



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERS DE  
CAMINS, CANALS I PORTS DE BARCELONA



---

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental  
(ámbito de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica)

Programa de doctorado: Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural

**Análisis estructural probabilista orientado a evaluación del daño  
sísmico con aplicaciones a tipologías constructivas  
empleadas en Costa Rica**

Tesis Doctoral presentada por

**Diego A. Hidalgo Leiva**

para optar por el grado de doctor por la

Universidad Politécnica de Cataluña

Director:

**Dr. Luis G. Pujades**

Co-Director:

**Dr. José R. González Drigo**

---

Barcelona, 2017



*A mi familia.*



## AGRADECIMIENTOS

Primero quiero agradecer a mis profesores y compañeros que han colaborado y acompañado durante el proceso de desarrollo de este trabajo, especialmente al tutor de la tesis, el profesor Luis Pujades quien con su constante guía y supervisión me ha ayudado a dar un salto cualitativo con este trabajo y a nivel personal y profesional. A mi supervisor, el profesor José Ramón González quien han contribuido con su sabiduría a que la investigación sea objetiva y crítica, adicionalmente quisiera agradecer al profesor Alex Barbat que con sus consejos ha contribuido a mejorar el trabajo. A mi esposa y familia por su continuo apoyo y su ayuda en la revisión de numerosos documentos.

A mis compañeros y colegas, Luis Pinzón, Sergio Díaz, Miguel Mánica, Yeudy Vargas, Álvaro Ruiz, Jhon Castillo y Richard Almonte, quienes con sus comentarios y observaciones también me han ayudado como colegas, pero también como amigos.

A los compañeros del Laboratorio de Ingeniería Sísmica por su constante colaboración y su disponibilidad en todo momento. Además, por brindarme acceso a la base de datos de registros de aceleración con la que se realizó el análisis de las medidas de intensidad, donde fue fundamental el aporte de datos hecho por las siguientes instituciones:

- Guatemala: CONRED (David Monterroso), INSI/UMEH (Enrique Molina) y a Juan Pablo Ligorria
- El Salvador: SNET (Douglas Hernandez), UCA (Reynaldo Zelaya)
- Nicaragua: INETER (Emilio Talavera)
- Costa Rica: LIS (Aaron Moya y Victor Schmidt), ICE
- Panamá: UPA (Eduardo Camacho)

Quiero brindar un agradecimiento especial a la Universidad de Costa Rica y al personal de la Oficina de Asuntos Internacionales y Cooperación Exterior (OAICE), quienes me han brindado la beca parcial durante los cuatro años de este doctorado. De igual manera, quiero agradecer al CONICIT-MICITT por la beca complementaria que me han brindado durante estos años.

A la Universidad Politécnica de Cataluña y todos sus funcionarios por toda la ayuda y todos los recursos que me han facilitado para poder ejecutar esta tesis que hoy culmina.

Esta tesis se ha realizado también en el marco de los proyectos de referencia CGL2011-23621 y CGL2015-65913-P, financiados por el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) del Gobierno de España y por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) de la Unión Europea (UE).



## RESUMEN

La evaluación del daño sísmico en las estructuras, es una tarea que debe buscar la implementación de nuevas teorías, herramientas y procedimientos para reducir la incertidumbre asociada a la determinación de la respuesta estructural esperada. Dicha respuesta se ve afectada tanto por la amenaza y las condiciones en que ésta es caracterizada, como por los modelos numéricos empleados para caracterizar el comportamiento del material, de los elementos, así como su interacción.

En la presente tesis doctoral se realizan aportes novedosos en pro de mejorar el conocimiento de la amenaza sísmica en la zona centroamericana, con especial énfasis en Costa Rica. Para esto se utiliza una base de datos de acelerogramas con más de 3000 registros provenientes de más de 1000 eventos sísmicos. Además de caracterizar la base de datos y sus principales peculiaridades de interés para el análisis estructural, se determinan nuevas medidas de intensidad sísmica, las cuales consideran la independencia del registro con respecto a la orientación del acelerómetro, permitiendo determinar valores medianos y máximos en la amenaza, definida mediante espectros de respuesta 5% amortiguada.

Se propone también una nueva técnica para determinar la amenaza máxima independiente de la orientación del sensor, que reduce significativamente el tiempo de cálculo requerido, ampliando sus posibilidades de aplicación. Por otra parte, se aplican métodos de ajuste espectral que permiten ajustar un conjunto de registros de forma que sean compatibles con los espectros de diseño previstos para Costa Rica y puedan así ser usados en el análisis estructural.

Para el análisis estructural, se han seleccionado dos tipologías constructivas de uso común en Costa Rica: tipo Muro y tipo Dual. La estructura tipo Muro es representativa de una vivienda unifamiliar de dos niveles que emplea mampostería de bloques de concreto, reforzada de manera integral. Por otro lado, la estructura tipo Dual corresponde a un edificio de 18 niveles, de uso residencial, que emplea el concreto reforzado combinando muros de carga y pórticos resistentes. Ambas estructuras fueron diseñadas bajo las directrices de la normativa vigente y toman, como base, estructuras existentes que fueron proyectadas por el autor de esta tesis.

Para evaluar el daño esperado en las estructuras, se comparan los resultados obtenidos mediante los métodos basados en la curva de capacidad (obtenida de un análisis estático no lineal) con los resultados del índice de daño de Park y Ang (obtenida con un análisis dinámico no lineal incremental). Las evaluaciones realizadas reflejan un comportamiento adecuado de ambas estructuras bajo los criterios de desempeño establecidos en la norma de diseño.

Los análisis estructurales son realizados para un caso determinista (con condiciones características) y para diversos casos probabilistas, aplicando técnicas avanzadas para la optimización del muestreo de las variables. Se obtienen entonces curvas de capacidad, curvas de fragilidad, curvas de daño dinámicas y correlaciones entre

los parámetros de la acción sísmica y el desplazamiento, para los percentiles 5, 50 y 95. En general, los resultados del caso determinista se acercan al resultado del percentil 50, sobre todo en el rango lineal de la respuesta estructural.

Se emplea un modelo para parametrizar las curvas de capacidad que emplea 5 parámetros. Con este método fue posible obtener un excelente ajuste entre la curva real y la modelada. Para el caso de la estructura tipo Muro, se aplicó además un ajuste a tramos, el cual brinda mejores resultados.

Finalmente, se hace uso de un modelo de daño el cual toma como base el espectro de capacidad para ajustar la curva de daño de Park y Ang. Se propone, además, una mejora al modelo de daño inicial, que permite modelar mejor el comportamiento de estructuras frágiles.



## ABSTRACT

The damage assessment of structures under seismic actions, must seek the implementation of new theories, tools and procedures that reduce the uncertainty associated to the expected structural response of a building. This response could be affected by the seismic action and the conditions in which it was characterized as well as the mathematical models used to assess the materials and elements behavior and their interaction.

In this doctoral thesis, new information about the seismic hazard of Central America with emphasis in Costa Rica is presented. For this purpose, an accelerograms data base was used. It contained more than 3000 records from more than a 1000 seismic events. This data base was characterized and important peculiarities for further structural analysis were calculated. Furthermore, new seismic orientation-independent intensity measurements were determined, allowing the estimation of median and maximum values for the 5% damped response spectrum.

Also, a novel technic to estimate the maximal orientation-independent seismic hazard is proposed. With it, the calculation time cost is considerably reduced, increasing the possibility of applicability. On the other hand, a spectral matching method is presented allowing to compatibilized the response spectrum of a group of records with the design response spectra provided for Costa Rica.

For the structural analysis two typologies of common used in Costa Rica were selected. The first one is a two floors reinforced concrete masonry dwelling. The second one corresponds to a 18 storey building with dual reinforced concrete system. Both structures were designed using the Costa Rican Seismic Code and are based on real structures design by the author of this work.

For the damage assessment, the results of methods that used the capacity curves (obtained from a static non-linear analysis) are compared with the results obtained with the Park and Ang damage index and the maximum inter story drift (based on a dynamic non-linear analysis). The evaluation reveals that the behavior of both structures concurs with the design performance criteria.

The analysis is performed with deterministic and probabilistic cases applying advanced techniques to optimize the sampling of variables. Capacity, fragility and damage curves are presented and correlated with both seismic intensity measures and displacement for the 5,50 and 95 percentiles. In general, deterministic results are closely related with percentile 50, especially in the linear structural response range.

A model to parameterize the capacity curves is used. This model takes 5 parameters into account and makes possible to obtain an excellent adjustment between the original and the fitted curves. For the masonry dwelling an adjustment by sections was applied showing enhanced results.

Finally, a damage model that takes into account the capacity spectrum to adjust the obtained damage curve with the Park and Ang Index is used. Also, an improved version of the initial damage model is proposed. This methodology shows a better adjustment, especially for structures with brittle behavior.

## TABLA DE CONTENIDOS

Agradecimientos .....	iii
Resumen.....	v
Abstract .....	vii
Tabla de Contenidos .....	ix
Lista de Figuras .....	xiii
Lista de Tablas.....	xix
<b>Capítulo 1.</b> Introducción.....	1
1.1. Motivación .....	1
1.2. Antecedentes.....	2
1.3. Objetivos .....	4
1.3.1. Objetivo General.....	4
1.3.2. Objetivos Específicos .....	4
1.4. Resumen de la metodología.....	6
1.4.1. Análisis de la base de datos de aceleración.....	6
1.4.2. Análisis Estructural.....	7
1.4.3. Análisis Probabilista .....	9
1.4.4. El daño estructural .....	10
1.5. Estructura de la memoria.....	11
<b>Capítulo 2.</b> Análisis de la Direccionalidad.....	13
2.1. Introducción .....	13
2.1.1. Antecedentes .....	14
2.1.2. Planteamiento del Problema .....	15
2.1.3. Estructura del Capítulo.....	16
2.2. Conceptos Básicos .....	16
2.2.1. Acelerogramas: dominio del tiempo y de la frecuencia .....	17
2.2.2. Duración del Sismo .....	19
2.2.3. Espectros de Respuesta .....	21
2.2.4. Parámetros de respuesta mediana y máxima: Efecto de Direccionalidad.....	23
2.3. La media geométrica.....	25
2.3.1. El problema de la orientación del sensor.....	25

2.4.	Respuesta unidireccional.....	29
2.4.1.	Medidas dependientes del periodo (RotDpp).....	30
2.4.2.	Medidas independientes del periodo (RotIpp).....	31
2.5.	La Raíz de la suma de los cuadrados o Composición Vectorial.....	32
2.5.1.	Análisis vectorial de la señal sísmica.....	32
2.5.2.	Comparación con $S_{a_{RotD100}}$ .....	34
2.6.	Aplicación a la zona de estudio.....	35
2.6.1.	La base de datos.....	36
2.6.2.	Análisis Estadístico de las Base de Datos.....	38
2.6.3.	Análisis Espectral.....	45
2.7.	Resumen y Conclusión.....	53
<b>Capítulo 3.</b>	<b>Selección de registros para análisis estructural.....</b>	<b>55</b>
3.1.	Introducción.....	55
3.2.	Espectro Objetivo.....	56
3.3.	Ajustes de los registros sísmicos.....	56
3.4.	Rango de periodos de interés.....	57
3.5.	Método.....	57
3.6.	Registros seleccionados.....	61
3.7.	Resumen y Conclusión.....	62
<b>Capítulo 4.</b>	<b>Estructuras Tipo Muro de Mampostería Integral de Concreto Reforzado (VUM): Análisis Determinista.65</b>	
4.1.	Introducción.....	65
4.1.1.	Antecedentes.....	66
4.1.2.	Planteamiento del Problema.....	67
4.1.3.	Estructura del Capítulo.....	67
4.2.	El modelo.....	67
4.2.1.	Pruebas a Escala Natural.....	68
4.2.2.	Calibración del Modelo de Histéresis.....	73
4.2.3.	Vivienda Unifamiliar Modelo (VUM).....	75
4.2.4.	Calibración del Índice de Park y Ang.....	79
4.3.	Análisis Determinista.....	81
4.3.1.	Análisis No Lineal Estático (ANLE).....	81
4.3.2.	Análisis No Lineal Dinámico (ANLD).....	88
4.4.	Resumen y Conclusión.....	97
<b>Capítulo 5.</b>	<b>Estructuras Tipo Muro de Mampostería Integral de Concreto Reforzado (VUM): Análisis Probabilista ..99</b>	

5.1. Introducción .....	99
5.2. Variables aleatorias: Caracterización .....	99
5.2.1. Función de máxima verosimilitud .....	100
5.2.2. Distribución de probabilidad truncada.....	101
5.2.3. Las variables aleatorias.....	102
5.2.4. Correlación entre las variables aleatorias. ....	106
5.3. Variables aleatorias: Muestreo.....	108
5.4. Análisis No Lineal Estático Probabilista ( <i>ANLEP</i> ) .....	110
5.4.1. Espectros de Capacidad .....	111
5.4.2. Desplazamiento para el <i>PP</i> .....	112
5.4.3. Curvas de fragilidad medianas .....	113
5.5. Análisis No Lineal Dinámico Probabilista ( <i>ANLDP</i> ) .....	114
5.5.1. Curvas de daño incremental probabilistas.....	115
5.6. Resumen y Conclusión.....	117
<b>Capítulo 6.</b> Estructuras Tipo Dual de Concreto Reforzado ( <i>EDCR</i> ).....	119
6.1. Introducción .....	119
6.1.1. Antecedentes .....	119
6.1.2. Planteamiento del Problema .....	120
6.1.3. Estructura del Capítulo.....	120
6.2. Modelo de análisis.....	121
6.2.1. Elementos en Flexión.....	122
6.2.2. Elementos en Flexo-Compresión.....	125
6.2.3. Comportamiento elástico de la <i>EDCR</i> .....	129
6.3. Análisis Determinista.....	130
6.3.1. Análisis No Lineal Estático ( <i>ANLE</i> ).....	131
6.3.2. Análisis No Lineal Dinámico ( <i>ANLD</i> ).....	136
6.4. Análisis Probabilista.....	146
6.4.1. Variables aleatorias: Caracterización y Muestreo .....	146
6.4.2. Análisis No Lineal Estático ( <i>ANLEP</i> ) .....	149
6.4.3. Análisis No Lineal Dinámico ( <i>ANLDP</i> ) .....	153
6.5. Resumen y Conclusión.....	156
<b>Capítulo 7.</b> Modelo paramétrico y modelo de daño.....	159
7.1. Introducción .....	159

7.1.1.	Antecedentes .....	160
7.1.2.	Planteamiento del Problema .....	160
7.1.3.	Estructura del Capítulo.....	160
7.2.	Capacidad.....	161
7.2.1.	Breve revisión del modelo paramétrico .....	161
7.2.2.	Caso Determinista .....	163
7.2.3.	Caso Probabilista .....	167
7.3.	Modelos de daño .....	170
7.3.1.	Modelo básico.....	170
7.3.2.	Modelo mejorado .....	175
7.3.3.	Comparación y discusión.....	179
7.4.	Resumen y Conclusiones .....	179
<b>Capítulo 8.</b>	<b>Resumen, Conclusiones y Líneas futuras de investigación .....</b>	<b>181</b>
8.1.	Introducción.....	181
8.2.	Resumen.....	182
8.2.1.	La acción sísmica.....	182
8.2.2.	La mampostería reforzada .....	187
8.2.3.	El daño .....	188
8.2.4.	El modelo paramétrico.....	191
8.2.5.	Los modelos de daño.....	192
8.3.	Conclusiones.....	193
8.3.1.	La acción sísmica.....	193
8.3.2.	Las estructuras.....	194
8.3.3.	El modelo paramétrico.....	195
8.3.4.	El modelo de daño.....	196
8.4.	Líneas futuras de Investigación .....	196
8.4.1.	La acción sísmica.....	197
8.4.2.	Las estructuras.....	197
8.4.3.	El modelo paramétrico.....	198
8.4.4.	El modelo de daño.....	198
Referencias .....		199

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2-1 ACELEROGRAMAS DE LAS COMPONENTES HORIZONTALES (N00E Y N90E) Y VERTICAL (UPDO) DEL SISMO DE SÁMARA DEL 5 DE SETIEMBRE DEL 2012, REGISTRADO EN LA ESTACIÓN GNSR.....	18
FIGURA 2-2. ESPECTRO DE AMPLITUD Y DE FASE DE FOURIER PARA EL SISMO DE SÁMARA DEL 5 DE SETIEMBRE DEL 2012 DIRECCIÓN N00E, REGISTRADO EN LA ESTACIÓN GNSR. ....	19
FIGURA 2-3. EJEMPLO DE RECORTE DEL INICIO DE LA SEÑALES PARA: (A) REGISTROS CON GRAN CANTIDAD DE PUNTOS ANTES DE LA FASE FUERTE Y (B) REGISTROS CON POCOS PUNTOS ANTES DE LA FASE FUERTE. ....	21
FIGURA 2-4. SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD CON EXCITACIÓN EN LA BASE (CHOPRA, 2007). ....	22
FIGURA 2-5. RESPUESTA EN ACELERACIONES DE TRES OSCILADORES DE UN GRADO DE LIBERTAD PARA LA DIRECCIÓN N00E Y N90E DEL SISMO DE SÁMARA DEL 5 DE SETIEMBRE DEL 2012, REGISTRADA EN LA ESTACIÓN GNSR. ....	22
FIGURA 2-6. ESPECTRO DE RESPUESTA EN ACELERACIONES PARA LA DIRECCIÓN: (A) N00E Y (B) N90E, DEL SISMO DE SÁMARA DEL 5 DE SETIEMBRE DEL 2012, REGISTRADA EN LA ESTACIÓN GNSR. SE MUESTRAN TAMBIÉN LOS PERIODOS ANALIZADOS EN LA FIGURA 2-5. ....	23
FIGURA 2-7. ORBITA DE ACELERACIONES DEL SISMO DE SÁMARA DEL 5 DE SETIEMBRE DEL 2012 EN: (A) ESTACIÓN GNSR Y (B) ESTACIÓN GSTC. ....	24
FIGURA 2-8. VARIACIÓN DE LA PGA PARA LAS SEÑALES ACC <sub>1</sub> Y ACC <sub>2</sub> DEL SISMO DE SÁMARA DEL 5 DE SETIEMBRE DEL 2012, REGISTRADA EN LA ESTACIÓN GNSR, SEGÚN ECUACIONES 2-3 Y 2-4. ....	27
FIGURA 2-9. (A) ESPECTROS S <sub>AGM</sub> PARA EL SISMO DE SÁMARA. (B) VARIACIÓN DE LA RESPUESTA ESPECTRAL COMO FUNCIÓN DEL ÁNGULO DE ROTACIÓN PARA TRES SDOF CON PERIODOS DE 0.1, 0.5 Y 1.0 SEGUNDOS. SE SEÑALA CON UNA LÍNEA HORIZONTAL EL VALOR CORRESPONDIENTE AL PERCENTIL 50. ....	27
FIGURA 2-10. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA FUNCIÓN DE ERROR PARA DEFINIR EL ESPECTRO S <sub>AGMROTIPP</sub> . EN LA PARTE SUPERIOR SE MUESTRA LA NORMALIZACIÓN DE LAS AMPLITUDES ESPECTRALES PARA CADA SDOF, MIENTRAS QUE EN LA PARTE INFERIOR SE MUESTRA LA FUNCIÓN ERROR, EN (A) PARA EL PERCENTIL 50 Y EN (B) PARA EL PERCENTIL 100. ....	29
FIGURA 2-11. COMPARACIÓN ENTRE LOS ESPECTROS DE LA GM INDEPENDIENTES DE LA ORIENTACIÓN DEL SENSOR CON DEPENDENCIA E INDEPENDENCIA DEL PERIODO PARA: (A) EL PERCENTIL 50 Y (B) EL PERCENTIL 100. ....	29
FIGURA 2-12. (A) ESPECTROS UNIDIRECCIONALES PARA EL SISMO DE SÁMARA. (B) VARIACIÓN DE LA RESPUESTA ESPECTRAL COMO FUNCIÓN DEL ÁNGULO DE ROTACIÓN PARA TRES SDOF CON PERIODOS DE 0.1, 0.5 Y 1.0 SEGUNDOS. SE SEÑALA CON UNA LÍNEA HORIZONTAL EL VALOR CORRESPONDIENTE CON EL PERCENTIL 50. ....	31
FIGURA 2-13. COMPARACIÓN ENTRE LOS ESPECTROS UNIDIRECCIONALES INDEPENDIENTES DE LA ORIENTACIÓN DEL SENSOR CON DEPENDENCIA E INDEPENDENCIA DEL PERIODO PARA: (A) EL PERCENTIL 50 Y (B) EL PERCENTIL 100. ....	32
FIGURA 2-14. RESPUESTA ESPECTRAL PARA UN SDOF CON T=1 SEGUNDO (A) HISTORIAL TEMPORALES EN LAS DIRECCIONES ORTOGONALES Y SU COMBINACIÓN VECTORIAL (B) ÓRBITA DE ACELERACIONES QUE COMBINA EL MÓDULO Y LA DIRECCIÓN DE LA COMBINACIÓN VECTORIAL..	34
FIGURA 2-15. A) COMPARACIÓN ENTRE S <sub>ARSS</sub> , S <sub>AROTD100</sub> Y S <sub>AROT100</sub> B) PORCENTAJE DE DIFERENCIA ENTRE S <sub>ARSS</sub> Y S <sub>AROTD100</sub> RESPECTO AL PRIMERO, TODO PARA EL SISMO DE SÁMARA DEL 5 DE SETIEMBRE DEL 2012 EN LA ESTACIÓN GNSR. ....	35
FIGURA 2-16. UBICACIÓN DE ESTACIONES ACEREOGRÁFICAS DE LA BASE DE DATOS DE CENTRO AMÉRICA. ....	36
FIGURA 2-17. DEFINICIÓN DE DISTANCIA EPICENTRAL DE ACUERDO A CRITERIO DE JOYNER Y BOORE (1981), TOMADO DE WEATHERILL AND BURTON (2010). ....	42

FIGURA 2-18. UBICACIÓN DE EPICENTROS PARA SISMOS DE LA DB-01 CON MAGNITUD MAYOR O IGUAL A 5.5. ....	44
FIGURA 2-19. COMPARACIÓN DE LAS DISTRIBUCIONES DE $S_{AGMAR}$ Y SU LOGARITMO NATURAL PARA $T=1.25$ SEGUNDOS PARA LOS ARCHIVOS DE LA DB-01. ....	46
FIGURA 2-20. A) ESPECTROS DE RESPUESTA $S_{AGMAR}$ Y SU VALOR MEDIO B) ESPECTROS DE RESPUESTA $S_{AGMAR}$ NORMALIZADOS AL VALOR DE PGA Y SU VALOR MEDIO. AMBAS FIGURAS PARA LA DB-01. ....	47
FIGURA 2-21. (A) VALORES MEDIOS DE LOS ESPECTROS DE RESPUESTA $S_{AGMROT50}$ , $S_{AGMROT100}$ , $S_{AGMROT150}$ , $S_{AGMROT100}$ Y $S_{AGMAR}$ Y (B) DIFERENCIAS ENTRE LOS VALORES MEDIOS DE $S_{AGMROT50}$ , $S_{AGMROT100}$ , $S_{AGMROT150}$ , $S_{AGMROT100}$ Y $S_{AGMAR}$ . AMBAS FIGURAS CORRESPONDEN A LA BASE DE DATOS DB-01. ....	48
FIGURA 2-22. (A) COMPARACIÓN DE ESPECTROS DE RESPUESTA MEDIA DE IM BASADOS EN ESPECTROS UNIDIRECCIONALES EN TÉRMINOS ABSOLUTOS Y (B) DIFERENCIAS CON RESPECTO A $S_{AGMAR}$ (DERECHA). AMBAS FIGURAS CORRESPONDEN A LA BASE DE DATOS DB-01. ....	49
FIGURA 2-23. (A) RELACIONES ENTRE ESPECTROS QUE EMPLEAN LA $GM$ Y (B) DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE CADA MEDIDA, TODO PARA LA DB-01. ....	50
FIGURA 2-24. (A) RELACIONES ENTRE MEDIDAS DE ESPECTROS UNIDIRECCIONALES RESPECTO A $S_{AGMAR}$ Y (B) DESVIACIÓN ESTÁNDAR PARA CADA MEDIDA, TODO PARA LA DB-01. ....	51
FIGURA 2-25. COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS PARA 3 RELACIONES DE MEDIDAS DE INTENSIDAD RESPECTO A $S_{AGMAR}$ , PARA: (A) DB-01 Y (B) DB-02. ....	52
FIGURA 2-26 COMPARACIÓN DE RELACIONES DE LA RESPUESTA MÁXIMA UNIDIRECCIONAL RESPECTO A $GMR0T150$ , COMPARANDO CON RESULTADOS DE DIFERENTES INVESTIGACIONES. ....	53
FIGURA 3-1. COMPARACIÓN DE LAS MATRICES DE CORRELACIÓN LINEAL PARA EL CASO: (A) SEÑALES SINUSOIDALES Y (B) ESTUDIO DE BAKER Y JAYARAM (2008). ....	59
FIGURA 3-2. ESPECTROS AJUSTADOS CON AJUSTE TIPO 1 PARA: A) ESTRUCTURA DE PERIODO BAJO Y B) ESTRUCTURA PERIODO ALTO. ....	60
FIGURA 3-3. ESPECTROS EN ACELERACIÓN DE LAS COMPONENTES HORIZONTALES DE LOS SISMOS SELECCIONADOS CON AJUSTE TIPO 2 PARA: A) LA ESTRUCTURA DE PERIODO BAJO Y B) LA ESTRUCTURA DE PERIODO ALTO. ....	60
FIGURA 3-4. COMPARACIÓN DE DESVIACIONES ESTÁNDAR ENTRE AJUSTES TIPO 1 Y TIPO 2 PARA: A) ESTRUCTURA DE PERIODO BAJO Y B) ESTRUCTURA DE PERIODO ALTO. ....	61
FIGURA 4-1 EJEMPLO DE DISTRIBUCIÓN DE REFUERZO Y BLOQUES DE CONCRETO EN MAMPOSTERÍA REFORZADA (ACUÑA, 2014). ....	69
FIGURA 4-2 ESQUEMA DEL MONTAJE GENERAL DE LAS PRUEBAS. ....	70
FIGURA 4-3. PATRÓN DE CARGA APLICADA EN LAS PRUEBAS. ....	71
FIGURA 4-4. DIAGRAMAS FUERZA-DESPLAZAMIENTO PARA: (A) WA01-BJ-NO, (B) WA02-BJ-MH, (C) WA03-BB-MH, (D) WA-04-BJ-MO, (E) WA05-BJ-MO, (F) WA06-BB-MO, (G) WA07-BB-MO, (H) COMPARACIÓN ENTRE CURVAS ENVOLVENTES PARA TODAS LAS PAREDES PROBADAS. ....	72
FIGURA 4-5. DESCRIPCIÓN GRÁFICA DE LA LEY DE HISTÉRESIS DE STEWART (1987) (VER EXPLICACIÓN EN EL TEXTO).....	73
FIGURA 4-6. COMPARACIÓN ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTALES Y LA REGLA DE HISTÉRESIS DE STEWART (1987) PARA: (A) WA02-BJ-HO AND (B) WA04-BJ-MO. ....	74
FIGURA 4-7. ESQUEMA DE SISTEMA DE ENTREPISO CON VIGUETAS PREFABRICADAS DE CONCRETO REFORZADO (PRODUCTOS DE CONCRETO, 2016). ....	76
FIGURA 4-8. EJEMPLO DE TENSORES EN TECHO CON ESTRUCTURA METÁLICA PARA RIGIDIZACIÓN A NIVEL DE CORONA. ....	76
FIGURA 4-9. PLANTA ESTRUCTURAL DE PRIMER NIVEL DE LA VUM. ....	77



FIGURA 4-10. CURVA ANALÍTICA DE HISTÉRESIS DE PARED P-1 DE LA VUM: A) ENVOLVENTE NEGATIVA Y POSITIVA CON LÍMITE DE DESPLAZAMIENTO ÚLTIMO A 0.8 F <sub>MAX</sub> , B) ENVOLVENTE AJUSTADA A DESPLAZAMIENTO ÚLTIMO Y APROXIMACIÓN BI-LINEAL.....	80
FIGURA 4-11. CURVAS Y ESPECTROS DE CAPACIDAD DE LA VUM EN LAS DOS DIRECCIONES PRINCIPALES Y SUS CORRESPONDIENTES FORMAS BI-LINEALES.....	82
FIGURA 4-12. ESPECTRO DE RESPUESTA SA-SD PARA ZONA SÍSMICA III Y SUELO TIPO 3 DE ACUERDO CON EL CSCR-10 (CFIA, 2011), PARA DUCTILIDADES CONSTANTES DE 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 5.0, 8.0 Y 10.....	83
FIGURA 4-13. PP Y DUCTILIDAD EN EL PP PARA LA VUM Y ESPECTRO DE DISEÑO EN ZONA III Y SUELO S3 DEL CSCR-10 (CFIA, 2011), PARA: (A) DIRECCIÓN X Y (B) DIRECCIÓN Y.....	84
FIGURA 4-14. PP Y DUCTILIDAD EN PP PARA ESTRUCTURA VUM Y ESPECTRO DE DISEÑO EN ZONA IV Y SUELO S3 DEL CSCR-10 (CFIA, 2011), PARA: (A) DIRECCIÓN X Y (B) DIRECCIÓN Y.....	85
FIGURA 4-15. CURVAS DE FRAGILIDAD EN FUNCIÓN DEL DESPLAZAMIENTO ESPECTRAL PARA LAS DOS DIRECCIONES DE ANÁLISIS Y EL DESPLAZAMIENTO EN EL PP, PARA: (A) DIRECCIÓN X Y (B) DIRECCIÓN Y.....	87
FIGURA 4-16. CAMBIO DE VARIABLE PARA CURVAS DE DAÑO MEDIO A) RELACIÓN ENTRE DESPLAZAMIENTO ESPECTRAL Y PGA B) CURVA DE DAÑO MEDIO CONTRA PGA.....	88
FIGURA 4-17. REGISTROS DE ACELERACIÓN DE LAS TRES SEÑALES A EMPLEAR PARA EL ANÁLISIS DINÁMICO DETERMINISTA DE LA VUM, EN (A) DIRECCIÓN N90E Y (B) DIRECCIÓN NO0E.....	90
FIGURA 4-18. ESPECTROS DE RESPUESTA NORMALIZADOS DE LOS SISMOS SELECCIONADOS Y DE LA NORMA DE DISEÑO CON PERIODOS ESTRUCTURAS EN (A) DIRECCIÓN X Y (B) DIRECCIÓN Y.....	90
FIGURA 4-19. MIDR DEL ANÁLISIS IDA PARA SISMOS SELECCIONADOS DE MANERA DETERMINISTA (A) EN FUNCIÓN DE LA PGA Y (B) EN FUNCIÓN DE LA PSA PARA EL PRIMER MODO.....	92
FIGURA 4-20. EVOLUCIÓN DEL ÍNDICE DE DAÑO DE PARK Y ANG PARA IDA PARA SISMOS SELECCIONADOS DE MANERA DETERMINISTA.....	93
FIGURA 4-21. ESPECTROS DE RESPUESTA NORMALIZADOS Y CON AJUSTE ESPECTRAL PARA LOS SISMOS SELECCIONADOS EN EL ANÁLISIS DETERMINISTA PARA: (A) DIRECCIÓN X Y (B) DIRECCIÓN Y.....	94
FIGURA 4-22. MIDR PARA ANÁLISIS IDA AL EMPLEAR REGISTROS CON AJUSTE ESPECTRAL (AJUSTE TIPO 2).....	94
FIGURA 4-23. RELACIÓN ENTRE LOS DESPLAZAMIENTO MÁXIMOS DEL ANÁLISIS DINÁMICO Y EL ESTÁTICO CON LA ACELERACIÓN DE LA DEMANDA.....	95
FIGURA 4-24. COMPARACIÓN DE DESPLAZAMIENTOS PARA EL PP Y EL ANÁLISIS DINÁMICO PARA (A) DIRECCIÓN X Y (B) DIRECCIÓN Y.....	96
FIGURA 4-25. EVOLUCIÓN DEL ÍNDICE DE DAÑO DE PARK Y ANG CON SISMOS CON AJUSTE ESPECTRAL (AJUSTE TIPO 2).....	97
FIGURA 5-1. EFECTO SOBRE LA FUNCIÓN DE DENSIDADES Y FUNCIÓN ACUMULATIVA DE PROBABILIDADES AL TRUNCAR POR LA IZQUIERDA.....	102
FIGURA 5-2. FUNCIONES DE AJUSTE PARA LA VARIABLE R1.....	103
FIGURA 5-3. FUNCIONES DE AJUSTE PARA LA VARIABLE R2.....	103
FIGURA 5-4. FUNCIONES DE AJUSTE PARA LA VARIABLE $\beta$ .....	104
FIGURA 5-5. FUNCIONES DE AJUSTE PARA LA VARIABLE $\alpha$ .....	104
FIGURA 5-6. FUNCIONES DE AJUSTE PARA LA VARIABLE E <sub>M</sub> .....	105
FIGURA 5-7. FUNCIONES DE AJUSTE PARA LA VARIABLE F <sub>M</sub> .....	105
FIGURA 5-8. FUNCIÓN EMPLEADA PARA MODELAR LA VARIACIÓN DEL FACTOR DE CORRELACIÓN ENTRE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES, EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA EUCLIDIANA DE SUS CENTROIDES.....	107

FIGURA 5-9. APLICACIÓN DE MUESTREO LHS PARA DOS VARIABLES ALEATORIAS CON 10 MUESTRAS, MOSTRANDO ALTA Y BAJA CORRELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES.....	109
FIGURA 5-10. EJEMPLO DE SIMULACIÓN CON 1000 MUESTRAS PARA $F^*M$ Y $E_M$ , UTILIZANDO LHS. ....	111
FIGURA 5-11. ESPECTROS DE CAPACIDAD PARA ANÁLISIS PROBABILISTA CON 1000 SIMULACIONES, VALORES MEDIOS Y RANGOS DE CONFIANZA. (A) DIRECCIÓN X Y (B) DIRECCIÓN Y. ....	112
FIGURA 5-12. CURVAS DE DESPLAZAMIENTO ESPECTRAL PARA EL PP EN FUNCIÓN DE LA ACELERACIÓN PICO: (A) EN LA DIRECCIÓN X Y (B) EN LA DIRECCIÓN Y. ....	112
FIGURA 5-13. CURVAS DE FRAGILIDAD INDIVIDUALES Y MEDIANAS PARA LA (A) DIRECCIÓN X Y (B) DIRECCIÓN Y. ....	113
FIGURA 5-14. ÍNDICE DE DAÑO MEDIO PARA LAS CURVAS DE FRAGILIDAD PROBABILISTAS EN (A) DIRECCIÓN X Y (B) DIRECCIÓN Y. ....	114
FIGURA 5-15. MIDR DEL ANÁLISIS IDA PARA TODOS LOS CASOS ANALIZADOS Y SUS CURVAS MEDIANAS Y MÁRGENES DE CONFIANZA. ....	115
FIGURA 5-16. COMPARACIÓN DE DESPLAZAMIENTO MEDIO PARA EL PP Y PARA EL ANÁLISIS DINÁMICO, RESPECTO A LA VARIACIÓN EN LA ACCIÓN SÍSMICA PARA (A) LA PGA Y (B) LA ACELERACIÓN ESPECTRAL PARA EL PRIMER MODO. ....	116
FIGURA 5-17. RELACIÓN ENTRE LOS DESPLAZAMIENTOS PARA EL PP Y EL DESPLAZAMIENTO MÁXIMO DEL ANÁLISIS DINÁMICO Y SU RELACIÓN MEDIANA PARA (A) DIRECCIÓN X Y (B) DIRECCIÓN Y. ....	116
FIGURA 5-18. DI DE PARK Y ANG COMO FUNCIÓN DE LA (A) PGA Y (B) LA COMBINACIÓN SRSS DE LA SA PARA EL PRIMER MODO DE LAS DOS DIRECCIONES PARA LOS CASOS PROBABILISTAS. ....	117
FIGURA 6-1. DISTRIBUCIÓN DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES EN PLANTA PARA EDCR.....	121
FIGURA 6-2. SECCIÓN TRANSVERSAL DE VIGA VC-1 PARA MODELO EDCR, TODAS LAS UNIDADES EN METROS SALVO INDICACIÓN, EL DIÁMETRO DEL REFUERZO SE DA EN OCTAVOS DE PULGADA. ....	124
FIGURA 6-3. (A) DESCRIPCIÓN DE CURVA DE HISTÉRESIS DE TAKEDA MODIFICADO (CARR, 2003). (B) EJEMPLO DE RESPUESTA PARA VIGA VC-1. CON MODELO HISTÉRICO. ....	124
FIGURA 6-4. SECCIÓN TRANSVERSAL DE COLUMNAS RC-1 Y RC-2, TODAS LAS UNIDADES EN METROS SALVO INDICACIÓN, EL DIÁMETRO DEL REFUERZO SE DA EN OCTAVOS DE PULGADA. ....	125
FIGURA 6-5. SECCIÓN TRANSVERSAL DE MUROS MC-1, MC-2 Y MC-3, TODAS LAS UNIDADES EN METROS SALVO INDICACIÓN, EL DIÁMETRO DEL REFUERZO SE DA EN OCTAVOS DE PULGADA. ....	126
FIGURA 6-6. DIAGRAMAS DE INTERACCIÓN P-M PARA (A) RC-1 Y RC-2 (B) MC-1, MC-2 Y RC-3.....	127
FIGURA 6-7. (A) DESCRIPCIÓN DE MODELO DE HISTÉRESIS DE TAKEDA REVISADO CON DEGRADACIÓN TRI-LINEAL (CARR, 2003), (B) MUESTRA DE COMPORTAMIENTO PARA MURO MC-1 CON DOS CONDICIONES DE CARGA AXIAL DISTINTAS. ....	128
FIGURA 6-8. MODELO SINA PARA COMPORTAMIENTO NO LINEAL EN CORTANTE (CARR, 2003). ....	129
FIGURA 6-9. FORMAS MODALES NORMALIZADAS PARA EDCR EN (A) DIRECCIÓN X Y (B) DIRECCIÓN Y (DERECHA). ....	130
FIGURA 6-10. MIDR PARA LA CONDICIÓN DE DESPLAZAMIENTO ÚLTIMO EN LAS CURVAS DE CAPACIDAD EN LAS DIRECCIONES X Y Y PARA EDCR. ....	132
FIGURA 6-11. CURVAS Y ESPECTROS DE CAPACIDAD EN LAS DIRECCIONES X Y Y PARA EDCR. SE MUESTRAN TAMBIÉN LAS FORMAS BILINEALES CORRESPONDIENTES. ....	132
FIGURA 6-12. UBICACIÓN DEL PP PARA LA EDCR EN (A) LA DIRECCIONES X Y (B) DIRECCIÓN Y. ....	133
FIGURA 6-13 CURVAS DE FRAGILIDAD PARA EDCR EN (A) LA DIRECCIONES X Y (B) DIRECCIÓN Y.....	135
FIGURA 6-14 (A) VARIACIÓN DEL DESPLAZAMIENTO PARA EL PP CON LA PGA (B) RELACIÓN DEL ÍNDICE DE DAÑO MEDIO CON EL DESPLAZAMIENTO PARA EL PP. ....	136

FIGURA 6-15. REGISTROS DE ACELERACIÓN DE LAS TRES SEÑALES A EMPLEAR PARA EL ANÁLISIS DINÁMICO DE LA ESTRUCTURA EDCR, ACOTADAS PARA DS Y CON VENTANA DE TUKEY.....	137
FIGURA 6-16. ESPECTROS DE RESPUESTA NORMALIZADOS DE LOS ACELEROGRAMAS SELECCIONADOS Y EL ESPECTRO DE LA NORMA DE DISEÑO PARA (A) DIRECCIÓN X Y (B) DIRECCIÓN Y.....	138
FIGURA 6-17. MIDR DEL ANÁLISIS IDA PARA LOS ACELEROGRAMAS SELECCIONADOS (CASO DETERMINISTA).....	139
FIGURA 6-18. ESPECTROS DE RESPUESTA NORMALIZADOS Y CON AJUSTE ESPECTRAL PARA LOS SISMOS SELECCIONADOS EN EL ANÁLISIS DETERMINISTA PARA: (A) DIRECCIÓN X Y (B) DIRECCIÓN Y.....	139
FIGURA 6-19. MIDR DEL ANÁLISIS IDA PARA LOS ACELEROGRAMAS SELECCIONADOS. (CASO DETERMINISTA CON AJUSTE ESPECTRAL).....	140
FIGURA 6-20. ÍNDICE DE DAÑO PARA ANÁLISIS IDA CON LOS ACELEROGRAMA SELECCIONADOS (CASO DETERMINISTA SIN AJUSTE ESPECTRAL).....	142
FIGURA 6-21. ÍNDICE DE DAÑO PARA ANÁLISIS IDA CON ACELEROGRAMAS (CASO DETERMINISTA CON AJUSTE ESPECTRAL).....	143
FIGURA 6-22. RELACIÓN ENTRE EL DESPLAZAMIENTO MÁXIMO PARA EL ANÁLISIS DINÁMICO INCREMENTAL CON LA PGA Y LA SA PARA EL PERIODO DEL PRIMER MODO DE OSCILACIÓN.....	144
FIGURA 6-23. COMPARACIÓN DE LAS CURVAS QUE RELACIONAN EL DESPLAZAMIENTO MÁXIMO EN EL TECHO PARA EL ANÁLISIS DINÁMICO Y EL DESPLAZAMIENTO PARA EL PP, RESPECTO A LA PGA Y LA SA PARA EL PRIMER MODO.....	145
FIGURA 6-24. RELACIÓN ENTRE EL DESPLAZAMIENTO PARA EL PP Y EL DESPLAZAMIENTO MÁXIMO PARA EL ANÁLISIS DINÁMICO INCREMENTAL, CORRELACIONADOS A PARTIR DE LOS VALORES DE PGA.....	145
FIGURA 6-25. DISTRIBUCIÓN DE LA RESISTENCIA DEL CONCRETO PARA LA BASE DE DATOS DISPONIBLE.....	148
FIGURA 6-26. SIMULACIÓN DE RESISTENCIA Y MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL CONCRETO POR LHS.....	149
FIGURA 6-27. ESPECTROS DE CAPACIDAD PARA ANÁLISIS PROBABILISTA CON 200 SIMULACIONES, VALORES MEDIOS Y RANGOS DE CONFIANZA. (A) DIRECCIÓN X Y (B) DIRECCIÓN Y.....	150
FIGURA 6-28. CURVAS DE DESPLAZAMIENTO ESPECTRAL PARA EL PP EN FUNCIÓN DE LA ACELERACIÓN PICO: (A) EN LA DIRECCIÓN X Y (B) EN LA DIRECCIÓN Y.....	151
FIGURA 6-29. CURVAS DE FRAGILIDAD PROBABILISTAS (A) DIRECCIÓN X Y (B) DIRECCIÓN Y.....	152
FIGURA 6-30. CURVAS DE DAÑO MEDIO PARA LAS DOS DIRECCIONES DE ANÁLISIS CON SUS MÁRGENES DE CONFIANZA EN (A) DIRECCIÓN X Y (B) DIRECCIÓN Y.....	153
FIGURA 6-31. MIDR DEL ANÁLISIS IDA PARA TODOS LOS CASOS ANALIZADOS Y SUS CURVAS MEDIANAS Y MÁRGENES DE CONFIANZA EN (A) DIRECCIÓN X Y (B) DIRECCIÓN Y.....	154
FIGURA 6-32. COMPORTAMIENTO MEDIO DEL DESPLAZAMIENTO MÁXIMO Y PARA EL PP EN FUNCIÓN DE LA ACCIÓN SÍSMICA.....	155
FIGURA 6-33. RELACIÓN ENTRE LOS DESPLAZAMIENTOS PARA EL PP Y EL DESPLAZAMIENTO MÁXIMO DEL ANÁLISIS DINÁMICO Y SU RELACIÓN MEDIA EN (A) DIRECCIÓN X Y (B) DIRECCIÓN Y.....	155
FIGURA 6-34. DI DE PARK Y ANG COMO FUNCIÓN DE LA ACELERACIÓN PARA LOS CASOS PROBABILISTAS CON EL VALOR MEDIANO Y LOS MÁRGENES DE CONFIANZA AL PERCENTIL 5 Y 95.....	156
FIGURA 7-1. A) CURVA DE CAPACIDAD Y PARTES LINEAL Y NO LINEAL. B) DERIVADAS CON RESPECTO AL DESPLAZAMIENTO.....	162
FIGURA 7-2. MODELO AJUSTADO DEL ESPECTRO DE CAPACIDAD EN LA DIRECCIÓN X DE LA ESTRUCTURA VUM, SE MUESTRA LA PARTE NO LINEAL DE LA CURVA, SU PRIMERA Y SEGUNDA DERIVADA ASÍ COMO EL ERROR DEL AJUSTE.....	164
FIGURA 7-3. AJUSTE DEL ESPECTRO DE CAPACIDAD EN LA DIRECCIÓN Y DE LA ESTRUCTURA VUM, SE MUESTRA LA SECCIÓN NO LINEAL DE LA CURVA SU PRIMERA Y SEGUNDA DERIVADA ASÍ COMO EL ERROR DEL AJUSTE.....	164

FIGURA 7-4. ESPECTROS DE CAPACIDAD DE ESTRUCTURA VUM AJUSTADOS CON EL MODELO PARAMÉTRICO DE PUJADES ET AL. (2014) EN: A) DIRECCIÓN X Y B) DIRECCIÓN Y.....	165
FIGURA 7-5. ESPECTROS DE CAPACIDAD DE ESTRUCTURA VUM AJUSTADOS CON EL MODELO PARAMÉTRICO DE PUJADES ET AL. (2015) CON 2 TRAMOS DE AJUSTE EN: A) DIRECCIÓN X Y B) DIRECCIÓN Y. ....	166
FIGURA 7-6. ESPECTROS DE CAPACIDAD DE ESTRUCTURA EDCR AJUSTADOS CON EL MODELO PARAMÉTRICO DE PUJADES ET AL. (2015) EN: A) DIRECCIÓN X Y B) DIRECCIÓN Y.....	167
FIGURA 7-7. AJUSTE PARAMÉTRICO PARA CURVAS OBTENIDAS DEL ANÁLISIS PROBABILISTA. VALORE MEDIANO, Y PERCENTILES 5 Y 95 PARA VUM EN: A) DIRECCIÓN X Y B) DIRECCIÓN Y. ....	168
FIGURA 7-8. AJUSTE PARAMÉTRICO PARA CURVAS OBTENIDAS DEL ANÁLISIS PROBABILISTA. VALORE MEDIANO, Y PERCENTILES 5 Y 95 PARA EDCR EN: A) DIRECCIÓN X Y B) DIRECCIÓN Y.....	169
FIGURA 7-9. SINCRONIZACIÓN DE CURVA $D_{IPa}$ CON ESPECTRO DE CAPACIDAD PARA DEFINIR PUNTO DE NORMALIZACIÓN PARA ESTRUCTURA VUM EN: A) DIRECCIÓN X Y B) DIRECCIÓN Y. ....	172
FIGURA 7-10. AJUSTE DEL MODELO DE DAÑO EN ESTRUCTURA VUM CON MODELO DE DAÑO DE PUJADES ET AL. (2014) EN: A) DIRECCIÓN X Y B) DIRECCIÓN Y.....	173
FIGURA 7-11. SINCRONIZACIÓN DE CURVA $D_{IPa}$ CON ESPECTRO DE CAPACIDAD PARA DEFINIR PUNTO DE NORMALIZACIÓN PARA ESTRUCTURA EDCR EN: A) DIRECCIÓN X Y B) DIRECCIÓN Y.....	174
FIGURA 7-12. AJUSTE DE CURVA DE DAÑO EN ESTRUCTURA EDCR CON MODELO DE DAÑO DE PUJADES ET AL. (2015) EN: A) DIRECCIÓN X Y B) DIRECCIÓN Y.....	175
FIGURA 7-13. AJUSTE DE CURVA DE DAÑO EN ESTRUCTURA VUM CON MODELO DE DAÑO CON COMBINACIÓN DE RIGIDECE EN: A) DIRECCIÓN X Y B) DIRECCIÓN Y.....	176
FIGURA 7-14. AJUSTE DE CURVA DE DAÑO EN ESTRUCTURA EDCR CON MODELO DE DAÑO CON COMBINACIÓN DE RIGIDECE EN: A) DIRECCIÓN X Y B) DIRECCIÓN Y.....	177
FIGURA 7-15. AJUSTE DE CURVA DE DAÑO EN ESTRUCTURA EDCR CON MODELO DE DAÑO CON COMBINACIÓN DE RIGIDECE EN: A) DIRECCIÓN X Y B) DIRECCIÓN Y.....	178
FIGURA 7-16. VARIACIÓN DEL ERROR RMS PARA LAS COMBINACIONES DE LOS FACTORES A Y B EN EL AJUSTE DE LAS CURVA DE DAÑO PARA EDCR EN LA DIRECCIÓN Y. ....	178
FIGURA 8-1. COMPARACIÓN DE RELACIONES DE LA RESPUESTA MÁXIMA UNIDIRECCIONAL RESPECTO A $GMRot150$ , COMPARANDO CON RESULTADOS DE DIFERENTES INVESTIGACIONES.....	183
FIGURA 8-2. (A) RELACIONES DE LA RESPUESTA MÁXIMA CON RESPECTO A $GMar$ Y (B) DESVIACIÓN ESTÁNDAR DEL LOGARITMO DE LAS RELACIONES.....	184
FIGURA 8-3. COMPARACIÓN DE LAS MATRICES DE CORRELACIÓN LINEAL PARA (A) EL CASO DE SEÑALES SINUSOIDALES Y (B) EL ESTUDIO DE BAKER Y JAYARAM (2008). ....	187
FIGURA 8-4. RELACIÓN ENTRE EL MIDR Y PGA PARA: A) ESTRUCTURAS VUM, B) ESTRUCTURAS EDCR EN DIRECCIÓN X Y C) ESTRUCTURA EDCR EN DIRECCIÓN Y. ....	191

## LISTA DE TABLAS

TABLA 1-1. TIPO DE ESTRUCTURAS PROPUESTAS PARA ANÁLISIS.....	7
TABLA 2-1 . DISTRIBUCIÓN DE REGISTROS DE ACUERDO A LA PGA PARA LAS BASES DE DATOS DISPONIBLES. (TODOS LOS VALORES EN $CM/S^2$ ) ....	39
TABLA 2-2 . TIPOS DE SUELO EMPLEADOS PARA LA CLASIFICACIÓN EN LAS ESTACIONES ACELEROGRÁFICAS. ....	40
TABLA 2-3 . CLASIFICACIÓN DE REGISTROS SÍSMICOS POR TIPO DE SUELO PARA LAS BASES DE DATOS DISPONIBLES. ....	40
TABLA 2-4 . CLASIFICACIÓN DE REGISTROS SÍSMICOS POR MAGNITUD $M_w$ PARA LAS BASES DE DATOS DISPONIBLES. ....	41
TABLA 2-5 . CLASIFICACIÓN DE REGISTROS SÍSMICOS POR PROFUNDIDAD PARA LAS BASES DE DATOS DISPONIBLES, TODOS LOS DATOS EN KILÓMETROS. ....	42
TABLA 2-6 . CLASIFICACIÓN DE REGISTROS SÍSMICOS POR DISTANCIA ENTRE EL HIPOCENTRO Y LA ESTACIÓN PARA LAS BASES DE DATOS DISPONIBLES, TODOS LOS DATOS EN KILÓMETROS. ....	43
TABLA 2-7 . CLASIFICACIÓN DE REGISTROS SÍSMICOS POR DISTANCIA ENTRE EL HIPOCENTRO Y LA ESTACIÓN PARA LAS BASES DE DATOS DISPONIBLES, TODOS LOS DATOS EN KILÓMETROS. ....	44
TABLA 2-8. FRECUENCIAS DE CORTE UTILIZADO PARA EL PROCESAMIENTO DE REGISTROS EN LA BASE DE DATOS Y CANTIDAD DE REGISTROS PARA CADA RANGO. ....	45
TABLA 3-1. LISTA DE REGISTROS SELECCIONADOS CON UN ÚNICO FACTOR DE ESCALA PARA ESTRUCTURA DE PERIODO BAJO Y PERIODO ALTO, SE MUESTRA EL FACTOR DE ESCALADO Y EL NOMBRE DE REGISTROS SEGÚN FORMATO LIS-UCR (MOYA, 2006).....	62
TABLA 4-1 DESCRIPCIÓN DE ESPECÍMENES DE MAMPOSTERÍA PROBADOS Y EL REFUERZO EMPLEADO. ....	70
TABLA 4-2 RESUMEN DE PROPIEDADES DEL AJUSTE ENTRE EL MODELO DE HISTÉRESIS Y EL RESULTADO DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO. ....	74
TABLA 4-3. RESUMEN DE PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE PAREDES DE PRIMER NIVEL DE LA VUM (VÉASE TAMBIÉN LA FIGURA 4-9). ....	77
TABLA 4-4. RESUMEN DE MASAS CONCENTRADAS EN LA VUM. ....	78
TABLA 4-5. RESUMEN DE RESISTENCIA EN ELEMENTOS DE LA VUM (VÉANSE TAMBIÉN LA FIGURA 4-5 Y FIGURA 4-9).....	79
TABLA 4-6 MATRIZ DE PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DETERMINADOS CON LA FUNCIÓN BINOMIAL. ....	87
TABLA 4-7 PARÁMETROS DE AJUSTE DE LAS CURVAS DE FRAGILIDAD PARA UNA FUNCIÓN ACUMULATIVA LOG-NORMAL. ....	88
TABLA 5-1. RESUMEN DE PARÁMETROS DESCRIPTIVOS DE LAS FDP PARA LAS VARIABLES ALEATORIAS A CONSIDERAR PARA LAS ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA REFORZADA. ....	106
TABLA 5-2. DESPLAZAMIENTOS MEDIANO Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LA FUNCIÓN LOG-NORMAL PARA AJUSTE DE CURVAS DE FRAGILIDAD PARA EL ESTADO DE DAÑO I, PARA EL VALOR DE PERCENTIL 5, 50 (VALOR MEDIANO) Y 95. ....	113
TABLA 6-1. DISTRIBUCIÓN DE MASAS CONCENTRADAS EN ALTURA PARA EDCR. ....	123
TABLA 6-2. RESUMEN DE CAPACIDAD CALCULADA PARA ELEMENTOS EN FLEXO-COMPRESIÓN (VER EXPLICACIÓN EN EL TEXTO). ....	126
TABLA 6-3. PARÁMETROS DESCRIPTIVOS DEL MODELO DE HISTÉRESIS DE TAKEDA REVISADO CON DEGRADACIÓN TRI-LINEAL (CARR, 2003)...	128
TABLA 6-4. PARÁMETROS DESCRIPTIVOS DEL MODELO DE HISTÉRESIS DE SINA (CARR, 2003). ....	129
TABLA 6-5. PERIODOS NATURALES PARA LOS PRINCIPALES MODOS DE OSCILACIÓN TRASLACIONALES. ....	130
TABLA 6-6 MATRIZ DE PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DETERMINADOS CON LA FUNCIÓN BINOMIAL. ....	134
TABLA 6-7 PARÁMETROS DE AJUSTE DE LAS CURVAS DE FRAGILIDAD PARA UNA FUNCIÓN ACUMULATIVA LOG-NORMAL. ....	134
TABLA 6-8. DESPLAZAMIENTOS MEDIANO Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LA FUNCIÓN LOG-NORMAL PARA AJUSTE DE CURVAS DE FRAGILIDAD PARA EL ESTADO DE DAÑO I, PARA EL VALOR DE PERCENTIL 5, 50 (VALOR MEDIANO) Y 95. ....	152

Análisis estructural probabilista orientado a evaluación del daño sísmico con aplicaciones a tipologías constructivas empleadas en Costa Rica

---

TABLA 7-1. RESUMEN DE PARÁMETROS PARA LOS AJUSTES DE LOS CASOS DETERMINISTA DE LA ESTRUCTURA VUM. ....	165
TABLA 7-2. RESUMEN DE PARÁMETROS PARA LOS AJUSTES POR TRAMOS DE LOS CASOS DETERMINISTA DE LA ESTRUCTURA VUM.....	166
TABLA 7-3. RESUMEN DE PARÁMETROS PARA LOS AJUSTES DE LOS CASOS DETERMINISTA DE LA ESTRUCTURA EDCR. ....	167
TABLA 7-4. RESUMEN DE PARÁMETROS PARA LOS AJUSTES POR TRAMOS DE CURVAS OBTENIDAS DEL ANÁLISIS PROBABILISTA DE LA ESTRUCTURA VUM. ....	169
TABLA 7-5. RESUMEN DE PARÁMETROS PARA LOS AJUSTES POR TRAMOS DE CURVAS OBTENIDAS DEL ANÁLISIS PROBABILISTA DE LA ESTRUCTURA EDCR.....	170
TABLA 7-6. COMPARACIÓN DEL ERROR CUADRÁTICO MEDIO (RMSE) ENTRE LOS MODELOS DE DAÑO ANALIZADOS PARA EL CASO DETERMINISTA. ....	179