de septiembre de 2017 Mw7.1.

Basado en lo anterior, este estudio realiza la recopilación de daños de más de 400 edificios de vivienda a partir de dos fuentes: (1) a través del uso de información de edificios dañados emitida por las asociaciones civiles e instituciones gubernamentales y (2) a través de inspecciones externas en cada uno de los edificios para las mismas viviendas con daños reportados. Entonces, para cada vivienda georreferenciada, se calculan los valores de aceleración espectral correspondientes al periodo fundamental de la estructura utilizando un esquema de interpolación de intensidades en toda la ciudad ante el evento sísmico. Finalmente, la interpretación de los estados de daño se basa en el cálculo de las curvas de fragilidad empírica para las diferentes clases de vivienda.

2. CARACTERIZACIÓN DE LA ACCIÓN SÍSMICA DE ENTRADA

2.1 Zonificación sísmica

El alto riesgo sísmico de la Ciudad de México, además de la combinación de factores tales como la vulnerabilidad de las construcciones, cercanía a las fallas activas y los posibles efectos locales de amplificación de las ondas sísmicas, se encuentra influenciado en gran medida, por la configuración geológica presentada en el subsuelo de la Ciudad de México.

Como se indicó previamente, los eventos sísmicos más fuertes que han azotado a la Ciudad de México han sido, el sismo de 1985 Mw8.1 y el sismo de 2017 Mw7.1. El más reciente, el sismo del 19S de 2017, con mecanismo intraplaca de profundidad intermedia, manifestó un mayor contenido de altas frecuencias (alrededor de 1 Hz), generando las mayores intensidades sísmicas en sitios con periodo dominante del suelo, T_s , promedio de 1.3 s en la Ciudad de México. Estos sismos han puesto en evidencia la brutal amplificación y el incremento sustancial en la duración de los movimientos en el área lacustre, comparados con los registrados en terreno firme o roca de la ciudad. Por ejemplo, la amplitud de las ondas sísmicas con periodos dominantes del suelo cercanos a 2 s en la Zona de Lago puede llegar a ser 50 veces mayor que en un sitio de suelo firme de la Ciudad de México. Sin embargo, las ondas sísmicas en el suelo firme de la ciudad, sufren también efectos amplificación con respecto a otros lugares fuera de la Ciudad de México (*e.g.*, las ondas sísmicas en Ciudad Universitaria llegan ser 10 veces más grandes que la de un sitio de terreno firme fuera de la ciudad tal como la de la ciudad de Cuernavaca), por lo que la amplitud en la Zona de Lago puede ser de 300 a 500 veces mayor (Cruz *et al.*, 2017).

De este modo se han manifestado los efectos de amplificación dinámica en depósitos lacustres. Sin embargo, esta amplificación se debe al entrampamiento de ondas por el contraste entre las características dinámicas de los depósitos superficiales, cuyo espesor no sobrepasa los 150 m y de la roca basal (Reinoso, 2017). Se han utilizado diversas técnicas con el fin de mediar la amplificación en zonas de lago y transición con respecto a la zona de lomas. Una de las técnicas utilizadas, ha sido el uso de los cocientes espectrales y en otros casos funciones de transferencia, que a partir de estos, se estima el periodo dominante del

sitio así como las máximas amplitudes de esos cocientes. Esta técnica ha sido implementada para obtener mapas de isoperiodos dominantes de la ciudad (Reinoso y Lermo, 1991).

La importancia de conocer el periodo dominante del suelo en un sitio dado, surge del hecho de caracterizar mejor la respuesta sísmica en la ciudad, así como de reducir la probabilidad de efectos de resonancia en las estructuras con el suelo. Esto último es, evitar la construcción de estructuras con periodos fundamentales similares al periodo dominante del suelo en dicha localización. Conociendo los periodos dominantes del suelo se ha propuesto la zonificación sísmica, donde es posible apreciar las zonas con mayor peligro sísmico y que presentan aceleraciones del terreno, velocidades del suelo y aceleraciones espectrales desfavorables para el diseño adecuado de la infraestructura civil (e.g., viviendas, puentes, etc.). De esta forma las alcaldías en la Ciudad de México con mayor peligro sísmico son: Benito Juárez, Coyoacán, Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Iztapalapa, Tlalpan, Venustiano Carranza y Xochimilco.

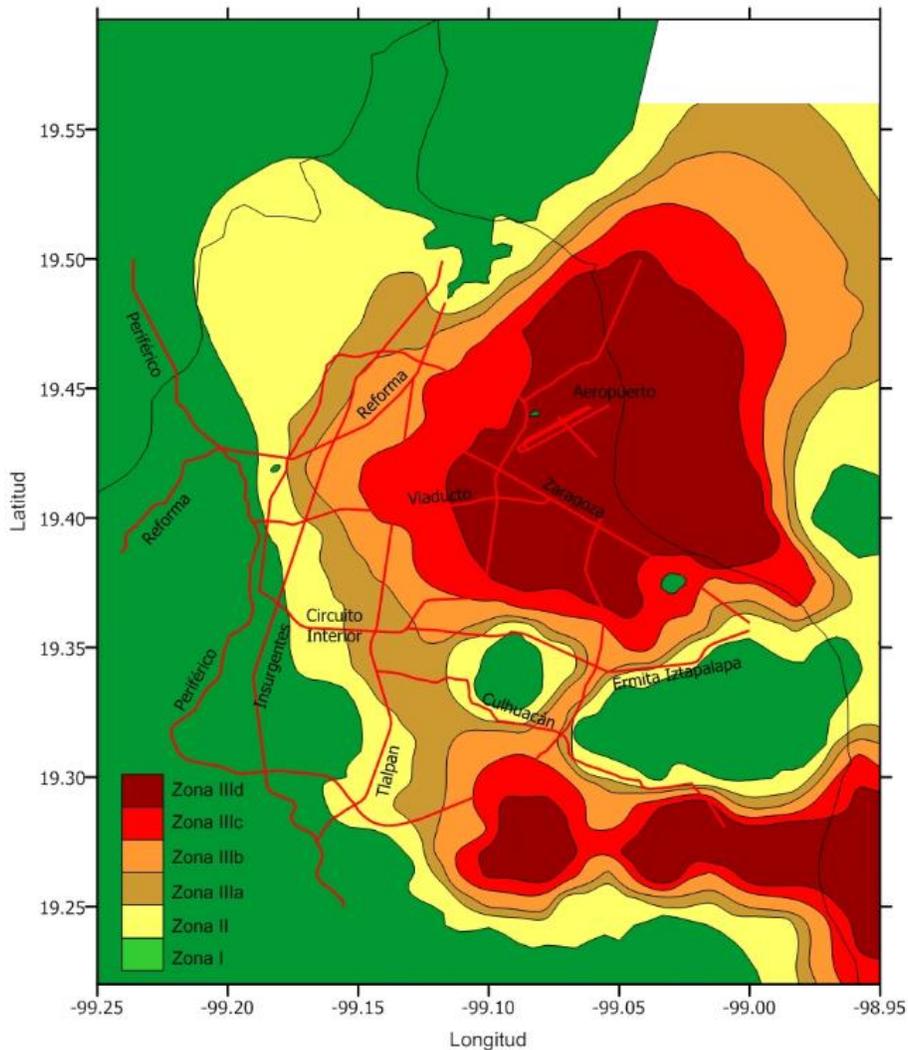


Figura 2.1. Zonificación Sísmica de la Ciudad de México (NTC-Sismo, 2004)

De acuerdo con la zonificación que proponía el reglamento de construcción del Distrito Federal en su versión 2004 dentro de su Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTC-Sismo, 2004), se indica que la zonificación consta de tres zonas principales, Zona de Lomas (Zona I), Zona de Transición (Zona II) y Zona de Lago (Zona III) y para esta última se consideran cuatro subzonas (IIIa, IIIb, IIIc y IIId ver figura 2.1). De acuerdo con esta versión de las NTC-2004, conociendo el periodo dominante en el suelo se permite hacer una reducción del coeficiente sísmico, y tomar en cuenta los efectos de interacción suelo-estructura.

Por su parte, en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo en su versión 2017 (*i.e.*, la vigente actualmente), se ha especificado la herramienta SASID, base de datos donde se encuentran el espectro elástico para un sitio específico de la construcción (*i.e.*, no existen ya más zonas sísmicas), así como el afectado por los factores de reducción por comportamiento sísmico, Q' , y por sobre-resistencia, R , partiendo del tipo de edificio que se quiera construir y la localización geográfica del mismo (NTC-Sismo, 2017).

2.2 Intensidades espectrales registradas

Durante el sismo del 19 de septiembre de 2017 se reportó por la Red Acelerográfica de la Ciudad de México (RACM), un sismo con $M_w 7.1$ de profundidad intermedia, el cual sacudió a la Ciudad de México a las 13:14:40 horas, proveniente de Axochiapan, Morelos y a 120 km de la Ciudad de México.

La RACM para la zona I, zona de lomas, de la Ciudad de México, registró un valor de aceleración máxima del suelo (PGA en sus siglas en inglés) de 57 cm/s/s en Ciudad Universitaria (estación CU). Recordar que, en 1985, la estación CU registró una PGA 30 cm/s/s, esto significa casi dos veces menor en comparación de las registradas en 2017 (ver figura 2.2). Por su parte, al calcular las aceleraciones espectrales para ambos eventos en CU, se estima que en un periodo fundamental de la estructura alrededor de 0.3 s, se presentan valores de intensidades de más de cinco veces las registradas en el evento de 1985 (ver figura 2.2). Esto claramente se puede observar en la figura 2.2 donde intensidades espectrales, en periodos fundamentales bajos ($T_e \leq 1.5$ s) son mayores para el sismo del 2017 respecto al sismo de 1985.

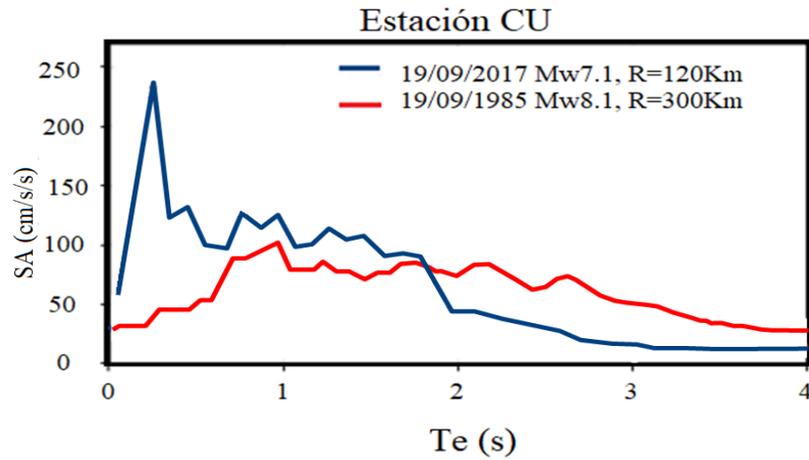


Figura 2.2. Espectro de respuesta en estación CU en suelo firme, para los sismos del 19 de septiembre de 1985 y 2017 ($\xi = 5\%$)

En otras palabras, las aceleraciones espectrales para esta estación indican que, los edificios de 1 a 12 niveles cercanos a la estación sísmica experimentaron valores de aceleración en promedio mayor a 100 cm/s/s, aproximadamente 2 veces mayor que la observada en 1985. No obstante, edificios más altos, de entre 12 y 20 niveles, experimentaron valores de aceleración promedio en la estación CU de 60 cm/s/s, que es aproximadamente 30% menor a la de 1985, que fue cercana a 85 cm/s/s (figura 2.3). Por otro lado, en la figura 2.4 se encuentran los espectros de respuesta registrados en la estación CU luego del sismo del 19S de 1985 y 2017, comparado con el espectro de diseño de NTC-Sismo, 2017. Se observa, que el espectro de diseño para esta zona, no se encuentra rebasado por los espectros de respuesta registrados luego de estos sismos.

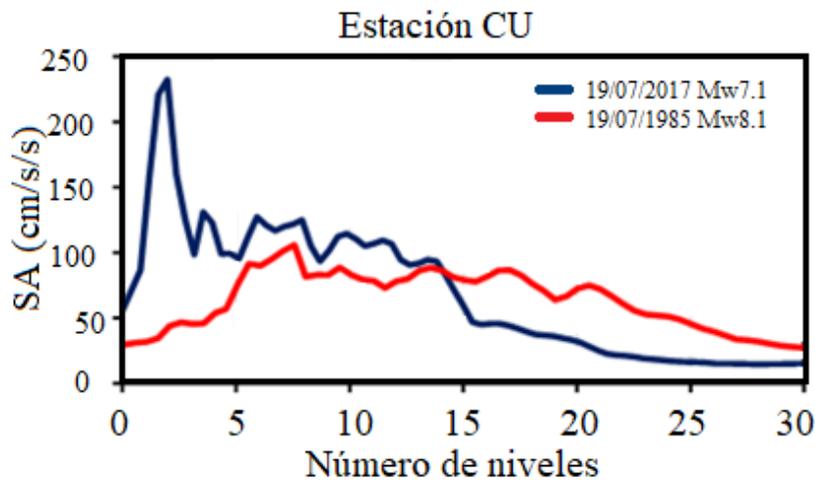


Figura 2.3. Aceleraciones experimentadas en las azoteas de los edificios con diferentes alturas para la zona suelo firme aledañas a la estación CU

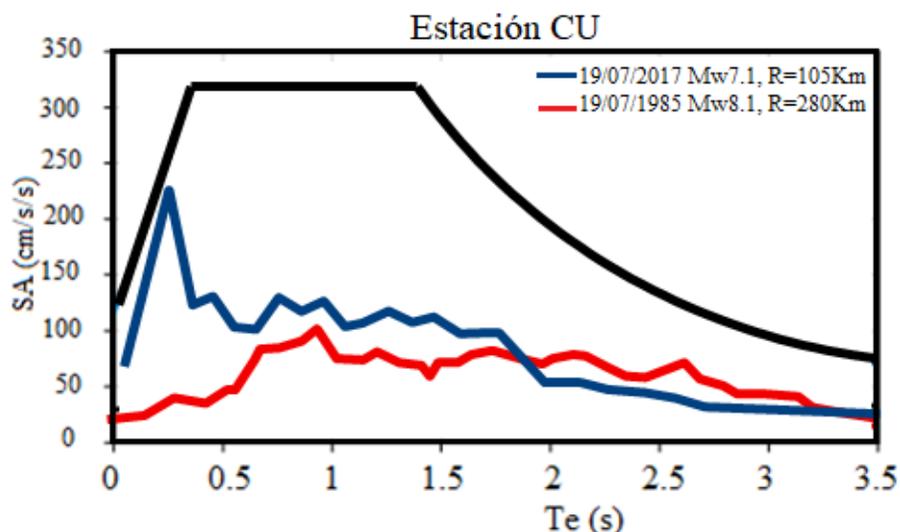


Figura 2.4. Espectros de respuesta del movimiento registrado en la estación CU durante el sismo del 19 de septiembre de 2017 ($\xi = 5\%$), en comparación con el espectro de diseño del RCDF y sus NTCDS (2017)

En contraste, con relación a la zona III (*i.e.*, Zona de Lago de la ciudad), la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (estación SCT), registró un valor de *PGA* de 91 cm/s/s, aceleración menor a diferencia del sismo de 1985, registrándose un valor de *PGA* mayor de 150 cm/s/s (ver figura 2.5). Por su parte, el valor de aceleración espectral máxima para el sismo de 2017 es aproximadamente 40% menor que la registrada en 1985, y su periodo dominante del suelo, T_s , se redujo de 2 s a 1.7 s, aproximadamente, causado por el proceso de consolidación a que está sujeto el subsuelo de la ciudad por la extracción de agua. Los registros en la estación SCT muestran que edificios con periodos menores a 1 s, cercanos a la estación, experimentaron valores de aceleración promedio de 188 cm/s/s, muy similares a las de 1985, mientras que edificios con periodos fundamentales mayores estuvieron expuestos a aceleraciones de 1.5 a 5 veces más grandes en 1985 que las observadas el 19 de septiembre de 2017. La diferencia más clara entre los dos terremotos se evidenció en suelo blando para edificios con más de 15 niveles (ver figura 2.6). Sin embargo, la estación SCT no se encuentra en la zona con los mayores daños, que se encuentra más al oeste de la ciudad (es decir, hacia las colonias Roma y Condesa), principalmente en la zona de transición. En esa zona, se generaron aceleraciones mayores que las registradas en la estación SCT para edificios de 3 a 10 niveles, tal como la estación acelerométrica CH84 ubicada al sur de la ciudad que más adelante se indica.

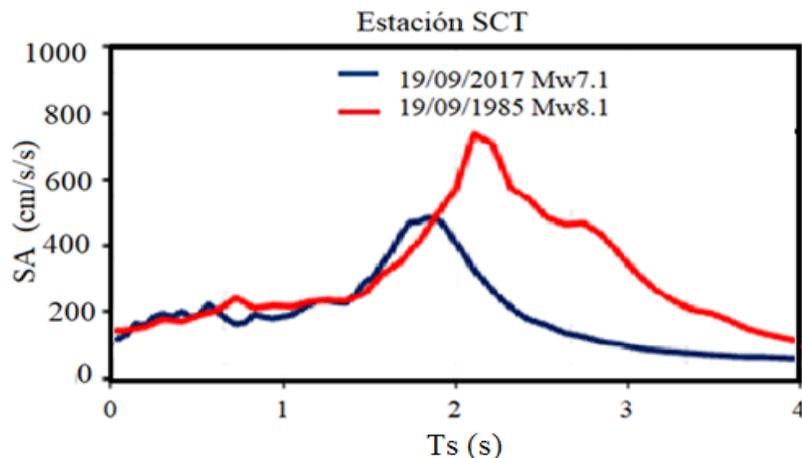


Figura 2.5. Espectro de respuesta en terreno blando, estaciones SCT, para los sismos del 19 de septiembre de 1985 y 2017 ($\xi = 5\%$)

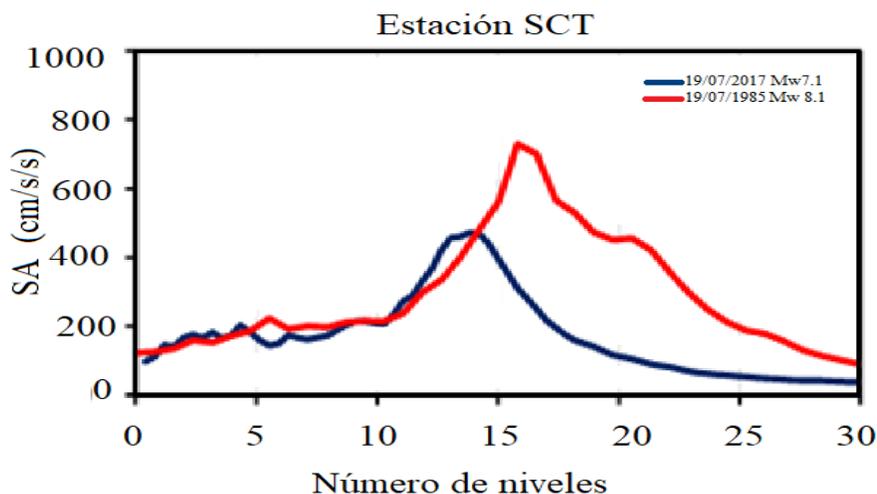


Figura 2.6. Aceleraciones experimentadas en las azoteas de los edificios con diferentes alturas para la zona suelo blando aledañas a la estación SCT

Como previamente se indicó, no obstante la RACM registró un valor de *PGA* cercano a 200 cm/s/s (0.2 g) en la zona de Culhuacán (estación CH84) (ver figura 2.7), que de acuerdo con el Reglamento de construcciones del Distrito Federal y sus Normas Técnicas Complementarias, la estación Culhuacán queda comprendida en la zona sísmica de Lago, Zona IIIa y dentro Zona II, zona de transición, de la zona geotécnica para el diseño de cimentaciones.

Del mismo modo, en la figura 2.7 representa las estimaciones de la estación CH84 en la zona de Culhuacán, estación que registró las máximas aceleraciones, el espectro de respuesta observado después del sismo de 2017 no rebasa el espectro de diseño para esta zona, sin embargo, el espectro de respuesta calculado para este mismo sismo se encuentra tocando los

puntos del espectro de diseño para periodos cercanos a 0.3 s. Finalmente, para el sismo de Mw7.1, las estructuras con periodo fundamental menores a 1.5 s experimentaron los mayores valores de aceleraciones espectrales, estos edificios son constituidos por 3 a 10 niveles. A diferencia, en el sismo de 1985, las estructuras dañadas resultaron en su mayoría, con alturas entre 7 a 15 niveles, es decir, con periodos fundamentales entre 1 y 2.4 s.

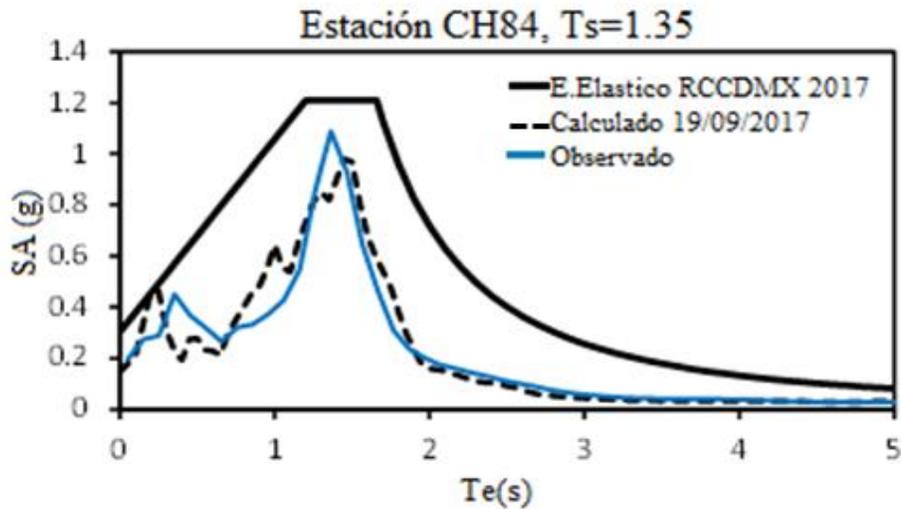


Figura 2.7. Espectros de respuesta del movimiento registrado en la estación CH84 durante el sismo del 19 de septiembre de 2017 ($\xi = 5\%$), en comparación con los espectros de diseño del RCDF y sus NTCDS (2017)

2.3 Cálculo de intensidad sísmica en sitios no instrumentados

El peligro sísmico, se caracteriza principalmente, por la localización, la intensidad máxima del movimiento y, frecuentemente, por la aceleración máxima del suelo y la aceleración espectral; proporcionando, cada una de estas medidas, una información implícita pero parcial de la fuerza sísmica. De este modo es necesario obtener las intensidades sísmicas experimentadas para cada estructura durante algún evento sísmico. Estas intensidades sísmicas están implícitas en los espectros de diseño que utilizan los ingenieros de la práctica para diseñar las construcciones de la ciudad. Uno de los métodos posibles para determinar las aceleraciones máximas del suelo (*PGA*) y aceleraciones espectrales (*SA*), es mediante la utilización del registro en la estación más cercana a la localización de la estructura de interés en función de los periodos dominantes del suelo, *Ts*. Este método consiste en georreferenciar las edificaciones a analizar y localizarlas en un mismo mapa con los *Ts* de fondo y las estaciones acelerométricas. Sin embargo, este método presenta incertidumbre en los datos ya que, aunque las edificaciones se encuentren en un radio cercano a la ubicación de la estación señalada como la más cercana, las aceleraciones espectrales no siempre serán iguales a las calculadas para dicha estación.

Con base en lo anterior, para este estudio se consideraron los registros de movimientos fuerte del terreno luego del sismo del 19 de septiembre del 2017 Mw7.1 asentados en 75 estaciones acelerométricas que registraron el movimiento fuerte del terreno durante este evento sísmico y que forman parte de la red acelerográfica del Centro de Instrumentación y Registro Sísmico (CIRES) y de la red del Instituto de Ingeniería de la UNAM (II UNAM) (ver figura 2.8). Estos registros se utilizaron para calcular mapas de los valores de *PGA* y valores de *SA* en un mapa georreferenciado utilizando método de interpolación Bayesiana (*e.g.*, Pérez-Rocha 1999; Pérez-Rocha *et al.* 2009). Entonces basado en esas intensidades interpoladas y para cada vivienda dañada y georreferenciada, se calcularon las aceleraciones espectrales asociadas al periodo fundamental de esta. Es decir, los valores de *SA* en sitios no instrumentados, alrededor de toda la Ciudad de México, se calcularon mediante el uso de un esquema de interpolación Bayesiana. Los detalles son dados por Pérez-Rocha (1999) y Pérez-Rocha *et al.* (2009). Estos valores de *SA* se obtuvieron en función del periodo fundamental de una estructura, *Te*, obtenido mediante la ecuación 2.3.1 empírica (Mosquera, 2007):

$$T_e = 0.08 \cdot N^{1.26} \quad (2.3.1)$$

donde, *N* es el número de niveles del edificio.

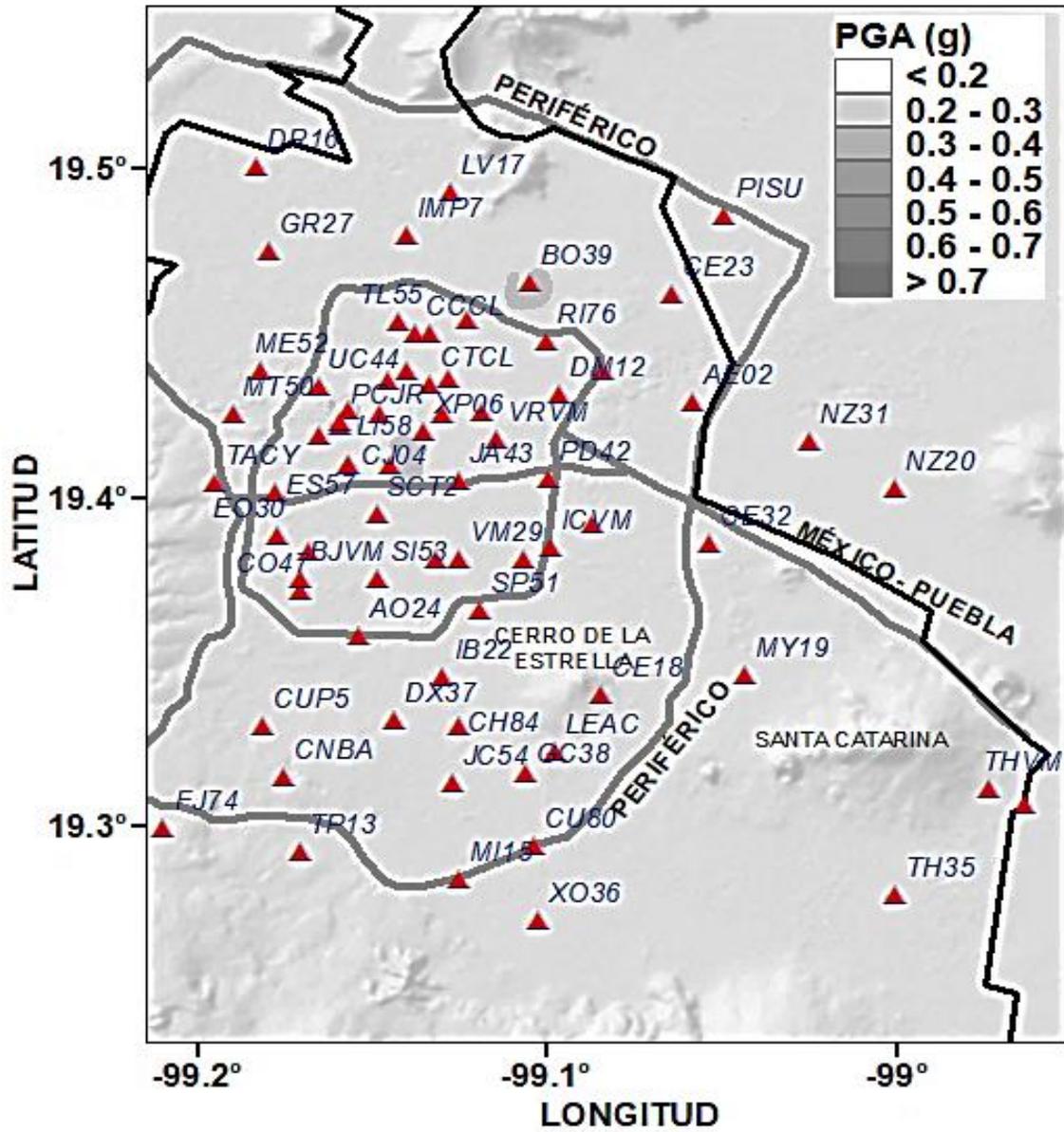


Figura 2.8. Distribución espacial en toda la Ciudad considerando el sismo del 19 de septiembre de 2017, se muestran aceleración máxima del terreno y los triángulos representan las 75 estaciones acelerométricas de los registros considerados

3. CASO DE ESTUDIO: VIVIENDAS DAÑADAS EN LA CDMX

3.1 Vulnerabilidad de la Ciudad de México

Como se señaló en la Introducción, la Ciudad de México ha sido afectada por dos grandes eventos sísmicos que, a pesar de la diferente naturaleza de estos, el daño de ambas ocurrencias se correlaciona directamente con las características del suelo blando en la zona del lecho lacustre, las cuales magnificaron las aceleraciones de entrada relativamente moderadas. Sismos de tal magnitud y cercanía a la ciudad como los mencionados, que generaron tales intensidades sísmicas (aceleraciones máximas del suelo, aceleraciones espectrales) en la ciudad, hacen evidente la vulnerabilidad de las construcciones en la Ciudad de México, incrementándose por las condiciones de deterioro de rigidez y resistencia estructural en las que se encontraban (posiblemente por daño acumulado) previo a los sismos, y por ende el alto impacto social que han tenido en la población, revelado a través de las pérdidas humanas, económicas y de funcionalidad.

El sismo más reciente (*i.e.*, sismo 19S 2017 Mw7.1) ha generado nuevamente diversas discusiones de la correcta aplicación de las normativas para la construcción vigente. Es importante destacar que el objeto de los reglamentos de construcción en zonas sísmicas se concentra en garantizar que las construcciones sean capaces de resistir determinadas fuerzas sísmicas y no exceder las condiciones de servicio para las que están destinadas. Los reglamentos de toda ciudad o país buscan garantizar que las construcciones puedan resistir sismos severos que ocurren en un determinado periodo de retorno sin que colapsen. Sin embargo, no garantizan que las construcciones presenten un buen comportamiento sísmico ante diferentes intensidades de movimiento del terreno, es decir, que los daños puedan controlarse.

Las viviendas que resultaron afectadas luego del sismo de 2017 Mw7.1, en su mayoría se encontraban bajo un periodo de años de construcción promedio de 40 años, es decir, ya habían resistido otro de los sismos más destructivos que han azotado a la ciudad, algunos de estos, se encontraba bajo rehabilitaciones luego de sismo de 1985, y un porcentaje menor se encontraba construido en un periodo de alrededor de 15 años; es decir, a grandes rasgos, estas edificaciones se encontraban construidas bajo normativas de los años de 1976, 1993 y 2004.

De las construcciones que se rehabilitaron luego del sismo de 1985, se atendieron como prioridad aquellas construcciones con daños visibles y que requerían algún tipo de reforzamiento estructural, consiguiendo que cumplieran con la normativa emergente para proyectos de reparación de viviendas dañadas de 1985. A diferencia, las construcciones que no sufrieron daños aparentes pudieron continuar funcionando como lo venían haciendo habitualmente. De este modo, las viviendas diseñadas con reglamentos de construcciones previos y que pertenecen al grupo B1 y B2, no están obligadas a cumplir con la nueva normativa (*i.e.*, el reglamento no es retroactivo). Esto es, el reglamento emergente después del sismo de 1985 para el efecto de rehabilitaciones de las edificaciones dañadas luego del sismo, no contenía la necesidad de revisar y asegurar las condiciones de resistencia de todas las viviendas de la ciudad, es decir, solamente estipulaba que una vivienda que sufrió daños severos observables después de la ocurrencia de un sismo debía ser revisada para cumplir con la normatividad vigente; sin embargo, aquellas viviendas sin daño o con afectaciones menores no estaban obligadas a obedecer con la normatividad vigente en la ciudad.

3.2 Definición de la zona de estudio

Tras las significativas pérdidas en la Ciudad de México luego de la ocurrencia del sismo 19 de septiembre Mw7.1, y los numerosos reportes de construcciones dañadas en la ciudad, hubo la necesidad de realizar estudios de estimación de pérdidas a través de diversos métodos para la recopilación de información de viviendas dañadas. Para estos fines, asociaciones civiles, organismos locales e instituciones gubernamentales, integraron bases de datos de edificaciones dañadas luego del sismo, existentes en las 16 alcaldías de la Ciudad de México. Por ejemplo, por parte del gobierno central, a través del Instituto para la Seguridad de las Construcciones (ISC) se puso en marcha la Plataforma CDMX (ver figura 3.1). En este portal la ciudadanía tenía la oportunidad de registrar su inmueble dañado y algunas características de la vivienda y sus daños, mediante esta información, esperar la revisión estructural para evaluar el estado post-sísmico de la vivienda. Por otra parte, a través de las asociaciones civiles se configuró la Plataforma Mi Edificio, a diferencia de la anterior, su objeto principal era integrar la información de viviendas dañadas y configurar un escenario principal respecto a los daños en la Ciudad de México tras el sismo del 19S de 2017. Conformando a grandes rasgos, un panorama general del daño de las edificaciones de la Ciudad de México luego del sismo del 19S Mw7.1. Por su parte, algunos otros organismos, únicamente colaboraron con el reporte de los edificios que habían sufrido colapso parcial o total con algunas características pre y post al sismo.

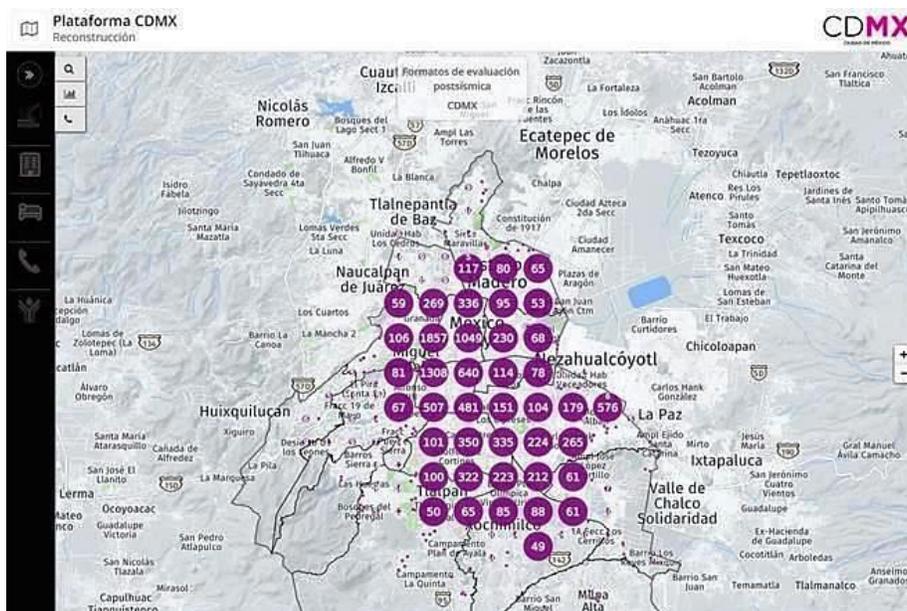


Figura 3.1. Vista general de la Plataforma CDMX

Conforme el paso de los días, después de evento sísmico se fueron sumando los daños en estos portales. En la Plataforma CDMX, del mismo modo, se fueron adjuntando los dictámenes post-sísmicos, de las revisiones estructurales, realizados por Directores Responsables de Obra (DRO) en conjunto con el ISC. Estos dictámenes contenían únicamente un formato general de las características de la vivienda (*i.e.*, dirección, coordenadas geográficas, uso del inmueble, número de niveles y el código del daño) y en algunos casos imágenes y descripciones de las condiciones de daño de la vivienda.

De este modo, con base en la información emitida por estos organismos e instituciones, es posible analizar los estados de daños (más adelante se indican los estados de daño que se refiere esta tesis), y en primera instancia para conocer las áreas de la ciudad donde se concentró el mayor porcentaje de daños, y posteriormente conocer las causas posibles de esa concentración de daño en la ciudad. Para este estudio, se realizó la recopilación de datos de los daños en viviendas de la ciudad, a través de la Plataforma CDMX (2017) y Plataforma Mi Edificio. Así como los dictámenes estructurales realizados para algunos edificios. Se revisaron estas bases de datos y se seleccionaron los edificios de vivienda que conformarían la muestra de este estudio. Los detalles se presentan en la siguiente sección.

3.3 Levantamiento estadístico de daños

3.3.1 Metodología

La metodología consiste en analizar una muestra de más de 400 edificios de vivienda de baja a mediana altura, ubicados en la Ciudad de México, que presentaron afectaciones (*i.e.*, viviendas que sufrieron desde daños menores hasta el colapso total) debido al sismo del 19 de septiembre de 2017 Mw7.1. Para ello, se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

- i. Identificación de viviendas reportadas con daños a consecuencia al sismo del 19S de 2017 Mw7.1. La identificación de los datos de daños es doble: (1) ya sea a través del uso de información de edificios dañados emitidas por asociantes civiles e instituciones gubernamentales, y (2) ya sea a través de la recopilación de información realizando inspecciones externas en cada uno de los sitios para las mismas viviendas con daños reportados.
- ii. Recopilación de la información disponible emitida por instituciones gubernamentales (*e.g.*, dictámenes estructurales, formatos de evaluación postsísmicas, así como informes del estatus de los edificios) para, con ayuda de las inspecciones in situ, asignar un estado de daño a los edificios. La asignación de esos estados de daño se describe más adelante.
- iii. Verificación del número de niveles, ubicación y algunas características de los edificios indicados en el inciso (i) por medio de la aplicación Google Earth.
- iv. Inspección de banqueta para los edificios donde la información del inciso (ii) no era suficiente para poder asignar un estado de daño. En las visitas se corroboró información de los edificios, tales como número de niveles, sistema estructural, uso del inmueble, entre otros.
- v. Asignación del estado de daño dependiendo de lo observado en las visitas in situ y de lo revisado en los dictámenes estructurales del 2017, clasificando a las viviendas con daño bajo, medio, alto, muy alto y colapso. Mayores detalles de la clasificación de daños se presentan más adelante.
- vi. Elaboración de las estadísticas que resumen los resultados del comportamiento de cada uno de los edificios de la muestra de viviendas con daños estudiada.

Con base en lo anterior se presenta la integración de una muestra de edificios reportados con daño en la Plataforma CDMX y Plataforma Mi Edificio, considerada un portal para la consulta de ubicación y clasificación de los inmuebles afectados por el sismo del 19 de septiembre de 2017. La muestra se limitó a considerar los edificios de vivienda que contaran con un estado de daño clasificado y contaran con un dictamen estructural que sustentara esta observación. De este modo se integró una muestra con 405 inmuebles dañados a consecuencia de sismo del 19S de 2017 Mw7.1, ubicados en las 16 alcaldías de la Ciudad de México.

3.4 Localización de viviendas dañadas

Después del sismo de 2017 se identificaron, para este estudio, más de 400 edificios habitacionales con daño. En la figura 3.2 se presenta la localización de las 405 viviendas dañadas (círculos naranjas) a consecuencia del sismo del 19S. Se observa, además, que el mayor porcentaje de daños está localizado en la zona poniente de la Ciudad de México, encontrándose en zonas donde los T_s oscilan entre 1 y 2 s.

Como se mencionó en el capítulo anterior el valor mayor de PGA se registró en la estación CH84 comprendida en la zona sísmica IIIa del reglamento de 2004. Considerando que las intensidades más altas se presentaron en las zonas sísmicas correspondientes con periodos dominante del suelo, T_s , entre 1 y 1.5 s. En la figura 3.2 se observa la gran correlación de daños entre las zonas con T_s , entre 1 y 1.5 s y el gran número de edificios dañados presentes en estas zonas. De este modo, el mayor porcentaje de daños se presentó en la zona sísmica IIIa correspondiente a la zona de transición geotécnica de la Ciudad de México.

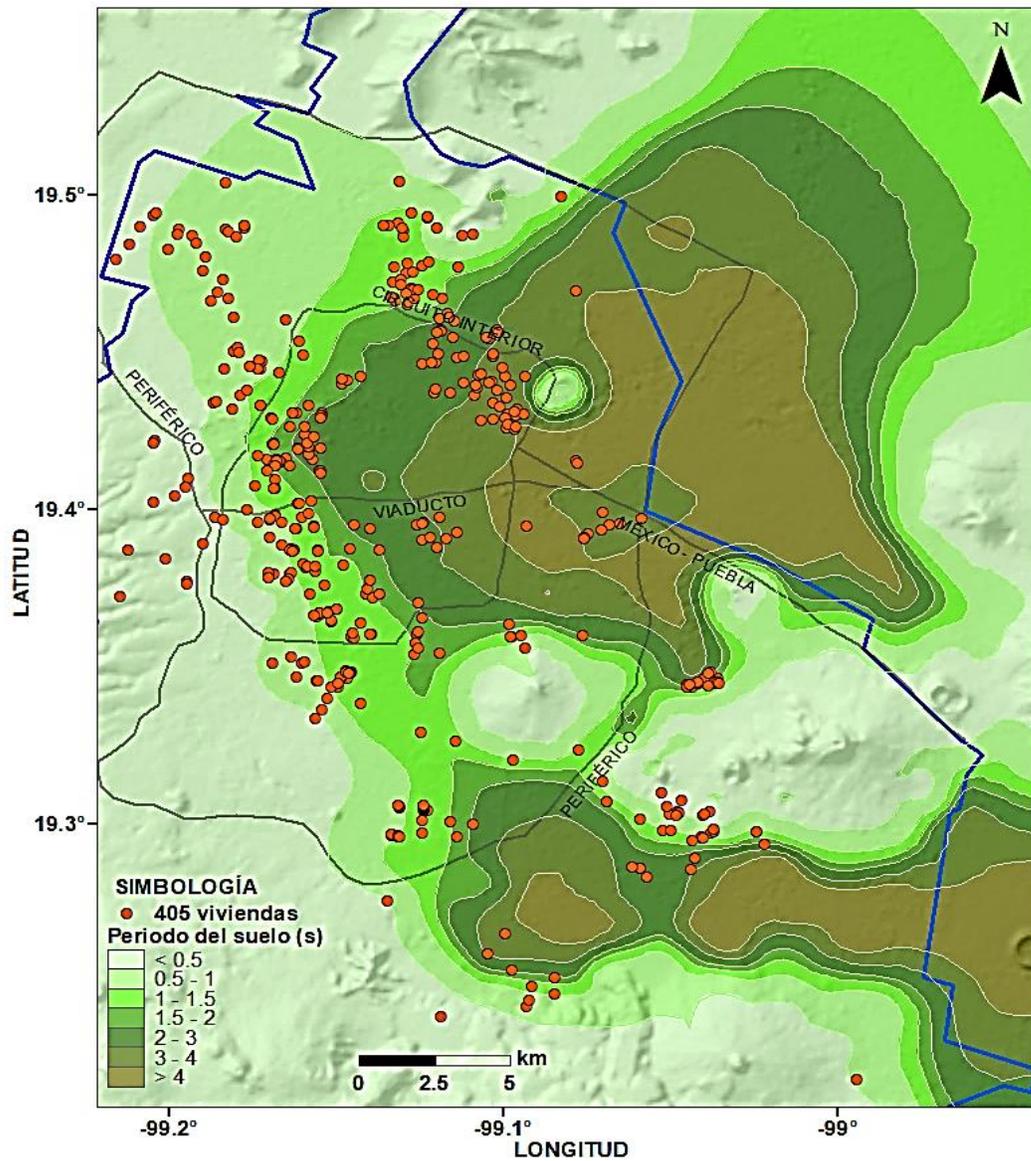


Figura 3.2. Ubicación de los edificios de vivienda con daños observados debido al sismo del 2017. Los círculos naranjas representan las 405 viviendas de la muestra con daños. El mapa contiene de fondo la distribución del periodo dominante del suelo de la Ciudad de México

De estos 405 edificios los daños más severos se localizaron principalmente en 8 alcaldías (*i.e.*, Benito Juárez, Coyoacán, Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Iztapalapa, Tláhuac, Tlalpan y Venustiano Carranza) (ver figura 3.3a). Se observa el mayor porcentaje en las alcaldías Benito Juárez y Cuauhtémoc con el 17% (69 de 405) y 15% (59 de 405), respectivamente (ver figura 3.4b). Para estas alcaldías las colonias más afectadas resultaron ser, las colonias Del Valle, Hipódromo Condesa, Narvarte, Portales y La Roma, que en conjunto representan más del 30% de los edificios que presentaron los estados de daño más severos antes del colapso (*i.e.*, daño alto y daño muy alto), y más del 50% de los edificios que sufrieron colapso durante el sismo (*i.e.*, daño alto y daño muy alto), y más del 50% de los edificios que sufrieron colapso durante el sismo (ver figura 3.3c), y que, además, corresponde efectivamente con las zonas que registraron las mayores intensidades sísmicas (*i.e.*, aceleraciones espectrales). A diferencia, en la figura 3.2 se observan regiones dentro de la zona IIIa sin la localización de viviendas dañadas, pues en estas regiones no se contaba con el registro de viviendas dañadas.

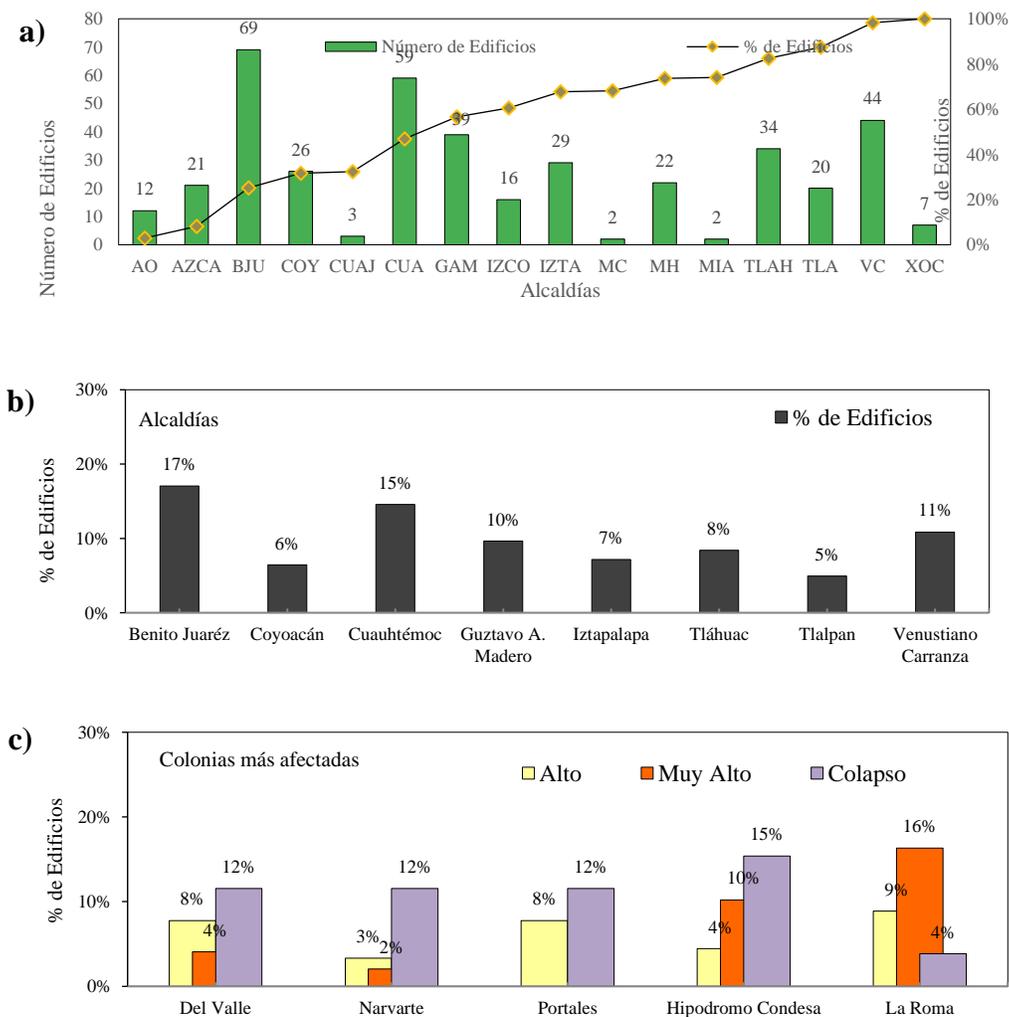


Figura 3.3. Distribución de las 405 viviendas en las 16 alcaldías de la Ciudad de México a) Distribución de los edificios y el porcentaje acumulado, b) Porcentaje de daños en las 8 alcaldías más afectadas c) Colonias que presentaron mayor porcentaje de los daños severos

3.5 Periodos dominantes del suelo

En esta sección, se muestra la frecuencia estadística de los distintos periodos de suelo, T_s , de acuerdo con la figura 3.4b. Del mismo modo, se presenta el porcentaje de daños observado para cada periodo dominante del suelo. En la figura 3.2 se muestra de manera ilustrativa la localización de las viviendas dañadas sobre un mapa que contiene de fondo la distribución de los periodos dominantes del suelo de la Ciudad de México. Esta distribución de los periodos dominantes del suelo se clasificó en siete categorías, las cuales son:

- T_s - 0 a 0.5 s con el 1% (4 de 405)
- T_s - 0.5 a 1 s con el 31% (124 de 405)
- T_s - 1 a 1.5 s con el 27% (109 de 405)
- T_s - 1.5 a 2 s con el 16% (63 de 405)
- T_s - 2 a 3 s con el 13% (54 de 405)
- T_s - 3 a 4 s con el 10% (42 de 405)
- T_s - > 4 s con más del 2% (9 de 405)

El sismo del 19S del 2017, con mecanismo de intraplaca característico por reflejar un movimiento con alto contenido de frecuencias altas, en este caso (alrededor de 1 Hz) por lo cual las mayores intensidades sísmicas se presentaron en sitios con periodos dominante del suelo, T_s , en promedio a 1.3 s. De este modo podemos observar el mayor porcentaje de edificios dañados, se encuentran localizados en zonas con periodos dominante del suelo, T_s , entre 0.5 y 2 s (*i.e.*, T_s promedio a 1.3 s) por lo que se encuentra bien correlacionado con los sitios que presentaron las mayores intensidades sísmicas. Dentro de este intervalo de periodos dominantes del suelo de 0.5 y 2 s se encuentra el 74% (296 de 405 edificios) del total de los edificios de la muestra, mientras que el 25% (109 de 405 edificios) corresponden a edificios localizados en T_s mayores a 2 s y el 1% (4 de 405 edificios) localizados en T_s menores a 0.5 s (ver figura 3.4a).

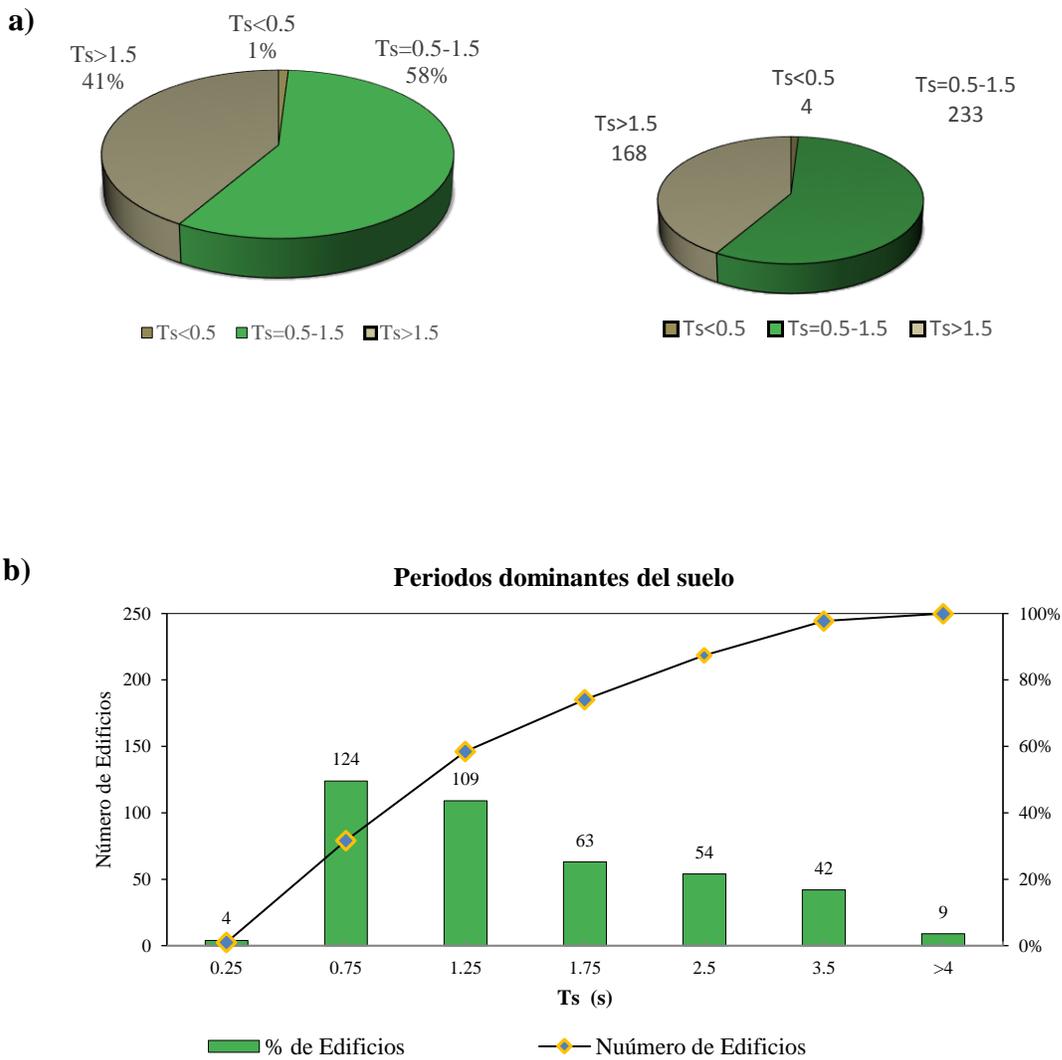


Figura 3.4. Distribución y porcentaje acumulado de los edificios en función del periodo dominante del suelo

3.6 Clases de vivienda

A continuación, se muestra la frecuencia estadística de las cinco clases de los edificios en las que se dividió la muestra acorde del número de niveles de acuerdo con Ordaz *et al.*, (2017). Del mismo modo, se presentan el porcentaje de edificios observados para cada una de las clases. La distribución de los edificios se dividió en 5 clases, las cuales son:

- C1- 1 a 2 niveles con el 33% (133 de 405)
- C2- 3 a 5 niveles con el 39% (159 de 405)
- C3- 6 a 10 niveles con el 25% (102 de 405)
- C4- 11-15 niveles con el 2% (9 de 405)
- C5- 16 a 24 niveles con <1% (2 de 405)

De esta manera se observa, el mayor porcentaje de edificios que integran la muestra, en orden descendente, son de 1 a 2 niveles, 3 a 5 niveles y de 6 a 10 niveles (*i.e.*, las clases C1, C2 y C3), que en conjunto comprenden el 97% (394 de 405 edificios) del total de los edificios de la muestra. No obstante, de este 97% de las clases C1, C2 y C3, el 40% (159 de 405) de los edificios corresponden a inmuebles constituidos por 3 a 5 niveles (ver figura 3.5). Por otro lado, las clases C4 y C5 constituidas por inmuebles de 11 a 24 niveles no representan más del 3% del total de edificios, lo que implica, que no son clases representativas para esta muestra.

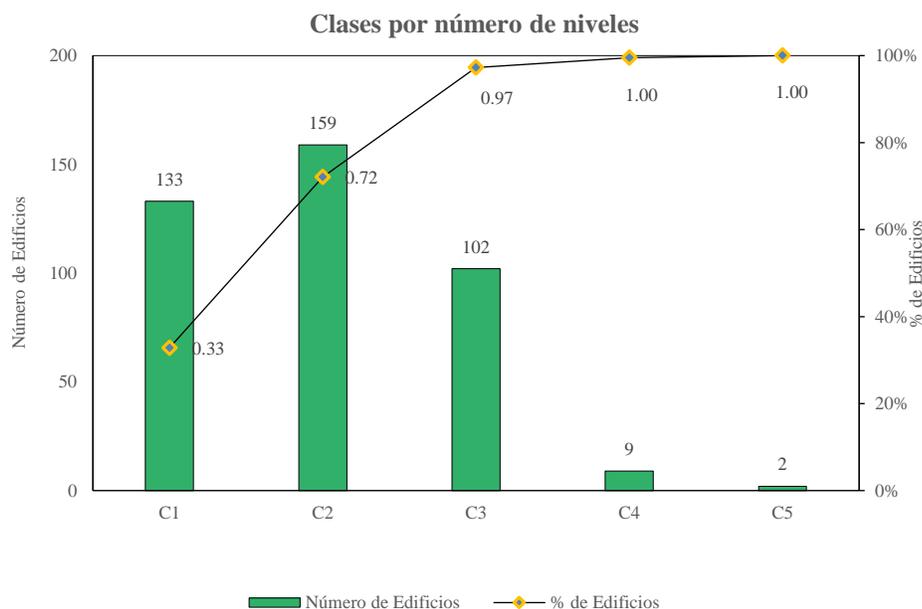


Figura 3.5. Distribución y porcentaje acumulado de los edificios por clases de vivienda

3.7 Periodos fundamentales de la estructura

Es necesario considerar el periodo fundamental de una estructura para el cálculo de los valores de aceleración espectral, SA , considerados en el diseño sísmico de las estructuras. Como se especificó en el capítulo anterior, los métodos para obtener los valores de las SA en sitios no instrumentados se realizan en función del periodo fundamental de la estructura, T_e , éste se calculará mediante la ecuación 2.3.1. En la figura 3.6 se muestra el histograma de frecuencia de los distintos periodos fundamentales, T_e , además, se presenta el porcentaje de edificios dañados observados en los T_e calculados. Las construcciones acordes a su periodo fundamental, T_e , se clasificaron en 5 clases, las cuales son:

- T_e - 0 a 0.5 s con el 54% (219 de 405)
- T_e - 0.5 a 1 s con el 33% (135 de 405)
- T_e - 1 a 1.5 s con el 10% (40 de 405)
- T_e - 1.5 a 2 s con el 1% (6 de 405)
- T_e - >2 s con el 1% (5 de 405)

Como es evidente, cerca del 60% de los edificios tiene un periodo fundamental, T_e , menor a 0.5 s, mientras que el 33% presenta T_e entre los 0.5 y 1 s. En conjunto más del 80% de los edificios que integran la muestra tienen periodos fundamentales menores, T_e , a 1 s, estos periodos se encuentran asociados a estructuras constituidas con menos de 7 niveles.

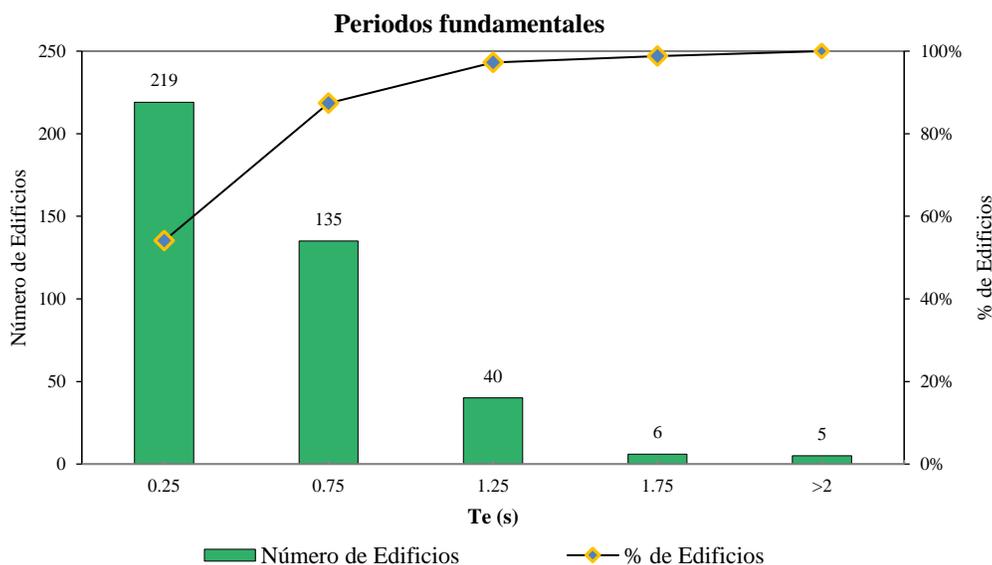


Figura 3.6. Distribución y porcentaje acumulado de los edificios en función del periodo fundamental de la estructura

3.8 Estados de daño

Para definir el daño en una estructura es necesario establecer distintos niveles de estados de daño, los cuales están en función de asignaciones cualitativas, que sirven como indicadores del grado de daño global de la estructura. Estos estados de daño representan una condición límite o tolerable de la afectación en la capacidad estructural establecida en función de tres aspectos fundamentales:

- i) Los daños físicos sobre los elementos estructurales y no estructurales,
- ii) La funcionalidad de la edificación posterior al sismo, y
- iii) El riesgo al que se encuentran expuestos sus ocupantes, edificios contiguos y su entorno.

El daño físico que se puede presentar en las estructuras se califica como daño estructural y no estructural. El primero, el cual ocurre en elementos estructurales tales como, vigas, columnas, muros, etc. Se relaciona con las características de los materiales que lo componen, su configuración, su estado, su conectividad y continuidad, el tipo de sistema y las características de la acción. Por otro lado, el daño no estructural está asociado con los elementos arquitectónicos, instalaciones (eléctricas y sanitarias) y el contenido de la edificación. La funcionalidad de la edificación implica, la posibilidad de realizar las actividades cotidianas del uso del inmueble, sin que las afectaciones de la vivienda o sus intervenciones se interpongan con la habitabilidad de sus ocupantes. Finalmente, las condiciones de inestabilidad del inmueble, dado que la vida de sus habitantes, construcciones de edificios contiguos y su entorno se encuentren en peligro, derivado de un posible desplome de la construcción, hundimiento diferencial y desplazamientos permanentes.

Para este estudio, posterior a la identificación de daños con ayuda de los documentos expedidos por las por las asociaciones civiles e instituciones gubernamentales, y además de las diversas verificaciones in situ de las condiciones de los inmuebles luego del sismo. Se definieron cinco estados de daño: 1) daño bajo DS_1 , 2) daño medio DS_2 , 3) alto DS_3 , 4) muy alto DS_4 y 5) colapso DS_5 . Los cuales se encuentran definidos en función de los tres aspectos previamente señalados en esta sección. Por ejemplo, se consideró como el mínimo estado de daño, el daño bajo DS_1 , ya que, de otra manera, se tendrían que haber tomado en cuenta todas las viviendas de la ciudad que no fueron reportadas, sin tener certeza de las nulas afectaciones. A diferencia, el máximo estado de daño DS_5 se asignó a las edificaciones que sufrieron colapso parcial (*i.e.*, derrumbe en alguno de sus entresijos) o colapso total (*i.e.*, derrumbe de todo el sistema estructural).

A continuación, se muestran la definición para los cinco estados de daño asignados a cada uno de los inmuebles que configuran la muestra para este estudio. Además, se muestran algunos edificios que ejemplifican cada uno de estos estados de daños. En el Anexo A se presentan mayores detalles; se muestran por ejemplo los daños interiores a través de

fotografías exhibidas en los documentos publicados, es por ello, que se justifica la baja calidad en las mismas.

- i. Bajo- DS_1 . Cuando afecta ligeramente la capacidad estructural. Se requieren medidas de reparación para la mayor parte de los elementos. Incluye leves fisuras en la estructura, muros de carga o muros divisorios y daño local insignificante en columnas y vigas. Esto significa que la estructura es calificada como segura para sus habitantes y su medio, por lo que una revisión futura no es necesaria para el inmueble (ver figura 3.7).



Figura 3.7. DS_1 - Edificio BJU32_2017 no presentó daño, a excepción de fisuras en los muros de algunos niveles (imagen obtenida de <https://bit.ly/36ES7Y1>)

- i) Medio- DS_2 . Cuando afecta medianamente la capacidad estructural. Incluye daño local en columnas, vigas y refuerzos; generalmente involucrando una pérdida significativa en su capacidad, la cual debería ser reestablecida a la original. Sin embargo, en este estado de daño, los elementos no estructurales pueden presentar daño severo. En este caso, es recomendable una revisión futura de la edificación para garantizar la habitabilidad y la seguridad estructural, así como someterla a un proyecto de rehabilitación estructural (*i.e.*, recuperar las condiciones originales o mejorar el comportamiento del sistema estructural) (ver figura 3.8).

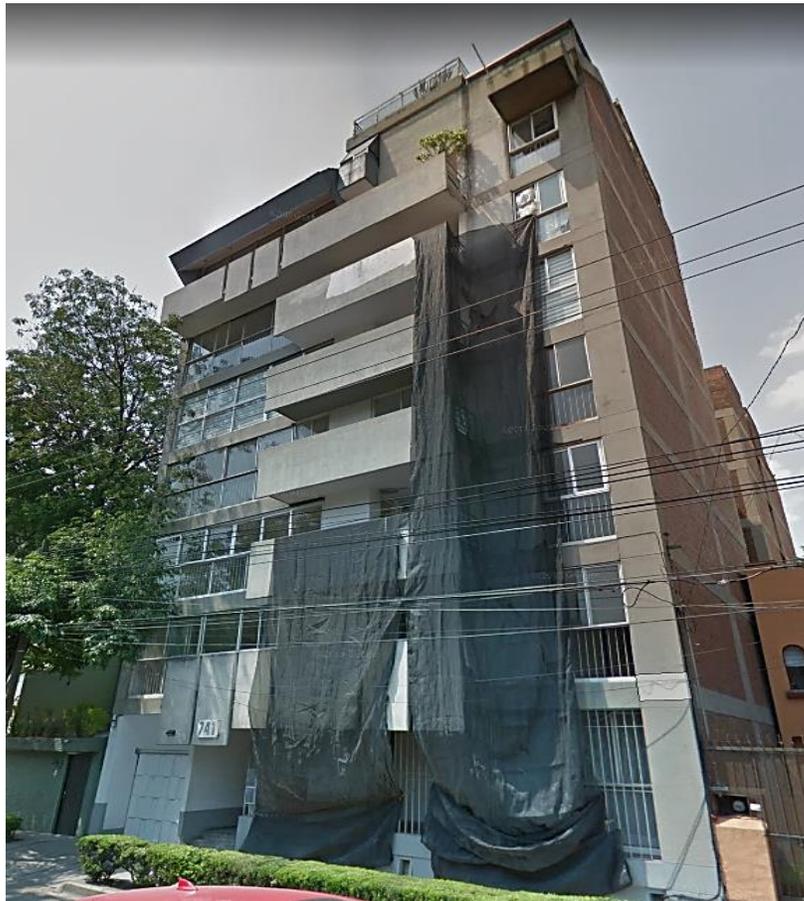


Figura 3.8. DS_2 - Edificio BJU55_2017 sin daño estructural, aunque se observaron trabajos de reparación en varios de sus muros exteriores (imagen obtenida de <https://bit.ly/2p1BLbu>)

- ii) Alto- DS_3 . Cuando se presentan severos daños en elementos estructurales los cuales propician la inestabilidad de la estructura. Incluye edificios con daño severo en columnas, pero sin importantes desplazamientos permanentes en losas e inclinación no muy significativa. Similar al DS_2 , hay un daño importante en elementos no estructurales y contenidos. Estas estructuras deben ser apuntaladas. Son consideradas inhabitables debido al riesgo que representan para sus habitantes, por lo que el edificio debe someterse a un proyecto de rehabilitación estructural y reforzamiento (*i.e.*, incremento de la capacidad para resistir cargas de una estructura o de una parte de la estructura) para seguir con su función (ver figura 3.9).

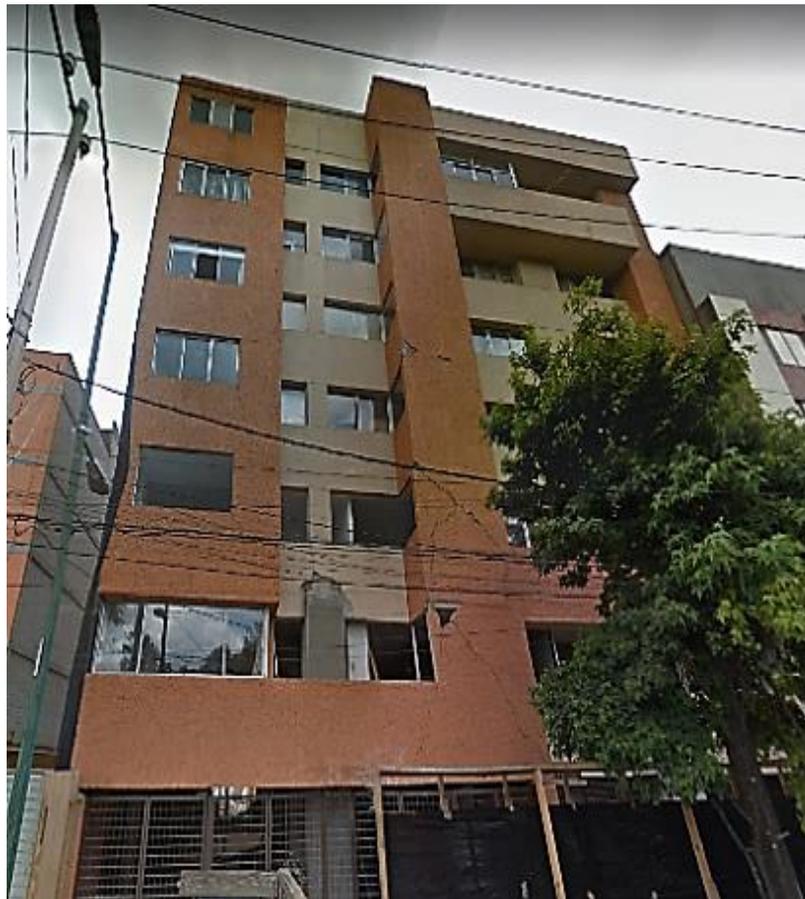


Figura 3.9. DS_3 - Edificio BJU37_2017 presentó daño estructural, lo que condujo a su apuntalamiento para una rehabilitación y reforzamiento del edificio (imagen obtenida de <https://bit.ly/3628pu3>)

- iii) Muy Alto- DS_4 . Cuando el daño afecta significativamente la capacidad estructural. En este nivel DS_4 se presentaron importantes daños en elementos estructurales, tales como, daño severo en varias columnas, importantes desplazamientos permanentes en losas e inclinación significativa, barras de refuerzo expuestas o pandeadas, concreto con aplastamiento significativo o con grietas mayores, muros de carga o no estructurales con grietas importantes con piezas aplastadas o desprendidas. Se considerará daño muy alto la presencia de grietas que indiquen la formación de conos o pirámides truncados derivados de fallas en cortante por penetración entre columnas y losas planas. Esto implica que presenta graves condiciones de inestabilidad que pone a la vida de personas, edificios contiguos y su entorno en peligro. Además, los costos de rehabilitación podrían resultar ser demasiado costosos (*i.e.*, no se considera factible económicamente reparar los daños) por lo que es más recomendable la demolición del edificio (ver figura 3.10).



Figura 3.10. DS_4 - BJU34_2017 tuvo daños tan severos que ameritó su demolición (imagen obtenida de <https://bit.ly/2Nb9AP9>)

- iv) Colapso- DS_5 . Cuando los inmuebles presentaron colapso parcial o total en su sistema estructural durante el evento sísmico. Dentro del primero, son considerados los edificios que presentaron derrumbes en alguno de sus entrepisos o una parte de su estructura, para esta última condición algunas veces producto del colapso total de los edificios contiguos o el posible golpeteo entre edificios. Mientras que, en el segundo, los inmuebles resultaron colapsados en todo su sistema estructural (ver figura 3.11).



Figura 3.11. DS_5 - Edificio BJU66_2017 colapsó durante el sismo (2017) (imagen obtenida de <https://bit.ly/39xBsXq>)

A continuación, se muestran los histogramas de frecuencia de los cinco estados de daño observados (*i.e.*, DS_1 , DS_2 , DS_3 , DS_4 , DS_5) de los edificios que integran la muestra en estudio. En la figura 3.12 se observa una distribución uniforme del 60% (240 de 405) de los edificios, estos se encontraron catalogados entre los estados de daño bajo y medio (DS_1 , DS_2) que, en términos de habitabilidad y funcionalidad, se considera como una estructura segura. No obstante, se encuentra que cerca del 40% (165 de 405) de edificios están entre los estados de daño alto, muy alto y colapso (*i.e.*, DS_3 , DS_4 , DS_5). Estos estados de daño presentan mayor importancia en relación con los anteriores, dado que representan, peligro para sus habitantes o para los edificios en su entorno (*i.e.*, DS_3 , DS_4), o en su caso, representan numerosas pérdidas económicas e incluso humanas (*i.e.*, DS_5). De los edificios que integran la muestra total en estudio, al 22% (90 de 405) de estos se asignaron con estado daño DS_3 , por su parte, el 13% (49 de 405) de los edificios de la muestra se encontraron con estado de daño DS_4 , mientras que el 6% (26 de 405) de los inmuebles colapsó total o parcialmente durante el evento sísmico del 2017.

Es importante destacar que, dentro de los 38 edificios que resultaron con colapso durante el evento sísmico, 26 se encuentran dentro del sector vivienda. Con lo anterior se verifica que las construcciones del sector vivienda en la Ciudad de México resultaron ser el sector más afectado (el 68% de los edificios colapsados) luego del sismo del 19 septiembre de 2017 Mw7.1. Además, que cerca del 50% (200 de 405) de los edificios requieren proyectos de rehabilitación y/o reforzamiento.

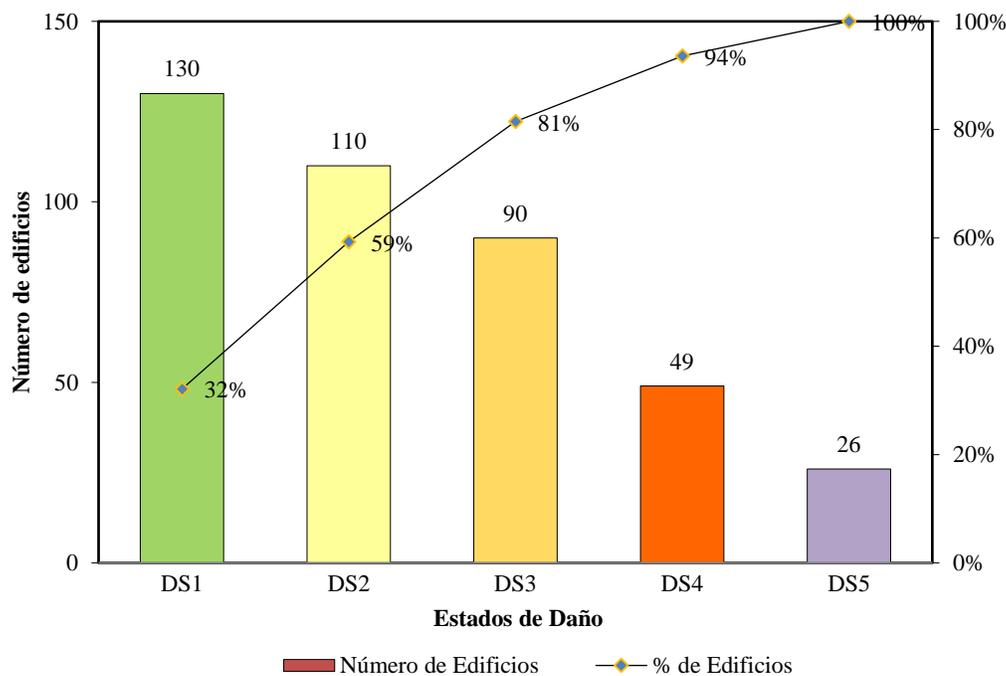


Figura 3.12. Distribución y porcentaje acumulado de las viviendas por su estado de daño

Como se mencionó en la sección 3.6, la C2 (*i.e.*, edificios constituidos de 3 a 5 niveles) en conjunto representa cerca del 40% de los edificios que integran la muestra. De este modo, en la siguiente figura 3.13, se observan que los porcentajes más altos de los estados de daños se concentraron en los DS_3 , DS_4 y DS_5 . Entonces, esta clase está integrada por el 31% (28 de 90) de los edificios que presentaron DS_3 , el 37% (18 de 49) de los edificios que presentaron DS_4 , mientras los edificios que presentaron DS_5 , en esta clase, se concentra el 46% (12 de 26) (ver figura 3.13). En esta figura, además, se observa la prevalencia de edificios dañados de 6 a 10, 1 a 2 y 3 a 5 niveles (en orden ascendente) (*i.e.*, las clases C3, C1 y C2).

Con relación a lo anterior, se destaca que el 73% (36 de 49) de los edificios que ameritan demolición se encuentran constituidos de 1 a 5 niveles (*i.e.*, dentro de las clases C1 y C2). A diferencia, el 85% (22 de 26) de los edificios con colapso se encontraban constituidos de 3 a 10 niveles (*i.e.*, edificios de mediana altura).

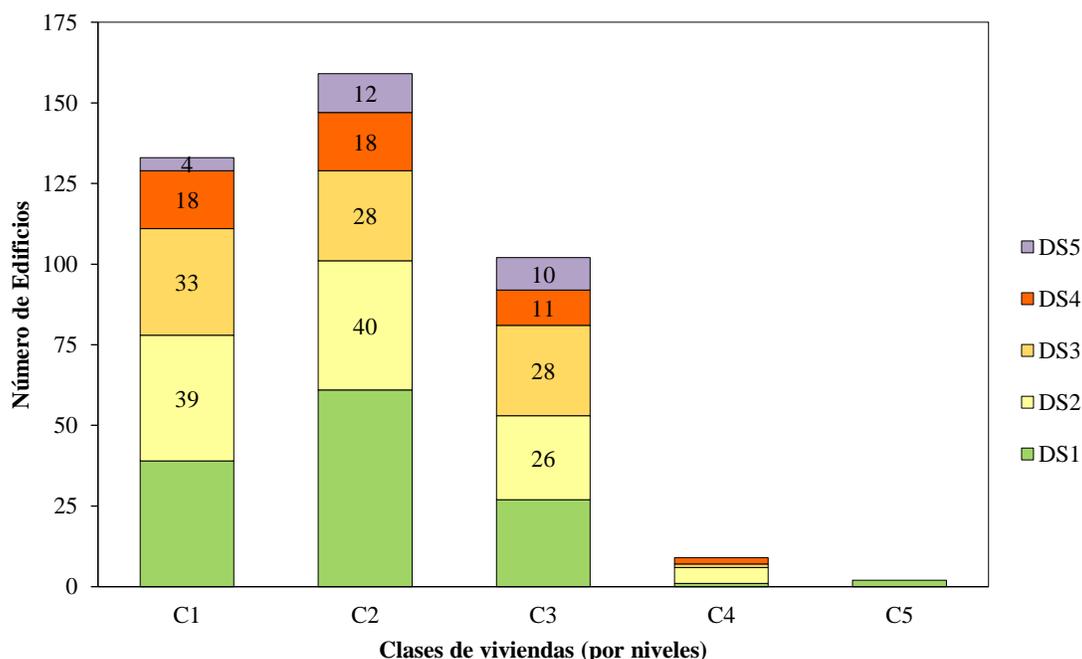


Figura 3.13. Clasificación del número de viviendas de acuerdo con su asignación del estado de daño en función de su número niveles

A continuación, se detallan los estados de daños observados en cuatro clases, correspondientes a los niveles de 1 a 2 niveles, 3 a 5 niveles, 6 a 10 y de 11 a 15 niveles (*i.e.*, las clases C1, C2, C3 y C4), puesto que para la clase de 16 a 24 niveles figuraba un estado de daño, DS_1 . Para las clases integradas de 1 a 2 niveles, 3 a 5 niveles y 6 a 10 niveles (*i.e.*, las clases C1, C2 y C3) se concentra el mayor porcentaje de los estados de daño (más del 90%) más importantes (*i.e.*, los estados de daño DS_3 , DS_4 y DS_5).

- En la figura 3.14a se presenta la distribución del número de edificios que resultaron dañados en la clase C1. Recordando que esta clase representa el 33% de los edificios que integran la muestra. Para esta clase, dentro de los estados de daño más importantes se concentra el 36% (18 de 49) de los edificios que ameritan demolición y el 15% (4 de 26) de los edificios que presentaron colapso. Así mismo, se concentra el 36% (33 de 90) de los edificios que amerita un proyecto de rehabilitación y reforzamiento y a su vez el 35% (39 de 110) de los edificios que requieren proyectos de rehabilitación.
- En la figura 3.14b se presenta la distribución del número de edificios que resultaron dañados en la clase C2. Esta clase representa el 39% de los edificios que integran la muestra. Dentro de los estados de daño más importantes se concentra el 36% (18 de 49) de los edificios que ameritan demolición y el 46% (12 de 26) de los edificios que presentaron colapso. Así mismo, se concentra el 31% (28 de 90) de los edificios que amerita un proyecto de rehabilitación y reforzamiento y a su vez el 36% (40 de 110) de los edificios que requieren proyectos de rehabilitación.
- En la figura 3.14c se presenta la distribución del número de edificios que resultaron dañados en la clase C3. Recordando que esta clase representa el 25% de los edificios que integran la muestra. Para esta clase, dentro de los estados de daño más importantes se concentra el 22% (11 de 49) de los edificios que ameritan demolición y el 38% (10 de 26) de los edificios que presentaron colapso. Así mismo, se concentra el 31% (28 de 90) de los edificios que amerita un proyecto de rehabilitación y reforzamiento y a su vez el 23% (26 de 110) de los edificios que requieren proyectos de rehabilitación.
- En la figura 3.14d se presenta la distribución del número de edificios que resultaron dañados en la clase C4. Esta clase representa cerca del 2% de los edificios que integran la muestra. El porcentaje más representativo de estados de daño en esta muestra se observa en el DS_2 , donde el 5% (5 de 110) de los edificios en esta clase amerita un proyecto de rehabilitación. Por otro lado, el 4% (2 de 49) de los edificios requieren demolición. Sin embargo, estos porcentajes no son significativos dentro de los estados de daño DS_2 y DS_4 .

En resumen, de los edificios que requieren proyectos de rehabilitación y reforzamiento el 36% de los edificios se concentra en la clase C1 (*i.e.*, viviendas de 1 a 2 niveles). Por su parte, el mismo porcentaje de los edificios que requieren proyectos de rehabilitación se concentra en la clase C2 (*i.e.*, viviendas de 3 a 5 niveles), que a su vez concentra el 46% de los edificios colapsados. Y además el 72% de los edificios que ameritan demolición se concentran en ambas clases (C1 y C2). Como se mencionó en las secciones anteriores, las clases C4 y C5, edificios de 11 a 24 niveles, no son clases representativas por el número de edificios que las constituyen ni por el porcentaje de estados de daño que representan.

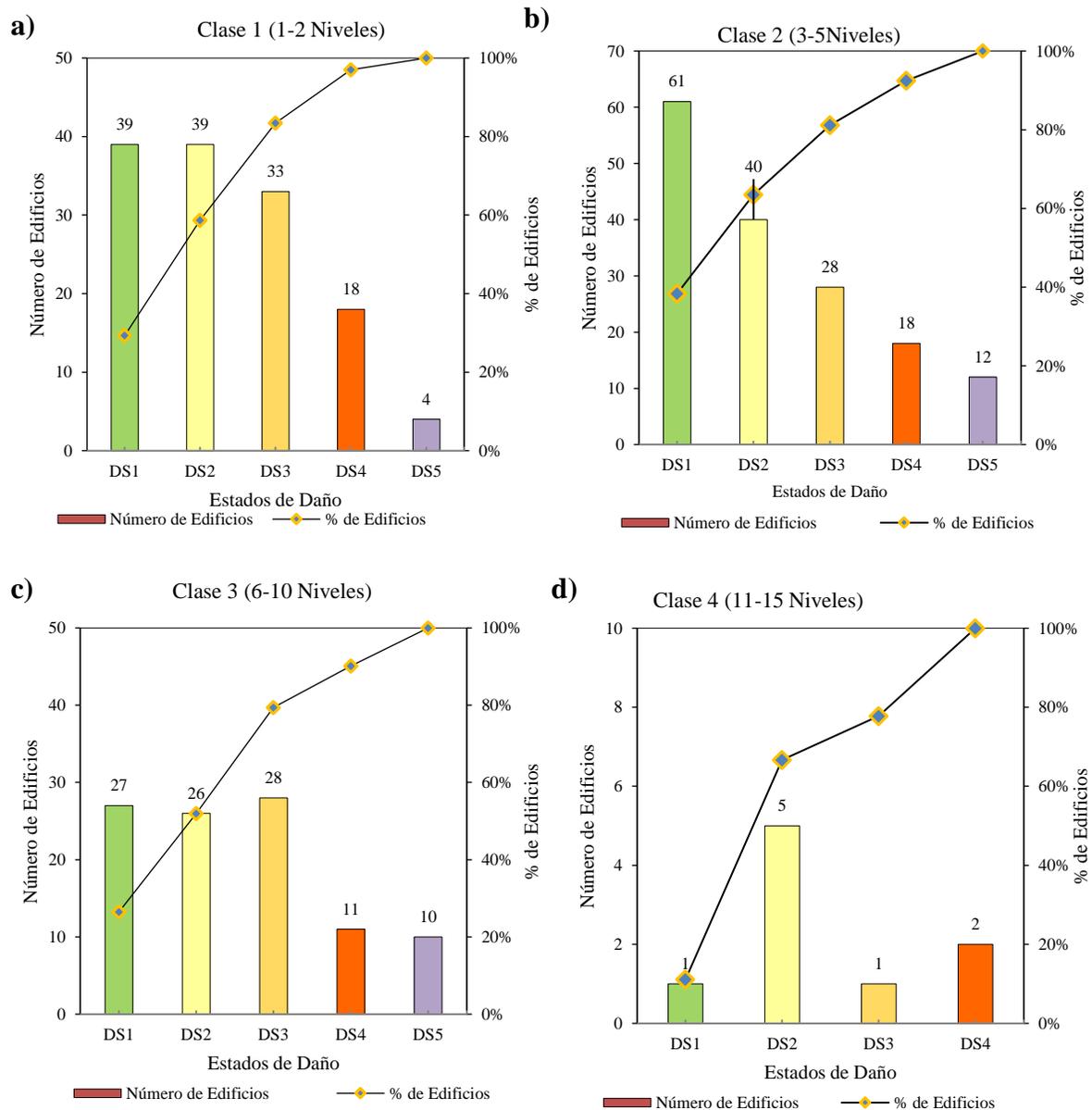


Figura 3.14. Distribución y porcentaje acumulado de los estados de daño en función de la clase de vivienda a) Clase C1, b) Clase C2, c) Clase C3, d) Clase C4

3.9 Análisis estadístico para intensidades espectrales

En sitios no instrumentados se obtuvieron, los valores de aceleraciones espectrales SA , mediante el método planteado en la sección 2.3 del capítulo anterior. El método utilizado propuesto por Pérez-Rocha (1999) y Pérez-Rocha *et al.* (2009). Este método, se justificó con la aseveración de que, al utilizar otro (*i.e.*, registro de la estación más cercana), se tendría una mayor incertidumbre del cálculo para los valores de intensidad de SA . Entonces, estos valores de SA se determinaron en función del periodo fundamental de las estructuras, T_e . Dicho periodo se calculó mediante la ecuación 2.3.1. Es importante destacar que, los valores de SA que experimentaron los edificios son indispensables para el análisis de fragilidad sísmica, es por ello, que se busca tener mayor certidumbre con dichos valores. En esta sección se presentan los histogramas de distribución de frecuencias de los valores de SA que posiblemente experimentaron los edificios. Se presentan tres casos donde las figuras representan: i) los histogramas de frecuencia de las SA experimentadas por los 405 edificios, ii) los histogramas de frecuencia de las SA para 3 clases (*i.e.*, C1, C2,C3) y iii) los histogramas de frecuencia para los cinco estados de daño (*i.e.*, DS_1 , DS_2 , DS_3 , DS_4 , DS_5) en las clases representativas (*i.e.*, C1, C2,C3). En la figura 3.16 se muestra la distribución espacial de la Ciudad de México, donde se presenta la localización de los edificios en cuestión con un mapa de fondo de los valores de SA para el período estructural $T_e = 1s$. En la figura 3.15 se muestra el histograma de distribución de frecuencias de los valores de SA calculadas, que experimentaron los 405 edificios en cuestión. Estas se presentan para seis intervalos de valores de SA calculadas:

- $SA - 0$ a 1 g con el 10% (42 de 405)
- $SA - 1$ a 2 g con el 38% (155 de 405)
- $SA - 2$ a 3 g con el 37% (148 de 405)
- $SA - 3$ a 4 g con el 10% (39 de 405)
- $SA - 4$ a 5 g con el 4% (15 de 405)
- $SA - 5$ a 6 g con el 1% (6 de 405)

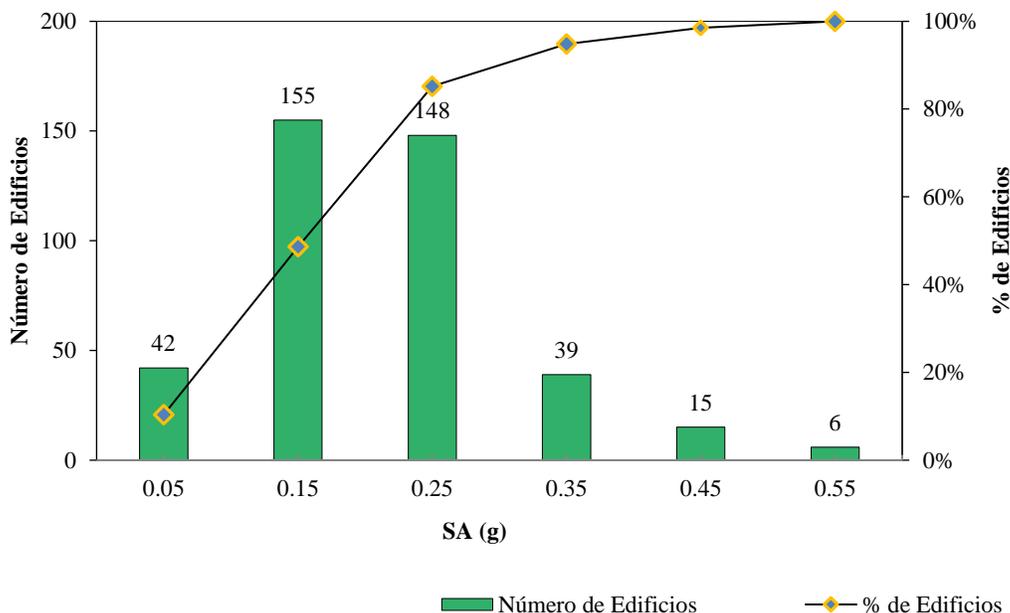


Figura 3.15. Histograma de distribución y porcentaje acumulado de los valores de aceleración espectral, SA, experimentados por las estructuras

Con lo relación a lo anterior, se evidencia que más del 80% de los edificios experimentaron valores de SA menores a 0.3 g . El 75% (303 de 405) de los edificios experimentaron valores de SA entre $0.1\text{ g} \leq SA < 0.3\text{ g}$. Estas aceleraciones espectrales se experimentaron en edificios con $T_e \leq 1.46\text{ s}$ (*i.e.*, con menos de 10 niveles).

Es importante destacar que el 55% (222 de 405) de los edificios de la muestra se encontraron localizados en sitios con periodos dominante del suelo promedio $T_s = 1.3\text{ s}$ (*i.e.*, T_s entre 0.5 y 2 s), característicos por poseer un $T_e \leq 1.46\text{ s}$ y que experimentaron un valor de SA promedio de 0.2 g .

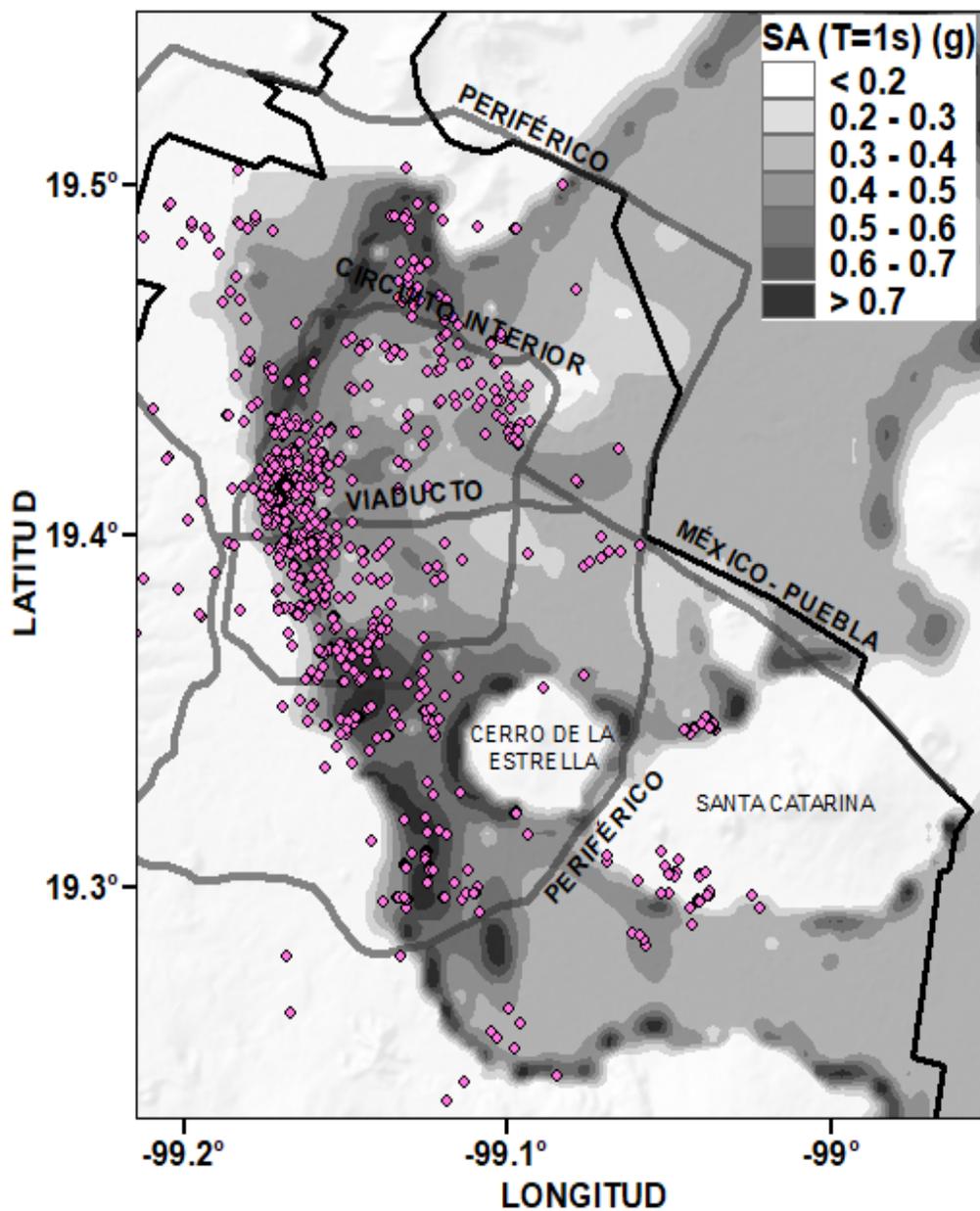


Figura 3.16. Localización de las viviendas dañadas luego del sismo del 19S del 2017. El mapa contiene de fondo la distribución de los valores de aceleración espectral, SA, que experimentaron los edificios. Los círculos representan los edificios dañados

En la siguiente figura se presenta el histograma de distribución de frecuencia para las tres clases de vivienda representativas, C1, C2 y C3. Se observan valores de aceleración espectral predominantes de 0.1 a 0.3 g. En la figura 3.17a se tienen los edificios de la clase C1, en la cual se puede observar que casi el 60% (79 de 133) de los edificios experimentaron valores de SA menores a 1.5g. Para la clase C2, en figura 3.17b se observa que cerca del 90% (140 de 159) de los edificios presentaron valores de SA entre 0.1 y 0.3 g. En la clase C3 (ver figura 3.17c) se observa que cerca del 80% (82 de 102) de los edificios presentaron valores de SA entre 0.1 y 0.35 g.

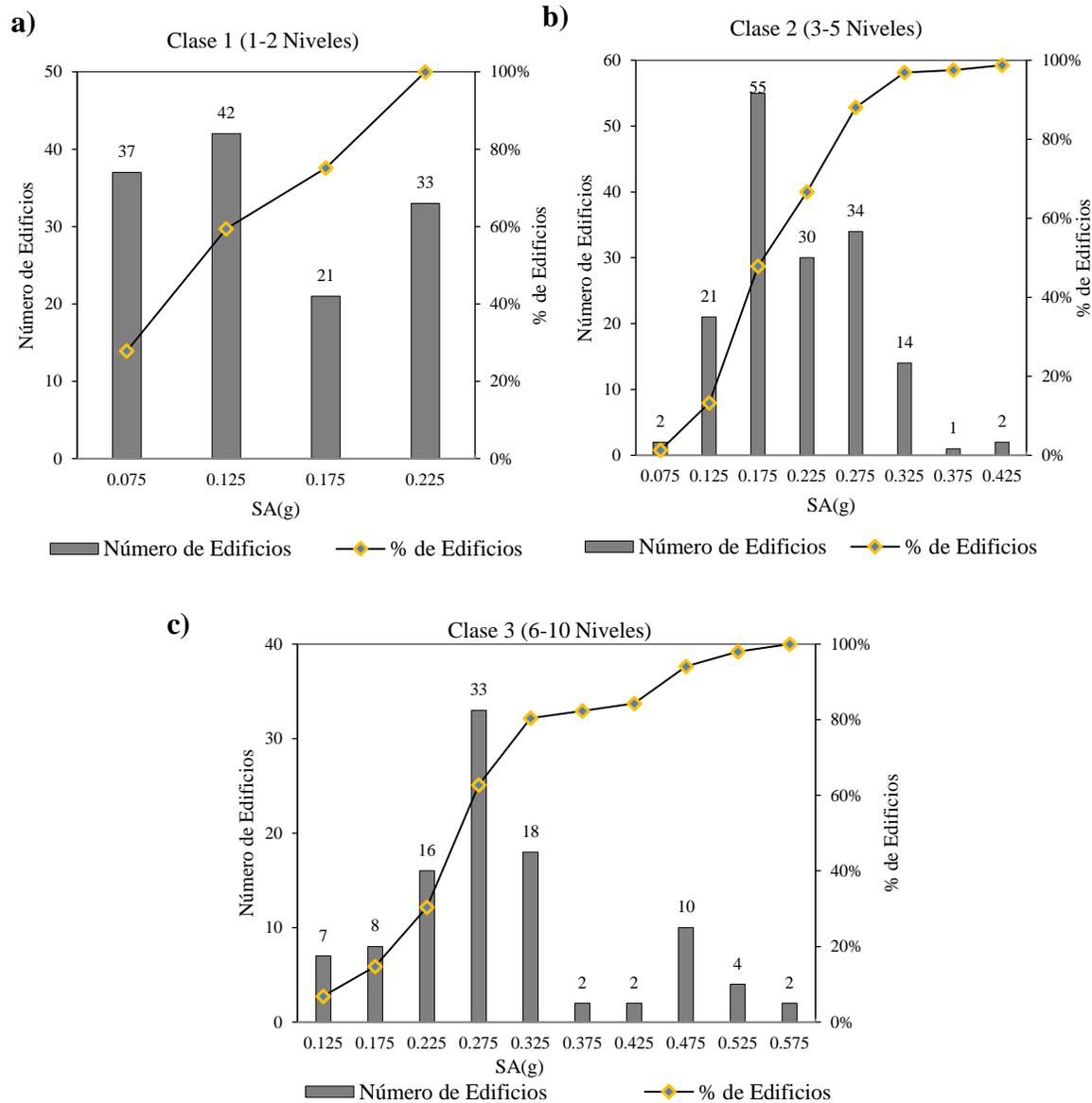


Figura 3.17. Distribución y porcentaje acumulado de los valores de aceleración espectral, SA , experimentadas por los edificios a) Clase C1, b) Clase C2, c) Clase C3

En la clase C1, se estima que un porcentaje cercano al 80% de edificios experimentaron valores de SA menores a 0.2 g; estos resultaron dentro de los estados de daño de DS_1 y DS_2 (figura 3.18a y 3.18b). A diferencia de lo anterior, los edificios que resultaron dentro de los estados de daño más importantes DS_3 , DS_4 y DS_5 , experimentaron valores de SA menores a 0.25 g (figuras 3.18c, 3.18d y 3.18e).

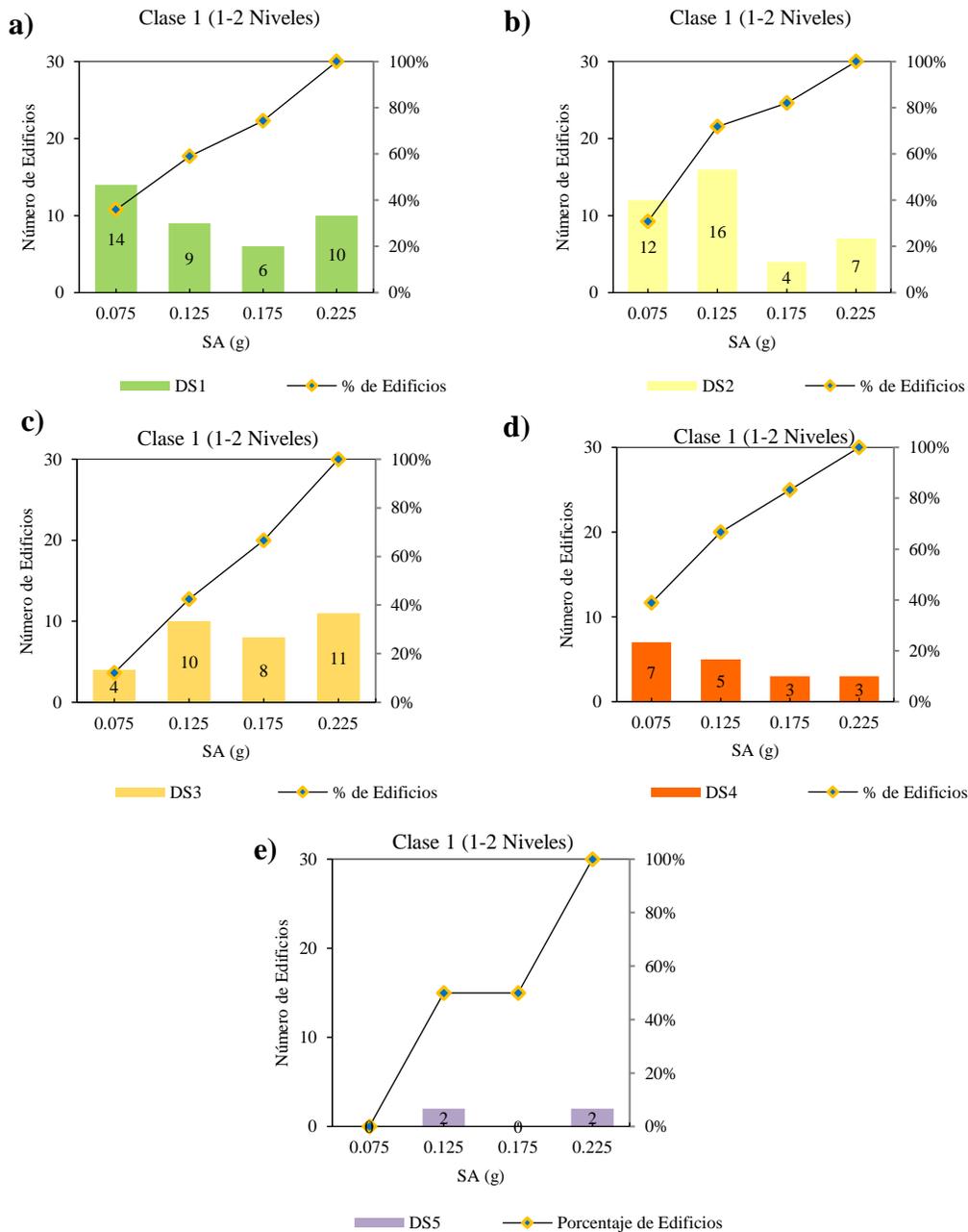


Figura 3.18. Distribución y porcentaje acumulado de los valores de aceleración espectral, SA , experimentadas por los edificios de la clase C1; a) DS_1 , b) DS_2 , c) DS_3 , d) DS_4 y e) DS_5

Dentro de la clase C2, más del 80% de edificios experimentaron valores de SA menores a 0.25 g, presentando estados de daño de DS_1 y DS_2 (figura 3.19a y 3.19b). Por su parte, de los edificios que resultaron dentro de los estados de daño más importantes DS_3 , DS_4 y DS_5 , más del 90% experimentaron valores de SA menores a 0.35 g (figuras 3.19c, 3.19d y 3.19e).

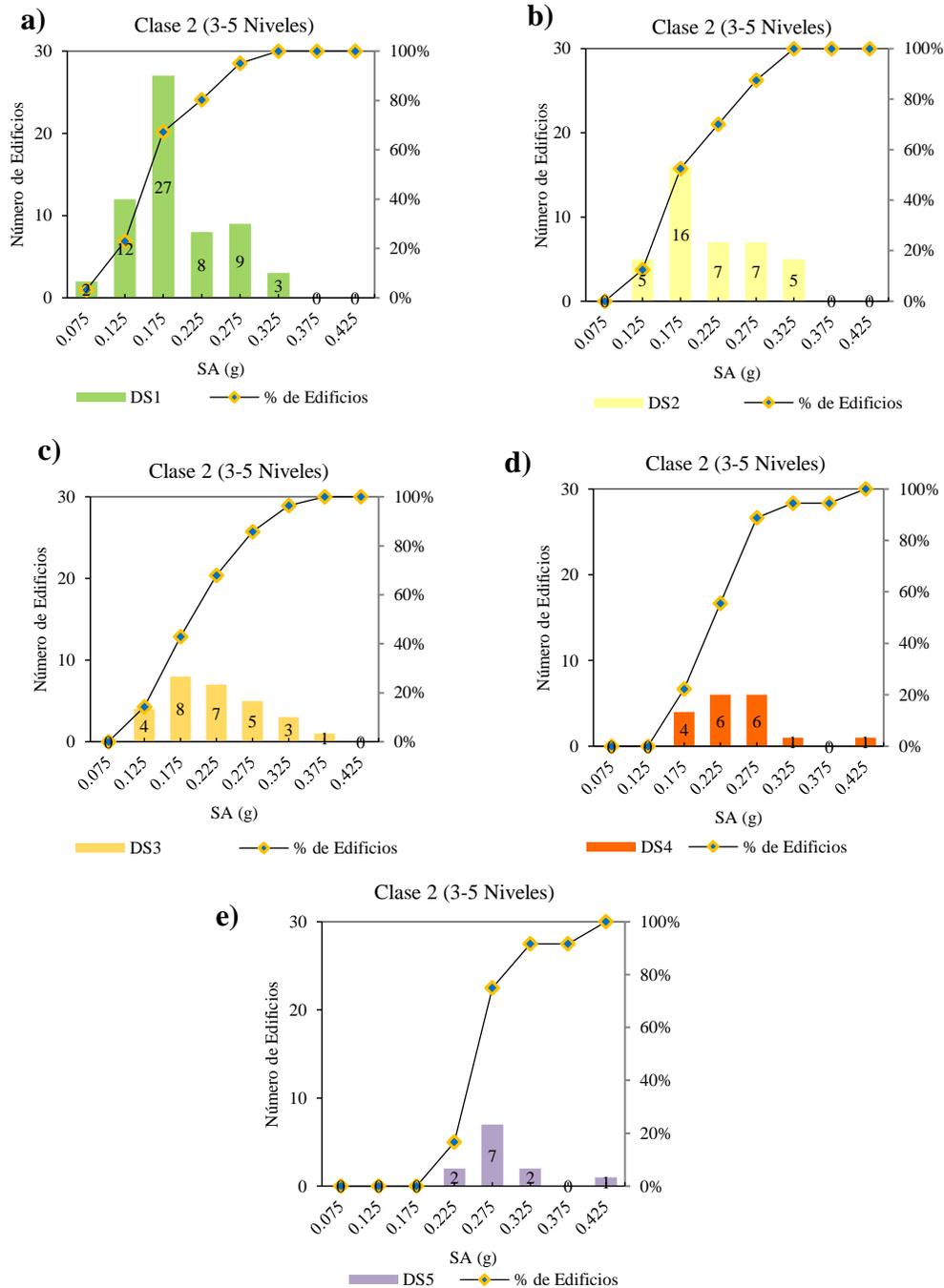


Figura 3.19. Distribución y porcentaje acumulado de los valores de aceleración espectral, SA , experimentadas por los edificios de la clase C2; a) DS_1 , b) DS_2 , c) DS_3 , d) DS_4 y e) DS_5

Como se puede observar en la clase C3, casi el 90% de edificios que experimentaron valores de SA menores a 0.3 g, resultaron en el estado de daño DS_1 (figura 3.20a), mientras que el mismo porcentaje de los edificios experimentaron valores de SA menores a 0.35 g dentro del estado de daño DS_2 (figura 3.20b). Por su parte, de los edificios que resultaron dentro de los estados de daño más importantes DS_3 , DS_4 y DS_5 , alrededor del 60% experimentaron valores de SA menores a 0.3 g (figuras 3.20c, 3.20d y 3.20e). No obstante, en estos estados de daño alrededor del 40% de los edificios experimentaron SA de hasta 0.5 g o incluso mayores, tal es el caso del estado de daño DS_3 .

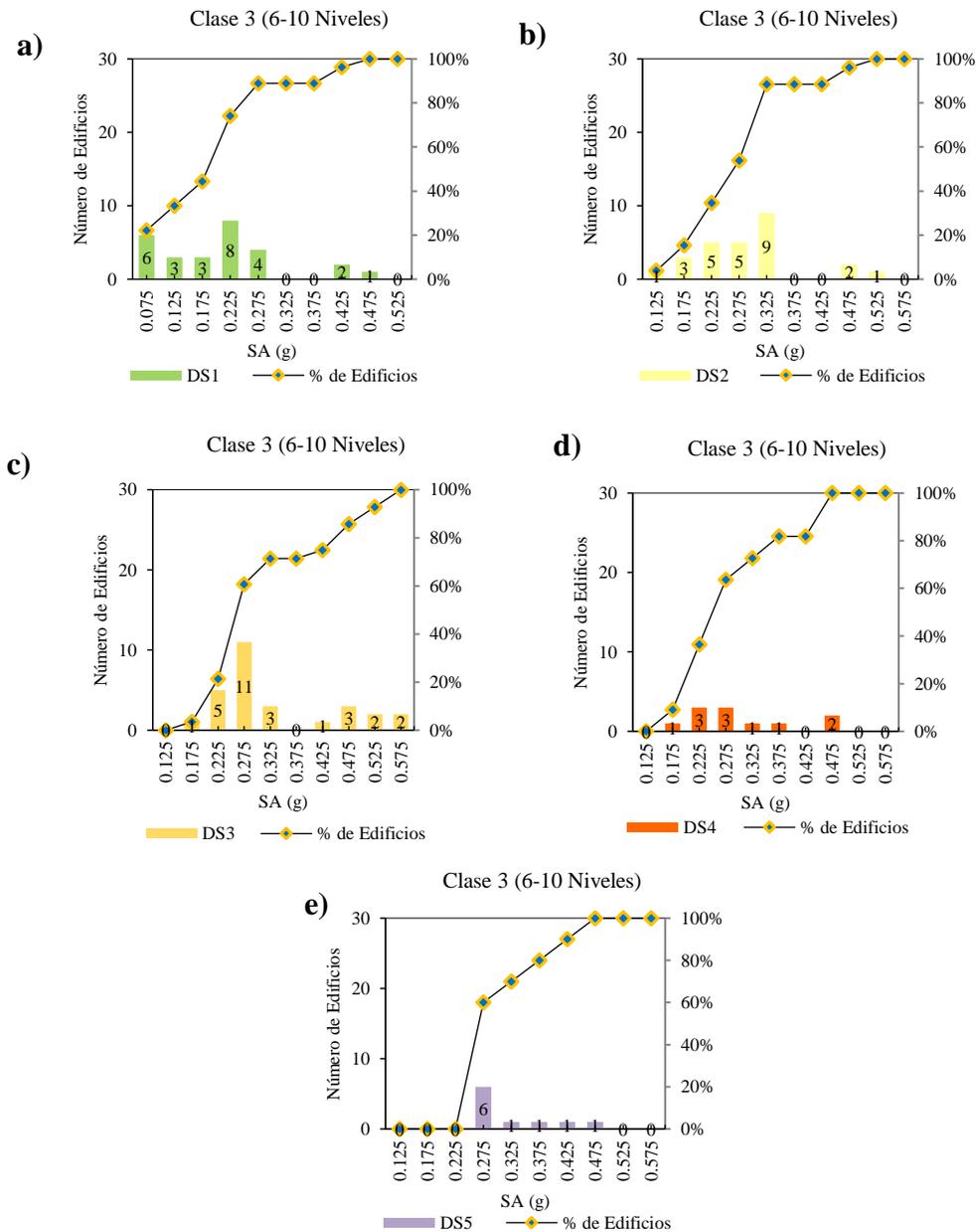


Figura 3.20. Distribución y porcentaje acumulado de los valores de aceleración espectral, SA , experimentadas por los edificios de la clase C3; a) DS_1 , b) DS_2 , c) DS_3 , d) DS_4 y e) DS_5

En resumen, para las tres clases de vivienda en análisis (C1, C2 y C3), los edificios que presentaron los estados de daño más importantes DS_3 , DS_4 y DS_5 son como resultado de experimentar en gran medida valores de SA menores a 0.3 g. Sin embargo, para la clase C2 y C3 se puede observar que los edificios llegaron a experimentar valores de SA de hasta 0.5 g o incluso mayores. Esos edificios se encuentran localizados en sitios con periodo dominante de suelo T_s entre 0.5 y 2 s, por lo que se encuentra bien correlacionado con sitios donde se produjeron las intensidades sísmicas más altas.

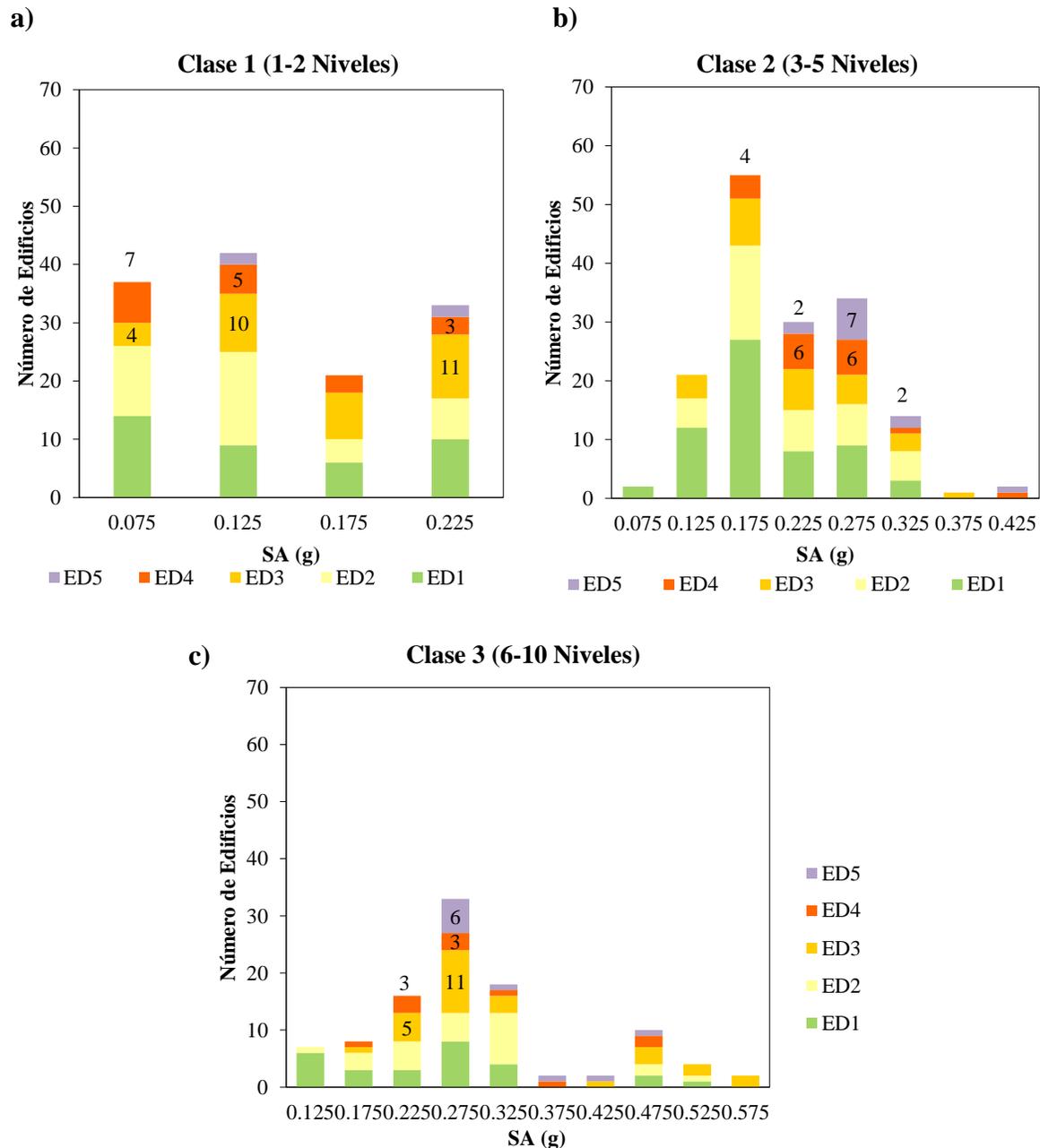


Figura 3.21. Distribución de los estados de daño de acuerdo con los valores de SA que experimentaron
a) Clase 1, b) Clase 2, c) Clase 3

3.10 Edificios con colapso

Tanto para el sismo de 1985 Mw8.1 como para el sismo de 2017 Mw7.1, los edificios del sector vivienda resultaron ser las construcciones más afectadas, prueba de ello, durante el sismo del 2017 resultaron con colapso parcial o total 38 edificios en la Ciudad de México, de los cuales, en este estudio, se identificó que el 68% (26 de 38) de los edificios tenían uso habitacional (*i.e.*, dentro del grupo B1 y B2). En la figura 3.15 se muestra la distribución de la localización de estos edificios por alcaldía, presentándose los siguientes porcentajes por alcaldía:

- Benito Juárez 46% (12 de 26)
- Cuauhtémoc 26% (7 de 26)
- Coyoacán 12% (3 de 26)
- Gustavo A. Madero 8% (2 de 26)
- Iztapalapa 8% (2 de 26)

Como se observa los mayores porcentajes se registraron en las alcaldías Benito Juárez y Cuauhtémoc con el 46% y 26%, respectivamente. Mismas alcaldías que en el evento sísmico del 19 de septiembre de 1985 Mw8.1, del mismo modo, concentraron los mayores porcentajes de este estado de daño.

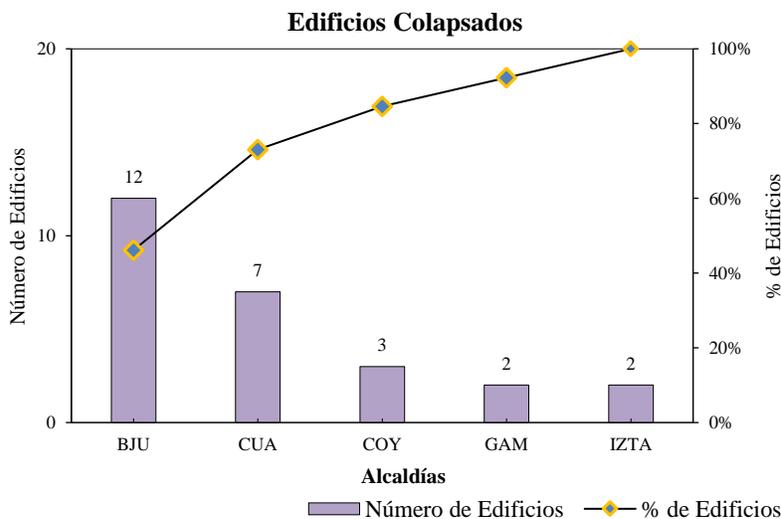


Figura 3.22. Distribución de los 26 edificios colapsados y el porcentaje presentado en 5 alcaldías donde se concentraron los colapsos

Como se mencionó en la sección 3.5, los sitios que presentaron mayores intensidades sísmicas son sitios con periodo dominante del suelo, T_s , en promedio de 1.3 s. En la figura 3.22 se presenta de manera ilustrativa la localización de las viviendas que sufrieron colapso en círculos rosas sobre un mapa que contiene de fondo la distribución del periodo dominante del suelo de la Ciudad de México. De acuerdo con la figura 3.23a, se observa que más del 88% de los edificios que presentaron colapso se concentra en sitios con periodo dominante del suelo, T_s , entre 0.5 y 2 s, por lo que se encuentra bien correlacionado, los daños y el periodo del suelo donde se presentaron las mayores intensidades sísmicas.

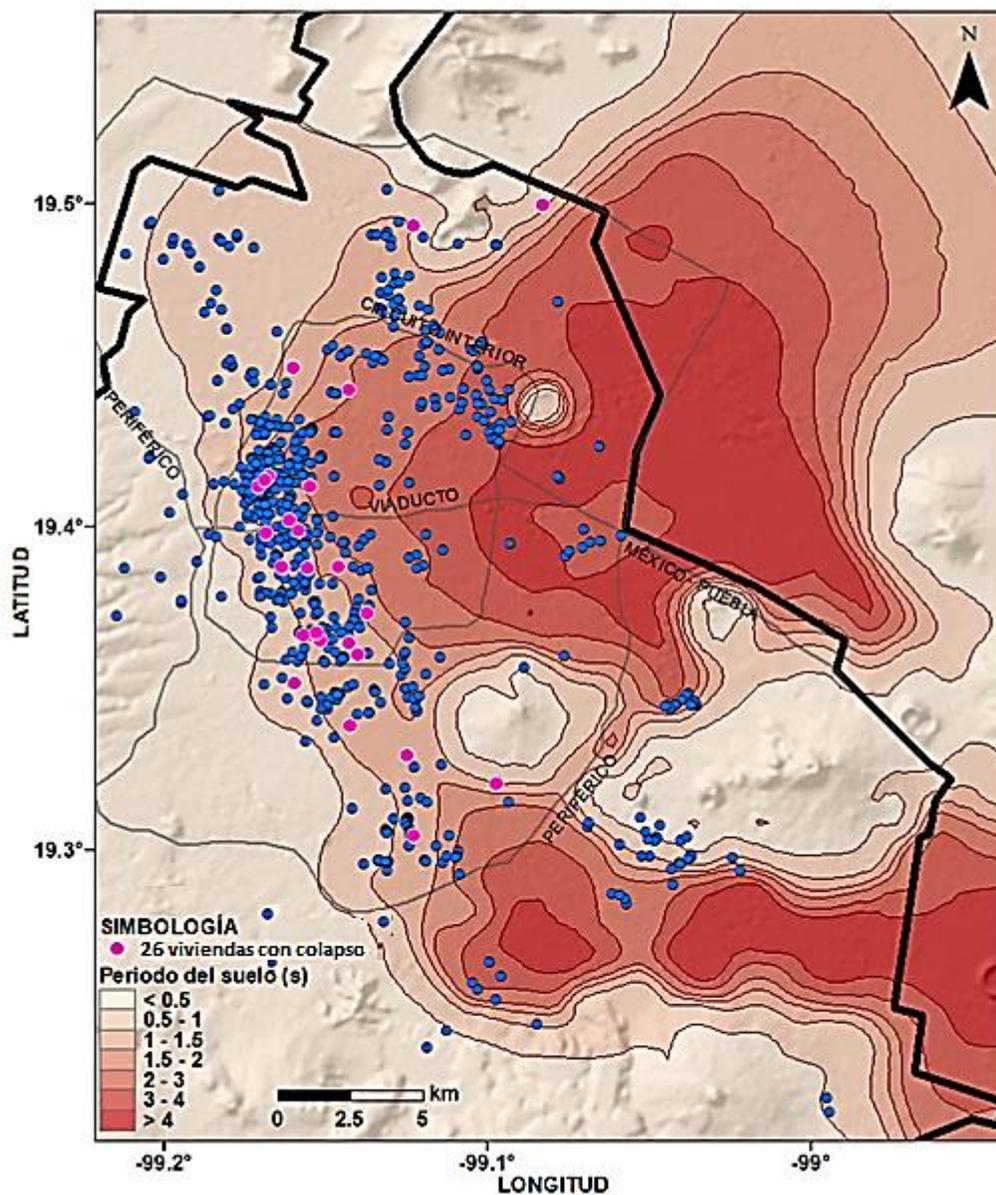


Figura 3.23. Ubicación de los edificios de vivienda con daños observados debido al sismo del 2017, los círculos rosas representan las 26 viviendas que sufrieron colapso durante el evento sísmico

Como se mencionó anteriormente en este estudio se identificaron 26 edificios que presentaron colapso total o parcial, los cuales, el mayor porcentaje de edificios experimentaron valores de aceleraciones espectrales entre 0.25 y 0.35 g asociados a edificios con periodos fundamentales, T_e , entre 0.3 y 1.4 s. Finalmente, estos edificios se encontraban constituidos principalmente de edificaciones de entre 3 y 10 niveles (ver figura 3.23)

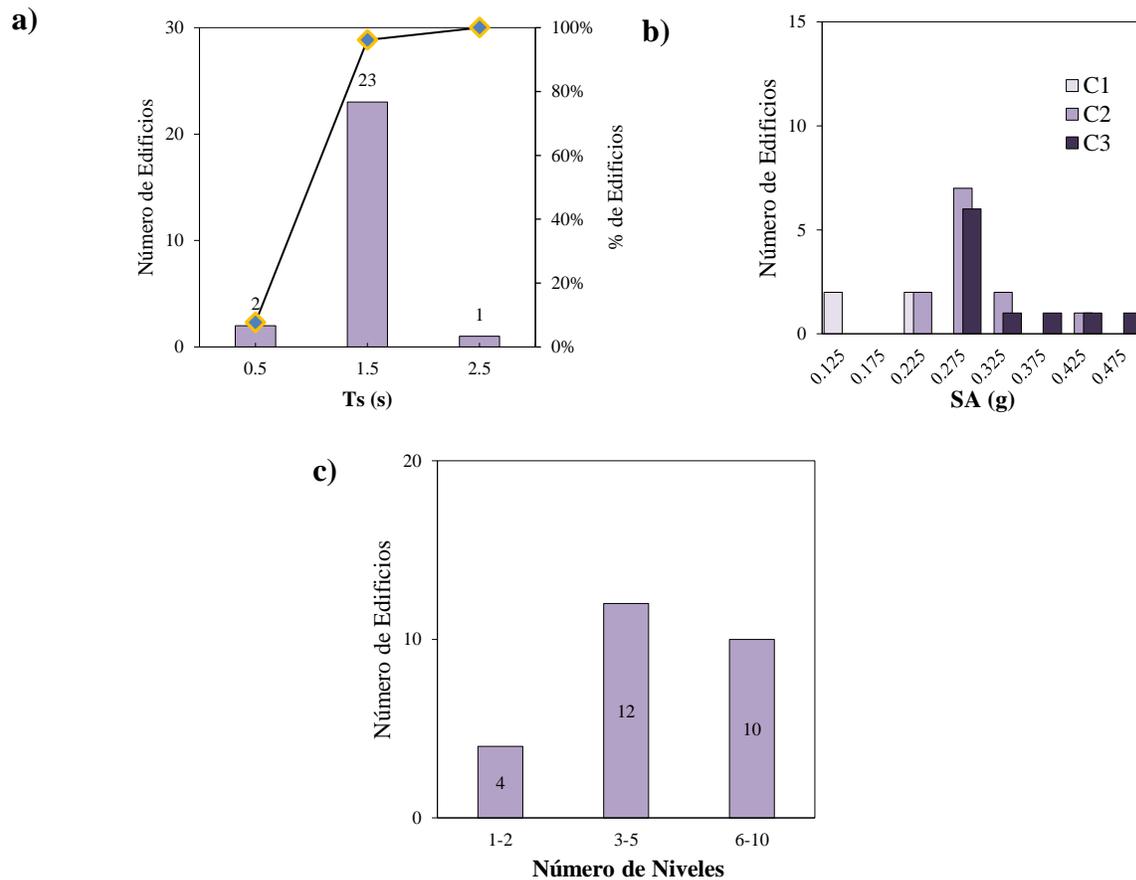


Figura 3.24 Distribución de los edificios colapsados y porcentaje acumulado a) Periodo dominante del suelo, b) Valores de aceleraciones espectrales experimentadas, c) Número de niveles

4. CÁLCULO DE FUNCIONES DE FRAGILIDAD

4.1 Fragilidad Sísmica

Realizar la evaluación del impacto que tienen los sismos sobre las edificaciones, es una tarea importante por la cantidad de pérdidas que se pueden llegar a tener, ya sean económicas o humanas durante este tipo de eventos sísmicos. Con el fin de mitigar el daño sísmico, o en caso de que suceda, la sociedad debería contar con un plan de acción frente a un desastre sísmico (como ocurrió en 2017), es necesario determinar aquellos factores y sus relaciones que sensiblemente permitan determinar la distribución de las edificaciones en la presencia de un evento sísmico futuro.

El realizar una estimación de daños ante futuros eventos sísmicos tiene como objeto reducir los impactos negativos sobre las construcciones y por ende sobre la población. Debido a la complejidad del problema, se han realizado gran cantidad de trabajos alrededor de ello. Sin embargo, las soluciones que se han buscado tienen la desventaja de ser particulares para los casos de estudio y no se pueden aplicar de manera general por ejemplo para la Ciudad de México. Es decir, emplearlos en los distintos tipos de fuentes sísmicas, características de sismos (*i.e.*, interplaca e intraplaca), tipo de suelo (*i.e.*, roca, suelo de transición y suelo blando), sistemas constructivos (*e.g.*, marcos de concreto, marcos de acero, etc.) y calidad de materiales que se presentan por mencionar algunos. No obstante, las investigaciones se han acercado al estudio del riesgo sísmico, mismo que utiliza la construcción de las funciones de fragilidad sísmica. Este análisis de fragilidad sísmica puede ser empleada para calcular las funciones de vulnerabilidad para edificios de muestra a nivel de ciudad. Se debe señalar que las funciones de vulnerabilidad son fundamentales para llevar a cabo el análisis de riesgo y la toma de decisiones sobre riesgo sísmico. Finalmente, cabe mencionar que este análisis de fragilidad sísmica que se presenta en la tesis es a nivel ciudad, por lo que el desarrollo de funciones de fragilidad particulares para un edificio queda fuera del alcance de este trabajo.

Las curvas de fragilidad representan la probabilidad de estar o exceder un estado límite de daño, como una función en parámetro de la intensidad del movimiento asociado a la respuesta estructural. Entonces con las curvas de fragilidad se representan a través de relaciones intensidad sísmica versus daño para diferentes tipos de edificaciones (en este caso a nivel

ciudad); intensidad es la aceleración espectral y el daño se refiere a alguno de los estados de daño de las viviendas antes mencionados. Estas relaciones pueden derivarse a partir de la información discreta asociada a los parámetros que sirven para caracterizar la intensidad sísmica y el estado de daño. Generalmente se expresan como la probabilidad acumulada de alcanzar o superar un cierto determinado estado de daño, para algún tipo de edificación, sujeta a diferentes intensidades del movimiento sísmico (en este caso la aceleración espectral asociada al periodo fundamental de la estructura). Así que, estas curvas describen, de manera continua la probabilidad de excedencia de los estados límites de daño a los que están asociados.

Del mismo modo una de las formas más utilizadas para calcular la vulnerabilidad sísmica de una estructura es mediante el uso de esas curvas de fragilidad, cuyo objetivo es representar gráficamente cuando una estructura ha excedido un cierto estado límite de daño ante la acción de un parámetro de intensidad; generalmente representado por los valores de aceleración espectral de un movimiento sísmico ante la ocurrencia de evento. Además, son parte fundamental en estudios como: evaluación y riesgo sísmico en sistemas estructurales, análisis, evaluación y mejora del funcionamiento sísmico de sistemas estructurales y no estructurales, identificación de diseños óptimos y estrategias de rehabilitación.

En un ejemplo donde existen N estados de daño, una curva de fragilidad determina la probabilidad que se alcance o se exceda el i -ésimo estado de daño, dado que se presentó una intensidad sísmica y , esto a través del cálculo de una función de fragilidad la cual está dada por la siguiente ecuación:

$$P(DS \text{ alcance o exceda al } ds_i | y) = f(y) \quad (4.1.1)$$

Así pues, una curva de fragilidad estará asociada a un solo estado de daño discreto, es decir existirá una curva de fragilidad por cada uno de los estados de daño contemplados. Dicha curva de fragilidad expresará cual es la probabilidad de alcanzar o exceder cierto estado de daño para la cual fue construida, dado que ocurrió una cierta intensidad sísmica. En la figura 4.1 a manera de ejemplo se presentan algunas curvas de fragilidad asociadas a cuatro estados de daño: 1) daño medio DS_2 , 2) alto DS_3 , 3) muy alto DS_4 y 4) colapso DS_5 . Se puede observar que a mayor sea el estado de daño elegido (e.g., DS_5), la probabilidad de alcanzar o exceder ese estado de daño dado una cierta intensidad sísmica (i.e., $y = SA$) será menor.

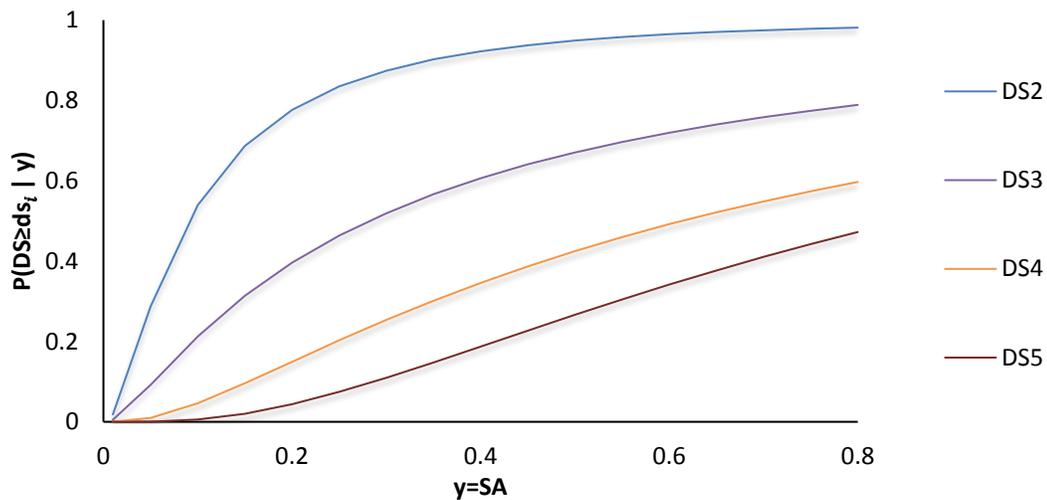


Figura 4.1 Ejemplos de curvas de fragilidad para cuatro estados de daño

4.2 Método empírico

Como se planteó en capítulos anteriores la asignación del estado de daño en las edificaciones se realizó mediante el conjunto de información obtenida de distintos procedimientos (i.e., en dictámenes estructurales, reportes post-sísmicos y visitas in situ). En términos generales, el estado de daño se basa en los daños cualitativamente observados de los edificios posteriores al sismo. De este modo, las curvas de fragilidad se calculan con base en el método empírico. Las curvas de fragilidad empíricas muestran un nivel de estado de daño dada una intensidad de movimiento sísmico, basadas en el daño observado en las estructuras durante sismos pasados.

La mayor limitación del método empírico es la insuficiente información sobre el daño observado para diferentes tipos de estructuras y estados de daño, lo cual resulta en bastantes grupos de estructuras sin curvas que puedan ser representativas. Otra limitación de estas curvas es que, en las evaluaciones post-sísmicas, al hacer la asignación de estados de daño, a menudo hay discrepancia entre los estados de daño asignados por cualquiera de los

inspectores que hacen las evaluaciones. Lo anterior, se debe a formaciones y criterios diferentes.

4.3 Funciones de fragilidad

Una función de fragilidad define la probabilidad de exceder un cierto estado de daño $DS \geq ds$ como una función de una medida de intensidad del movimiento en el suelo, IM (ecuación 4.3.1).

$$P(DS \geq ds|IM) \quad (4.3.1)$$

Es conocido que los valores de aceleraciones espectrales elásticos proporcionan una mejor correlación con los datos de daño empírico que el valor de aceleración máxima del suelo PGA (Singhal y Kiremidjian 1996, Rossetto 2004). Por lo tanto, una vez que se ha establecido la medida de intensidad IM y se han evaluado las probabilidades correspondientes, se realiza un análisis de regresión para construir esas curvas de fragilidad. Para ello, es necesario definir la forma funcional y la técnica de regresión. A continuación, se presenta una de las principales formas funcionales y técnicas de regresión, que se aplicó a dos de la información recabada para cada uno de las clases y estados de daño de las viviendas bajo estudio. Una de las formas funcionales más ampliamente adoptadas es la función de distribución lognormal acumulada dada por la ecuación 4.3.2.

$$P(DS \geq ds|IM) = \Phi \left[\frac{1}{\hat{\beta}} \ln \frac{IM}{\hat{\theta}} \right] \quad (4.3.2)$$

donde Φ es la función de distribución normal estándar acumulada, $\hat{\theta}$ es la media logarítmica y $\hat{\beta}$ es su desviación estándar logarítmica.

Los parámetros $\hat{\theta}$ y $\hat{\beta}$ pueden ser estimados mediante el método de estimación de máxima verosimilitud (MLE en sus siglas en inglés). La MLE busca los valores de los parámetros que tienen mayor probabilidad de haber originado los datos. El método MLE es aplicado a partir de la evaluación del número de edificios con $DS \geq ds(z_j)$ respecto al número total de edificios con ese comportamiento (n_j) para cada conjunto j –ésimo y para cada estado de daño DS . Por lo tanto, la distribución binomial (a la derecha de Π) da la probabilidad de observar edificios con $DS \geq ds$ para el j –ésimo conjunto (ecuación 4.3.4):

$$\text{Verosimilitud} = \prod_{j=1}^m \binom{n_j}{z_j} p_j^{z_j} (1 - p_j)^{n_j - z_j} \quad (4.3.4)$$

En la ecuación 4.3.4 Π denota el producto sobre los valores j – ésimos de 1 a m , $p_j = \Phi \left[\frac{1}{\beta} \ln \frac{x_j}{\theta} \right]$ y x_j es el nivel de intensidad $IM = x_j$ (*i.e.*, aceleración espectral asociada al periodo fundamental de la estructura). Después, los parámetros de la función de fragilidad se obtienen al maximizar la función de probabilidad como (ecuación 4.3.5):

$$\{\hat{\theta}, \hat{\beta}\} = \arg \max_{\theta, \beta} \sum_{j=1}^m \left\{ \ln \binom{n_j}{z_j} + z_j \ln p_j + (n_j - z_j) \ln(1 - p_j) \right\} \quad (4.3.5)$$

4.4 Variables consideradas

En el cálculo de las curvas de fragilidad se consideraron principalmente: 1) los parámetros que logran ser los más representativos de la muestra y 2) las características de las funciones de fragilidad. De este modo es importante considerar los siguientes parámetros:

i) Clases de viviendas

Como se mencionó en el capítulo anterior, la muestra en estudio se segmentó en cinco clases de acuerdo con el número de niveles que constituían a los edificios. De este modo, se logró identificar únicamente tres clases como más representativas de la muestra (*i.e.*, C1, C2 y C3). Entonces, las curvas de fragilidad se calcularán para esas tres clases representativas.

ii) Intensidades sísmicas

Las intensidades sísmicas actúan como un parámetro fundamental dentro del cálculo de las funciones de fragilidad. Las cuales han sido calculadas en el capítulo anterior y el método de cálculo se especificó en la sección 2.3.

iii) Estados de daño

Los estados de daño, del mismo modo, son indispensables en el análisis de fragilidad sísmica pues como se planteó anteriormente habrá tantas curvas como estados de daño.

4.5 Obtención de las curvas de fragilidad

Como se indicó antes, una curva de fragilidad dada la ecuación 4.3.2 tienen la finalidad de estimar la probabilidad de estar o exceder un estado límite de daño (*e.g.*, estado límite de daño medio, estado límite de daño alto o incluso estado límite de colapso) dada una cierta medida de intensidad. En la presente sección se expresarán las curvas de fragilidad para las viviendas constituidas de 1 a 2 niveles, de 3 a 5 niveles y de 6 a 10 niveles, asociadas a las 3 clases de vivienda representativas de la muestra (*i.e.*, C1, C2 y C3).

Para fines ilustrativos en las siguientes figuras de la 4.3 a la 4.5 se representan los resultados de las curvas de fragilidad para la muestra definida, asociadas a las clases C1, C2 y C3.

Nótese que para estas tres clases la información resulta suficiente para construir las curvas correspondientes a cuatro estados de daño (*i.e.*, DS_2 , DS_3 , DS_4 y DS_5). Nótese que el estado de DS_1 tomaría un valor continuo de 1.

En las figuras se presentan con círculos, cuadrados y triángulos los valores observados, representado los estados DS_2 , DS_3 , DS_4 y DS_5 . Así mismo, las líneas continuas corresponden a las funciones de distribución de probabilidad ajustadas con la ecuación 4.3.2. Se presentan en cada figura cuatro estados de daño, que corresponden a los estados de daño medio DS_2 , alto DS_3 , muy alto DS_4 y colapso DS_5 . Nótese que el eje de las abscisas representa la medida de intensidad del movimiento, en este caso, las aceleraciones espectrales correspondientes, y en el eje de las ordenadas la probabilidad $P(DS \geq ds|IM)$. Mayores detalles se presentan a continuación.

En términos generales se puede resaltar que las funciones de fragilidad asociadas a cada estado de daño no se intersectan entre ellas. Esto es, que la fragilidad del estado de daño DS_2 (daño medio) es mayor que la de DS_3 (daño alto), y así sucesivamente (la del estado de daño DS_3 es mayor que la del estado de daño DS_4 , daño muy alto, y esta última, a su vez, es mayor que la del estado de daño DS_5 colapso). El comportamiento de las curvas de fragilidad es congruente, dado que conceptualmente no sería posible que la probabilidad de estar o exceder, por ejemplo, un estado de daño alto DS_3 sea mayor que la probabilidad de estar o exceder un estado de daño medio DS_2 .

Por otro lado, nótese que para estructuras de la clase C1 (viviendas de 1 a 2 niveles) las intensidades sísmicas (*i.e.*, 0.01 a 0.22g) son menores que para estructuras de clase C2 (viviendas de 3 a 5 niveles), cuyos valores de intensidades van de 0.08 a 0.42g; y a su vez menores que para estructuras de clase C3 (viviendas de 6 a 10 niveles), cuyas intensidades van de 0.13 a 0.58g. Esto es porque las aceleraciones espectrales para viviendas de 1 a 2 y de 3 a 5 niveles están asociadas a periodos fundamentales de $T_e = 0.08 - 0.2$ s, $T_e = 0.32 - 0.61$ s y $T_e = 0.76 - 1.46$ s, respectivamente.

- En la figura 4.2 se presentan las funciones de fragilidad obtenidas para las viviendas constituidas de 1 a 2 niveles. Se observan probabilidades asociadas a aceleraciones espectrales que oscilan entre los valores de aceleración espectral de 0.01 a 0.22 g, dentro del eje de las abscisas. En el caso del estado de daño muy alto DS_4 dada una $IM=0.20$ g se tiene una probabilidad $P(ds \geq DS_4|0.2) = 0.20$, que representa una probabilidad del 20% de alcanzar o exceder el estado de daño DS_4 para un valor de aceleración espectral correspondiente a 0.20 g. Adicionalmente, en el estado de daño acorde al colapso DS_5 , se obtiene para una intensidad $IM=0.20$ g, la probabilidad $P(ds \geq DS_5|0.2) = 0.08$, que se interpreta como la probabilidad de alcanzar el estado de daño DS_5 , dado un valor de aceleración espectral de 0.20 g, es igual al 8%.

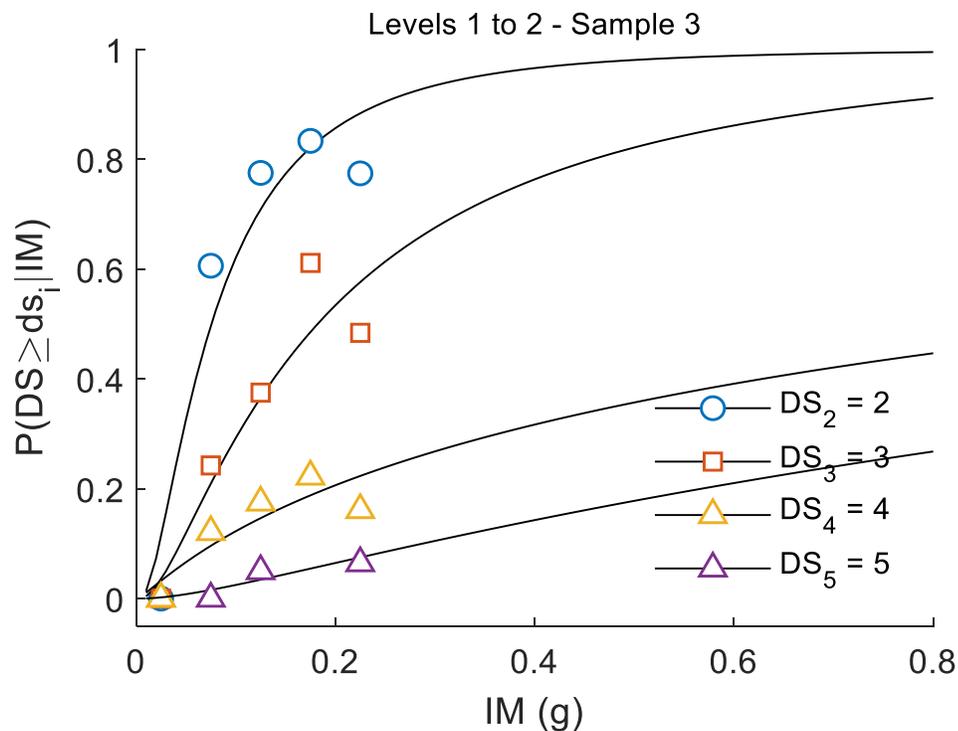


Figura 4.2 Curvas de fragilidad que ajustan los datos observados (círculos, triángulos y cuadrados). Clase C1, viviendas de 1 a 2 niveles

- En la figura 4.3 se muestran las funciones de fragilidad obtenidas para viviendas constituidas de 3 a 5 niveles. En este caso, se observan probabilidades asociadas a aceleraciones espectrales entre los 0.08 a 0.42 g. Con base en los resultados para el estado de daño muy alto DS_4 dada una $IM=0.40$ g, se obtiene una $P(ds \geq DS_4|0.4) = 0.38$, representando la probabilidad del 38% de alcanzar o exceder el estado de daño DS_4 dado un valor de aceleración espectral igual a 0.40 g. Análogamente, en el estado de daño DS_5 , para una $IM=0.40$ g, la $P(ds \geq DS_5|0.4) = 0.18$, es decir, la probabilidad de alcanzar el estado de daño DS_5 , dado un valor de aceleración espectral de 0.40 g, es igual al 18%.

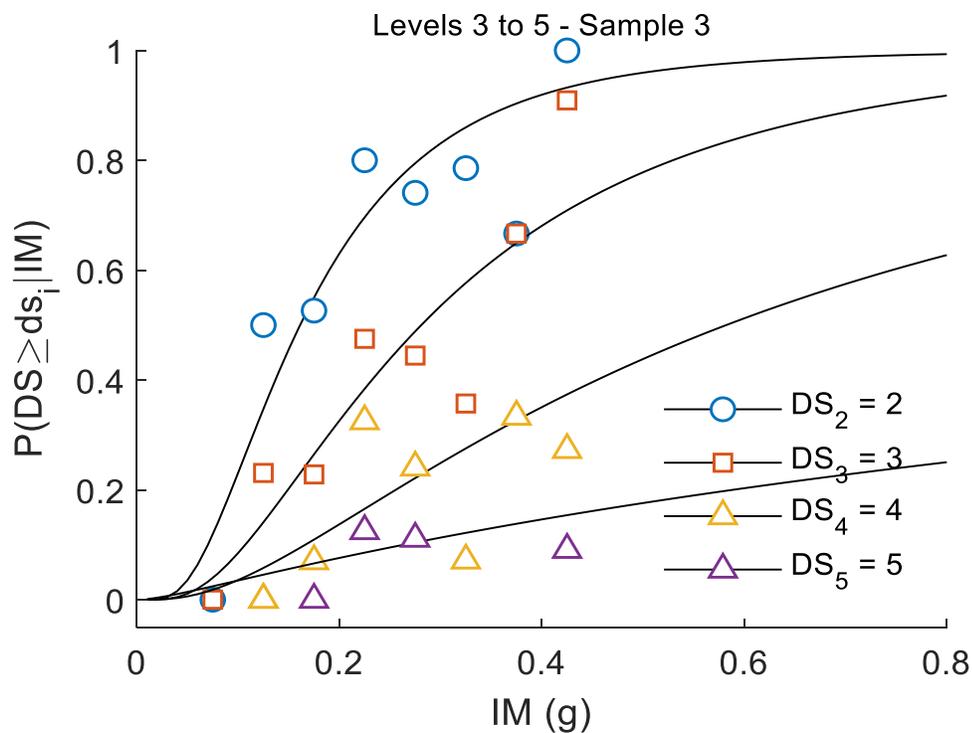


Figura 4.3 Curvas de fragilidad que ajustan los datos observados (círculos, triángulos y cuadrados). Clase C2, viviendas de 3 a 5 niveles

- En la figura 4.4 se observan las funciones de fragilidad que representan a las viviendas constituidas de 6 a 10 niveles. En esta figura las probabilidades se asocian a aceleraciones espectrales entre los 0.13 a 0.58 g. Para una intensidad $IM=0.60$ g se obtiene, en el estado de daño DS_4 una probabilidad $P(ds \geq DS_4|0.6) = 0.40$, lo cual indica la probabilidad de alcanzar o exceder el estado de daño DS_4 igual al 40%, para un valor de aceleración espectral de 0.60 g. No obstante, para el estado de daño DS_5 la $P(ds \geq DS_5|0.6) = 0.17$, que expresa la probabilidad de alcanzar el estado de daño DS_5 igual al 17%, correspondiente a un valor de aceleración espectral de 0.60 g.

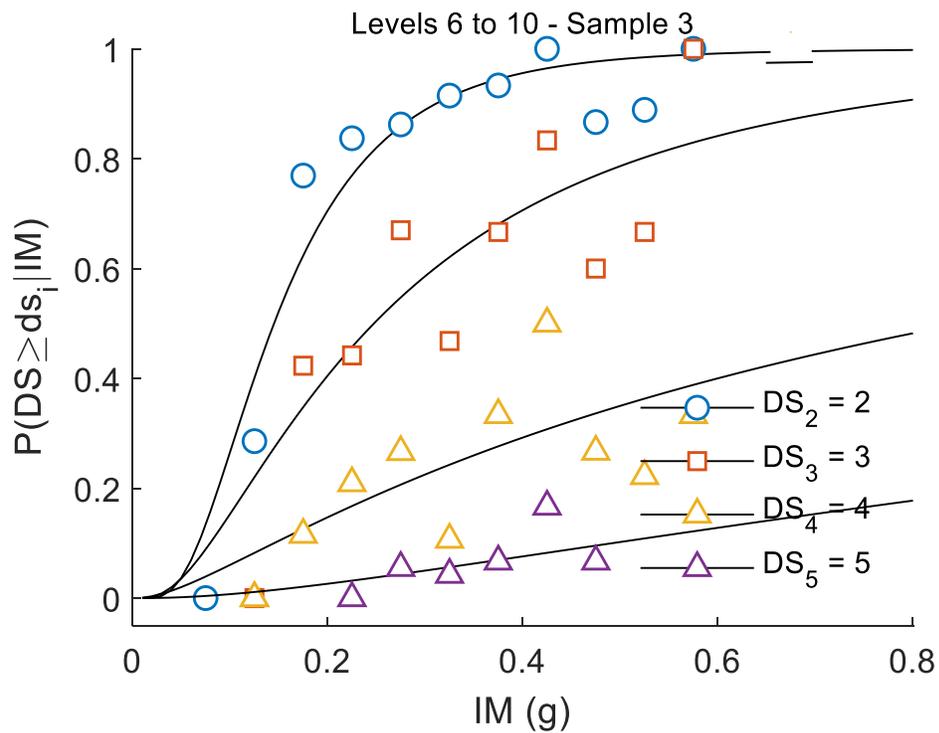


Figura 4.4 Curvas de fragilidad que ajustan los datos observados (círculos, triángulos y cuadrados). Clase C3, viviendas de 6 a 10 niveles

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este estudio se presentaron las curvas de fragilidad preliminares de viviendas ubicadas en la Ciudad de México que sufrieron daños causados por el sismo del 19 septiembre de 2017 Mw7.1 para las clases C1, C2 y C3 (*i.e.*, viviendas de 1 a 2, de 3 a 5 niveles y de 6 a 10 niveles). Estas clases resultaron ser las más representativas de la muestra dado que fueron las que presentaron desde daños ligeros a incluso el colapso. A diferencia, para las clases C4 y C5 (*i.e.*, viviendas de 6 a 10 y 11 a 24 niveles) la información no era suficiente para construir las curvas de los estados de daño, por ejemplo, en estas clases C4 y C5 no se reportaron edificios de vivienda con colapso parcial o total. Para cada clase se presentaron cuatro curvas de fragilidad de acuerdo con cuatro estados de daño DS_2, DS_3, DS_4, DS_5 ; nótese que el estado de daño DS_1 toma un valor continuo de 1. El estado de daño bajo DS_1 , se consideró como el daño mínimo que sufrieron las estructuras, ya que, de otro modo, se tendrían que considerar todas las viviendas de la ciudad que no fueron reportadas sin tener la certeza de las nulas afectaciones.

Las curvas de fragilidad se obtuvieron a partir del análisis de regresión siguiendo una función de distribución lognormal acumulada. Se estableció como medida de intensidad valores de aceleración espectral asociada al periodo fundamental de la estructura, puesto que presentan mayor correlación con los datos de daño empíricos aquí analizados. El método utilizado para la recopilación información, se realizó a través de diversos documentos y revisiones in situ. Con esta recopilación de datos se pudo asignar un estado de daño a las estructuras con base en las observaciones de daños plasmadas en dichos documentos y verificado posteriormente a través de visitas in situ. Estas observaciones permiten únicamente describir de manera cualitativa los efectos del sismo sobre las estructuras.

Las variables que se involucran en el análisis de fragilidad implican cierto grado de incertidumbre. Por ejemplo, los valores de la medida de intensidad obtenida mediante la fórmula empírica $T_e = 0.08 \cdot N^{1.26}$ presentan un porcentaje de error en el cálculo, para zonas con mayor densidad instrumental, los errores pueden ser menores que 5% y pueden llegar al 70% en las zonas con instrumentación deficiente, de acuerdo con Pérez-Rocha (1999) y Pérez-Rocha *et al.* (2009). Además, la respuesta estructural se puede ver intervenida por

parámetros originales de la estructura, tales como el tipo del sistema estructural o de cimentación, tipo de materiales, condiciones de irregularidad geométricas y de rigidez (*i.e.*, elevación, planta, piso débil, discontinuidad en elementos estructurales, posibilidad de golpeteo y ubicación en esquina), tiempo de construcción, grado de conservación y los efectos de sitio.

De las curvas de fragilidad presentadas se observa un comportamiento conceptualmente congruente, ya que las curvas no se intersectan entre ellas en ninguno de los casos. Por ejemplo, la fragilidad del estado de daño DS_2 es mayor que la de DS_3 , y así sucesivamente (la de DS_3 es mayor que la de DS_4 , y esta última, a su vez, es mayor que la de DS_5). Además, para un estado de daño menor su probabilidad de ocurrencia es mayor. Contrariamente, la probabilidad de ocurrencia de un estado de daño más severo, es menor.

Las edificaciones del sector vivienda, resultaron ser las construcciones más afectadas, el 68% de los edificios que presentaron colapso durante el sismo correspondían a este sector. De los edificios colapsados más del 90% fueron construidos antes de 1985, lo que implica que se encontraban con daño acumulado por eventos sísmicos anteriores, hecho que incrementa la vulnerabilidad sísmica de las estructuras.

Se identificaron que los mayores porcentajes de edificios dañados están localizados en sitios con periodo dominante del suelo con promedio $T_s = 1.3s$, donde queda bien correlacionado a los sitios que presentaron las mayores intensidades sísmicas. Estos están localizados en las alcaldías Benito Juárez y Cuauhtémoc; alcaldías donde se presentaron más del 70% de los colapsos. Mismas alcaldías que en el sismo de 1985 resultaron construcciones principalmente con severos daños.

Por otro lado, dentro de la muestra se pudo notar que, en los 405 edificios dañados en la Ciudad de México debido al sismo del 2017, los tres estados de daño que más se presentaron (en orden descendente) son: i) el DS_1 en un 32% (130 de 405) de los inmuebles, ii) el DS_2 en un 27% (110 de 405) de las viviendas y el iii) DS_3 en un 22% (90 de 405) de los edificios, los cuales corresponden a un estado de daño bajo, medio y alto, respectivamente. Sin embargo, para los dos estados de daño que implican afectaciones más severas, se indica que el 12% (49 de 405) de las construcciones estudiadas presentó daños tan severos que su demolición fue requerida y el 6% (26 de 405) de estas edificaciones sufrieron colapso durante el evento sísmico. Sin mencionar que, con base en las estadísticas obtenidas de la muestra, debido al sismo del 2017, los edificios afectados tenían en su mayoría un número de niveles dentro de los intervalos de 3 a 5 (39%), 1 a 2 niveles (33%) y 6 a 10 (25%) (*i.e.*, C2, C1 y C3, respectivamente). Es importantes destacar, además, que el 73% (36 de 49) de los edificios que ameritan demolición se encuentran constituidos de 1 a 5 niveles (*i.e.*, dentro de las clases C1 y C2). Contrariamente el 85% (22 de 26) de los edificios con colapso se encontraban constituidos de 3 a 10 niveles (*i.e.*, edificios de mediana altura). Además, para las tres clases de vivienda representativas de la muestra (C1, C2 y C3), los edificios que presentaron los

estados de daño más importantes DS_3 , DS_4 y DS_5 son como resultado de experimentar en gran medida valores de SA menores a 0.3 g. Sin embargo, para la clase C2 y C3 se puede los edificios llegaron a experimentar valores de SA de hasta 0.5 g o incluso mayores. Edificios localizados en sitios con periodo dominante de suelo T_s entre 0.5 y 2 s, por lo que se encuentra bien correlacionado con sitios donde se produjeron las intensidades sísmicas más altas.

Aunque lo anterior puede proporcionar una perspectiva del comportamiento de las viviendas durante el sismo del 19 de septiembre del 2017 Mw7.1, será necesaria información más detallada sobre todas las estructuras en estudio, principalmente de aquellas a las que sólo fue posible realizar una inspección exterior, tales como información detallada de los daños desde el interior del edificio, planos estructurales y arquitectónicos, dibujos y notas, muestras de concreto, escaneo de acero de refuerzo, etc., para verificar adecuadamente el daño de los edificios.

6. CONCLUSIONES

Se presentaron curvas de fragilidad preliminares para viviendas obtenidas a partir de estadísticas de los daños generados por sismo del 19 de septiembre de 2017 Mw7.1 en la Ciudad de México. Se presenta una muestra de más de 400 viviendas de baja a mediana altura (*i.e.*, 1 a 2 niveles, y 3 a 10 niveles) ubicadas en la ciudad que sufrieron desde daños menores hasta el colapso total. La recopilación de datos de daños es doble: (1) a través del uso de información de edificios dañados emitidas por las instituciones locales y gubernamentales, y (2) a través de la recopilación de información realizando inspecciones externas en cada uno de los sitios para las mismas viviendas con daños reportados.

Acorde a los resultados, se puede observar un comportamiento adecuado de los edificios de vivienda de la muestra, según se observa en las curvas de fragilidad construidas para las clases C1 (1 a 2 niveles), C2 (3 a 5 niveles) y C3 (6 a 10 niveles). Recordando la importancia de conocer el comportamiento de estos inmuebles durante los eventos sísmicos que ocurren y que afectan a las estructuras habitacionales de la Ciudad de México, ya que los edificios de vivienda son las edificaciones más afectadas durante los sismos (*e.g.*, sismos de 1985 y 2017), en parte porque, como ya se mencionó, si éstas se construyeron con una reglamentación anterior a la vigente y presentaron daños menores o nulos, no están obligadas a cumplir con la nueva normativa (*i.e.*, el reglamento no es retroactivo). Tan sólo de los edificios con estado de daño de colapso, para ambos sismos, más de la mitad de estos correspondían a edificaciones habitacionales y es fundamental, también, tener en cuenta que muchas de las construcciones de esta muestra son edificios de vivienda que han soportado los dos eventos sísmicos más destructivos que han azotado a la Ciudad de México.

La muestra de edificios utilizada contempla en su mayoría edificios habitacionales multifamiliares, sin embargo, no se desprecia la idea de que existieron cientos de viviendas unifamiliares afectadas debido al sismo del 2017, por lo que este análisis que se presenta persigue la mejora y la revisión del reglamento de construcciones de la Ciudad de México, así como el cumplimiento de las normas especificadas en el mismo.

Finalmente, las curvas de fragilidad desarrolladas en este estudio podrían usarse para calcular las funciones de vulnerabilidad para edificios de muestra a nivel de la Ciudad de México en el futuro cercano. Cabe señalar que las funciones de vulnerabilidad son fundamentales para llevar a cabo el análisis de riesgo y la toma de decisiones sobre riesgo sísmico.

BIBLIOGRAFÍA

Atienza, V. M. C., Singh, S. K., & Schroeder, M. O. (2017). ¿Qué ocurrió el 19 de septiembre de 2017 en México?. *Revista Digital Universitaria*, **18**(7).

Astiz, L., Kanamori, H. and Eissler, H., (1987). Source characteristics of earthquakes in the Michoacán seismic gap in Mexico, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **77**(4), 1326 - 1346.

CDMX (2017). Plataforma CDMX. <https://bit.ly/1PQ7VNr> (último acceso noviembre 2018).

Comisión de Derechos Humanos del Distrito Federal (2018). Crecimiento urbano y derechos humanos en la Ciudad de México. *Informe especial 25 aniversario*.

EM-DAT (2019). The Emergency Events Database

Fundación I.C.A. (1988). Experiencias derivadas de los sismos de septiembre de 1985.

Figuroa, J. (1957). El macrosismo del 28 de julio de 1957. In *Anales del Instituto de Geofísica* (Vol. 3, pp. 55-125).

Galvis, F., Miranda, E., Heresi, P., Dávalos, H., & Silos, J. R. (2017). Preliminary statistics of collapsed buildings in Mexico City in the September 19, 2017 Puebla-Morelos earthquake. *Technical Report*.

Hernández, M. A. (2017). Revisión de estructuras dañadas en sismos ocurridos en la Ciudad de México a la luz de nuevos conocimientos, Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

IBD-Instituto Belisario Domínguez (2017). Recuento de los daños 7S y 19S: a un mes de la tragedia, 3-4.

Fundación I. C. A. (1992). Catálogo de temblores que han afectado al Valle de México del siglo xiv al xx. Limusa.

NTC-DS (2004). Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal.

Masaki, K., Abeki, N., & Seo, K. (1996). Daños causados por el sismo de Michoacán de 1985: Reporte del Instituto de Arquitectos de Japón. In *Daños causados por el sismo de Michoacán de 1985: Reporte del Instituto de Arquitectos de Japón*. México. Secretaría de Gobernación. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED).

Mosquera, J. (2007). Validación de un modelo continuo simplificado y estudio paramétrico de edificios instrumentados en la Ciudad de México y California sujetos a sismos, Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

Ordaz, M., Reinoso, E., Jaimes, M. A., Alcántara, L., & Pérez, C. (2017). High-resolution early earthquake damage assessment system for Mexico City based on a single-station. *Geofísica internacional*, **56(1)**, 117-135.

Perez-Rocha, L.E. (1999). Respuesta sísmica estructural: efectos de sitio e interacción suelo-estructura, Tesis de doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

Perez-Rocha, L.E., Ordaz, M. & Reinoso, E. (2009). Interpolación espacial de las amplificaciones dinámicas del terreno en el valle de México, *Revista de Ingeniería Sísmica*, **80**, 85-112

R. J Marsal, M. D. Mazari (1959). The Subsoil of Mexico City. Contribution to the First Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.

Reinoso Angulo (2007). Riesgo sísmico de la Ciudad de México

Rossetto, T. (2004). Vulnerability curves for the seismic assessment of reinforced concrete building populations.

Salcido, Iván. (2015). El terremoto de 1985. Treinta años en nuestra memoria. Prólogo de Jacobo Zabludovsky. México, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural. Casa de las Campanas Ed. 510 p

Servicio Sismológico Nacional (2017). Reporte Especial. Sismo del día 19 de septiembre de 2017, Puebla-Morelos (M 7.1).

Singh S. K., Lermo J., Domínguez T., Ordaz M., Espinosa J. M., Mena E. y Quaas R. (1988). A study of amplification of seismic waves in the Valley of Mexico with respect to a hill zone site, *Earthquake Spectra*, **4**, 653-673.

Singh, S. K., Mori, A., Mena, E., Krüger, F., & Kind, R. (1990). Evidence for anomalous body-wave radiation between 0.3 and 0.7 Hz from the 1985 September 19 Michoacan, Mexico earthquake. *Geophysical Journal International*, **101(1)**, 37-48.

Singhal, A., & Kiremidjian, A. S. (1996). Method for probabilistic evaluation of seismic structural damage. *Journal of Structural Engineering*, **122**(12), 1459-1467.

Torres Alvarez Roberto Carlos, 2017. Efectos de sitio del sismo del 19 de septiembre de 2017 en la Ciudad de México. Nota Técnica. *Revista Geotecnia* 246, 18-22.

ANEXO A: ESTADOS DE DAÑO

Descripción de daños en edificio BJU32_2017-DS₁

Este edificio con dirección Nicolás San Juan N° 1251, en la colonia Del Valle, es de uso habitacional, compuesto por 9 niveles. Su cimentación se compone de un sistema de cimentación profundo, se estiman pilotes o pilas, y su estructuración es de columnas de concretos, muros de mampostería, traveses de concreto y losa maciza. No presentó daños estructurales consecuencia del sismo, sin embargo, se observaron leves fisuras en muros del 1er y 2do nivel, en la zona de azotea y fachada.



Figura A1. Edificio considerado **DS₁**: (a) Vista exterior del edificio previo al sismo <https://bit.ly/36ES7Y1>, (b) Vista del edificio posterior al sismo, (c) Vista del cubo del edificio con leves fisuras en vanos (d) Detalles de daños observados en cubo interior del edificio, (e) Daños en muros de fachada, encontrándose en proceso de reparación los daños, (f) Ligera separación del muro perimetral y el elemento del sistema estructural del edificio, vista en el primer nivel del edificio, (g) Leves fisuras en muros del cuarto de servicio en azotea y (h) Separación de la losa maciza y el pretil.



Figura A1. Continuación

Descripción de daños en edificio BJU55_2017-DS₂

Edificio ubicado en dirección Gabriel Mancera N°741, en la colonia Del Valle, de uso habitacional, compuesto por 7 niveles. Su cimentación, se infiere, es un cajón de concreto reforzado, y su estructuración se encuentra resuelta por marcos de concreto reforzado, muros diafragma en colindancias y muros divisorios de mampostería, y losa plana como sistema de entrepiso. La edificación presenta un sistema estructural irregular, lo componen tres cubos de iluminación en las colindancias norte, oriente y sur, formando una "H" en planta. Además, presenta irregularidad por planta baja débil. A raíz del sismo, presentó daños en muros de mampostería de fachada y muros divisorios. Así mismo, se observaron grietas por cortante en muros interiores y en los cubos de iluminación.



Figura A2. Edificio considerado **DS₂**: (a) Vista exterior del edificio previo al sismo <https://bit.ly/2TjVqQi>, (b) Vista del edificio posterior al sismo, (c) Daños en muros exteriores (d) Detalles de daños observados en cubo interior del edificio, (e) Fisuras mayores a 5 mm en muros de fachada, (f) Leves fisuras en muros exteriores transversales, (g) Fisura por cortante en muro de mampostería, (h) Fisura por separación de juntas en muros de mampostería, (i) Fisuras mayores a 5 mm en muros de mampostería, vista desde el cubo de iluminación, (j) Fisuras menores a 2 mm en elementos de concreto verticales, y (k) Fisuras menores en muros diafragma colindantes.

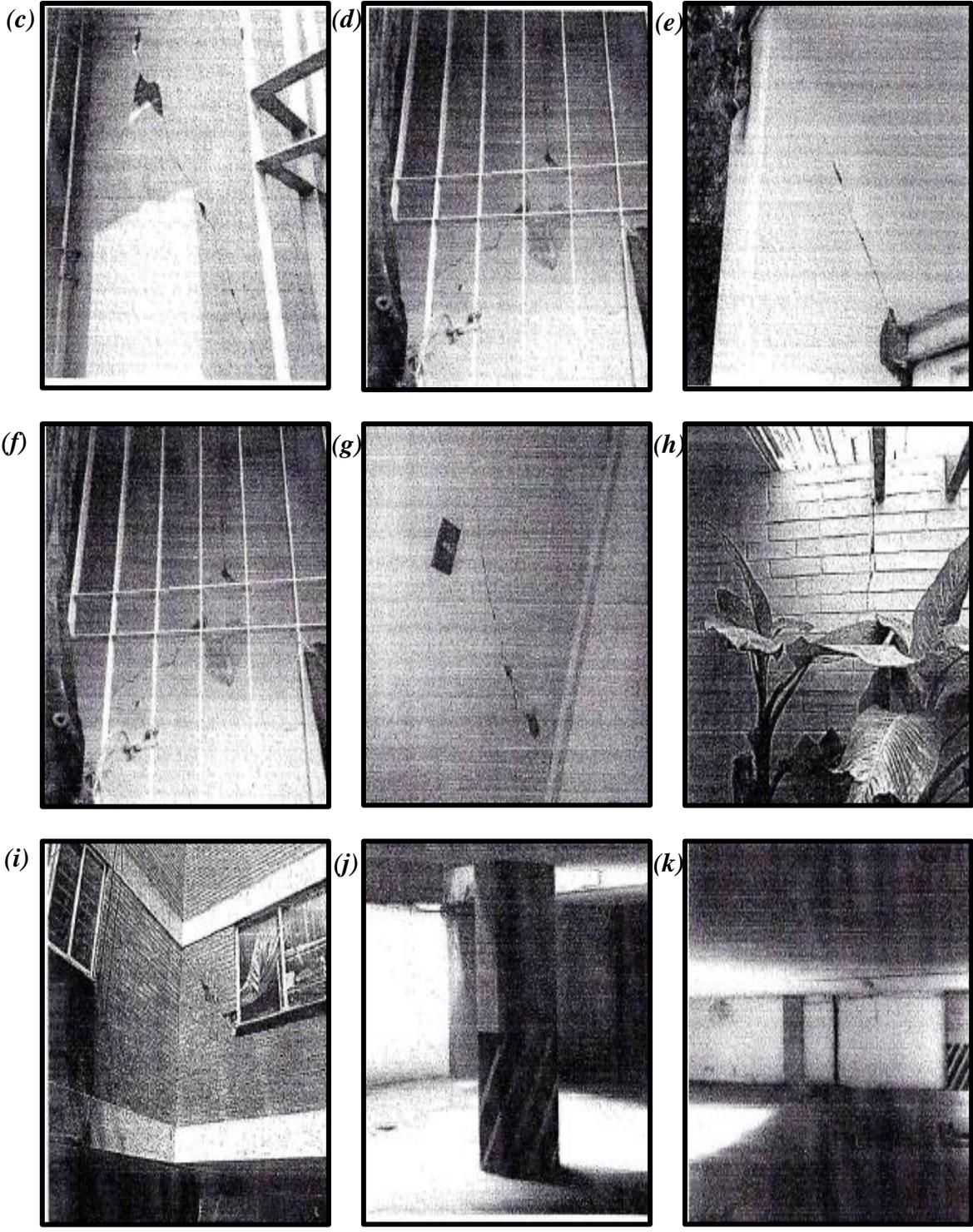


Figura A2. Continuación

Descripción de daños en edificio BJU37_2017-DS₃

Edificio ubicado en dirección Uxmal N° 785, en la colonia Santa Cruz Atoyac, de uso habitacional, compuesto por 7 niveles. Su cimentación se compone por un sistema de cimentación profundo, a base de pilotes de fricción, y su estructuración se encuentra resuelta por marcos de concreto reforzado, muros diafragma de mampostería, y losa plana aligeradas como sistema de entrepiso. La edificación presenta irregularidad por planta baja débil. A raíz del sismo, presentó daños en un porcentaje importante en columnas de la planta baja, presentado grietas mayores a 5 mm. Además, se presentan daños en más del 90% de los muros de mampostería en todos los niveles. El edificio se encuentra apuntalado.



Figura A3. Edificio considerado DS₃: (a) Vista exterior del edificio previo al sismo <https://bit.ly/3628pu3>, (b) Vista del edificio posterior al sismo, (c) Daños en muros exteriores de fachada (d) Detalles de daños observados en la entrada principal del edificio, (e) Fisuras mayores a 5 mm en muros laterales, (f) Fisuras mayores a 5 mm en elementos de concreto, (g) Detalle de daños en columnas, (h) Detalle de daños en planta baja, (i) Detalle de daños en muros interiores, y (j) Daños en muros exteriores laterales

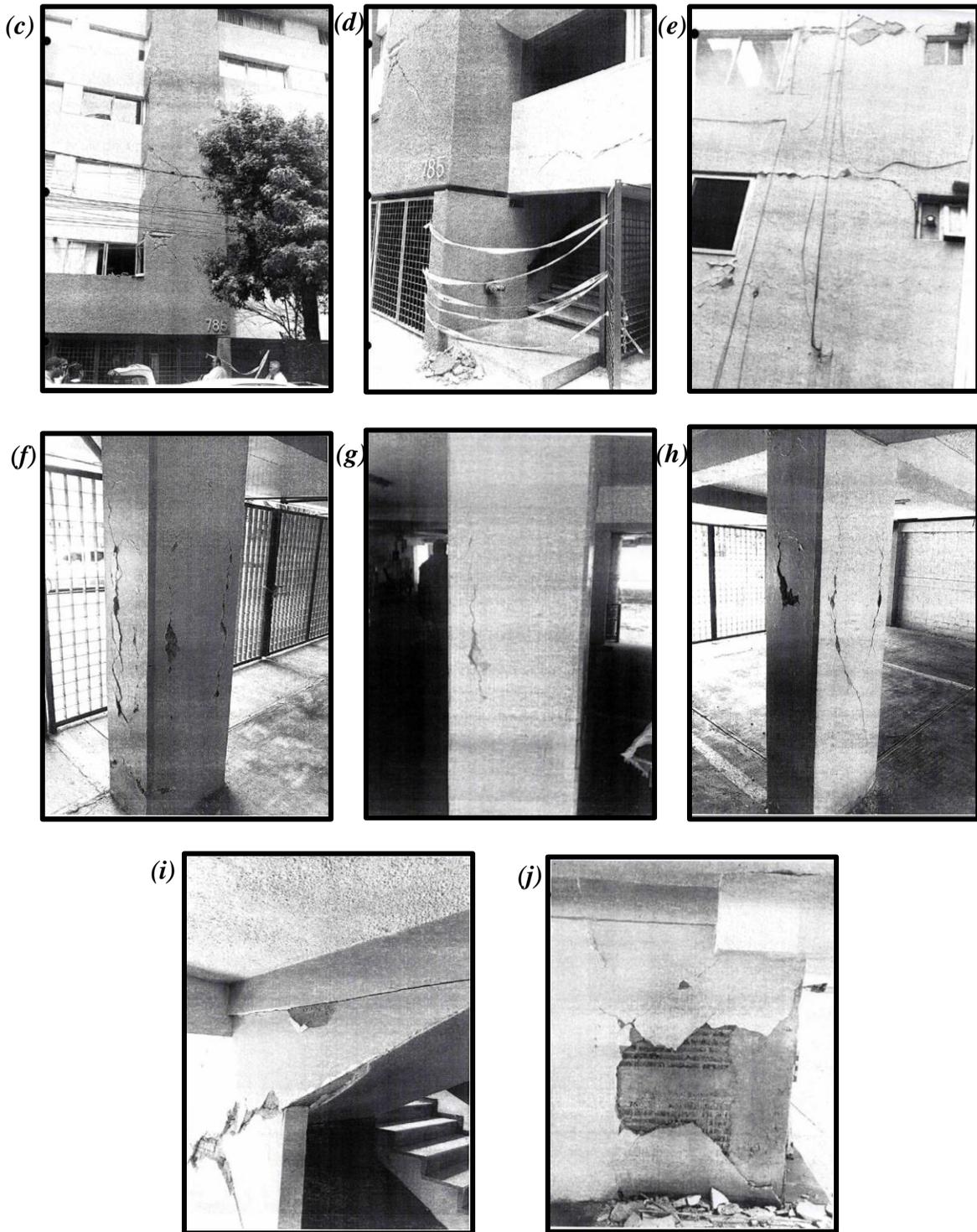


Figura A3. Continuación

Descripción de daños en edificio BJU34_2017-DS₄

Edificio ubicado en dirección Patricio Sanz N° 612, en la colonia Del Valle, de uso habitacional, constituido por 8 niveles. Su cimentación se compone por un cajón de concreto reforzado, y su estructuración se encuentra resuelta por columnas de concreto reforzado, muros diafragma de mampostería, y losa plana como sistema de entrepiso. A raíz del sismo, como resultado de los grandes desplazamientos horizontales de la estructura, se presentaron severos daños en columnas de planta baja, encontrándose expuesto el acero. Además, se presentaron daños importantes en los muros diafragma en casi todos los niveles.



Figura A4. Edificio considerado DS₄: (a) Vista exterior del edificio previo al sismo <https://bit.ly/2Nb9AP9>, (b) Vista del edificio posterior al sismo, (c) Daños en muros laterales exteriores (d) Detalles de daños observados en la planta baja del edificio, (e) Detalle de los severos daños en elementos estructurales, muros y columnas, (f) Acero de refuerzo expuesto en columnas, (g) Severos daños en muros, vista del cubo interior de iluminación, (h) Daños en muros interiores del edificio, (i) Daños en elementos no estructurales en la planta baja, (j) Fisuras en muros interiores mayores a 5 mm de abertura, y (k) Condiciones de las instalaciones del edificio.

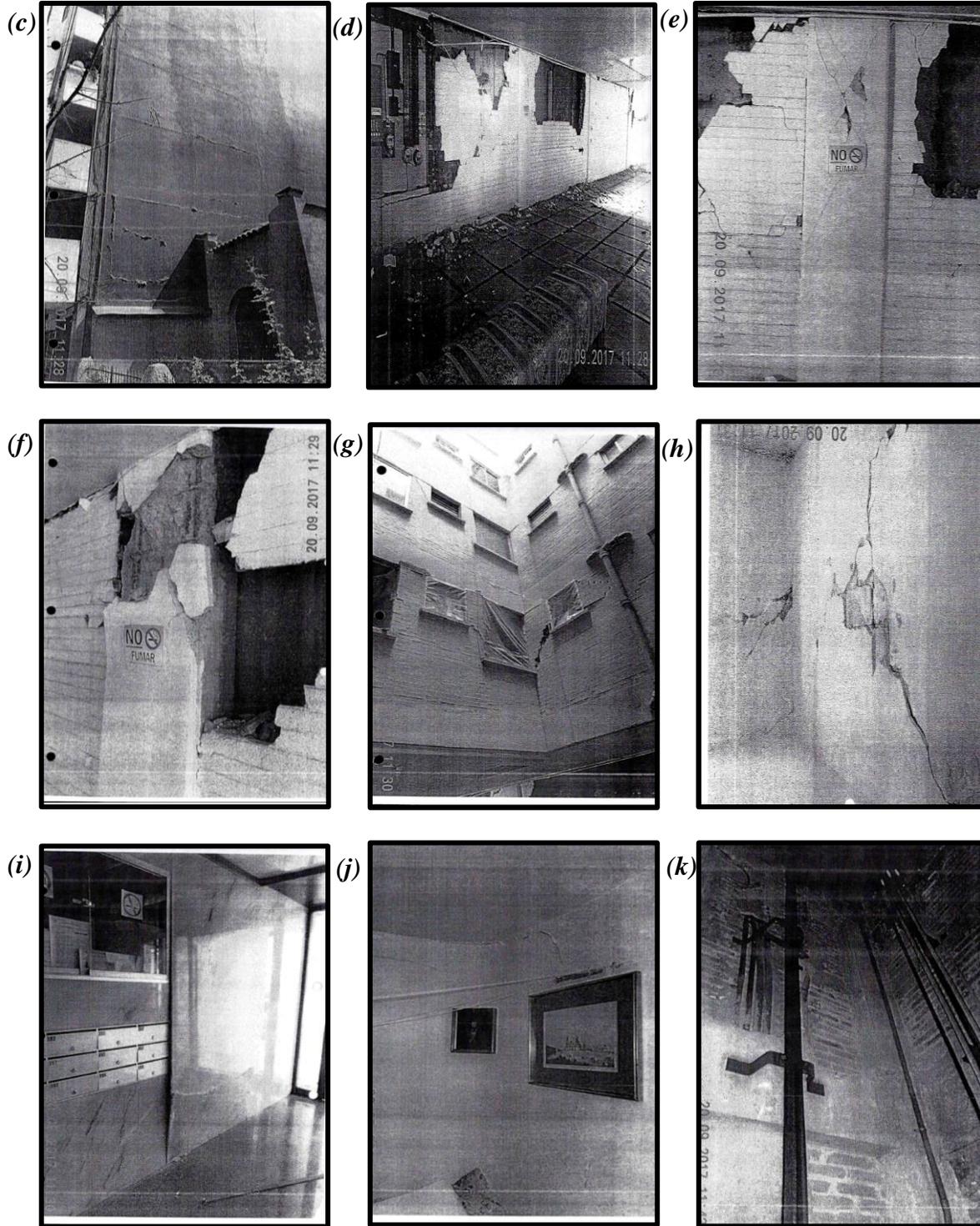


Figura A4. Continuación

Descripción de daños en edificio BJU66_2017-DS₅

Edificio ubicado en dirección Emiliano Zapata N°56, en la colonia Portales, de uso habitacional, constituido por 7 niveles. Su cimentación se compone por un cajón de concreto reforzado, y su estructuración se encuentra resuelta por muros de carga confinados, y losa de concreto con vigueta y bovedilla de bloques de poliestireno como sistema de entrepiso. La edificación presenta irregularidad en planta por su forma alargada. A raíz del sismo, sufrió el colapso del 35% de su área construida, dejando la edificación que parcialmente quedó de pie con daños estructurales severos, tales como fracturas en muros y en las conexiones con el sistema de entrepiso. En los elementos de concreto se encuentra expuesto el acero. Además, se presentó el efecto de torsión en la estructura, generando la inclinación de los sistemas de entrepiso aún existentes.



Figura A5. Edificio considerado DS₅: (a) Vista exterior del edificio previo al sismo <https://bit.ly/35Wlrba>, (b) Vista aérea del edificio posterior al sismo, (c) Estado del edificio en el momento de la inspección (d) Vista transversal del edificio, (e) Detalle de los componentes del sistema estructural del edificio, (f) Vista interior del edificio desde la planta baja, (g) Severos daños en elementos estructurales de la edificación remanente, (h) Detalle de los muros interiores de la edificación remanente, (i) Daños en el interior del estacionamiento del edificio, (j) Daños en muros laterales y de fachada de la edificación remanente, y (k) Daños en muros interiores de los departamentos.

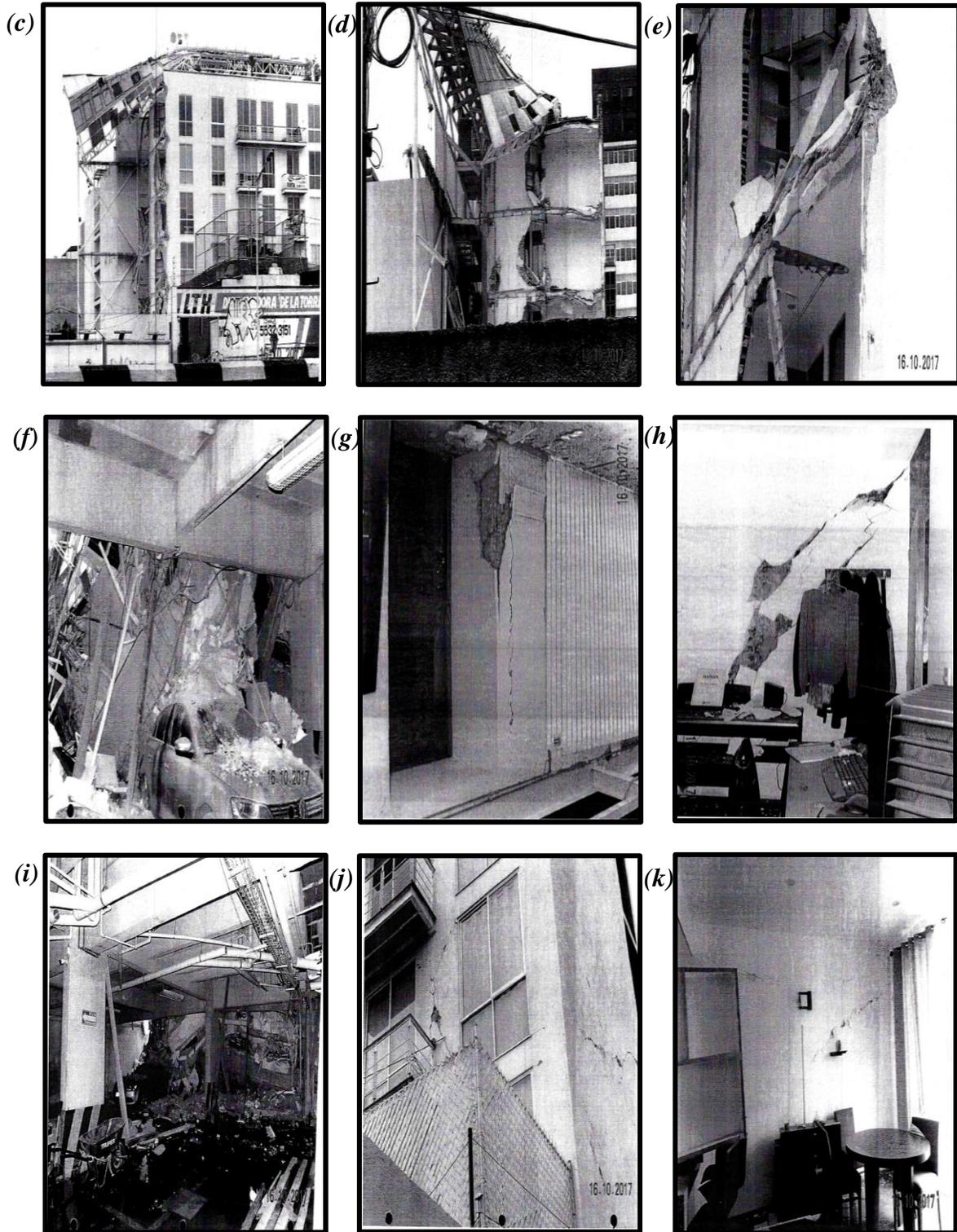


Figura A5. Continuación