

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE POSGRADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS

**EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE LAS
EDIFICACIONES DE LA CIUDAD DE QUITO – ECUADOR Y
RIESGO DE PÉRDIDA**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MÁSTER EN INGENIERÍA
ESTRUCTURAL**

ING. BLANCA ADRIANA CHÁVEZ ORDÓÑEZ

DIRECTOR: DR. ROBERTO RODRIGO AGUIAR FALCONÍ

Quito, Mayo 2016

DECLARACIÓN

Yo, Blanca Adriana Chávez Ordóñez, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Blanca Adriana Chávez Ordóñez

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Blanca Adriana Chávez Ordóñez, bajo mi supervisión.

Dr. Roberto Rodrigo Aguiar Falconí
DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento sincero a la Escuela Politécnica Nacional, a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, a mis maestros que supieron inculcar en mí el deseo de superación en mi campo profesional y me servirá para fortalecer las enseñanzas a mis educandos.

En especial quiero agradecer al Dr. Roberto Aguiar, director de tesis, por la confianza que depositó en mí, por su apoyo constante, sus indicaciones y orientaciones que fueron de gran ayuda para la realización de este trabajo.

Al Ilustre Municipio de Quito, a través del Arq. Mario Recalde, Director Metropolitano de Catastro por su cooperación con los datos catastrales para elaborar el presente estudio.

También quiero dejar constancia de mi agradecimiento sincero al Dr. Eugenio Villacís, Dra. Alicia Rivas, Ing. Hermel Flores, quienes con sus criterios me apoyaron y demostraron con sus acciones lo que es ser una gran persona.

Agradezco también a mis alumnos, amigos y hermanas que siempre me dieron fuerzas para continuar.

DEDICATORIA

A mi hijo, porque siempre está a mi lado y me da el aliento que necesito para seguir adelante. Por él comprendí que todo esfuerzo es importante al momento de superarnos, pues Mateo es la motivación más grande que tengo.

A mis hermanas que siempre están a mi lado en todos los momentos, en especial en el desarrollo de este trabajo.

A la señora Erlinda Moreno por su apoyo incondicional en momentos importantes de mi vida y en la culminación de esta maestría.

CONTENIDO

DECLARACIÓN	ii
CERTIFICACIÓN	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
DEDICATORIA.....	v
CONTENIDO.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
SIMBOLOGÍA.....	xiii
RESUMEN	xv
ABSTRACT	xvi
PRESENTACIÓN	xvii
CAPÍTULO 1	1
GENERALIDADES.....	1
CAPÍTULO 2	3
ESTADO DEL ARTE DE LA TEMÁTICA.....	3
2.1 PREÁMBULO	3
2.2 AMENAZA SÍSMICA.....	4
2.3 VULNERABILIDAD SÍSMICA.....	4
2.4 RIESGO SÍSMICO.....	5
2.5 RIESGO – AMENAZA – VULNERABILIDAD.....	6
2.6 ZONIFICACIÓN SÍSMICA DE QUITO	8
2.6.1 CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS SEGÚN EL NEC15	11
2.7 MODELO DEL TERREMOTO CARACTERÍSTICO.....	13
CAPÍTULO 3	15
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	15
3.1. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN.....	15
3.2. METODOLOGÍAS PARA ESTIMAR LA VULNERABILIDAD SÍSMICA	16
CAPÍTULO 4	18
METODOLOGÍA HAZUS.....	18
4.1. ESTIMACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SISMICA – METODOLOGÍA HAZUS	18
4.2. CURVAS DE CAPACIDAD	19
4.3. ESPECTRO DE DEMANDA	22
4.4. CURVAS DE FRÁGILIDAD	23
CAPÍTULO 5	26
PROYECTO PERPETUATE	26
5.1. PREÁMBULO	26
5.2. PRINCIPIOS BÁSICOS DEL PROCEDIMIENTO PERPETUATE	27
5.2.1. PRIMERA ETAPA.....	30

5.2.1.1. Clasificación del bien arquitectónico	30
5.2.1.2. Requerimientos de conservación y seguridad.....	32
5.2.1.3. Definición de la amenaza sísmica	37
5.2.1.4. Información de cómo fue construido	37
5.2.2. SEGUNDA ETAPA	39
5.2.2.1. Modelado y verificaciones de seguridad	39
5.2.2.2. Pruebas experimentales.....	42
5.2.2.3. Aplicación al estudio de casos	43
5.2.3. TERCERA ETAPA.....	44
5.2.3.1. Decisiones de rehabilitación.....	44
5.3. CARACTERÍSTICAS DE LA FUENTE SÍSMICA.....	45
5.4. RESULTADOS DEL PROYECTO PERPETUATE.....	46
CAPÍTULO 6	49
ANÁLISIS DEL CENTRO HISTÓRICO DE QUITO	49
6.1. PREÁMBULO	49
6.2. TRABAJO DE CAMPO	50
6.2.1. CARACTERIZACIÓN DEL CENTRO HISTÓRICO.....	51
6.2.2. ESTUDIO DE CASO.....	52
6.2.3. METODOLOGÍA.....	53
6.3. RESULTADOS DE LA CLASIFICACIÓN.....	59
6.4. ANÁLISIS ESPECÍFICO DE LA TIPOLOGÍA: MAMPOSTERÍA PORTANTE	61
6.5. ANÁLISIS ESPECÍFICO DE LA TIPOLOGÍA: HORMIGÓN ARMADO	62
6.5.1 CURVAS DE CAPACIDAD DE LAS TIPOLOGÍAS ENCONTRA- DAS EN EL CENTRO HISTÓRICO DE QUITO.	62
6.5.2. TIPOLOGÍA C1L PARA EL CENTRO HISTÓRICO DE QUITO.	63
6.5.2.1. C1L de tres plantas	66
6.5.2.1.1. Tres plantas - dos vanos.....	66
Pórtico de dos vanos y luces de 3m.-.....	66
Pórtico de dos vanos y luces de 4m.-	68
Pórtico de dos vanos y luces de 5m.-.....	69
6.5.2.1.2.Tres plantas - tres vanos	70
Pórtico de tres vanos y luces de 3m.-.....	70
Pórtico de tres vanos y luces de 4m.-.....	71
Pórtico de tres vanos y luces de 5m.-.....	72
Pórtico de tres vanos y luces de 5m c/col. 35x35.-.....	73
6.5.2.2. C1L de dos plantas	74
6.5.2.2.1. Dos plantas -dos vanos	74
Pórtico de dos vanos y luces de 3m.-.....	74
Pórtico de dos vanos y luces de 4m.-.....	75
Pórtico de dos vanos y luces de 5m.-.....	76
6.5.2.2.2. Dos plantas -tres vanos	76

Pórtico de tres vanos y luces de 3m.-.....	76
Pórtico de tres vanos y luces de 4m.-.....	77
Pórtico de tres vanos y luces de 5m.-.....	78
6.5.2.3. C1L de una planta	79
6.5.2.3.1. Una planta - dos vanos	79
Pórtico de dos vanos y luces de 3m.-.....	79
Pórtico de dos vanos y luces de 4m.-.....	80
Pórtico de dos vanos y luces de 5m.-.....	81
6.5.2.3.2. Una planta - tres vanos.....	82
Pórtico de tres vanos y luces de 3m.-.....	82
Pórtico de tres vanos y luces de 4m.-.....	83
Pórtico de tres vanos y luces de 5m.-.....	84
6.5.3. SÍNTESIS DE LAS CURVAS DE CAPACIDAD PARA LAS EDIFICACIONES TIPO C1L	85
6.6. CURVAS DE FRÁGILIDAD Y PORCENTAJES DE DAÑO EN LAS ESTRUCTURAS TIPO C1L	89
6.6.1. CURVAS DE FRÁGILIDAD	89
6.6.2. PORCENTAJES DE DAÑO EN LAS ESTRUCTURAS TIPO C1L DEL CENTRO HISTÓRICO DE QUITO.....	91
6.6.3. MAPAS DE PORCENTAJES DE DAÑO EN LAS ESTRUCTURAS TIPO C1L DEL CENTRO HISTÓRICO DE QUITO.....	94
CAPÍTULO 7	98
CONCLUSIONES.....	98
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
ANEXOS	102

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla No.1	Valores del factor Z en función de la zona sísmica.....	9
Tabla No. 2:	Zonas de suelos similares.....	10
Tabla No. 3:	Períodos de vibración en cada zona de suelo	11
Tabla No. 4:	Tipos de suelos según NEC 2015	12
Tabla No. 5	Segmentos de las fallas ciegas de Quito.....	14
Tabla No. 6	Clases de edificios y tipos relacionados de los modelos	32
Tabla No. 7	Objetivos del PERPETUATE, niveles de rendimiento y períodos de retorno relacionados, primarios (naranja intenso), secundarios (naranja pálido).....	34
Tabla No. 8	Criterios de aceptación definidos en el procedimiento PERPETUATE	36
Tabla No. 9	Resumen de los casos de estudio considerados	48
Tabla No.10	Nomenclatura de los Sistemas Estructurales que considera HAZUS 99.....	56
Tabla No.11:	Cuadro Resumen de las Tipologías de las Edificaciones del Centro Histórico de la Ciudad de Quito	59
Tabla No. 12	Resumen de los casos considerados.....	61
Tabla No. 13	Valores para los puntos de cedencia y de capacidad última. Para Nivel de Diseño Sísmico Muy Bajo (no se considera sismo).....	63
Tabla No. 14	Clasificación de la muestra C1L por número de pisos	66
Tabla No. 15	Puntos de desempeño analíticos	88
Tabla No. 16	Derivas máximas para viviendas de 1-2-3 plantas	91
Tabla No. 17	Porcentajes de daño para las estructuras de 3 pisos del CHQ ...	92
Tabla No. 18	Porcentajes de daño para las estructuras de 2 pisos del CHQ ..	93
Tabla No. 19	Porcentajes de daño para las estructuras de 1 piso del CHQ	94

INDICE DE FIGURAS

FIGURA No. 1	ZONAS SÍSMICAS PARA PROPÓSITOS DE DISEÑO SEGÚN LA NORMA ECUATORIANA DE CONSTRUCCIÓN.....	8
FIGURA No. 2:	ZONAS DE SUELOS SIMILARES.	10
FIGURA No. 3:	QUEBRADAS EN EL CENTRO NORTE DE QUITO.....	11
FIGURA No. 4	ESPECTROS DE DISEÑO.....	13
FIGURA No. 5	FALLAS CIEGAS DE QUITO	14
FIGURA No. 6	MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN.....	15
FIGURA No. 7	METODOLOGÍA PARA ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD.....	16
FIGURA No. 8	EJEMPLO DE CURVA DE CAPACIDAD.	20
FIGURA No. 9	REPRESENTACIÓN BILINEAL DEL ESPECTRO DE CAPACIDAD.	21
FIGURA No. 10	ESPECTRO SÍSMICO ELÁSTICO DE ACELERACIONES QUE REPRESENTA EL SISMO DE DISEÑO.....	23
FIGURA No. 11	EJEMPLO DE CURVAS DE FRAGILIDAD PARA ESTADOS DE DAÑO LIGERO, MODERADO, EXTENSIVO Y COMPLETO.....	24
FIGURA No. 12	EJEMPLO DE CONSTRUCCIÓN DE ESPECTRO DE CAPACIDAD Y ESPECTRO DE DEMANDA	25
FIGURA No. 13	ESQUEMA GENERAL DEL PROCEDIMIENTO.....	28
FIGURA No. 14	DESCRIPCIÓN GENERAL DEL BIEN ARQUITECTÓNICO EXAMINADO Y CLASIFICADO EN EL PROYECTO PERPETUATE	31
FIGURA No. 15	CURVA TÍPICA PUSHOVER DE UN BIEN ARQUITECTÓNICO CON IDENTIFICACIÓN DE DAÑO Y NIVELES DE RENDIMIENTO OBJETIVO	33
FIGURA No. 16	NIVELES DE RENDIMIENTO Y LOS NIVELES DE DAÑO DE PERPETUATE	34
FIGURA No. 17	ESQUEMA DEL ENFOQUE PROBABILÍSTICO ADOPTADO PARA DEFINIR LOS CRITERIOS DE ACEPTACIÓN	36
FIGURA No. 18	TIPOS DE BIENES Y ESCALAS DE EVALUACIÓN SÍSMICA CORRESPONDIENTES.....	41
FIGURA No. 19	RESUMEN DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES DEL PROYECTO PERPETUATE	42
FIGURA No. 20	ZONIFICACIÓN DE LA FUENTE SÍSMICA Y UBICACIÓN DEL SITIO (CENTRO HISTÓRICO DE RODAS EN LA 36.445N28.225E)	46
FIGURA No. 21:	CENTRO HISTÓRICO DE QUITO	52
FIGURA No. 22:	DELIMITACIÓN DE LAS ZONAS DE ESTUDIO.....	53
FIGURA No. 23:	EJEMPLO DE ASIGNACIÓN DE TIPOLOGÍAS PARA CADA VIVIENDA EN ZONA 15.....	55
FIGURA No. 24:	ASIGNACIÓN DE COLORES POR TIPOLOGÍA.....	57
FIGURA No. 25:	AMPLIACIÓN DE LA ZONA 12.....	58

FIGURA No. 26	TIPOLOGÍAS RESUMIDAS DE LAS 2606 VIVIENDAS DEL CHQ ESTUDIADAS.	60
FIGURA No. 27	TIPOS DE VIVIENDAS SEGÚN TIPOLOGÍA HAZUS EN LAS 23 ZONAS DE ESTUDIO.....	60
FIGURA No. 28	TIPOLOGÍA C1L EN EL CHQ EN VIVIENDAS DE UN PISO.....	64
FIGURA No. 29	TIPOLOGÍA C1L EN EL CHQ EN VIVIENDAS DE DOS PISOS	65
FIGURA No. 30	TIPOLOGÍA C1L EN EL CHQ EN VIVIENDAS DE TRES PISOS	65
FIGURA No. 31	CURVAS DE CAPACIDAD, PÓRTICO DE 2 VANOS Y LUCES DE 3m.	67
FIGURA No. 32	DERIVAS DE PISO PARA UN PÓRTICO DE 2 VANOS, 3m DE LUZ Y 3 PLANTAS.	67
FIGURA No. 33	PUNTO DE DESEMPEÑO PARA EL PÓRTICO DE 2 VANOS, 3m DE LUZ Y TRES PLANTAS.....	68
FIGURA No. 34	DERIVAS DE PISO PARA UN PÓRTICO DE 2 VANOS Y 4m DE LUZ.	68
FIGURA No. 35	PUNTO DE DESEMPEÑO PARA EL PÓRTICO DE 2 VANOS Y 4m DE LUZ	69
FIGURA No. 36	DERIVAS DE PISO PARA EL PÓRTICO DE 2 VANOS, 5m DE LUZ, Y TRES PLANTAS.....	69
FIGURA No. 37	PUNTO DE DESEMPEÑO PARA EL PÓRTICO DE 2 VANOS, 5m DE LUZ Y TRES PLANTAS.....	70
FIGURA No. 38	DERIVAS DE PISO PARA UN PÓRTICO DE 3 VANOS Y 3m DE LUZ.	70
FIGURA No. 39	PUNTO DE DESEMPEÑO PARA EL PÓRTICO DE 3 VANOS Y 3m DE LUZ	71
FIGURA No. 40	DERIVAS DE PISO PARA UN PÓRTICO DE 3 VANOS Y 4m DE LUZ.	71
FIGURA No. 41	PUNTO DE DESEMPEÑO PARA EL PÓRTICO DE 3 VANOS Y 4m DE LUZ	72
FIGURA No. 42	DERIVAS DE PISO PARA UN PÓRTICO DE 3 VANOS, 5 m DE LUZ Y 3 PLANTAS	72
FIGURA No. 43	PUNTO DE DESEMPEÑO PARA EL PÓRTICO DE 3 VANOS, 5m DE LUZ Y 3 PLANTAS.....	73
FIGURA No. 44	DERIVAS DE PISO PARA UN PÓRTICO DE 3 VANOS, 5m DE LUZ, 3 PLANTAS Y CON COLUMNAS DE 35*35 cm.....	73
FIGURA No. 45	PUNTO DE DESEMPEÑO PARA EL PÓRTICO DE 3 VANOS, 5m DE LUZ, 3 PLANTAS Y CON COLUMNAS DE 35*35 cm.....	74
FIGURA No. 46	DERIVAS DE PISO PARA PÓRTICOS DE 2V – 3m – 2p	74
FIGURA No. 47	PUNTO DE DESEMPEÑO PARA EL PÓRTICO DE 2V – 3m – 2p..	75
FIGURA No. 48	DERIVAS DE PISO PARA UN PÓRTICO DE 2V – 4m – 2p.....	75
FIGURA No. 49	PUNTO DE DESEMPEÑO PARA EL PÓRTICO DE 2V – 4m – 2p..	76
FIGURA No. 50	SIN PUNTO DE DESEMPEÑO EN EL PÓRTICO DE 2V – 5m – 2p	76

FIGURA No. 51	DERIVAS DE PISO PARA EL PÓRTICO DE 3V – 3m -2p	77
FIGURA No. 52	PUNTO DE DESEMPEÑO PARA EL PÓRTICO DE 3V – 3m – 2p..	77
FIGURA No. 53	DERIVAS DE PISO PARA EL PÓRTICO DE 3V – 4m – 2p	78
FIGURA No. 54	PUNTO DE DESEMPEÑO PARA EL PÓRTICO DE 3V – 4m – 2p..	78
FIGURA No. 55	DERIVAS DE PISO PARA UN PÓRTICO DE 3V – 5m – 2p	79
FIGURA No. 56	DERIVAS DE PISO PARA UN PÓRTICO DE 2V – 3m – 1p	80
FIGURA No. 57	PUNTO DE DESEMPEÑO PARA UN PÓRTICO DE 2V – 3m – 1p.	80
FIGURA No. 58	DERIVAS DE PISO PARA UN PÓRTICO DE 2V – 4m – 1p	81
FIGURA No. 59	PUNTO DE DESEMPEÑO PARA EL PÓRTICO DE 2V – 4m – 1p ...	81
FIGURA No. 60	DERIVAS DE PISO PARA PÓRTICOS DE 2V – 5m – 1p.....	82
FIGURA No. 61	PUNTO DE DESEMPEÑO PARA EL PÓRTICO DE 2V – 5m – 1p..	82
FIGURA No. 62	DERIVAS DE PISO PARA PÓRTICOS DE 3V – 3m – 1p	83
FIGURA No. 63	PUNTO DE DESEMPEÑO PARA EL PÓRTICO DE 3V – 3m – 1p..	83
FIGURA No. 64	DERIVAS DE PISO PARA PÓRTICOS DE 3V – 4m – 1p	84
FIGURA No. 65	PUNTO DE DESEMPEÑO PARA EL PÓRTICO DE 3V – 4m – 1p..	84
FIGURA No. 66	DERIVAS DE PISO PARA PÓRTICOS DE 3V – 5m – 1p	85
FIGURA No. 67	PUNTO DE DESEMPEÑO PARA EL PÓRTICO DE 3V – 5m – 1p..	85
FIGURA No. 68	CURVAS DE CAPACIDAD PARA LAS ESTRUCTURAS TIPO C1L Y LA CURVA PROMEDIO PARA LAS ESTRUCTURAS FRÁGILES.....	86
FIGURA No. 69	CURVA PROMEDIO DE CAPACIDAD PARA C1L DEL CHQ Y SU EQUIVALENTE CURVA BILINEAL	86
FIGURA No. 70	COMPARACIÓN ENTRE ESPECTROS DE CAPACIDAD ESTUDIO - HAZUS.	87
FIGURA No. 71	PUNTOS DE DESEMPEÑO.....	89
FIGURA No. 72	CURVAS DE FRAGILIDAD PARA ESTRUCTURAS DE 3 PISOS....	90
FIGURA No. 73	CURVAS DE FRAGILIDAD PARA EDIFICACIONES DE 2 PISOS ...	90
FIGURA No. 74	CURVAS DE FRAGILIDAD PARA EDIFICACIONES DE 1 PISO.....	91
FIGURA No. 75	PORCENTAJES DE DAÑO PARA ESTRUCTURAS DE 3 PISOS CON LUCES ENTRE VANOS DE 3m – 4m – 5m PARA EDIFICACIONES DEL CHQ.....	92
FIGURA No. 76	PORCENTAJES DE DAÑO PARA ESTRUCTURAS DE 2 PISOS CON LUCES ENTRE VANOS DE 3m – 4m – 5m PARA EDIFICACIONES DEL CHQ.....	93
FIGURA No. 77	PORCENTAJES DE DAÑO PARA ESTRUCTURAS DE UN PISO CON LUCES ENTRE VANOS DE 3m – 4m – 5m PARA EDIFICACIONES DEL CHQ.....	94
FIGURA No. 78	DAÑO EN ESTRUCTURAS C1L CON LUCES ENTRE VANOS DE 3m	95
FIGURA No. 79	DAÑO EN ESTRUCTURAS C1L CON LUCES ENTRE VANOS DE 4m	96
FIGURA No. 80	DAÑO EN ESTRUCTURAS C1L CON LUCES ENTRE VANOS DE 5m	97

SIMBOLOGÍA

PSHA =	Análisis Probabilístico de Peligro Sísmico
IM =	Intensidad Sísmica.
PL =	Nivel de Desempeño
PGA =	Aceleración máxima del terreno para sismo de diseño
PGD=	Aceleración máxima para evolución de fallas del suelo
ADR =	Espectro de Respuesta Aceleración – Desplazamiento
IMPL=	Valor máximo de la medida de intensidad compatible con cada PL de la curva de amenaza.
PDL =	Probabilidad de tener un cierto estado de daño.
CSM =	Método del Espectro de Capacidad.
DL =	Nivel de desplazamiento.
TR, PLi =	Período de retorno para cada nivel de desempeño
T*R,PLi =	Período de retorno del terremoto de diseño
Is =	Índice de seguridad.
VN =	Vida nominal del bien.
CHQ =	Centro Histórico de Quito.
Au =	Aceleración última.
CCLM =	Constitución continua de Leyes de Modelación
SEM =	Modelos de elementos estructurales
DIM =	Modelos de interface discreta
MBM =	Modelos de macro bloques
SFI =	Interacción suelo - cimiento
SFSI =	Efectos de interacción suelo-estructura
IDA =	Análisis Dinámico Incremental

UNDRO= Oficina del Coordinador de las Naciones Unidas para el Socorro en
Casos de Desastre

UNESCO= United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
(Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y
la Cultura)

UNISDR –Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de
Desastres

RESUMEN

En el presente estudio se desarrolla un análisis de vulnerabilidad sísmica y riesgo de pérdida en las edificaciones de la ciudad de Quito, ante la ocurrencia de un evento sísmico. Se toma como muestra representativa el Centro Histórico de Quito, ya que sus edificaciones comprenden las diferentes tipologías de construcción de toda la ciudad.

Para este análisis se utilizan metodologías probadas en Europa y Estados Unidos como HAZUS y PERPETUATE, así como modelos desarrollados en Ecuador para la determinación de curvas de capacidad, curvas de fragilidad, puntos de desempeño y derivas máximas de piso.

En la muestra de 2606 edificaciones del Centro Histórico de Quito se aplica la metodología HAZUS para clasificarlas. Una vez clasificadas se utiliza el principio de similitud con el proyecto PERPETUATE para la tipología de mampostería portante. Como resultado se obtiene que, ante un evento desastroso, estas edificaciones sufrirían daño.

Para la tipología de hormigón armado, se recurre a la metodología de HAZUS adaptada a Ecuador. Se calculan las curvas de capacidad, puntos de desempeño y derivas de piso. Con estos datos se accede a las curvas de fragilidad para definir los porcentajes de daño y finalmente conocer la vulnerabilidad de dichas edificaciones.

Se concluye que la ciudad de Quito tiene un alto grado de vulnerabilidad, no solo por las características propias del suelo y sus fallas, sino también, por la forma en que se diseña y construye.

Los resultados obtenidos no son concluyentes y son susceptibles de ser mejorados en función de la tecnología disponible.

PALABRAS CLAVE: Vulnerabilidad Sísmica, Riesgo, Mampostería, Hormigón armado.

ABSTRACT

In the present study, an analysis of seismic vulnerability and risk of loss in buildings of the city of Quito, it's developed in the occurrence of a seismic event. A representative sample is taken of the Historic Center of Quito, since its buildings include the different typology of construction of the entire city.

In this analysis methodologies tested in Europe and the United States like HAZUS and PERPETUATE are used, as well as models developed in Ecuador for determining capacity curves, fragility curves, performance points, and maximum floor drifts are used.

In the sample of 2606 buildings in the Historic Center of Quito the HAZUS methodology was applied to classify. Once classified the principle of similarity to the project PERPETUATE is used for the typology of masonry bearing. As a result is obtained that, during a disastrous event, these buildings will suffer damage.

For the typology of reinforced concrete is used to HAZUS methodology adapted to Ecuador. The curves of capacity, performance points and floor drifts are used. With these, the fragility curves are accessed to define the percentage of damage and finally know the vulnerability of these buildings.

This concludes that the City of Quito has a high degree of vulnerability, not only by the characteristics of the soil and its failures, but also by the way it is designed and constructed.

The results obtained are inconclusive and are susceptible to be improved in terms of available technology.

KEYWORDS: Seismic Vulnerability, Damage, Risk, Masonry, Reinforced Concrete.

PRESENTACIÓN

Este trabajo se organiza en 7 capítulos:

Capítulo I: Generalidades.- Se describe la importancia de realizar un estudio de la vulnerabilidad y porcentajes de daño que se asocian con la posible ocurrencia de sismos de gran magnitud en el Centro Histórico de Quito.

Capítulo II: Estado del Arte de la Temática.- Se realiza una descripción teórica de los estudios existentes, relacionados con el tema de la tesis.

Capítulo III: Metodología en la Investigación.- Se determina la metodología a utilizar en el presente estudio de vulnerabilidad sísmica y riesgo de pérdida.

Capítulo IV: Metodología HAZUS.- Es este capítulo se hace una descripción de la metodología HAZUS que sirve para determinar la vulnerabilidad sísmica y riesgo de pérdida, ante un evento natural catastrófico.

Capítulo V: Proyecto PERPETUATE.- Se describe el Proyecto PERPETUATE desarrollado en varios países de Europa para determinar la vulnerabilidad y riesgo de pérdida en bienes patrimoniales de la tipología de mampostería portante.

Capítulo VI: Análisis del Centro Histórico de Quito - CHQ.- En base a la descripción y uso de datos en 2606 edificaciones del CHQ se determina: las tipologías estructurales, puntos de desempeño, derivas de piso, curvas de capacidad, curvas de fragilidad, como parte del estudio de vulnerabilidad mediante la metodología HAZUS y programas desarrollados en Ecuador; y, porcentajes de daño ante la posible ocurrencia del sismo de diseño planteado por la NEC15.

Capítulo VII: Conclusiones.- Se enuncian las conclusiones de la tesis y se resalta el aporte de este estudio.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

El territorio continental del Ecuador se encuentra situado en el Cinturón de Fuego del Pacífico, zona de alta sensibilidad sísmica y de riesgos que se asocian a esta característica geológica. Específicamente, la ciudad de Quito se encuentra en una planicie de características geotécnicas relacionadas con una falla longitudinal de 45 Km que atraviesa la ciudad, con un crecimiento desordenado, hipertrófico y sin el cumplimiento de las normas sísmo resistentes, en gran parte de las construcciones, lo que promueve la probabilidad de que ocurran sismos con capacidad destructora, entre moderada y alta (Del Pino y Yépez, 1990).

El Riesgo sísmico en el ámbito de los riesgos naturales, genera pérdidas económicas y humanas en todo el mundo. Este riesgo, dada su difícil predicción, requiere de medidas que contribuyan a reducir los efectos negativos en la sociedad. Dichas medidas deben estar encaminadas básicamente a las actividades de prevención, para evitar que las futuras edificaciones colapsen o sufran daños severos durante un posible sismo (Códigos sísmicos); y, evaluar la vulnerabilidad de las estructuras existentes y conocer el riesgo real de una población (Estudios de riesgo sísmico destinados a la definición de planes y gestión de la emergencia).

En este contexto, es de interés para el ámbito profesional y académico conocer las características relevantes de un evento sísmico de gran magnitud y su eventual afectación a las edificaciones de la ciudad de Quito en términos de riesgos y/o daños, de tal manera que se puedan enfrentar y mitigar con las menores pérdidas posibles.

A nivel nacional, la investigación respecto a la vulnerabilidad es mínima, un trabajo corresponde a Riesgo Sísmico en la ciudad de Quito, planteado por varios autores, entre los que constan: Hugo Yépez, Jeannette Fernández y Jorge Valverde de la EPN. Según sus autores, este proyecto de riesgo sísmico se debe considerar como un estudio preliminar cuyo objetivo es, ante todo, sensibilizar a los responsables y a la población ante los riesgos sísmicos. (Chatelian, Guiller, Yepes, & otros, 1996)

Esta condición en el campo investigativo del Ecuador, promueve inequívocamente la necesidad de conocer con carácter dialéctico y proactivo la vulnerabilidad de las edificaciones de la Ciudad de Quito, que eventualmente pudieran representar un patrón de comportamiento adverso en el país.

La probabilidad de pérdidas que se pueden producir al ocurrir un sismo, están relacionadas directamente con dos factores, la amenaza sísmica y la vulnerabilidad (Fourier d'Albe, 1988).

Las edificaciones de la ciudad de Quito son de tipología heterogénea, el 53% son edificaciones irregulares asociadas a asentamientos precarios, construidas en un entorno físico – geográfico con características geológicas y geomorfológicas que pueden eventualmente favorecer la ocurrencia de eventos sísmicos (Contrato Social por la Vivienda, 2006: 6) (GUEVARA SAMANIEGO, 2013).

El Objeto de la Investigación es establecer los rangos de vulnerabilidad y los porcentajes de daño en las edificaciones de la ciudad de Quito, a partir de una muestra elegida en el Centro Histórico de la Ciudad, muchas de la cuales destacan por su valor histórico y patrimonial, lo que se logra al delimitar los rangos de vulnerabilidad y evaluar los daños, a partir de métodos convencionales.

Para lograr este objetivo, se realiza un inventario de las edificaciones del Centro Histórico, un muestreo y selección según las tipologías de las edificaciones, el tratamiento de la muestra y finalmente una legitimación de la homogeneidad de la muestra, a través de: establecer la edad de la edificación, el sistema constructivo, resistencia o permanencia y fragilidad.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE DE LA TEMÁTICA

2.1.PREÁMBULO

La historia del Ecuador nos muestra que la actividad sísmica en los últimos 460 años, ha provocado la destrucción de ciudades enteras como Riobamba en 1797 o Ibarra en 1868 y la muerte de más de 60.000 personas por causa de terremotos. (Yépez, 2015). Sin embargo, no existe una conciencia real de la población sobre el peligro sísmico que existe.

El país cuenta con la Norma Ecuatoriana de Construcción cuya última actualización corresponde a NEC 2015, sin embargo existen edificaciones que se construyeron antes de que exista un código e incluso, con su existencia, se siguen construyendo edificaciones que no lo consideran y que además incurren en una mala práctica constructiva (Roldós, F, 2012).

De otra parte, los eventos sísmicos de diferente magnitud ocurridos a nivel mundial en los siglos XX y XXI causaron aproximadamente 1,8 trillones de dólares en daños globales, y los daños en edificios por la ocurrencia de terremotos históricos evidencian la vulnerabilidad en las construcciones tradicionales de las poblaciones. (Vielma, J., e. a., 2013)

Eventualmente a nivel global, ocurren catástrofes promovidas por eventos naturales tales como los terremotos, deslaves, movimientos sísmicos, erupciones volcánicas, deslizamientos, inundaciones, sequías, huracanes, tsunamis, etc.; de tal manera que es imperioso realizar investigaciones que prevean la magnitud de los daños y su mitigación.

Con estos estudios se pretende anticipadamente advertir a las autoridades de gobierno e instituciones vinculadas, sobre los posibles efectos de un evento sísmico

de gran escala en los entornos poblados, para planificar y activar respuestas de emergencia oportunas.

2.2. AMENAZA SÍSMICA

En general, hoy se acepta que el concepto de amenaza se refiere a un peligro latente o factor de riesgo externo de un sistema o un sujeto expuesto, que se puede expresar en forma matemática como la probabilidad de exceder un nivel de ocurrencia de un suceso con una cierta intensidad, en un sitio específico y durante un tiempo de exposición determinado. (Cardona, 2001).

Según la Oficina del Coordinador de las Naciones Unidas para el Socorro en Casos de Desastre – UNDRP (por sus siglas en inglés), la amenaza o peligro (Hazard - H), está definida como la probabilidad de ocurrencia de un evento potencialmente desastroso durante cierto período de tiempo en un sitio dado. (Barbat & Pujades, 2004).

De ahí que, la mejor manera de expresar la amenaza sísmica es mediante la probabilidad de que ocurran fenómenos naturales del tipo geológico o meteorológico, tales como movimientos sísmicos, erupciones volcánicas, deslizamientos, inundaciones, sequías, huracanes, etc.; de cierta magnitud e intensidad en un lugar determinado y durante un cierto período de tiempo.

2.3. VULNERABILIDAD SÍSMICA.

La vulnerabilidad es la predisposición de un sistema, elemento, componente, grupo humano o cualquier tipo de mecanismo, a sufrir afectación ante la acción de una situación de amenaza específica (Cardona A., 2011)

La vulnerabilidad sísmica de una estructura, grupo de estructuras o una zona urbana completa, se define como su predisposición intrínseca a sufrir daño ante la ocurrencia de un movimiento sísmico, asociada directamente con sus características físicas y estructurales de diseño (Barbat, 1998) (Bonett Díaz, 2003)

La Vulnerabilidad es un término que se maneja frecuentemente en la literatura general, que se aplica en el sentido de desastre y peligro. Derivada del Latín, del verbo vulnerare, que quiere decir “provocar un daño”, una injuria (Icumi Nichiata, Bertolozzi, Ferreira Takahashi, & Fracolli, 2008).

La UNDRO en coordinación con la UNESCO, promovió una reunión de expertos con el fin de proponer una unificación de definiciones que se acepte ampliamente (UNDRO, 1979). Entre otros conceptos, el reporte de dicha reunión, "Desastres naturales y análisis de vulnerabilidad", incluyó el siguiente:

Vulnerabilidad (V), es el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo, resultado de la probable ocurrencia de un evento desastroso, expresada en una escala que va de 0, o sin daño, a 1, o pérdida total. (Barbat & Pujades, 2004)

Por tanto la vulnerabilidad sísmica es la falta de resistencia de un edificio, un sector, o incluso una ciudad, frente a las solicitaciones de origen natural, tales como las solicitaciones sísmicas. En el caso particular de las estructuras, la vulnerabilidad se produce cuando los edificios se construyen y se diseñan con materiales inapropiados de resistir tensiones máximas, como las que provocan las sacudidas sísmicas, lo cual genera la necesidad de conocer y cuantificar los probables daños que se esperan ante un evento sísmico de cierta magnitud. Solamente cuando se pueda predecir en un entorno razonablemente probable, se podrá reducir la vulnerabilidad y generar planes de mitigación y contingencia ante eventos sísmicos.

2.4. RIESGO SÍSMICO

El riesgo es un concepto complejo y extraño, representa algo irreal, en tanto que está siempre relacionado con el azar, con posibilidades, con algo que aún no sucede. Su sentido tiene que ver con algo imaginario, algo escurridizo que nunca puede existir en el presente sino solo en el futuro. Si hay certeza no hay riesgo, así, el riesgo es algo en la mente, íntimamente ligado a la psicología personal o colectiva,

aun cuando se intente a menudo darle un sentido de objetividad. (Elms, 1992) (Cardona, 2001)

Según la UNDRRO, se define el Riesgo específico (Specific risk-RS), como el grado de pérdidas que se esperan como producto de la ocurrencia de un evento particular y como una función de la amenaza y la vulnerabilidad. (Barbat & Pujades, 2004).

Dicha pérdida puede ser medida en términos humanos, económicos o sociales y la escala que se escoja define el costo de la pérdida que da una medida del riesgo. (Bommer, Salazar, & Samayoa, 1998)

El Riesgo sísmico es uno de los riesgos que más asocia pérdida de vidas humanas esto se muestra a nivel mundial mediante los resultados obtenidos por las Naciones Unidas (UNISDR 2008), estudio en el que se comparan las afectaciones y pérdidas humanas producidas por diferentes riesgos como son: incendios, erupciones de volcanes, inundaciones y terremotos. Por incendios, 258 personas, erupciones 126 personas, inundaciones 42911 personas y solo por terremotos, se superan los 87000 muertos.

2.5. RIESGO – AMENAZA – VULNERABILIDAD

Las definiciones previas, permiten advertir que la amenaza está relacionada directamente con los eventos naturales (terremotos, maremotos, deslaves, erupciones, huracanes, etc.), es decir en ella no se puede intervenir, por tanto no se puede minimizar.

La vulnerabilidad sísmica de las edificaciones por el contrario, se puede relacionar con el error humano (ejemplo: mala ubicación del inmueble, utilización de materiales inapropiados, defectos constructivos, entre otros), por tanto se puede minimizar.

Es mandatorio para los ingenieros civiles intervenir, especialmente en el diseño correcto y según normas estrictas de diseño sismo-resistente, y además, supervisar

la construcción de las edificaciones, de tal manera que puedan resistir las solicitaciones para las cuales fueron diseñadas.

Dada la alta incidencia de la intervención humana en la vulnerabilidad, que es determinante para definir el riesgo sísmico, aunque los sismos son un fenómeno natural, los desastres resultantes cuando ocurren, no pueden ni deben considerarse como “desastres naturales” (Bommer, Salazar, & Samayoa, 1998)

Por lo expuesto anteriormente, se puede inferir que en dos lugares que están expuestos a la misma amenaza, no se espera la misma respuesta. Esto se visualiza claramente en el siguiente ejemplo: el terremoto de enero de 2010 que azotó Haití cuya magnitud fue 7 en la escala de Richter, causó la muerte de más de 100.000 (cien mil) personas, por el contrario, el sismo de magnitud muy similar (7.1 en la escala de Richter) acaecido en Japón seis meses antes, apenas produjo un muerto, este suceso muestra que las respuestas en dos sitios diferentes no son las mismas. Por tanto, la respuesta al evento sísmico, depende de varios factores como son: la densidad poblacional, la buena o mala planificación urbana, el poco o gran diseño sismo-resistente, etc., los cuales caracterizan lugares más o menos expuestos.

Esto lleva a la conclusión de que en la ecuación del riesgo se tienen que incluir dichos factores. En ese sentido, la ecuación que planteó Fourier d’Albe en 1988, Riesgo Sísmico = Amenaza Sísmica * Vulnerabilidad, cambia a la que se conoce actualmente:

$$RS = AS * E * V * C \quad (2.1)$$

RS = Riesgo Sísmico

AS = Amenaza Sísmica

E = Exposición

V = Vulnerabilidad

C = Costo

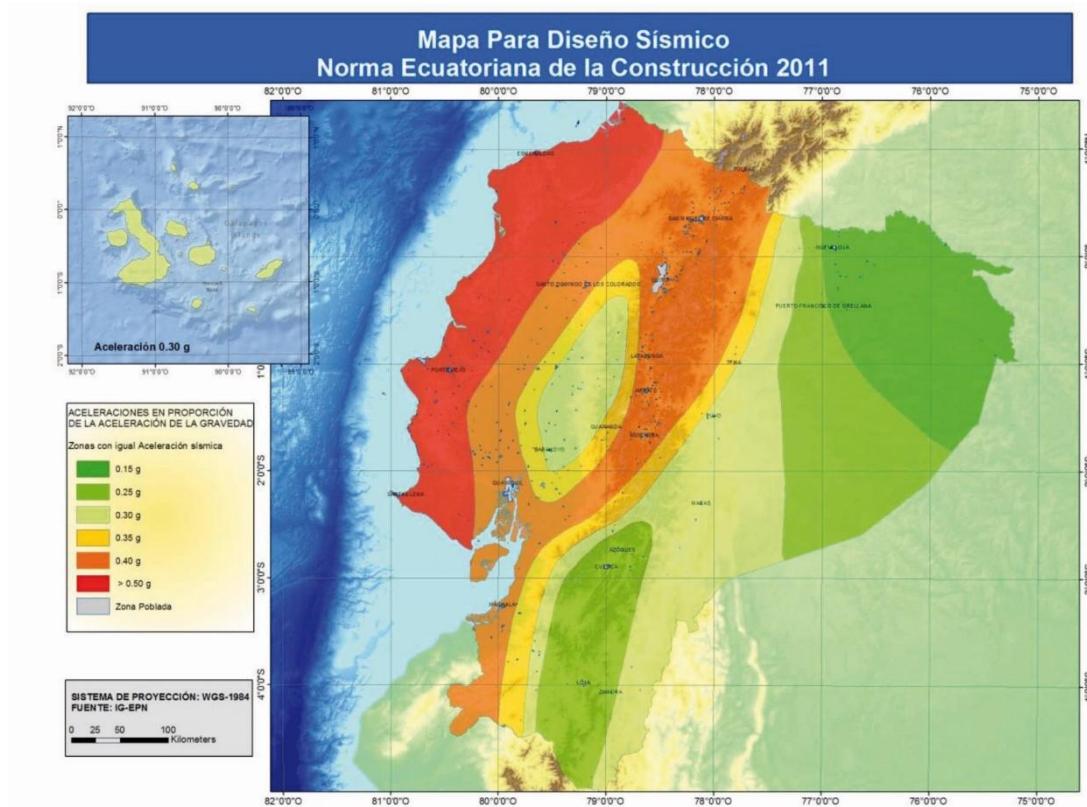
En ella, la exposición corresponde al número de edificios existentes en la zona, el número de personas que habitan en el lugar de estudio, o, el número, tipo, o valor de las industrias, y comercios existentes.

El costo se relaciona directamente con el valor que representaría volver a tener el lugar en las mismas condiciones de habitabilidad y confort como las previas a la ocurrencia del evento sísmico. Además, el valor también tiene otras evaluaciones como por ejemplo si se conoce que el sitio es patrimonial o tiene un valor histórico o religioso.

2.6. ZONIFICACIÓN SISMICA DE QUITO

El mapa sísmico del Ecuador nos muestra cómo se encuentra la ciudad de Quito frente a la peligrosidad sísmica.

FIGURA No. 1 ZONAS SÍSMICAS PARA PROPÓSITOS DE DISEÑO SEGÚN LA NORMA ECUATORIANA DE CONSTRUCCIÓN.



FUENTE: NEC15

La TABLA No.1 muestra los valores de Z que se utilizan en diseño sismo resistente, según la zona sísmica en la que se emplaza el bien.

TABLA No.1 VALORES DEL FACTOR Z EN FUNCIÓN DE LA ZONA SÍSMICA

Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Valor factor Z	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.50
Caracterización de la amenaza sísmica	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy Alta

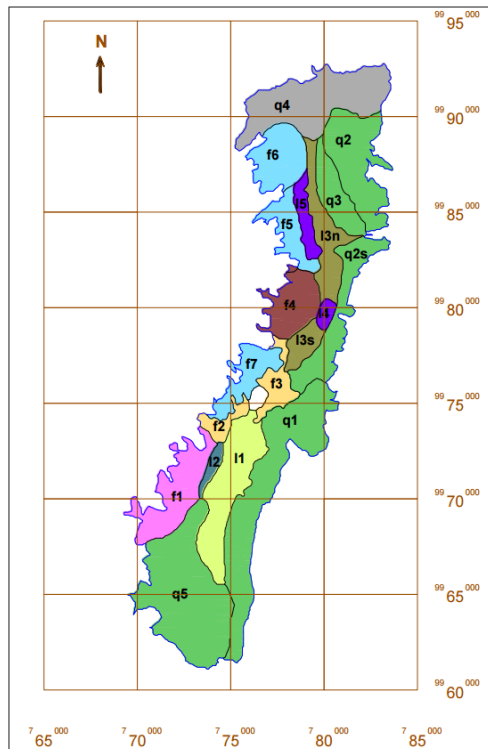
FUENTE: Aguiar, R.(2011)

De acuerdo a los valores de la TABLA No.1 y la posición geográfica de la Ciudad de Quito , el valor del factor z es de 0.40 el cual caracteriza una amenaza sísmica alta, condicionada por las características locales del suelo, que influyen directamente en la respuesta estructural.

Los suelos duros presentan menores amplitudes en las señales sísmicas, y los suelos blandos presentan grandes amplitudes. Por esta razón, las Normativas Sísmicas incorporan un factor de amplificación que considera las condiciones locales del suelo.

En los estudios de microzonificación se determinan los períodos de vibración del suelo, dato que es muy importante para los Proyectistas Estructurales ya que en su diseño deben prever que el período de vibración de la estructura esté muy alejado de la vibración del suelo para que no se produzca el efecto de resonancia en el caso de que ocurra el sismo. La resonancia es el fenómeno mediante el cual la estructura y el suelo vibran con la misma frecuencia, lo que provoca una amplificación constante de la amplitud del sistema oscilante o que el movimiento propio de la estructura se haga muy grande.

El estudio de Aguiar, R. presenta la siguiente zonificación de Quito:

FIGURA No. 2: ZONAS DE SUELOS SIMILARES.

FUENTE: (AGUIAR F. R., 2001)

El estudio de (Aguiar,R. 2011) estableció los suelos con características similares y los colocó en la FIGURA No. 2 con diferentes colores. Un resumen de dichas características se presenta en la siguiente tabla:

TABLA No. 2: ZONAS DE SUELOS SIMILARES

Zonas de suelos similares	Características
q1, q2, q3, q5	Similares
q4	Cangahua recubierta por arena volcánica.
l1,l2,l3	Suelos lacustres en la depresión central de Quito
l4	Parque La Carolina - nivel freático alto; primeros estratos de suelo de gran espesor y poca resistencia.
l5	Material aluvial de la zona f5
f1	Flancos del Pichincha- Depósitos aluviales
f2, f3	Similares
f5, f6, f7	Pueden ser compatibles

FUENTE: (AGUIAR F. R., 2001)

Dicho estudio presenta los períodos de vibración en cada zona de suelo, de la siguiente manera:

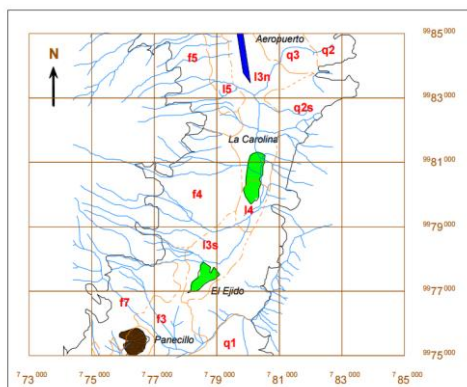
TABLA No. 3: PERÍODOS DE VIBRACIÓN EN CADA ZONA DE SUELO

Zona	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	L1	L2
T	0.178	0.309	0.302	0.121	0.116	0.179	0.068	0.322	0.287
Zona	L3	L4	L5	Q1	Q2n	Q2s	Q3	Q4	Q5
T	0.324	0.201	0.148	0.299	0.116	0.211	0.198	0.064	0.289

FUENTE: (AGUIAR F. R., 2001)

Según el Código ecuatoriano de la Construcción (CEC 2000) los suelos se clasifican como S1, S2, S3, y S4; el primero es un suelo más resistente y el último un suelo malo. Con respecto a las quebradas, según esta normativa, corresponden a un tipo de suelo S4.

FIGURA No. 3: QUEBRADAS EN EL CENTRO NORTE DE QUITO



FUENTE: (AGUIAR F. R., 2001)

2.6.1. CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS SEGÚN LA NEC15

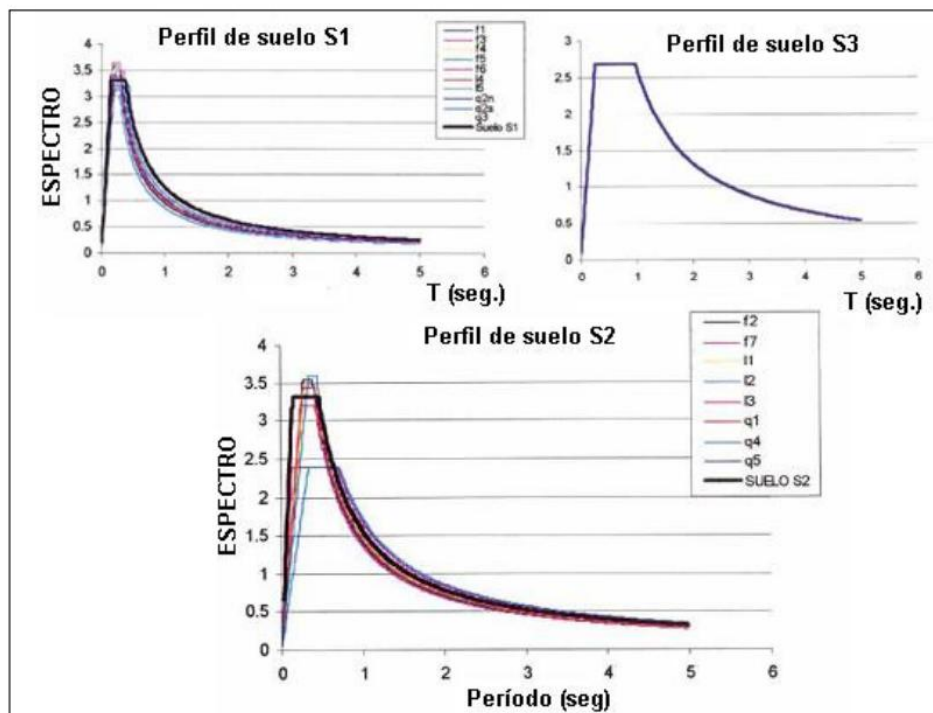
En la Norma Ecuatoriana de Construcción NEC15, se consideran los siguientes tipos de suelo:

TABLA No. 4: TIPOS DE SUELOS SEGÚN NEC 2015

TIPO DE PERFIL	DESCRIPCION	DEFINICIÓN
A	Perfil de roca competente	$V_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez media	1500 m/s $> V_s \geq 760$ m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	760 m/s $> V_s \geq 360$ m/s
	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$N \geq 50.0$ $S_u \geq 100$ Kpa
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	360 m/s $> V_s \geq 180$ m/s
	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$50 > N \geq 15$ $100 > S_u \geq 50$ Kpa
E	Perfiles que cumplan el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$V_s < 180$ m/s
	Perfiles que contiene un espesor total H mayor de 3m de arcillas blandas	$IP > 20$
		$w \geq 40\%$ $S_u < 50$ Kpa
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero o geotecnista. Se contemplan las siguientes subclases:	
	F1 - Suelos susceptibles a la falla o colapso por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc.	
	F2 - Turbas y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H > 3m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas).	
	F3 - Arcillas de muy alta plasticidad (H > 7.5m con índice de plasticidad IP > 75)	
	F4 - Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H > 30m)	
	F5 - Suelos con contrastes de impedancia α ocurriendo dentro de los primeros 30m superiores del perfil de subsuelo, incluyendo contactos entre suelos blandos y roca, con variaciones bruscas de velocidades de ondas de corte.	
F6 - Rellenos colocados sin control ingenieril		

FUENTE: NEC15

Los espectros de diseño serían diferentes para cada tipo de suelo como se muestra en el siguiente ejemplo de la FIGURA No. 4.

FIGURA No. 4 ESPECTROS DE DISEÑO

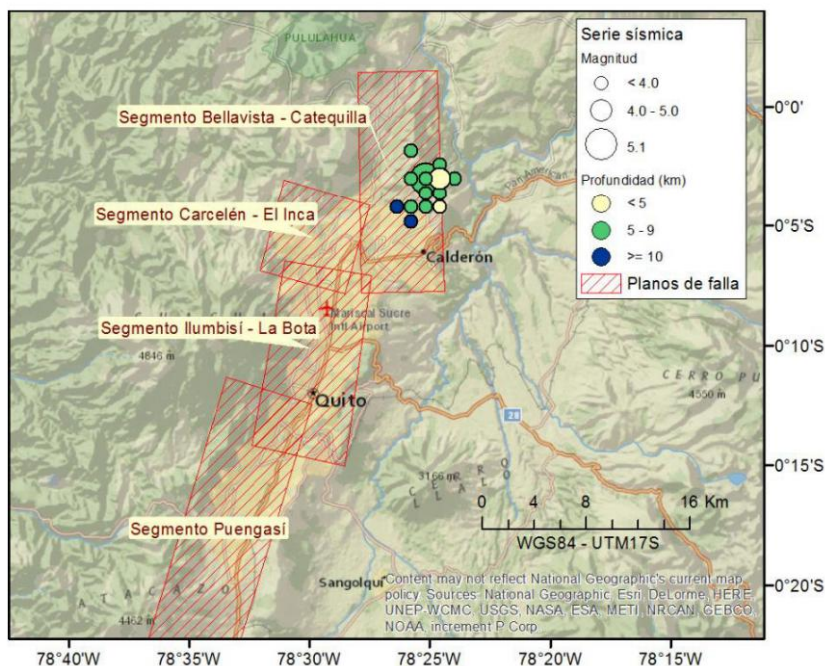
FUENTE: (Valverde et al 2002)

En el estudio de la microzonificación sísmica del Centro – Norte de Quito (Roberto Aguiar, 2013) , se determina que la velocidad de la onda de corte se da en los primeros 30 metros, lo que demuestra que la mayor parte de los suelos de Quito, son clase “D” Por tanto, se puede decir que el suelo de Quito no es tan resistente pero tampoco es malo.

La clasificación aplicable al Centro Histórico de Quito corresponde a un suelo tipo D, previsto en la NEC 2015.

2.7. MODELO DEL TERREMOTO CARACTERÍSTICO

Quito es una ciudad emplazada sobre innumerables fallas ciegas inversas, las principales son: Puengasí, Ilumbisí – La Bota, Carcelén – El Inca, Catequilla – Bellavista, y la de Tangahuilla. El bloque de Quito se está levantando con respecto al Valle de los Chillos y el Valle de Tumbaco por compresión tectónica.

FIGURA No. 5 FALLAS CIEGAS DE QUITO

FUENTE: (AGUIAR, RIVAS, BENITO, GASPAR, & al, 2014)

Cada uno de estos segmentos de falla tiene un área y una longitud en las cuales se pueden definir las zonas-fuente locales para cada una de ellas como se aprecia en la TABLA No. 5

TABLA No. 5 SEGMENTOS DE LAS FALLAS CIEGAS DE QUITO

Segmento	Area ruptura (km) ²	Magnitud (RA)	Longitud de Superficie de Ruptura (km)	Magnitud (SRL)	Período de Recurrencia (años)
Puengasí	259	6.4	22	6.4	188
ILB	176	6.2	15	6.2	138
CEI	82	5.9	7	5.7	105
BC	191	6.3	17.5	6.3	183
Tangahuilla	108	6.0	12	6.0	115

FUENTE: (AGUIAR, RIVAS, BENITO, GASPAR, & al, 2014)

El modelo del terremoto característico TC asume que en la falla se producen rupturas que generan un sismo de la misma magnitud en una periodicidad determinada, por tanto, luego de que transcurre el período, se esperaría un sismo de la misma magnitud que el anterior.

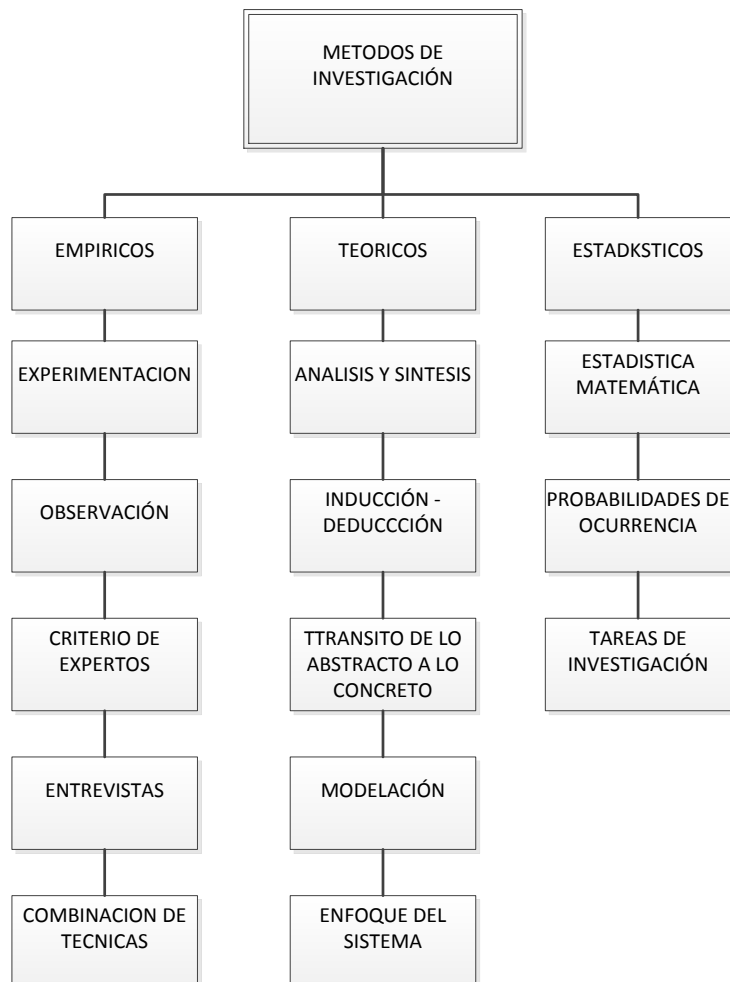
CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

Conjunto de procedimientos o reglas generales por medio de las cuales se investiga el objeto de estudio de las ciencias. Permite obtener nuevos conocimientos del fenómeno y desempeña un papel importante en la construcción y desarrollo de la teoría científica.

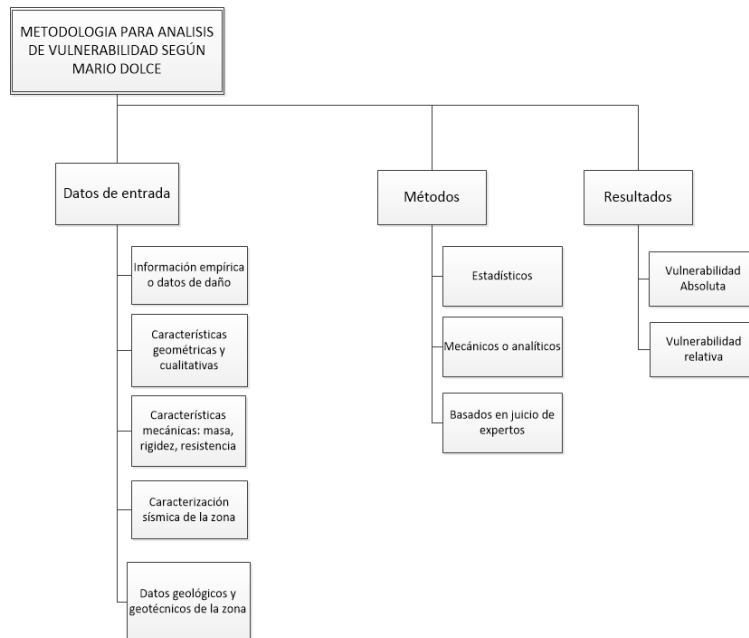
FIGURA No. 6 MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN



FUENTE: (Herrera, Vielma, Barbat, & Pujades, 2013)

3.2. METODOLOGÍAS PARA ESTIMAR LA VULNERABILIDAD SISMICA

FIGURA No. 7 METODOLOGÍA PARA ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD



FUENTE: (Herrera, Vielma, Barbat, & Pujades, 2013)

Según se aprecia en las FIGURA No. 6 y FIGURA No. 7, es factible utilizar diferentes técnicas que se asocian a los tres métodos básicos de investigación, en este sentido la metodología propuesta por Dolce en 1994 es flexible ya que tiende a la búsqueda de un resultado, que en principio, satisfaga el planteamiento del objetivo de la investigación.

En este contexto, lo pertinente es usar los métodos mecánicos que promueven el uso de modelos mecánicos de la estructura según su tipología, cuyo resultado es predecir el efecto sísmico (ver FIGURA No. 7).

Según el modelo que representa la estructura, se pueden aplicar métodos mecánicos analíticos simples o mecánicos de análisis detallado. Cuando se eligen modelos simples, por su sencillez, se puede analizar un gran número de edificaciones en un corto período de tiempo.

Por el contrario, cuando se opta por el análisis más detallado, se utilizan modelos más refinados, por tanto el análisis se enfoca en estructuras individuales. Para este tipo de análisis, se pueden realizar varios tipos de procedimientos: lineal estático, lineal dinámico, no lineal estático y no lineal dinámico. Básicamente se diferencian en la inmediatez de su aplicación desde el más simple al más complejo dependiendo del número de variables que intervengan.

Como ejemplos de aplicación del procedimiento de análisis no lineal estático se pueden mencionar: *método de espectro de capacidad (MEC o SCM)* mismo que se incorpora en el ATC-40, *método del coeficiente de desplazamiento (FEMA) Agencia Federal de Emergencias de Estados Unidos, HAZUS, Instituto Nacional de Ciencias de la Construcción (NIBS).*

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA HAZUS

4.1. ESTIMACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA

Entre los procedimientos mencionados anteriormente, destacan FEMA y HAZUS por el interés en medir la vulnerabilidad de las estructuras que se asocia básicamente al método no lineal estático que considera la alternancia de la magnitud de la carga sísmica (espectro de demanda), y la capacidad de la estructura (espectro de capacidad).

El espectro de capacidad tiene una tendencia asintótica a partir de la capacidad última, y se configura básicamente en función de los desplazamientos y las aceleraciones espectrales.

Por otro lado, el sismo genera una curva denominada espectro de demanda cuya superposición con el espectro de capacidad se identifica a través de un punto virtual de intersección que se conoce como punto de demanda o (punto de desempeño) (AGUIAR F. R., 2001). Esta intersección representa que la ductilidad del espectro de demanda es igual a la ductilidad de la estructura.

La posición del punto de desempeño dependerá eventualmente del espectro de demanda elástico, el cual se va a reducir por comportamiento inelástico, de tal manera que si la estructura va a sufrir daño, su daño será mayor mientras más se reduzca el espectro de demanda.

Posteriormente con la abscisa del punto de desempeño y el uso de las curvas de fragilidad, se pueden determinar los cuatro escenarios posibles de daño (leve, moderado, extensivo, completo), los cuales se cuantifican en valores porcentuales cuya sumatoria debe corresponder al cien por ciento. Para este análisis, también se puede utilizar la deriva máxima de piso en lugar del punto de desempeño. Las curvas de fragilidad representan las funciones de daño en edificios, son curvas log-

normales acumulativas que relacionan la probabilidad de empezar en, o exceder, un estado de daño del edificio para un parámetro de demanda sísmica dada.

Para determinar los daños en las edificaciones que soportan temblores de tierra, el método parte de las funciones de daño, dichas funciones incluyen: (1) curvas de fragilidad que describen la probabilidad de alcanzar o superar los diferentes estados de daño dada la respuesta pico del edificio, y (2) Espectros de capacidad (a partir de las curvas de capacidad del edificio / push-over, que se emplean junto con los espectros de demanda con amortiguamiento modificado, para determinar el punto de desempeño del edificio), y/o las derivas máximas de piso.

Para estimar los daños, al utilizar las curvas de fragilidad y de capacidad se requiere de:

- Tipos de modelos de construcción (incluye la altura, el nivel de diseño sísmico que representa la edificación -o grupo de edificaciones- de interés).
- Espectro de respuesta (o PGA, para sismo de diseño, y PGD para evolución de fallas de suelo) en sitios con edificaciones existentes o en los centroides de la sección de área que se quiere analizar, donde el edificio (o grupo de edificios) se localiza.

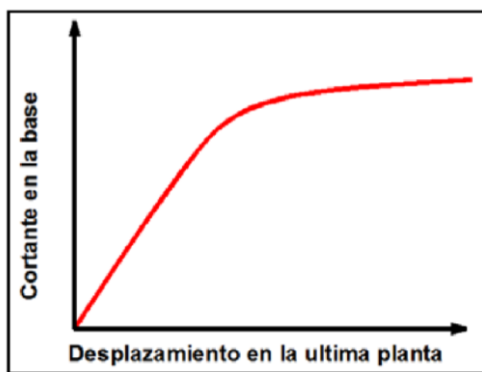
Generalmente, el tipo de modelo no se conoce para cada edificio, pero se puede determinar desde el inventario de instalaciones que utilizan la relación del tipo y ocupación del inmueble.

4.2. CURVAS DE CAPACIDAD

La curva de capacidad es un gráfico en un sistema de referencia cartesiano, en el cual las abscisas son los desplazamientos máximos sufridos en el último piso de la estructura ante la aplicación de diferentes cargas horizontales, las cuales se incrementan paulatinamente (análisis push-over), y en las ordenadas van los diferentes valores del cortante basal que se produce en la estructura por la acción sísmica.

Esta curva tiene tres zonas bien definidas: la primera es una línea recta inclinada que va desde el origen de coordenadas hasta el punto de fluencia, a esta zona se la conoce como zona elástica; la segunda es una curva que comienza en el punto de fluencia donde el cortante basal deja de aumentar linealmente hasta cuando la estructura sufre los primeros agrietamientos, a esta zona se la conoce como la zona de fluencia; y la tercera se conoce como la zona de capacidad última, este punto representa el desplazamiento para el cual la estructura alcanza el mecanismo de colapso, desde este punto en adelante la curva tiende a ser asintótica (ver FIGURA No. 8).

FIGURA No. 8 EJEMPLO DE CURVA DE CAPACIDAD.

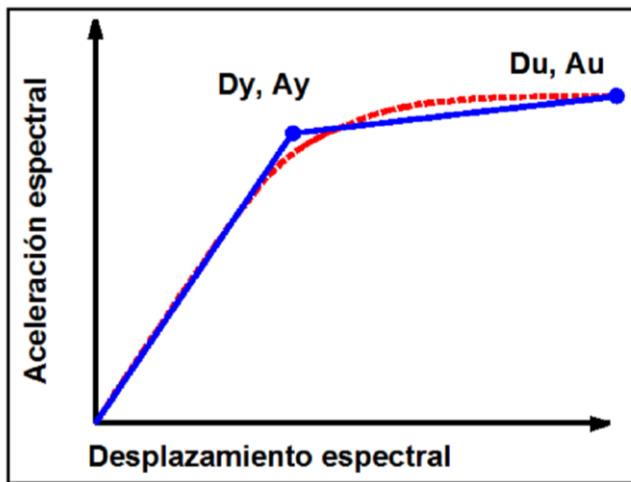


FUENTE: Archivo particular

Estas curvas describen los desplazamientos push-over de cada tipo de edificio y nivel de diseño sísmico como una función de las cargas aplicadas lateralmente que se producen por los terremotos.

Mediante el cambio de variables, se puede transformar la curva de capacidad en un espectro de capacidad, es decir relacionar las aceleraciones espectrales y los desplazamientos espectrales de manera que se tenga mayor objetividad en la toma de datos y que ellos sean cuantificables. Además, para mayor sencillez, es conveniente transformar esta curva en una curva bilineal simplificada a través de los puntos de capacidad de fluencia (D_y , A_y) y de capacidad última (D_u , A_u):

FIGURA No. 9 REPRESENTACIÓN BILINEAL DEL ESPECTRO DE CAPACIDAD.



FUENTE: Archivo particular

Para definir la curva bilineal, se pueden utilizar varios métodos, desde métodos gráficos aproximados, hasta métodos estadísticos más específicos, sin embargo, en este estudio se aproximan las curvas con el criterio de áreas iguales, es decir que en el caso del ejemplo de la FIGURA No. 9, el área bajo la curva azul, debe ser igual al área bajo la curva roja.

Las curvas de capacidad son diferentes para cada estructura, pues, depende de algunas variables como son: el material, el número de pisos, etc. Por esta razón, para realizar la evaluación de la vulnerabilidad en grandes ciudades se debe definir curvas representativas de un grupo de edificaciones, esto se puede encontrar en las diferentes metodologías existentes como es el caso de la metodología HAZUS.

La metodología de HAZUS considera treinta y seis (36) tipologías estructurales para las cuales define la ductilidad del sistema estructural mediante la sobre-resistencia λ como la relación entre la resistencia última y la resistencia en fluencia. Para determinar los puntos de fluencia y de última capacidad, emplea las siguientes ecuaciones:

$$A_y = \frac{C_s \eta}{\alpha_1} \quad (4.1)$$

$$D_y = 9.8 T_e^2 A_y \quad (4.2)$$

$$A_u = \lambda A_y \quad (4.3)$$

$$D_u = \lambda \mu D_y \quad (4.4)$$

Luego de un estudio experimental HAZUS y con las ecuaciones descritas define las diferentes curvas para las 36 tipologías de edificaciones que establece como representativas.

En el presente estudio, se obtienen las curvas de capacidad, los espectros de capacidad y los puntos de desempeño analíticamente con los programas de CEINCI LAB, los programas de (Mora, 2015) y se compara con los resultados de HAZUS.

En este estudio se consideran las curvas correspondientes a las tipologías que se definen del estudio de campo en el Centro Histórico de Quito.

4.3. ESPECTRO DE DEMANDA

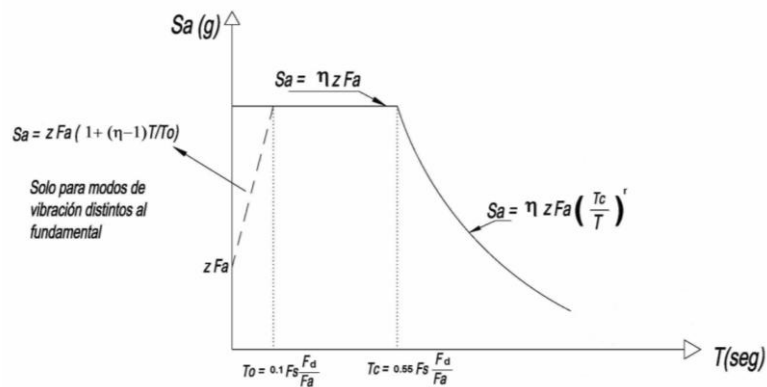
El principal factor que influye en la determinación del espectro de demanda es el tipo de suelo como se muestra en el numeral 2.6.1 de este documento, por tanto dependerá de la zona de análisis para definirlo.

En adición, el espectro de demanda se relaciona directamente con el modelo del terremoto característico.

Luego de seleccionar el espectro de demanda, el método consiste en reducirlo con diferentes amortiguamientos, mientras mayor sea el porcentaje de amortiguamiento, mayor es la probabilidad de que se interseque con el espectro de capacidad.

Para este trabajo, se utiliza el espectro de demanda correspondiente a la NEC15 (Norma Ecuatoriana de la Construcción – Peligro Sísmico) y en un suelo tipo D que corresponde al Centro Histórico de Quito (FIGURA No. 10).

FIGURA No. 10 ESPECTRO SÍSMICO ELÁSTICO DE ACELERACIONES QUE REPRESENTA EL SISMO DE DISEÑO.



FUENTE: NEC_SE_DS (peligro sísmico)

4.4. CURVAS DE FRAGILIDAD

La “salida” de curvas de fragilidad es un estimado de la probabilidad acumulativa de comenzar en, o exceder, cada estado de daño para el nivel de temblor de tierra (o falla del suelo). Las probabilidades de daño discreto se obtienen a partir de las probabilidades de daño acumulativo. Las probabilidades de daño discreto para tipos de edificios modelo y clases de ocupación son las salidas de los módulos de daño del edificio. Estas salidas se utilizan directamente como entradas para inducir un daño físico y módulos de pérdida económica y social directa.

Los espectros de capacidad y los de fragilidad son aplicables, en teoría, tanto para un edificio particular como a todos los edificios del mismo tipo, estas curvas son más fiables como predictores de daño para grandes grupos de población, más que para pequeños grupos. No se pueden considerar fiables para predicción de daño en una instalación específica sin confirmación previa de un experto en ingeniería sísmica / estructural.

Para el desarrollo de estas curvas, no se considera la práctica de separar la incertidumbre de la aleatoriedad, por tanto, se utiliza el concepto de “la mejor estimación” de la curva de fragilidad. Este enfoque es similar al que se aplica para desarrollar las curvas de fragilidad por el método FEMA en el estudio de consecuencias de terremotos largos en seis ciudades del valle de Misisipi.

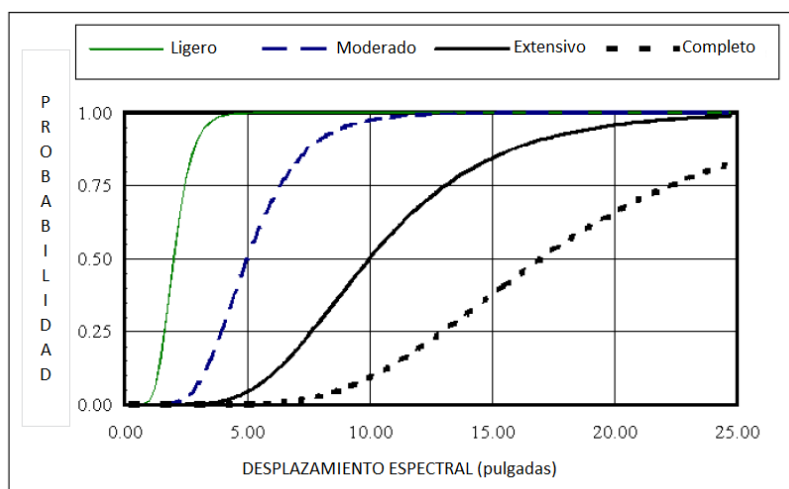
En la metodología, los valores del desplazamiento espectral medio (o aceleración) se desarrollan para cada uno de los tipos de edificación modelo y los estados de daño de interés para la combinación de rendimiento de datos (con pruebas de elementos existentes). Los datos de terremotos experimentados, se toma según la opinión y juicio de los expertos.

El espectro de respuesta pico varía significativamente para edificios que tienen diferentes propiedades de respuesta (p.e., altura, edificios flexibles con desplazamientos cortos, edificios rígidos). Además, la determinación del desplazamiento espectral pico requiere conocimiento de las propiedades de respuesta de los edificios.

La respuesta del edificio se caracteriza por las curvas de capacidad del mismo. Para el caso ecuatoriano se contemplan las curvas de fragilidad que se presentan en el estudio para edificaciones de hormigón armado de uno a seis pisos, en el Ecuador (Bobadilla de la Torre, 2005) que tiene como precedente las curvas FEMA y el Método de HAZUS.

Un ejemplo de las curvas de fragilidad para los cuatro estados de daño que se aplica en esta metodología se presenta a continuación en la FIGURA No. 11

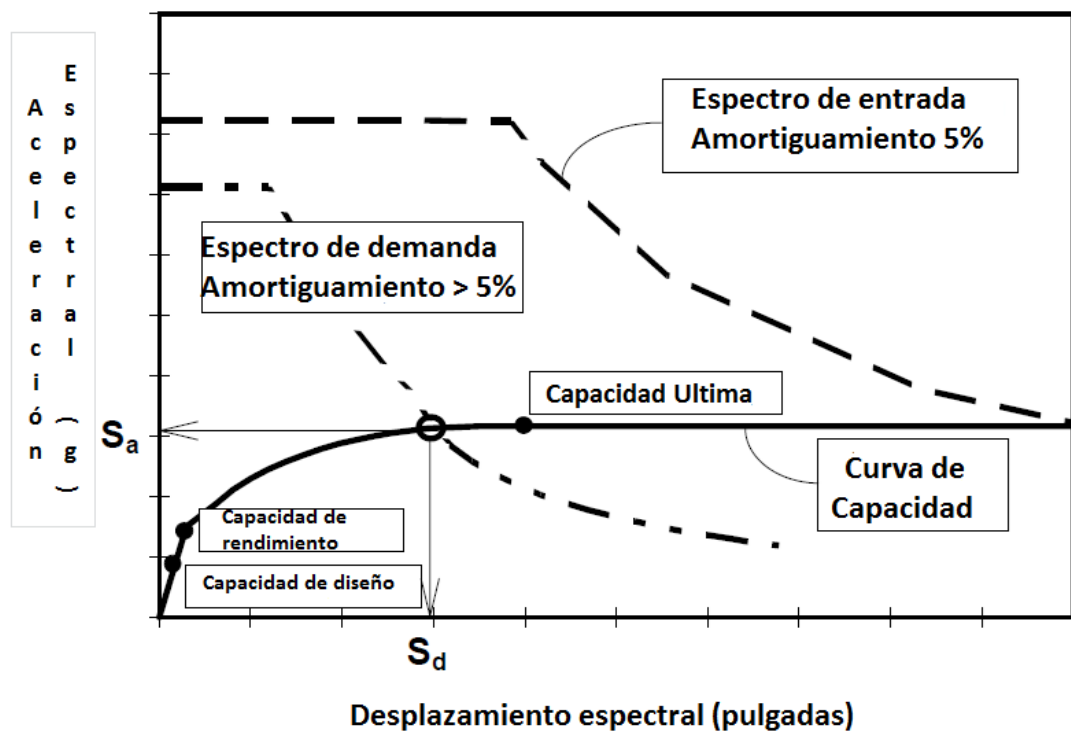
FIGURA No. 11 EJEMPLO DE CURVAS DE FRAGILIDAD PARA ESTADOS DE DAÑO LIGERO, MODERADO, EXTENSIVO Y COMPLETO.



FUENTE: (HAZUS, 1996)

El espectro de demanda al 5% de amortiguamiento reduce el espectro para niveles más altos de amortiguamiento efectivo (p.e., el amortiguamiento efectivo incluye ambas respuestas del edificio, para un amortiguamiento elástico y un amortiguamiento histerético con un amortiguamiento que se asocia con un rendimiento posterior cíclico de la respuesta del edificio).

FIGURA No. 12 EJEMPLO DE CONSTRUCCIÓN DE ESPECTRO DE CAPACIDAD Y ESPECTRO DE DEMANDA



FUENTE: (HAZUS, 1996)

La FIGURA No. 12 ilustra la intersección de un espectro de capacidad típico de un edificio y un espectro de demanda típico (con reducción por un amortiguamiento efectivo mayor que el 5% del crítico). Los puntos de diseño, rendimiento y capacidad última definen la forma del espectro de capacidad del edificio. La respuesta pico (cualquiera de los dos, la aceleración espectral o el desplazamiento espectral) en el punto de intersección del espectro de capacidad y el espectro de demanda es uno de los parámetros que se pueden utilizar con las curvas de fragilidad para estimar las probabilidades del estado de daño. Otro parámetro puede ser la máxima deriva.

CAPÍTULO 5

PROYECTO PERPETUATE

5.1. PREÁMBULO

El Proyecto PERPETUATE se desarrolla en 2012 con el objetivo de elaborar una metodología para la evaluación del riesgo sísmico de los bienes de patrimonio cultural y el diseño de intervenciones en 6 países europeos (Francia, Grecia, Italia, Eslovenia, Reino Unido, y Argelia). Este proyecto se basa en el siguiente principio: la protección del patrimonio cultural necesita una mejora en los métodos de análisis y evaluación de los procedimientos en lugar de la mejora de las técnicas de intervención. Un método de evaluación fiable es la herramienta principal para respetar el principio de “mínima intervención” bajo la restricción de seguridad estructural.

Si se llega a demostrar que el monumento no es seguro y que se debe intervenir, en la mayoría de los casos, las técnicas tradicionales con una mejora de los resultados de los nuevos métodos de análisis son más eficaces, tienen una relación costo – beneficio sostenible y además una solución reversible.

El enfoque para evaluar la vulnerabilidad de los activos patrimoniales en la actualidad es el de desplazamiento basal. Los modelos mecánicos disponibles para el análisis de edificios de mampostería o elementos antiguos, suelen tener en cuenta la verificación en términos de fuerza debido a que las técnicas de fortalecimiento se basan en el concepto de aumentar la rigidez y esfuerzo. Este enfoque es correcto en condiciones estáticas, pero el terremoto es un fenómeno dinámico que induce deformaciones y amplificaciones dinámicas. La respuesta sísmica de las estructuras depende de las propiedades dinámicas. En general, mientras más rígida es la estructura, mucho más altas son las acciones estáticas equivalentes a las que se la someten, por tanto, la flexibilidad es una primera característica positiva para un buen comportamiento sísmico. Se conoce además que las acciones de inercia son proporcionales al peso, por tanto el poco peso es

otro factor fundamental que influye en forma positiva. Por último, cuando los terremotos son destructivos (cuyo período de retorno es grande, por tanto son raros), es imposible que las estructuras soporten las acciones sísmicas sin daños significativos, por tanto la construcción debe ser lo suficientemente dúctil y ser capaz de sostener las cargas verticales sin colapso, aunque los desplazamientos horizontales sean grandes.

5.2. PRINCIPIOS BÁSICOS DEL PROCEDIMIENTO PERPETUATE

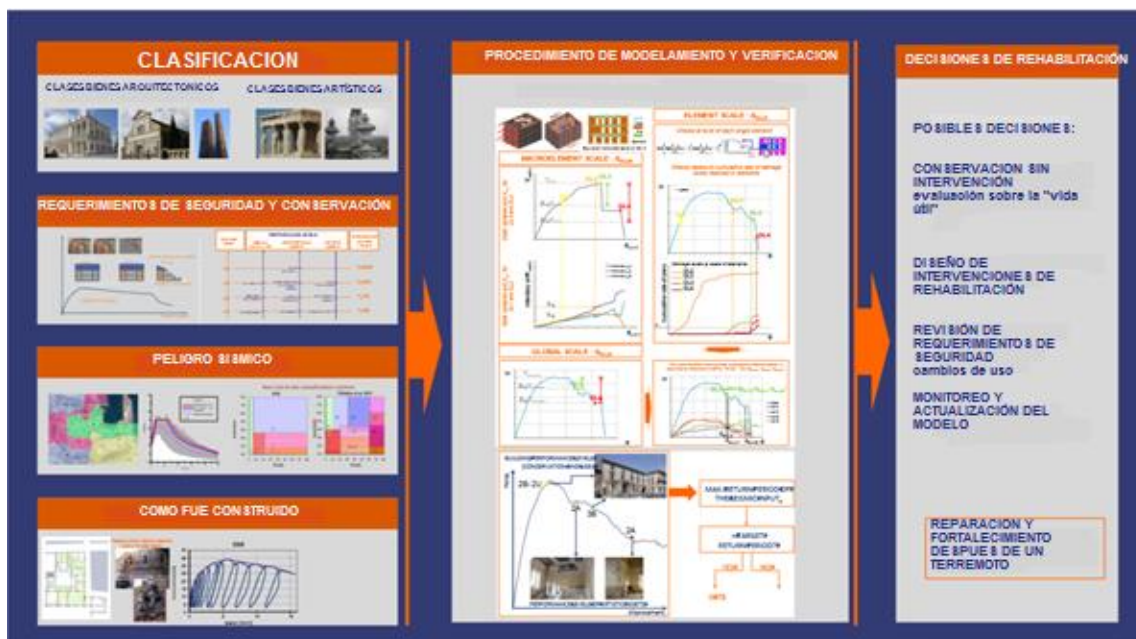
Los niveles de rendimiento de destino deben estar correctamente definidos por PERPETUATE para los activos del patrimonio cultural, que consideran no sólo el uso y la seguridad de las personas, sino también la conservación del valor arquitectónico y artístico del monumento.

Los análisis no lineales, tanto estáticos como dinámicos, son necesarios para evaluar el comportamiento sísmico de estructuras de mampostería después de que ocurra el daño, hasta que las condiciones de colapso estén cerca. Se propone una clasificación de los bienes arquitectónicos y artísticos y los modos de daños típicos que se describen con el fin de abordar las posibles estrategias de modelado. Cuatro tipos alternativos de modelos se identifican y se desarrollan para analizar una amplia variedad de construcciones históricas de mampostería.

El análisis no lineal estático (paso a paso / push-over) se considera como la herramienta principal para determinar la aceleración pico y propone criterios de aceptación detallados para la identificación de los picos en la curva push-over, en relación con los diferentes objetivos de rendimiento.

La FIGURA No. 13 muestra el camino metodológico propuesto por PERPETUTE para la evaluación de los bienes de patrimonio cultural.

FIGURA No. 13 ESQUEMA GENERAL DEL PROCEDIMIENTO



FUENTE: (Calderini C., 2012)

Este proyecto, da consejos para la definición de una curva de capacidad simplificada y los valores pico (PLs) con el fin de llevar a cabo una evaluación del desplazamiento basal.

La entrada sísmica está representada por un espectro de respuesta Aceleración – Desplazamiento (ADR) al igual que en el caso de HAZUS, definida específicamente para el edificio objeto de la investigación. Para determinar la probabilidad anual de ocurrencia (período de retorno), es necesario un análisis probabilístico de peligros sísmicos (PSHA).

Las intensidades máximas del terremoto deben ser compatibles con el cumplimiento de cada nivel de rendimiento que debe ser considerado por el bien patrimonial.

El formato de la evaluación propuesta por las directrices de PERPETUATE es determinista, excepto para la ocurrencia del terremoto. En la actualidad, todos los códigos y recomendaciones se adoptan.

Sin embargo, se conoce que existen muchas incertidumbres, aleatorias y epistémicas, que afectan la evaluación de un edificio de mampostería existente como son:

- Las características relevantes de la entrada sísmica (duración, frecuencia, etc.).
- Fiabilidad de los modelos mecánicos
- Parámetros de los materiales
- Conocimiento incompleto de la construcción, etc.

PERPETUATE toma en consideración los aspectos probabilísticos en algunos pasos como criterios de aceptación para la definición de PLs y el análisis de la sensibilidad para la elaboración del protocolo de las investigaciones in situ.

En la FIGURA No. 13 se visualizan tres pasos principales para el procedimiento. El primero incluye: a) la clasificación del bien arquitectónico o artístico; b) la definición de los estados límites de rendimiento (específicos para los bienes del patrimonio cultural); c) Evaluación de la interacción de riesgo sísmico e interacción suelo – estructura; d) el conocimiento de la construcción (ensayos no destructivos, parámetros de los materiales, la identificación estructural).

El segundo paso se relaciona con: a) la definición de los modelos estructurales para el análisis sísmico del edificio de mampostería y los activos artísticos contenidos; b) los procedimientos de verificación.

Finalmente, en la tercera etapa, se toman las decisiones de rehabilitación y, si es necesario, la segunda etapa se repite para el diseño de fortalecimiento de las intervenciones.

5.2.1. PRIMERA ETAPA

5.2.1.1. Clasificación del bien arquitectónico

La evaluación sísmica de un bien de patrimonio cultural requiere un conocimiento preliminar a profundidad de la construcción desde el punto de vista histórico, con el fin de destacar los principales elementos de la autenticidad y el valor arquitectónico, así como las transformaciones ocurridas a lo largo de los últimos siglos. Es necesario resaltar la importancia de las diferentes partes de la construcción, el establecimiento de una jerarquía entre elementos arquitectónicos, con el fin de elegir, entre las posibles alternativas, la solución de fortalecimiento menos invasiva.

Después de una fase preliminar en la que se estudia el bien, se analiza su importancia histórica y arquitectónica y su uso; luego de identificar el monumento, se clasifica de acuerdo a PERPETUATE: de la A a la F.(FIGURA No. 14)

La clasificación se basa en los modos de daño sísmico predominante de los bienes y en el supuesto de que su aparición está estrechamente relacionada con la construcción de la morfología (forma arquitectónica, proporciones) y la tecnología (tipo de albañilería, la naturaleza de los diafragmas horizontales, eficacia de pared a pared y ventanales, paredes y conexiones). Está claro que cada clase y subclase que se relacionan, recogen una gran variedad de edificios y un solo edificio puede pertenecer a diferentes clases en función de sus características específicas (por ejemplo, incluso si dos edificios tienen la misma función, pueden ser diferentes para la morfología o para los detalles constructivos y tecnológicos). En este sentido, como un ejemplo, es importante señalar cual es el comportamiento sísmico que prevalece y no el papel que desempeña o su uso fundamental en la asignación de una cierta clase. La asignación a una clase es básica para elegir opciones de modelado e identificar los estados límites adecuados en la curva de capacidad.

FIGURA No. 14 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL BIEN ARQUITECTÓNICO EXAMINADO Y CLASIFICADO EN EL PROYECTO PERPETUATE



FUENTE: (Calderini C., 2012)


En modelos particulares se clasifican con referencia a la escala de modelado (material de mampostería o elementos estructurales) y el tipo de discretización (continua o discreta):

- CCLM (Constitución continua de Leyes de Modelación): modelado de elementos finitos con las leyes constitutivas homogeneizadas fenomenológicas o micro mecánica;
- SEM (Modelos de elementos estructurales): modelado de pórtico equivalente por discretización en términos de muelles, enjutas y otros elementos lineales y no lineales;
- DIM (Modelos de interface discreta): modelado discreto de bloques e interfaces;
- MBM (Modelos de macro bloques): aplicación del análisis límite (teorema de límite superior e inferior) a un mecanismo de colapso predefinido de bloques rígidos.

La correlación entre las clases y el enfoque de modelado sugerido se resume en la TABLA No. 6.

TABLA No. 6 CLASES DE EDIFICIOS Y TIPOS RELACIONADOS DE LOS MODELOS

Clases de bienes arquitectónicos		Tipo de modelo			
		CCLM	SEM	DIM	MBM
A	Los activos de patrimonio sujetos a daños que prevalecen en el plano: palacios, castillos, casas religiosas, serie de caravanas, edificios colectivos.	Raro	Global	Raro	Local
B	Bienes patrimoniales sometidos a daños con prevalencia fuera del plano: Iglesias, mezquitas, teatros modernos, mercados, edificios industriales.	Possible		Raro	
C	Bienes patrimoniales caracterizados por elementos de mampostería mono dimensionales: torres, campanarios, minaretes, faros, chimeneas.	Possible	Global		Raro
D	Estructuras arqueadas sometidas a daños en el plano: arcos triunfales, acueductos, puentes, claustros.	Raro		Possible	Local
E	Estructuras masivas con reinante fracaso local de mampostería. Fortalezas, murallas defensivas, teatros romanos y griegos.	Possible		Global	
F	Bloques estructurales sometidos a vuelco. Columnas, obeliscos, ruinas arqueológicas, templos griegos			Possible	Local
G	Sistemas constructivos sujetos a daño complejo: Centros históricos.		Global	Raro	Local

	Estandar		Possible
	Raro		

FUENTE: (Calderini C., 2012)

5.2.1.2. Requerimientos de Conservación y Seguridad

La FIGURA No.15 ilustra el logro de niveles de rendimiento objetivo (es decir los estados límites que se asocian a diferentes niveles de desplazamiento en la curva de capacidad), se toma en cuenta todos los aspectos que se mencionan previamente.

FIGURA No. 15 CURVA TÍPICA PUSHOVER DE UN BIEN ARQUITECTÓNICO CON IDENTIFICACIÓN DE DAÑO Y NIVELES DE RENDIMIENTO OBJETIVO



FUENTE: (Calderini C., 2012)

Es una opinión compartida de que no es posible definir los niveles de seguridad estrictos para los bienes culturales, ya que siempre es preferible el enfoque "caso por caso". La definición de los niveles de seguridad "aceptables" se pueden pensar como una solución de compromiso: por un lado, se deben evitar los daños derivados de las acciones ambientales (terremotos, inundaciones, envejecimiento); por otro lado, se deben evitar las intervenciones invasivas, diseñadas con el fin de evitar daños futuros de acciones ambientales, las mismas que no producen pérdida significativa de inmediato en términos de conservación. Para conciliar estos temas es de importancia fundamental los niveles de seguridad "aceptable" para los bienes patrimoniales culturales que se encaminan al concepto de los estados límites de rendimiento (PL). Para los edificios ordinarios, los PLs se refieren principalmente a las cuestiones económicas y de seguridad. Si la ocurrencia de daño puede ser aceptable para los edificios monumentales, puede ser discutible para los activos artísticos debido a su naturaleza intrínseca de "irrecuperables". Así, en bienes del patrimonio cultural, la conservación y seguridad de las personas se deben considerar en un enfoque integro. De acuerdo con esto, en el proyecto PERPETUATE, se consideran los siguientes objetivos: El uso y la vida humana (U),

la conservación del edificio (B); la conservación de activos Artísticos (A) (FIGURA No. 16).

FIGURA No. 16 NIVELES DE RENDIMIENTO Y LOS NIVELES DE DAÑO DE PERPETUATE



FUENTE: (Calderini C., 2012)

Por otra parte, se identifican niveles de desempeño (PLs) para cada uno de los objetivos y los niveles de peligro en el terremoto relacionado, que se expresan en términos de período de retorno (TRD, PLi). Los períodos de retorno pueden ser modificados por los coeficientes de importancia (γ_k , donde $k = U, B, A$), que tienen en cuenta el uso y la importancia arquitectónica y artística del edificio que se examina.

TABLA No. 7 NIVELES DE RENDIMIENTO Y PERÍODOS DE RETORNO RELACIONADOS, primarios (naranja intenso), secundarios (naranja pálido)

$T_{DR,PLi} / \gamma_k$ $k = U, B, A$	Uso y vida humana		Bienes arquitectónicos		Bienes artísticos	
	Ocupación Inmediata	Seguridad Vital	Daño significativo pero restaurable	Cercano al colapso	Daño restaurable	Prevención de pérdidas
72/ γ_k	2U				2A	
475/ γ_k		3U	3B			3A
2475/ γ_k				4B		

FUENTE: (Calderini C., 2012)

En principio, se supone en forma básica que los niveles de desempeño (PLs) están correlacionados directamente a los niveles de desplazamiento (DLs). Esto significa, en la práctica, que los criterios de aceptación de un determinado nivel de desempeño (PLi) es la consecución del correspondiente nivel de desplazamiento (DLi), siendo $dPLi = dDLi$.

Este enfoque es admisible si la ocurrencia de diferentes DLs tienen espacios regulares en la curva de capacidad. Esta es una perspectiva bastante determinista que parece coherente en el caso de los bienes que se constituyen por un solo elemento o macro elemento, pero no puede estar por el lado de la seguridad para las estructuras más complejas.

A modo de ejemplo, este enfoque implica que el criterio de aceptación que se adopta para el nivel de rendimiento PL3 del objeto de conservación del edificio es el mismo de PL3 de uso y destino de la vida humana, ya que la consecución del mismo nivel de daño (DL3) se registra en ambos casos. Sin embargo, las consecuencias de tal DL3 podrían ser aceptables para los objetos de conservación del edificio, pero no para el uso y conservación de vidas humanas (considerar como ejemplo el caso de un gran daño en una sección muy pequeña de un bien). Por esta razón, se propone un segundo punto de vista probabilístico, basado en curvas de fragilidad y en las consecuencias reales de DLs.

A través de las curvas de fragilidad se evalúa la distribución probabilística de los DLs como una función del desplazamiento "d" de la estructura. En la FIGURA No. 17, se puede observar que los DLs con diferentes probabilidades de ocurrencia se relacionan con el mismo valor del desplazamiento estructural "d". En general, la probabilidad condicional de que se supere DLi corresponde a probabilidades menores de exceder $DLk > i$. En el enfoque probabilístico propuesto, se definen criterios de aceptación para un PLi al tener en cuenta las probabilidades de superación de los niveles de daños mayores DLk (con $k \geq i$) de su combinación (ver TABLA No. 8). Por tanto, el desplazamiento en el que se alcanza el nivel de rendimiento no es coincidente con el desplazamiento en el que se alcanza el nivel de daño correspondiente ($dPLi \neq dDLi$).

Esta perspectiva es más fiable y capaz de tomar en cuenta los recursos sísmicos específicos de cada bien único (por lo tanto no cuantificables en términos generales). De hecho, el histograma de la distribución de los niveles de daño depende de la posición relativa de cada nivel de daño en el pulsador sobre la curva del bien patrimonial (en función de la ductilidad de la estructura) y de las incertidumbres (epistémicas y al azar) de la evaluación.

FIGURA No. 17 ESQUEMA DEL ENFOQUE PROBABILÍSTICO ADOPTADO PARA DEFINIR LOS CRITERIOS DE ACEPTACIÓN



FUENTE: (Calderini C., 2012)

TABLA No. 8 CRITERIOS DE ACEPTACIÓN DEFINIDOS EN EL PROCEDIMIENTO PERPETUATE

Nivel de desempeño (PL)	CRITERIOS DE ACEPTACIÓN			
	Objetivos de conservación del edificio		Objetivos de Uso y Vida Humana	
	Ley de correlación con la probabilidad de tener un cierto estado de daño	Valor límite	Ley de correlación con la probabilidad de tener un cierto estado de daño	Valor límite
2	-	-	$0.4 P_{DL3} + P_{DL4} + P_{DL5}$	1%
3	P_{DL5}	3%	$0.3 P_{DL5}$	3%
4	P_{DL5}	15%	-	-

FUENTE: (Calderini C., 2012)

Esta interpretación conceptual de la correlación entre los DLs y PLs, y la definición operativa relacionada, representa un resultado innovador del proyecto PERPETUATE.

5.2.1.3. Definición de la Amenaza Sísmica

La evaluación de la amenaza sísmica juega un papel fundamental en la evaluación del riesgo sísmico de edificios patrimoniales, ya que son sensibles a: características particulares de la entrada sísmica (duración del terremoto, contenido de frecuencia en el rango de período largo, componente vertical del movimiento); efectos de amplificación del suelo; fenómenos de interacción suelo-estructura (en el caso de estructuras de mampostería grandes, pesadas y rígidas). De hecho, se pueden resaltar muchas diferencias con edificios modernos diseñados con las normas de los códigos de construcción. A modo de ejemplo, los edificios históricos a veces se construyeron en lugares donde se producen fuertes efectos de sitio locales por la topografía empinada, efectos de cuenca o fundaciones construidas sobre los restos de estructuras anteriores. Por otra parte, el largo período de vibración de algunas clases de bienes (considera el comportamiento de mecedora en el caso columnas de piedra individuales) requiere una definición fiable del espectro de respuesta de aceleración de desplazamiento también en este rango.

PERPETUATE, después de un análisis probabilístico en detalle de las medidas de intensidad disponibles, obtuvo unos adecuados Espectros de Respuesta Aceleración-Desplazamiento (ADR) y las historias de tiempo apropiadas para los bienes de patrimonio cultural. Además, el proyecto desarrolló un modelo de cimentación con mejoras para la evaluación de la vulnerabilidad de las estructuras de mampostería masiva; tuvo en cuenta el papel que cumple la cimentación, la interacción suelo - cimiento asociado (SFI) y los efectos de interacción suelo-estructura (SFSI)

5.2.1.4. Información de cómo fue construido

La minimización de las intervenciones sobre bienes del patrimonio cultural requiere un conocimiento exhaustivo sobre los propios bienes. Con el fin de garantizar un enfoque común y uniforme a nivel europeo, el proyecto define tanto las normas relativas a la encuesta del activo (encuesta estructural y tecnológica, la caracterización de materiales, etc.), como sobre la base de las técnicas

tradicionales e innovadoras, además, los criterios adecuados para optimizar el plan de investigación (con el fin de minimizar su invasividad y el impacto en la construcción).

De acuerdo con el procedimiento PERPETUATE, el programa de investigación se debe basar en la sensibilidad preliminar, análisis que se dirige a identificar los principales parámetros a investigar y definir los factores de confianza apropiados del modelo. En la evaluación de la seguridad sísmica de un edificio existente se suman la incertidumbre epistémica, que se debe al conocimiento incompleto del bien, y, la falta de registros sísmicos históricos. En bienes de patrimonio cultural, se debe garantizar su conservación y por tanto el impacto de las intervenciones se debe reducir al mínimo.

La identificación de los principales parámetros que influyen en la respuesta estructural del bien permite definir, al finalizar la investigación, algunos puntos importantes (reduciendo así los costes y el tiempo) y para reducir el número de ensayos destructivos.

La calibración de los factores de confianza sobre la base de los análisis de sensibilidad en lugar de suposiciones a-priori (tal como se hace generalmente para edificios estándar) proporciona modelos y resultados más fiables. De hecho, en los análisis de sensibilidad se consideran ambas, las incertidumbres estadísticas, que se tratan por variables aleatorias adecuadas, y las incertidumbres epistémicas, tratadas como árbol lógico.

Por otra parte, sobre la base de una revisión de las técnicas para el conocimiento de los bienes culturales, conjuntos de información relacionadas con los principios y alcances de las pruebas, figuras de configuración de prueba, procedimientos de prueba y mediciones, interpretación de los resultados, junto con las disposiciones del código, se resumen en los cuadros que pueden representar una herramienta útil para los profesionales. Se proporcionan valores de referencia para los principales parámetros mecánicos de mampostería (módulo elástico, de corte y resistencia a la compresión, el compartimiento de la deriva), basado en la literatura,

los códigos de diseño y pruebas experimentales. A más de los métodos para identificar los parámetros mecánicos de materiales y elementos estructurales, se cuenta con métodos para identificar el comportamiento dinámico de edificios patrimoniales (técnicas de vibración ambiental, desplazamientos permanentes y técnicas de teledetección).

5.2.2. SEGUNDA ETAPA

5.2.2.1. Modelado y Verificaciones de Seguridad

Para llevar a cabo las verificaciones que se basan en desplazamiento se requieren modelos capaces de describir el comportamiento no lineal de los bienes dentro de las acciones externas hasta su colapso. El objetivo de PERPETUATE es definir un camino lógico para seleccionar el modelo más fiable, preciso y computacionalmente sostenible para puntualizar los procedimientos de verificación de seguridad sísmica apropiada para cada clase de bien, de acuerdo a las diversas categorías como se ilustra en la FIGURA No. 14.

El resultado propuesto en PERPETUATE es la máxima Medida de Intensidad Sísmica (IM) compatible con el cumplimiento de cada nivel de desempeño (IMPLi), que se identifican en la segunda etapa (requisitos de seguridad y de conservación). Con este objetivo, se consideran los siguientes métodos de procedimientos de análisis y verificación:

- Análisis estático no lineal (paso a paso) y método del espectro de capacidad (CSM), basado en la comparación entre la demanda de desplazamiento, que se obtiene por la reducción del espectro de respuesta de aceleración y la capacidad de desplazamiento.
- Análisis Dinámico Incremental (IDA) o análisis no lineal dinámico con una gran cantidad de registros (método de la nube), basado en la evaluación estadística de IMPLi de los resultados de los análisis dinámico no lineal con tiempos marcados en una selección adecuada.

El primer método de análisis estático no lineal (CSM) se asume como el estándar. Se puede utilizar para todas las clases de bienes arquitectónicos y también para la evaluación de los bienes artísticos. La curva de fragilidad se obtiene de acuerdo con procedimientos bien conocidos (definición del modelo de carga, fuerza-desplazamiento junto con análisis incremental), con amplia aplicación para estructuras modernas. La aplicación a estructuras irregulares con diafragmas horizontales flexibles plantea algunas preguntas y algunos consejos específicos para las diferentes clases de bienes de patrimonio cultural, y en el proyecto PERPETUATE se examinan a profundidad.

El segundo método de análisis dinámico incremental (método de la nube), aunque más preciso, se sugiere solamente para algunas clases de bienes (por ejemplo, la clase F), aplicable con un esfuerzo computacional razonable. Se puede utilizar también como validación de los resultados del primer método, con el fin de mejorar la fiabilidad de la evaluación.

Para la verificación de seguridad y el modelo a adoptar, es útil hacer una distinción entre activos simples que se conforman por un solo macro-elemento y activos complejos compuestos por un conjunto de macro-elementos (FIGURA No. 18). Para los bienes del primer tipo, se modela el único macro-elemento y la evaluación que se realiza en su curva de capacidad. Para los activos complejos, es necesario distinguir los siguientes dos sub-casos:

- Edificios que se caracterizan por un comportamiento caja. En este caso, se requiere un modelo 3D de todo el edificio (enfoque global, FIGURA No. 18), evaluación que se realiza en su curva de capacidad total.
- Edificios constituidos por un conjunto de n macro-elementos, que exhiben un comportamiento casi independiente. En este caso, cada uno de los macro-elementos se modela de forma independiente (enfoque de escala macro-elementos) y se calculan n curvas de capacidad, luego se asigna la carga sísmica por una redistribución que se adopta. La evaluación de la totalidad de los activos se presenta a continuación, a través de criterios de una buena combinación.

FIGURA No. 18 TIPOS DE BIENES Y ESCALAS DE EVALUACIÓN SÍSMICA CORRESPONDIENTES.



FUENTE: (Calderini C., 2012)

Los parámetros anteriores se refieren implícitamente a la evaluación del edificio como un todo, con cargas sísmicas que se asocian a la masa total de la estructura. Sin embargo, vale la pena señalar que una evaluación sísmica exhaustiva requeriría también la verificación de los posibles mecanismos locales (principalmente fuera de su propio plano). Uno de los pasos cruciales de la verificación es la definición fiable de PL a través de modelos mecánicos. Para ello, PERPETUATE propone un enfoque multi-escala que tome en cuenta la respuesta de los bienes a diferentes escalas: Escala de elementos estructurales (daño local), escala de elementos arquitectónicos (daño en macro-elementos) y escala global (curva paso a paso). La idea básica es la evaluación de un determinado DLI a escala mundial, como resultado de un conjunto de controles que se llevan a cabo en diferentes escalas, mediante un enfoque heurístico que logra los límites convencionales de la curva de capacidad (se fija por el dictamen de expertos o parámetros de análisis), ya sea de todo el edificio o de macro-elementos "pertinentes". Las inspecciones sistemáticas de los elementos y macro-elementos, se encaminan a evitar la aparición de niveles de daños locales que sean incompatibles con el cumplimiento del DLI que se considera.

Por último, con el fin de modelar prácticamente la estructura, ya sea por el enfoque de escala global o el enfoque escala macro-elemento, se proponen observaciones

críticas y herramientas operativas a través de PERPETUATE. En particular, una nueva herramienta se desarrolla específicamente para el modelado de macro - bloque de mecanismos de colapso y se propone un software existente mejorado significativamente TREMURI para el análisis global de los edificios de mampostería.

PERPETUATE plantea criterios adecuados para definir los DLs en la curva de push-over equivalente, obtenida para el modelo de macro bloques (MBM). En este caso, los límites convencionales propuestos en el marco de la aproximación heurística se han validado a través de muchos análisis dinámicos no lineales realizados en Housner - como modelos de bloques rígidos o sistemas elásticos no lineales degradantes.

5.2.2.2. Pruebas Experimentales

Las pruebas experimentales de laboratorio realizadas dentro del proyecto PERPETUATE, (FIGURA No. 19) se orientan a diferentes objetivos.

FIGURA No. 19 RESUMEN DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES DEL PROYECTO PERPETUATE



FUENTE: (Calderini C., 2012)

Los ensayos en la mesa vibratoria en los laboratorios de Grecia e Italia se orientaron a:

- analizar el comportamiento dinámico de los sistemas multi-bloques, determinar su capacidad de desplazamiento para diferentes entradas sísmicas, evaluar los estados límites y validar los modelos numéricos normalmente adoptados para este tipo de estructuras (clase F);
- analizar el comportamiento de cizallamiento de bóvedas de crucería (mampostería a escala real) de contorno asimétrico, evaluar la efectividad de las intervenciones de instalación posterior tales como la introducción de tirantes rígidos o flexibles en arcos (como en el caso del sistema de arco-muelle) y la inserción de sistemas de aislamiento de base para los bienes artísticos (como en el caso de estatuas).

Los ensayos de corte en las paredes de mampostería se orientaron a dos objetivos principales. Por un lado, se midieron las propiedades mecánicas de las paredes de ladrillo y de piedra antigua similares y la fiabilidad de los criterios de resistencia de esfuerzos. Por otro lado, se analizó la interacción entre el comportamiento estructural de la pared y el comportamiento mecánico de los revestimientos (yesos o estucos), lo que vincula el problema de los bienes artísticos estrictamente conectados a elementos estructurales (clase Q de acuerdo a la clasificación de PERPETUATE).

En Eslovenia se realizaron ensayos in situ para evaluar la efectividad de diferentes técnicas de intervención (como elementos lineales diagonales o perpendiculares, y mallas), ver FIGURA No. 19.

5.2.2.3. Aplicación al Estudio de Casos

Los estudios de caso en diferentes países fueron fundamentales para la validación del nuevo procedimiento de evaluación propuesto por PERPETUATE (FIGURA No. 19). El problema de la protección sísmica del patrimonio cultural se enfrenta a diferentes escalas y condiciones de daño: por un lado se estudian los monumentos

individuales y centros históricos, y por otro lado, se estudian tanto los edificios en buen estado como los edificios con daños recientes (en el primer caso, el objetivo era la prevención, en el segundo, la reparación / reconstrucción). El análisis de estudios de caso de daños recientes por un terremoto se aborda principalmente para simular la respuesta sísmica real que se muestra por la estructura y validar los modelos adoptados. En muchos casos, los bienes artísticos pertinentes se consideraron en el ensayo, lo que puso a prueba la capacidad del procedimiento para considerar su interacción con daños en elementos estructurales.

5.2.3. TERCERA ETAPA

5.2.3.1. Decisiones de Rehabilitación

Los pasos finales del procedimiento son esquemáticos. La conversión de la curva de push-over en curva de capacidad se realiza según el código. Una vez que se calcula el valor máximo de la medida de intensidad i -ésima (IM_{PLi}), da resultado de la evaluación que se utiliza en las decisiones de rehabilitación.

En la curva de peligro, los valores calculados de la medidas de intensidad (IMs) compatible con los niveles de desempeño requeridos (PLs) se convierten en períodos de retorno ($T_{R,PLi}$) con el fin de comparar con el período de retorno del terremoto de diseño ($T^*_{R,PLi}$), que se solicita para el PLi dado. A partir de estos datos, los resultados de la evaluación se resumen en términos de un índice de seguridad adecuado que se puede definir como

$$I_s = T_{R,PLi} / T^*_{R,PLi} \quad (5.1)$$

Si I_s es mayor que uno, los requisitos de seguridad están plenamente satisfechos. Otra posible interpretación es a través de la definición de la vida nominal del bien, dada por:

$$V_N = 50 * \frac{T_{R,PLi}}{T^*_{R,PLi}} \quad (5.2)$$

Los niveles de riesgo se definen habitualmente para las probabilidades de excedencia en 50 años, se puede suponer que, si $VN > 50$ años, el comportamiento sísmico del bien arquitectónico es adecuado, mientras que, si $VN < 50$ años, se deben considerar las decisiones de rehabilitación. La vida nominal es un parámetro útil para cuantificar el tiempo dentro del cual se tienen que aplicar las acciones de prevención. Permite la definición de una lista de prioridades de las intervenciones en el caso de la evaluación de un grupo de edificios. Sin embargo, vale la pena señalar que su empleo es correcto, desde el punto de vista conceptual, sólo si está expuesto a un peligro dependiente del tiempo.

En la verificación de seguridad caso por caso, se pone de relieve la necesidad de mejorar la capacidad sísmica del edificio, para su rehabilitación se pueden considerar las siguientes alternativas: las intervenciones de fortalecimiento y la conservación sin intervención, en caso de que el fortalecimiento de las partes sea muy invasivo. Otra alternativa está en función de la vida útil del edificio, para lo cual se requiere la revisión de los requisitos mínimos de seguridad que, en la práctica, significa el cambio de uso del edificio. Por último, el edificio puede ser monitoreado y se pueden actualizar los modelos. También en este caso se prevé la elección en el futuro, es decir, realizar la elección de rehabilitación cuando las herramientas más precisas y validadas estén disponibles con seguridad, por las mejoras en la investigación aplicada en el campo.

5.3. CARACTERÍSTICAS DE LA FUENTE SISMICA

En esta sección las diferentes entradas del análisis probabilístico de peligro sísmico (PSHA) para la ciudad de Rodas (uno de los sitios de ejemplo del proyecto PERPETUATE) se presentan en términos de la caracterización de la fuente sísmica y las ecuaciones de predicción de movimiento de suelo.

A partir del modelo de riesgo sísmico para Europa dentro del proyecto PERPETUATE, (Laurentiu y Danciu 2011), se extrae la información de las tasas de actividad sísmica en las nueve zonas fuente que están cercanas a Rodas (véase la FIGURA No. 20). No se realizaron modificaciones a este modelo de fuente sísmica

para dicho estudio, ya que representa el conocimiento más alto a la fecha, sobre el potencial de terremotos en Europa y también es un modelo de consenso que representa los puntos de vista de muchos expertos.

FIGURA No. 20 ZONIFICACIÓN DE LA FUENTE SÍSMICA Y UBICACIÓN DEL SITIO (CENTRO HISTÓRICO DE RODAS EN LA 36.445N28.225E)



FUENTE: (Calderini C., 2012)

El mapa sísmico tectónico de la zona euro-mediterránea, Delavaud et al. (2012), señalan que Rodas se encuentra dentro de un área activa de sismicidad cortical poco profunda cerca de una zona de subducción (Arco de Hellenic).

De igual manera, en Argelia se utiliza el modelo sismo-tectónico para diferentes períodos de retorno. Las fallas a considerar incluyen 12 continentales y dos de mar, una de ellas fue la causa del terremoto Boumerdes del 21 de mayo de 2003 de magnitud Mw 6,8.

5.4. RESULTADOS DEL PROYECTO PERPETUATE

Los estudios de caso en diferentes países, fueron fundamentales para la validación del nuevo procedimiento de evaluación propuesto por PERPETUATE.

El problema de la protección sísmica del patrimonio cultural se enfrenta a diferentes escalas y condiciones de daño. Por un lado, se consideran monumentos

individuales y centros históricos; y de otra parte, los edificios en buen estado como edificios recientemente dañados (en el primer caso, el objetivo era la prevención, en la segunda, la reparación / reconstrucción). El análisis de los estudios de casos recientemente dañados por un terremoto se abordó principalmente para simular la respuesta sísmica real que muestra la estructura y además validar los modelos adoptados.

En muchos casos, los bienes artísticos notables estaban presentes, lo que permitió poner a prueba la capacidad del procedimiento para considerar su interacción con daños en elementos estructurales.

La TABLA No. 9 resume los estudios de casos considerados y sus principales características. Como se desprende de ella, los bienes examinados pertenecen a las clases A y B (para bienes únicos) y G (para centros históricos); a pesar de la prevalencia de estas clases, vale la pena señalar que la respuesta de los demás casos ha sido analizada en profundidad dentro de los ensayos experimentales en la mesa vibradora (enfocados en las maquetas de los bienes que cubran también las clases D y F).

Una caracterización sísmica probabilística precisa del peligro, con el apoyo de micro-temblores in situ, mediciones topográficas y matrices de medida, permite la identificación del suelo para la mayoría de los sitios considerados (en particular para los suelos de Rodas y Argel).

Por otra parte, para cada caso de estudio, se recogieron datos relacionados con la información conforme a obra, incluyendo en algunos casos también las mediciones de vibración ambiental para la identificación estructural. En el caso del centro histórico de Rodas, se realizó una simulación numérica en un prototipo de edificios existentes, con el fin de evaluar el efecto de la propagación de las incertidumbres en la evaluación. Con este objetivo, el daño calculado a partir de curvas de fragilidad derivadas de un análisis de historia en el tiempo y el daño calculado con las curvas de capacidad de análisis estáticos no lineales se compararon con el establecimiento de una buena concordancia entre ellas.

TABLA No. 9 RESUMEN DE LOS CASOS DE ESTUDIO CONSIDERADOS

CASO DE ESTUDIO	SITIO	ASOCIACIÓN	CLASE	DAÑO SISMICO	ESCALA		TIPO DE MODELO				NUMERO DE SIMULACIONES E INTERVENCIONES
					BIEN UNICO	CENTRO URBANO	CCLM	SEM	DIM	MBM	
Palacio Ardinghelli	L'Aquila	UNIGE	A	SI	X			X		X	SI
Iglesia de Santa María Paganica	L'Aquila	UNIGE	B	SI	X		X			X	SI
Catedral de San Pardo	Larino	UNIGE	B	SI	X		X			X	NO
Escuela Neoclásica	Rodas	ULAUTH	A	NO	X			X			SI
Arsenal de Milly	Rodas	AUTH UNIGE BRGM	B	NO	X		X	X		X	NO
Mansión Hassan Bey	Rodas	UNIGE AUTH	A	NO	X			X			SI
Gran Mezquita	Algeria	UNIGE	B	NO	X		X	X		X	SI
Casbah de Argel	Algeria	UBATH USTHB	G	NO		X	FAMIVE REGISTRO DE IDEAS				SI
Palacio Kolizej	Ljubljana	UL ZRMK	A	NO	X			X			NO
Construcciones rurales en la región de Posocje	Región Posocje	UBATH UL	A	SI		X	FAMIVE				NO
Centro Histórico de Ljubljana	Ljubljana	UBATH UL	G	NO		X	FAMIVE				SI

FUENTE: (Calderini C., 2012)

CAPÍTULO 6

ANÁLISIS DEL CENTRO HISTÓRICO DE QUITO, PATRIMONIO CULTURAL DE LA HUMANIDAD

6.1. PREÁMBULO

El Centro Histórico de la ciudad de Quito es emblemático por su patrimonio histórico y cultural. Desde el punto de vista urbanístico, arquitectónico y estructural resulta muy heterogéneo, no solo por la clasificación de las edificaciones, sino también por su uso y distribución espacial.

Para tener un enfoque actual de las condiciones y características estructurales de este núcleo urbano, se requiere una clasificación tipológica que además de la forma arquitectónica, características constructivas, edad y estilo, promueva el conocimiento de la respuesta estructural de las mismas ante eventos sísmicos, con la premisa histórica de que ya ocurrieron.

La valoración de daño para bienes patrimoniales luego de terremotos recientes, muestran la gran vulnerabilidad de varios de los tipos de estructuras históricas tales como iglesias, torres, obeliscos, entre otras. (Calderini C., 2012). En este estudio se demostró que las intervenciones son invasivas, no son efectivas, e incluso aumentan la vulnerabilidad.

La prevención de los bienes de patrimonio cultural debe garantizar su capacidad de perdurar en el tiempo contra el deterioro, los riesgos naturales y los fenómenos extremos, sin perder su autenticidad y la facilidad de uso.

Dentro de los bienes patrimoniales más importantes se encuentran las iglesias, y en el Centro Histórico de Quito, solo en la calle García Moreno son siete, de norte a sur: la primera es la iglesia de Santa Bárbara, construida en 1550, restaurada luego del terremoto de 1987, la segunda es la iglesia de La Concepción (1575), la misma que funcionó como el primer monasterio de la ciudad.

La tercera y cuarta son el templo de La Catedral y la iglesia de El Sagrario (1564 y 1699, respectivamente). En La Catedral se realizó la proclamación de Independencia de 1809. Solo esta iglesia continúa intacta. La quinta es La Compañía de Jesús (1613), de estilo barroco, cuya portada exterior fue labrada en piedra volcánica, mientras que su interior está cubierto totalmente por láminas de oro talladas. Se completan las siete iglesias con el Monasterio del Carmen Alto y de la capilla de San Lázaro.

Un análisis completo de este tipo de edificaciones, basada en el Comportamiento Sísmico de los bienes del Patrimonio Cultural de Italia se desarrolló en el Proyecto PERPETUATE promovido por Calderini et al (2012).

Por la heterogeneidad de las edificaciones de Centro Histórico de Quito, caracterizado por edificaciones de mampostería (más del 60%) y de hormigón armado, cerca de la cuarta parte (25 %), de la muestra de análisis, es conveniente utilizar la combinación de la metodología propuesta por el proyecto PERPETUATE y la metodología HAZUS, análisis que a futuro se puede aprovechar en el resto de la ciudad de Quito.

6.2. TRABAJO DE CAMPO

El presente trabajo aborda la clasificación tipológica de las edificaciones del Centro Histórico de Quito, con la premisa de que acciones preventivas y de recuperación estructural de las edificaciones pueden contribuir al uso correcto y la conservación de este Patrimonio Cultural de la Humanidad.

Se reconoce internacionalmente que la Metodología de HAZUS utiliza una clasificación estructural ante las eventuales solicitaciones sísmicas. Esta metodología define las curvas de capacidad en diferentes ámbitos Físico - Geográfico ante un mismo evento, por lo que resulta conveniente aplicar esta metodología en el Centro Histórico de Quito, para valorar los posibles escenarios desde el punto de vista de vulnerabilidad sísmica, de prevención y de estimación de riesgos.

6.2.1. CARACTERIZACIÓN DEL CENTRO HISTÓRICO DE QUITO

El Centro Histórico de Quito tiene gran relevancia histórica y cultural, reconocido por la UNESCO como Primer Patrimonio Cultural de la Humanidad en 1978. Representó en su momento el poder colonial y actualmente es el símbolo del poder republicano. En él se encuentra un conjunto arquitectónico de diferentes estilos y épocas, alrededor del cual se desarrolló el embrión urbanístico de la Ciudad de Quito.

Hasta la década de los años cincuenta del siglo anterior, este núcleo urbano permaneció literalmente invariante en el espacio y el tiempo. No fue sino hasta la década de los años setenta, en que el Ecuador se convierte en país petrolero, cuyos efectos económicos incidieron en el cambio urbanístico de las principales ciudades, que en el caso de Quito, se evidenció en su expansión y desarrollo constructivo en la zona Norte de la ciudad.

Paradójicamente, lo que fue un núcleo urbano aristocrático de la ciudad, se transformó en una zona desvalorizada, con el advenimiento entre otras cosas, de mercados, sitios de tolerancia, mercado informal y desorden urbanístico, lo que generó adicionalmente una emigración interna de los tradicionales habitantes de este sector, hacia el norte de la ciudad en busca de una mejor calidad de vida.

En la década de los años noventa y acorde a las Políticas de Ordenamiento Territorial, surgen los primeros pasos dentro de los gobiernos seccionales, en este caso el Municipio de Quito, sobre la necesidad de recuperar y preservar el patrimonio urbano. Con este antecedente, se crean áreas de regeneración urbana y recuperación de inmuebles inventariados como patrimonio cultural. Los pasos iniciales fueron intentos aislados y no fue sino hasta la década de los años 2000, que se convierte en política de Estado y se emiten las respectivas ordenanzas para regular este proceso.

6.2.2. ESTUDIO DE CASO

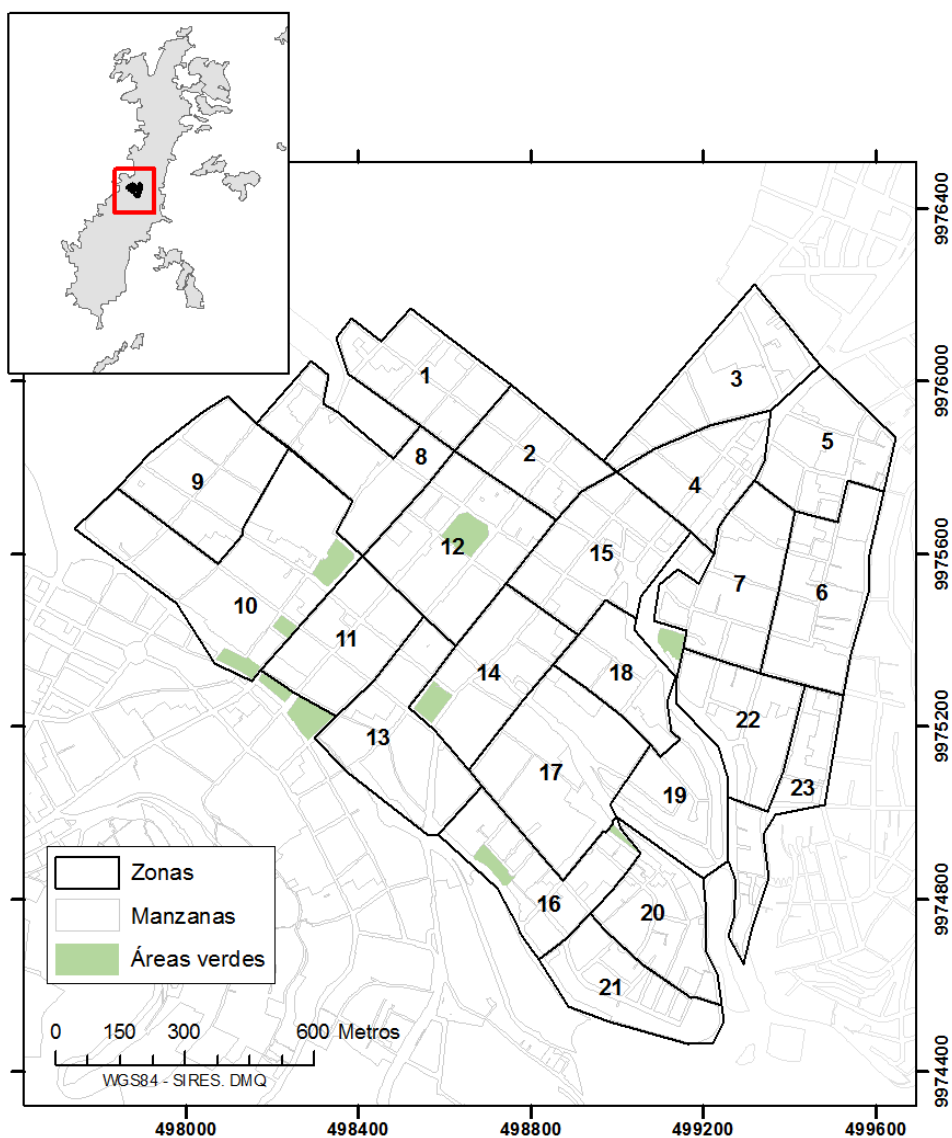
Este estudio promueve clasificar tipológicamente las edificaciones del Centro histórico de Quito, mediante el empleo del Método HAZUS, al considerar que la heterogeneidad estructural y arquitectónica es un sello de identidad de este sector de la Ciudad, que se evidencia con diferente desarrollo en el ámbito espacio-temporal, respecto al contexto urbanístico del resto de la Ciudad de Quito (Ver FIGURA No. 21)

FIGURA No. 21: CENTRO HISTÓRICO DE QUITO



FUENTE: Archivo particular

La delimitación del área de estudio se configuró de la siguiente manera: Por el Norte: Calle Manabí y Gral. Briceño; por el Sur: por las Calles: Sucre – Vicente Rocafuerte – 24 de Mayo – Piedra; por el Este: por las calles: Valparaíso – Los Ríos – Sucre; y por el oeste por la calles: Mires – Chimborazo –Manuel Quiroga. (Ver FIGURA No. 22)

FIGURA No. 22: DELIMITACIÓN DE LAS ZONAS DE ESTUDIO.

FUENTE: Archivo particular

6.2.3. METODOLOGÍA

La clasificación tipológica de las estructuras se fundamenta en el Método de HAZUS, para lo cual y como paso previo, fue necesario establecer el siguiente procedimiento:

- Inspección in situ
- Encuestas
- Muestreo preestablecido
- Tabulación de datos
- Desagregación de la muestra

Según los datos procesados, ver TABLA No.11, la desagregación de la muestra inicial permite jerarquizar tipológicamente las estructuras atendiendo a su sistema constructivo. En este contexto, el mayor porcentaje lo ocupa las edificaciones de mampostería portante (URML, URMM), construcciones características de finales del siglo XV.

El desarrollo ulterior se produce a inicios del siglo XX, cuya característica esencial fue la aparición de estructuras de hormigón armado sin arriostramientos, tipo C1L, que evidencia una migración interna dentro del Centro Histórico, con la aparición de nuevos barrios que se asentaron hacia el sector Nor-Oriental de la ciudad.

La desagregación de la muestra permitió además, identificar aquellos sitios que por diferentes motivos no se clasificaron y cuyo porcentual de apenas 4.37 %, refleja que el nivel de confianza de la muestra es alto, lo cual permite inferir que el procedimiento que se utilizó, corresponde plenamente con el objetivo del estudio.

Por otra parte, el trabajo de campo se desarrolla en 23 zonas, cada una de aproximadamente 6 manzanas; con la respectiva clave catastral por lote, (Ver FIGURA No. 21 y FIGURA No. 22). Tuvo relevancia la participación de estudiantes de la Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, quienes además de las encuestas realizaron el respectivo levantamiento de evidencias, mediante registro fotográfico.

De forma complementaria, como paso esencial, se aborda el Método de HAZUS al utilizar los códigos referenciados, que involucran 36 tipos estructurales validados mediante ensayos de laboratorio y comprobados en diferentes ámbitos geográficos. Ver TABLA No.10

En la FIGURA No. 23 se aprecia la distribución parcial de las claves catastrales por manzana en un sector de la Zona 15, en cada una de ellas se involucra un Código de la TABLA No.10, que se respalda por la respectiva evidencia fotográfica. A partir de esta clasificación, se elaboraron mapas con códigos de colores que permiten observar las diferentes tipologías existentes en el Centro Histórico de Quito, agrupadas por categorías. (Ver FIGURA No. 24).

FIGURA No. 23: EJEMPLO DE ASIGNACIÓN DE TIPOLOGÍAS PARA CADA VIVIENDA EN ZONA 15.



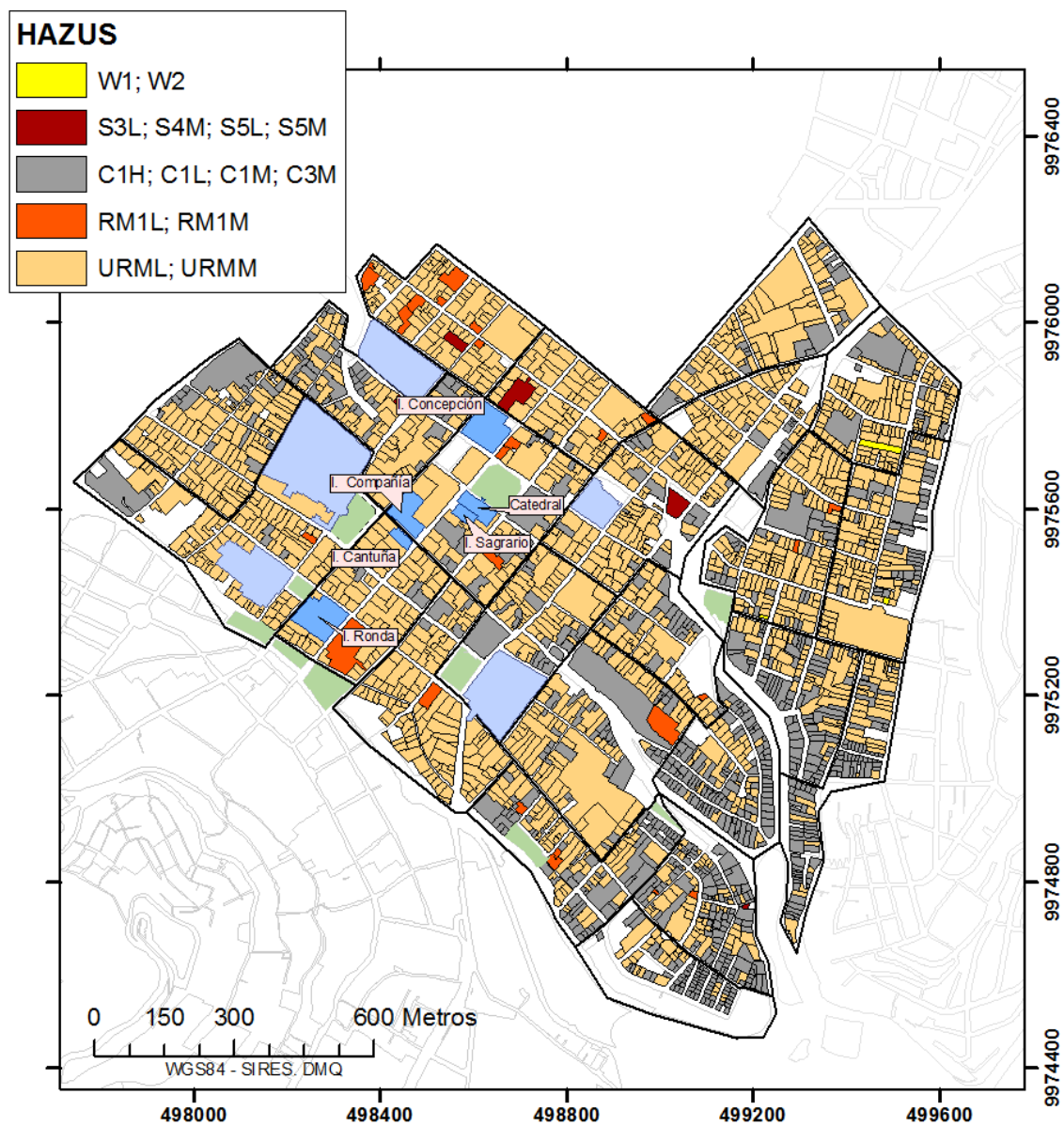
FUENTE: Archivo particular

TABLA No.10 NOMENCLATURA DE LOS SISTEMAS ESTRUCTURALES QUE CONSIDERA HAZUS 99

No.	CODIGO	DESCRIPCION	RANGO		VALOR TIPICO	
			NOMBRE	PISOS	PISO	PIES
1	W1	Estructuras de Madera Liviana		1-2	1	14
2	W2	Estructuras de Madera para Industria		Todos	2	24
3	S1L	Pórticos de acero compuesto por vigas y columnas. Se usan diafragmas horizontales para transmitir cargas.	Bajo	1-3	2	24
4	S1M		Medio	4-7	5	60
5	S1H		Alto	8+	13	156
6	S2L	Pórticos arriostrados de acero con diagonales. Además tienen columnas y vigas	Bajo	1-3	2	24
7	S2M		Medio	4-7	5	60
8	S2H		Alto	8+	13	156
9	S3L	Pórticos de acero liviano		Todos	1	15
10	S4L	Pórticos de acero con muros de corte. El pórtico resiste la carga vertical y el muro el sismo. También incluye sistema dual.	Bajo	1-3	2	24
11	S4M		Medio	4-7	5	60
12	S4H		Alto	8+	13	156
13	S5L	Pórticos de acero con paredes de bloque sin reforzar para resistir el sismo. Es un edificio antiguo.	Bajo	1-3	2	24
14	S5M		Medio	4-7	5	60
15	S5H		Alto	8+	13	156
16	C1L	Pórticos de vigas y columnas de hormigón armado. Se incluye edificios antiguos y modernos	Bajo	1-3	2	20
17	C1M		Medio	4-7	5	50
18	C1H		Alto	8+	12	120
19	C2L	Pórticos con muros de corte para resistir acción sísmica.	Bajo	1-3	2	20
20	C2M		Medio	4-7	5	50
21	C2H		Alto	8+	12	120
22	C3L	Pórticos de hormigón armado con paredes sin reforzar. Edificios antiguos que pueden tener problemas con sismos.	Bajo	1-3	2	20
23	C3M		Medio	4-7	5	50
24	C3H		Alto	8+	12	120
25	PC1	Casa prefabricada de hormigón.		Todos	1	15
26	PC2L	Pórticos de Concreto Prefabricado con muros de corte de hormigón.	Bajo	1-3	2	20
27	PC2M		Medio	4-7	5	50
28	PC2H		Alto	8+	12	120
29	RM1L	Mampostería Reforzada confinada con elementos de madera o metal	Bajo	1-3	2	20
30	RM1M		Medio	4+	5	50
31	RM2L	Pórticos de Concreto Prefabricado con muros de corte de hormigón.	Bajo	1-3	2	20
32	RM2M		Medio	4-7	5	50
33	RM2H		Alto	8+	12	120
34	URML	Estructuras con mampostería no reforzada	Bajo	1-3	1	15
35	URMM		Medio	3+	3	35
36	MH	Casas Móviles		Todos	1	10

FUENTE: (AGUIAR F. R., 2001)

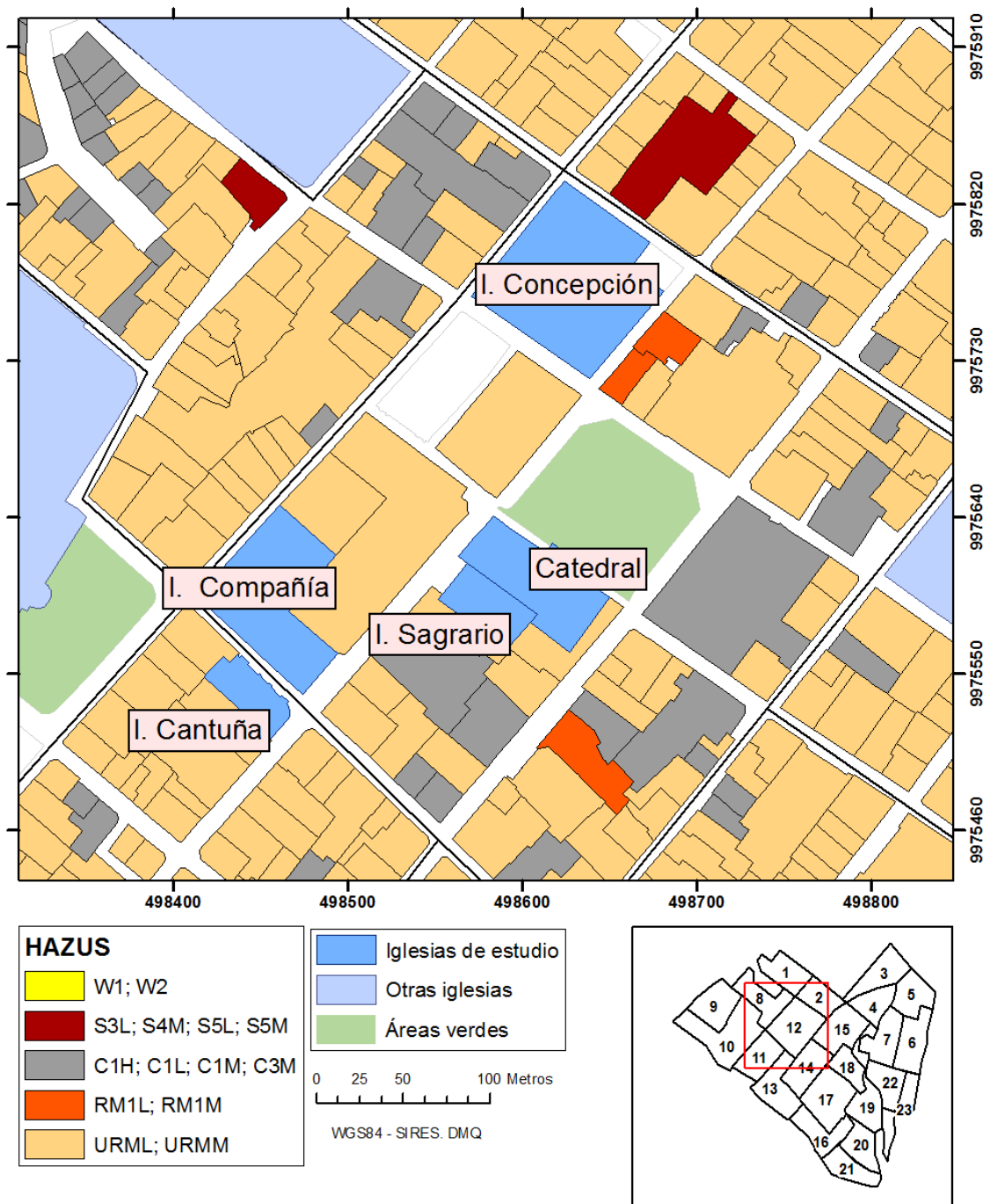
FIGURA No. 24: ASIGNACIÓN DE COLORES POR TIPOLOGÍA



FUENTE: Archivo particular

Para distinguir el empleo de los diferentes colores, se presenta una ampliación de la zona 12, la cual involucra la calle García Moreno conocida también como la calle de las siete cruces. Se tomó esta calle por el significado histórico y cultural, pues en ella se emplazan un conjunto de iglesias, edificaciones emblemáticas del Centro Histórico de Quito, como se anota anteriormente. (Ver FIGURA No. 25)

FIGURA No. 25: AMPLIACIÓN DE LA ZONA 12



FUENTE: Archivo particular

6.3. RESULTADOS DE LA CLASIFICACIÓN

El levantamiento de la información en la zona de estudio (Ver FIGURA No. 22) involucra en términos generales 2606 edificaciones de diferente tipología, clasificadas según la nomenclatura de HAZUS. (Ver TABLA No.11).

TABLA No.11: TIPOLOGÍAS DE LAS EDIFICACIONES DEL CENTRO HISTÓRICO DE LA CIUDAD DE QUITO

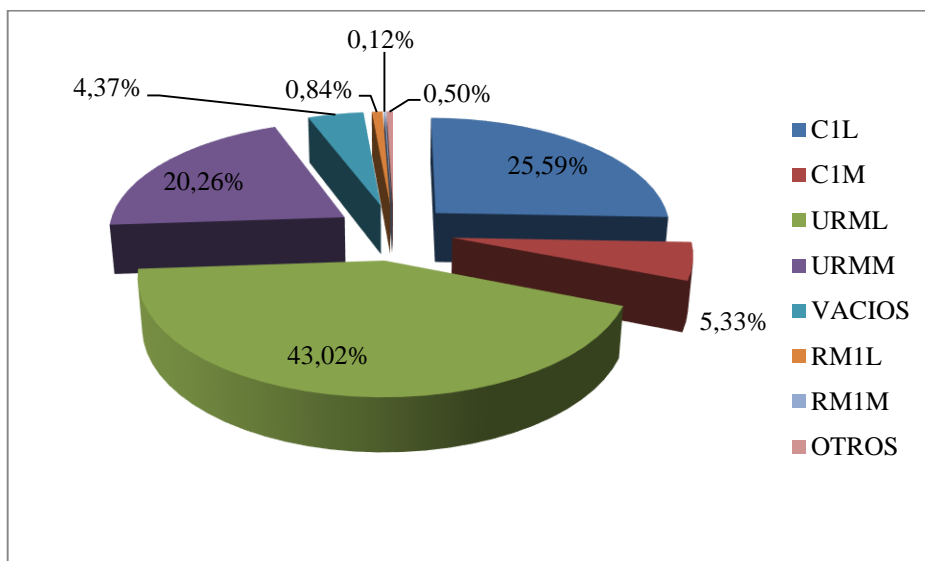
Código secuencial HAZUS	Nomenclatura HAZUS	Número de Edificaciones	%
1	W1	2.00	0.08%
2	W2	1.00	0.04%
9	S3L	1.00	0.04%
11	S4M	1.00	0.04%
13	S5L	1.00	0.04%
14	S5M	2.00	0.08%
16	C1L	667.00	25.59%
17	C1M	139.00	5.33%
18	C1H	3.00	0.12%
19	C2L	0.00	0.00%
23	C3M	1.00	0.04%
29	RM1L	22.00	0.84%
30	RM1M	3.00	0.12%
34	URML	1,121.00	43.02%
35	URMM	528.00	20.26%
	Elementos no registrados	114.00	4.37%
TOTAL:		2,606.00	100.00%

FUENTE: Blanca Chávez

Se especifica que el valor de 4.37% corresponde a las áreas verdes, los solares yermos, las viviendas inaccesibles de las que no se pudo obtener ninguna información.

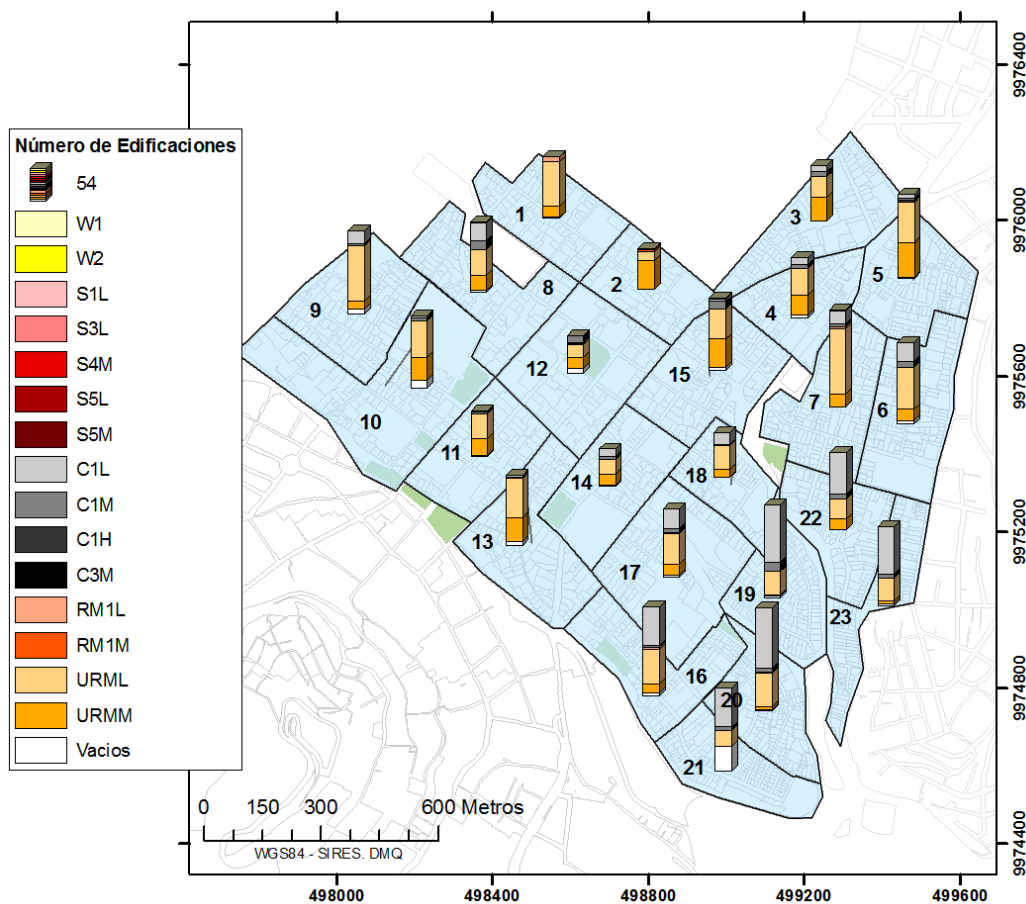
Para tener una idea clara de la distribución de las edificaciones de la muestra caracterizada, se presentan las FIGURA No. 26 Y FIGURA No. 27 respectivamente.

FIGURA No. 26 TIPOLOGÍAS RESUMIDAS DE LAS 2606 VIVIENDAS DEL CHQ ESTUDIADAS.



FUENTE: Archivo particular

FIGURA No. 27 TIPOS DE VIVIENDAS SEGÚN TIPOLOGÍA HAZUS EN LAS 23 ZONAS DE ESTUDIO.



FUENTE: Archivo particular

6.4. ANÁLISIS ESPECÍFICO DE LA TIPOLOGÍA: MAMPOSTERÍA PORTANTE

La TABLA No. 12 resume las estructuras representativas de mampostería portante en los bienes de patrimonio cultural y su clasificación según el proyecto PERPETUATE de acuerdo al principio de similitud, el cual garantiza que los casos estudiados se puedan agrupar en función de similitud geométrica, similitud dinámica y similitud cinemática, en términos de la respuesta estructural ante la ocurrencia de eventos de distinta magnitud. Esto es, se aplica este principio entre las edificaciones del Centro Histórico de Quito y las edificaciones del proyecto PERPETUATE de la siguiente manera: se asume una similitud geométrica cuando las edificaciones responden a las mismas características en forma y tamaño; similitud dinámica cuando la respuesta estructural es la misma ante las sollicitaciones similares; y, similitud cinemática cuando el movimiento del soporte de la estructura es similar. FIGURA No. 26 Y FIGURA No. 27.

Por lo expuesto anteriormente, los bienes examinados corresponden a las clases A, B y E agrupadas según su tipología estructural de mampostería portante que representa más del 60% de la muestra examinada

TABLA No. 12 RESUMEN DE LOS CASOS CONSIDERADOS

CLASE	CASO DE ESTUDIO	SITIO	ESCALA		DAÑO SISMICO	OBSERVACIONES
			BIEN UNICO	CENTRO URBANO		
A	Palacio Arzobispal	DMQ	X	CHQ	SI	
	Palacio de Gobierno	DMQ	X	CHQ	SI	
	Convento Sto. Domingo	DMQ	X	CHQ	SI	
	Convento La Merced	DMQ	X	CHQ	NO	
	Convento La Concepción	DMQ	X	CHQ	NO	
	Hotel Plaza Grande	DMQ	X	CHQ	NO	
B	Iglesia Sto Domingo	DMQ	X	CHQ	SI	
	Iglesia San Francisco	DMQ	X	CHQ	SI	

TABLA 12 CONTINUACIÓN...

B	Iglesia Catedral Metropolitana	DMQ	X	CHQ	SI	
	Iglesia del Sagrario	DMQ	X	CHQ	SI	
	Iglesia La Compañía	DMQ	X	CHQ	SI	
	Iglesia Santa Bárbara	DMQ	X	CHQ	SI	
	Iglesia La Concepción	DMQ	X	CHQ	SI	
	Iglesia San Lázaro	DMQ	X	CHQ	SI	
	Iglesia Basílica Voto Nacional	DMQ	X	CHQ	SI	
	Monasterio Carmen Alto	DMQ	X	CHQ	SI	
E	Casa Manuela Saenz	DMQ	X	CHQ	SI	*
	Casa 1028	DMQ	X	CHQ	SI	*
	Casa Sucre	DMQ	X	CHQ	SI	*
	Casa Benalcázar	DMQ	X	CHQ	SI	*
	Mansión Landázuri	DMQ	X	CHQ	SI	*
	Museo de la Ciudad	DMQ	X	CHQ	SI	*
	Museo Numismático	DMQ	X	CHQ	SI	*
	Biblioteca Nacional	DMQ	X	CHQ	SI	*
	Otras	DMQ	X	CHQ	SI	*
	* Este conjunto representa aproximadamente el 90% de la tipología URML					

FUENTE: Blanca Chávez

6.5. ANÁLISIS ESPECÍFICO DE LA TIPOLOGÍA: HORMIGÓN ARMADO

6.5.1. CURVAS DE CAPACIDAD DE LAS TIPOLOGÍAS ENCONTRADAS EN EL CENTRO HISTÓRICO DE QUITO.

Al ser edificaciones que datan de los años 1500 y de 1900, como se menciona anteriormente, se puede señalar que las edificaciones del Centro Histórico de Quito no tienen diseño sismo-resistente.

En sus inicios, las edificaciones de hormigón armado se diseñaron únicamente para carga vertical verificando que la cuantía de acero esté dentro del rango establecido por la norma.

Para las tipologías de hormigón armado encontradas en las edificaciones del CHQ que no cuentan con diseño sísmico, la Metodología HAZUS determina los valores de los puntos de cedencia y de última resistencia con los que se generan las curvas de capacidad, ver TABLA No. 13

TABLA No. 13 VALORES PARA LOS PUNTOS DE CEDENCIA Y DE CAPACIDAD ÚLTIMA. PARA NIVEL DE DISEÑO SÍSMICO MUY BAJO (NO SE CONSIDERA SISMO)

Clasificación	Tipología	Punto del Nivel de Cedencia		Punto de Capacidad Última	
		Dy (plg)	Ay (g)	Du (plg)	Au (g)
1	W1	0.240	0.200	4.320	0.600
2	W2	0.160	0.100	2.350	0.250
9	S3L	0.160	0.100	1.880	0.200
11	S4M	0.270	0.067	2.460	0.150
13	S5L	0.120	0.100	1.200	0.200
14	S5M	0.340	0.083	2.270	0.167
16	C1L	0.100	0.062	1.760	0.187
17	C1M	0.290	0.052	3.460	0.156
18	C1H	0.500	0.024	4.520	0.073
19	C2L	0.120	0.100	1.800	0.250
23	C3M	0.260	0.083	1.950	0.188
29	RM1L	0.160	0.133	1.920	0.267
30	RM1M	0.350	0.111	2.770	0.222
34	URML	0.240	0.200	2.400	0.400
35	URMM	0.270	0.111	1.810	0.222

FUENTE: (AGUIAR F. R., 2001)

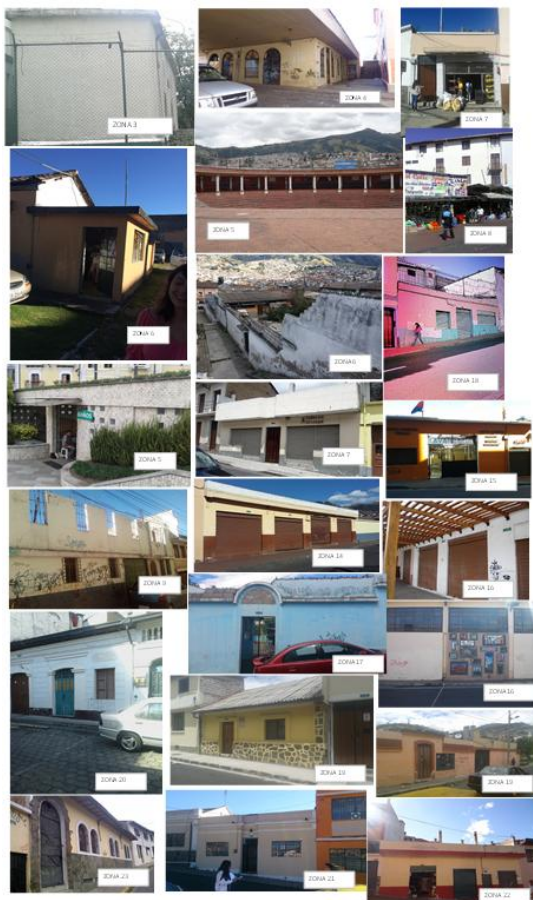
6.5.2. TIPOLOGÍA C1L PARA EL CENTRO HISTÓRICO DE QUITO.

La tipología C1L tiene importancia en este estudio por dos razones: la primera, representa un porcentaje importante de las edificaciones de la muestra; la segunda, esta tipología se mantiene en la mayoría de las edificaciones de la ciudad de Quito, que no se encuentran en el centro histórico.

Para la tipología C1L cuyo porcentaje es 25.59% de las edificaciones en estudio, se aplican los programas, con un nivel de diseño sísmico muy bajo, para encontrar las curvas de capacidad, puntos de desempeño y derivas de piso, propuestos por Mora y CEINCILAB (Mora, 2015).

En las figuras FIGURA No. 28, FIGURA No. 29 y FIGURA No. 30 se visualizan las edificaciones que corresponden a esta tipología C1L para uno, dos y tres pisos y se infiere que por lo general se forman, en su mayoría, por pórticos de dos y tres vanos, con longitudes entre vanos que fluctúan entre 3m mínimo y 5 metros máximo.

FIGURA No. 28 TIPOLOGÍA C1L EN EL CHQ EN VIVIENDAS DE UN PISO



FUENTE: Archivo particular

FIGURA No. 29 TIPOLOGÍA C1L EN EL CHQ EN VIVIENDAS DE DOS PISOS



FUENTE: Archivo particular

FIGURA No. 30 TIPOLOGÍA C1L EN EL CHQ EN VIVIENDAS DE TRES PISOS



FUENTE: Archivo particular

El grupo de la muestra correspondiente a tipología C1L, se clasifica según el número de pisos de acuerdo a la TABLA No. 14.

TABLA No. 14 CLASIFICACIÓN DE LA MUESTRA C1L POR NÚMERO DE PISOS

	UNIDADES	PORCENTAJE
UN PISO	139	20.84%
DOS PISOS	248	37.18%
TRES PISOS	280	41.98%
	667	100.00%

FUENTE: Blanca Chávez

A continuación se presenta un análisis sobre las edificaciones tipo que se consideran en el Centro Histórico de Quito con la tipología C1L.

6.5.2.1. C1L de Tres Plantas

Se eligen pórticos modelo cuyas columnas son de 30x30 cm, con acero de refuerzo de 8 varillas $\Phi 12$ mm y estribos $\Phi 8$ mm cada 10 cm en los extremos y cada 20 cm en el centro de luz, además se consideran diferentes luces entre vanos que van de 3 a 5 m. Para los edificios que tienen luces de 5m en cada vano, se considera adicionalmente el análisis con columnas de 35x35 cm y acero de refuerzo principal de 8 $\Phi 12$ y E $\Phi 8@10/20$.

Para el programa se considera además el suelo tipo D (TABLA No. 4) propio del Centro Histórico de Quito y zona sísmica 5 (TABLA No.1).

Se obtienen los siguientes resultados:

6.5.2.1.1. Tres Plantas - Dos Vanos

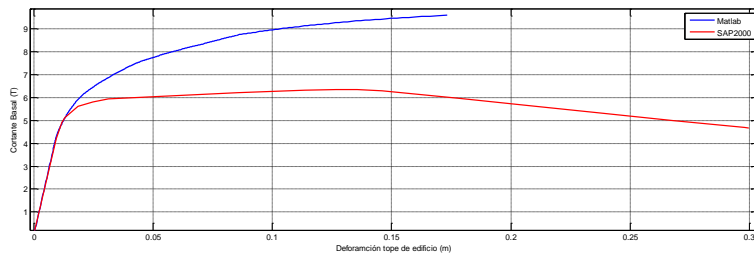
Pórtico de dos vanos y luces de 3m.-

Punto de desempeño: 1 GDL (grado de libertad):	0.114 m
Y (Punto Y):	7.5973 m/s ²
Múltiples GDL:	0.143 m

V (cortante basal)= 9.186 Ton
 Deriva máxima: 2.17%

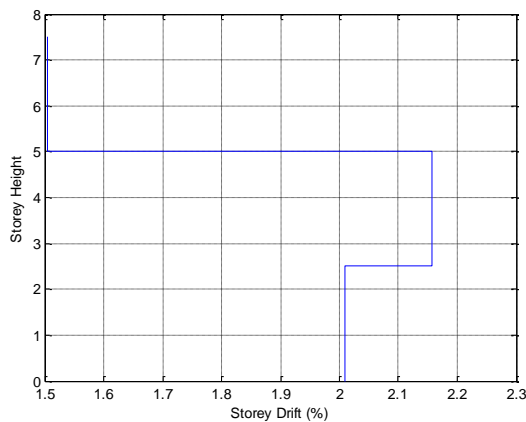
La FIGURA No. 31 presenta la diferencia entre las curvas de capacidad obtenidas con el programa de (Mora, 2015) y SAP 2000, se presenta

FIGURA No. 31 CURVAS DE CAPACIDAD, PÓRTICO DE 2 VANOS Y LUCES DE 3m.



FUENTE: Blanca Chávez

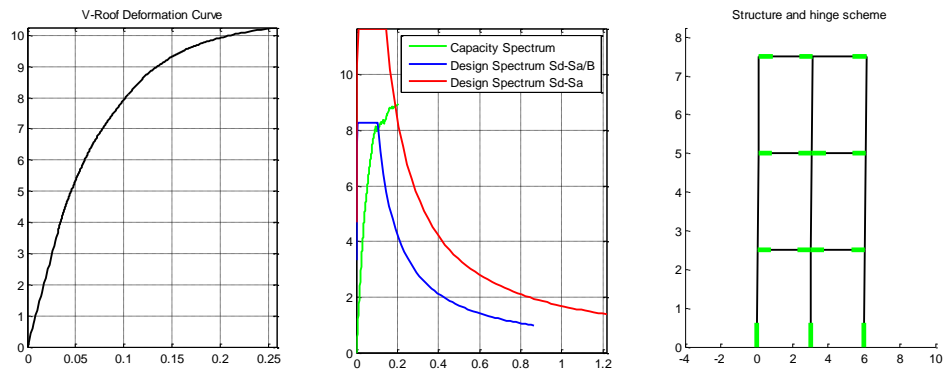
FIGURA No. 32 DERIVAS DE PISO PARA UN PÓRTICO DE 2 VANOS, 3M DE LUZ Y 3 PLANTAS.



FUENTE: Blanca Chávez

La FIGURA No. 32 muestra las derivas que se obtienen para el análisis de un edificio con dos vanos y 3m de luz entre vanos. La FIGURA No. 33 muestra los resultados obtenidos para este mismo edificio.

FIGURA No. 33 PUNTO DE DESEMPEÑO PARA EL PÓRTICO DE 2 VANOS, 3m DE LUZ Y TRES PLANTAS

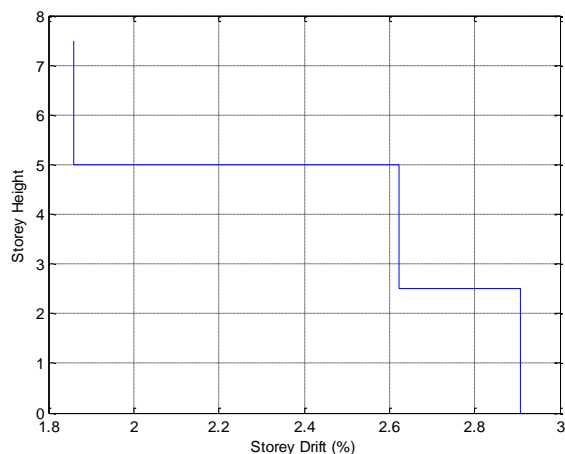


FUENTE: Blanca Chávez

Pórtico de dos vanos y luces de 4m.-

Punto de desempeño: 1GDL:	0.148 m
Múltiples GDL:	0.185 m
V =	9.344 Ton
Deriva:	2.907%
Y pto:	5.7453 m/s ²

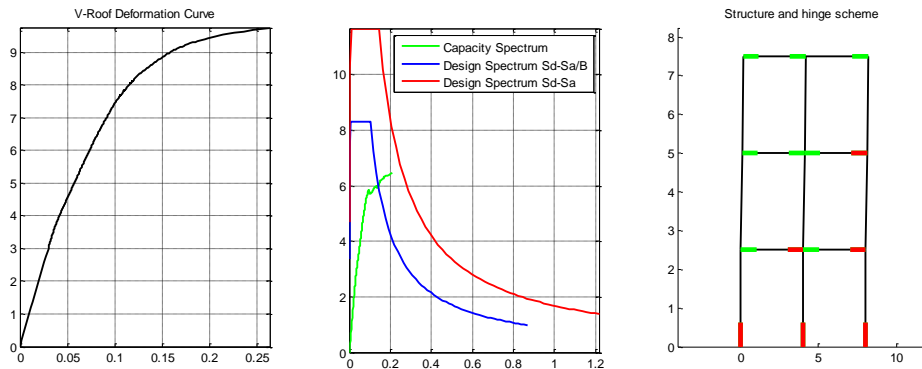
FIGURA No. 34 DERIVAS DE PISO PARA UN PÓRTICO DE 2 VANOS Y 4M DE LUZ.



FUENTE: Blanca Chávez

Sus resultados son los siguientes:

FIGURA No. 35 PUNTO DE DESEMPEÑO PARA EL PÓRTICO DE 2 VANOS Y 4m DE LUZ

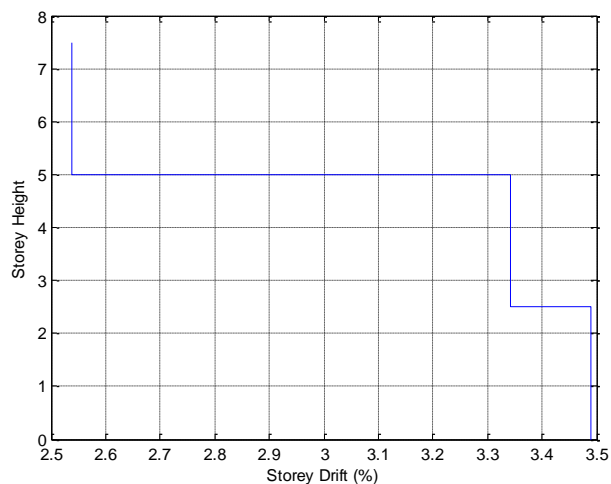


FUENTE: Blanca Chávez

Pórtico de dos vanos y luces de 5m.-

Punto de desempeño: 1GDL:	0.186 m.
Múltiples GDL:	0.234 m.
V =	8.945 Ton
Deriva:	3.49%
Y pto:	4. 532 m/s ²

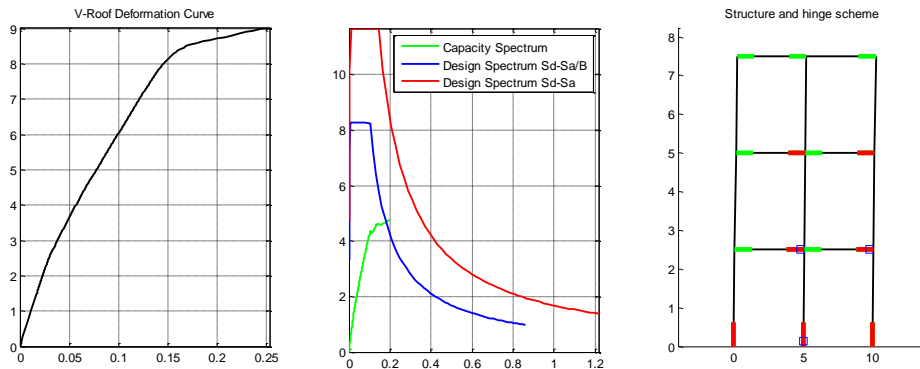
FIGURA No. 36 DERIVAS DE PISO PARA EL PÓRTICO DE 2 VANOS, 5M DE LUZ, Y TRES PLANTAS



FUENTE: Blanca Chávez

Tampoco cumple para la deriva máxima.

FIGURA No. 37 PUNTO DE DESEMPEÑO PARA EL PÓRTICO DE 2 VANOS, 5M DE LUZ Y TRES PLANTAS



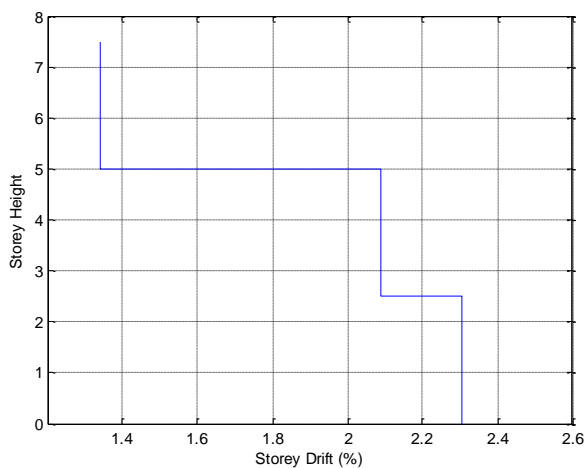
FUENTE: Blanca Chávez

6.5.2.1.2. Tres Plantas - Tres Vanos

Pórtico de tres vanos y luces de 3m.-

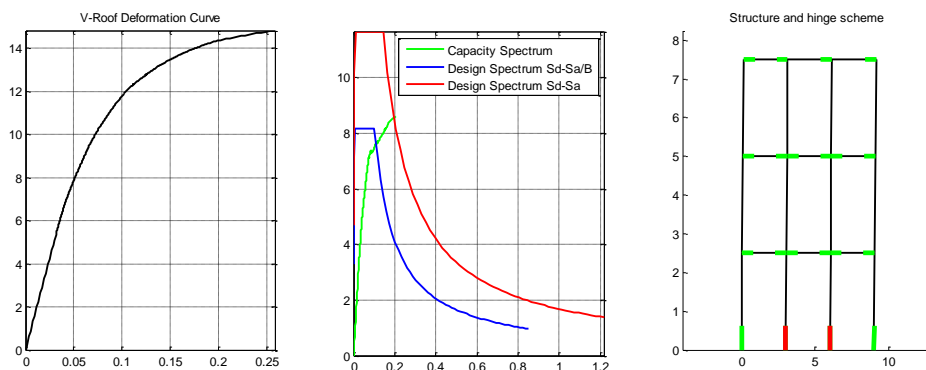
Punto de desempeño: 1GDL:	0.119 m
Múltiples GDL:	0.143 m
V =	13.326 Ton
Deriva:	2.305%
Y pto:	7.1372 m/s ²

FIGURA No. 38 DERIVAS DE PISO PARA UN PÓRTICO DE 3 VANOS Y 3m DE LUZ.



FUENTE: Blanca Chávez

FIGURA No. 39 PUNTO DE DESEMPEÑO PARA EL PÓRTICO DE 3 VANOS Y 3m DE LUZ

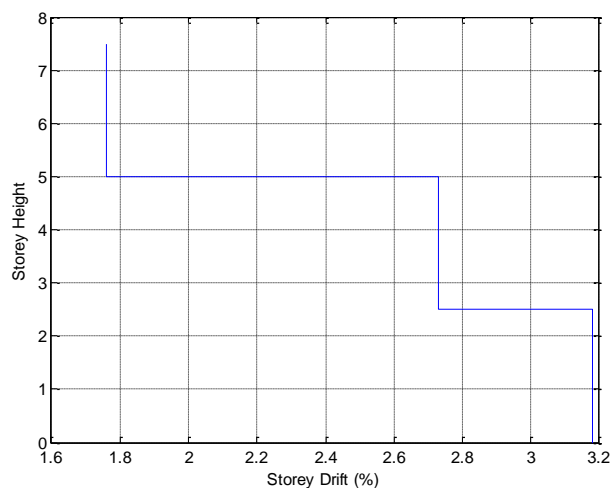


FUENTE: Blanca Chávez

Pórtico de tres vanos y luces de 4m.-

Punto de desempeño: 1GDL:	0.155 m
Múltiples GDL:	0.192 m
V =	13.467 Ton
Deriva:	3.179%
Y pto:	5. 4575 m/s ²

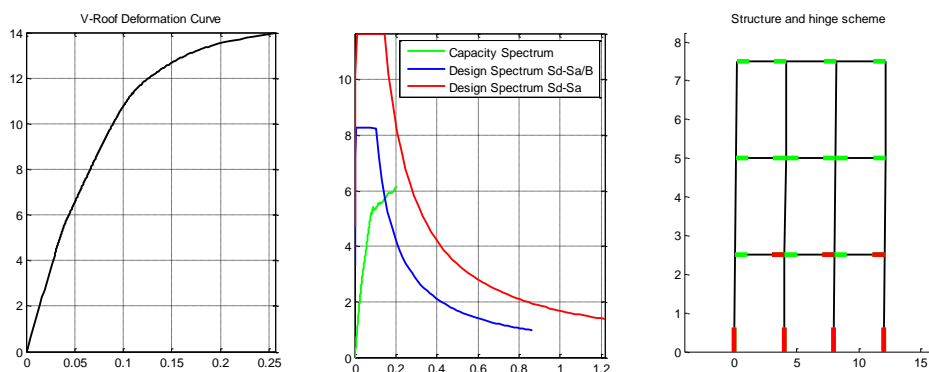
FIGURA No. 40 DERIVAS DE PISO PARA UN PÓRTICO DE 3 VANOS Y 4m DE LUZ.



FUENTE: Blanca Chávez

Su deriva es muy superior a la máxima y sus resultados son:

FIGURA No. 41 PUNTO DE DESEMPEÑO PARA EL PÓRTICO DE 3 VANOS Y 4m DE LUZ



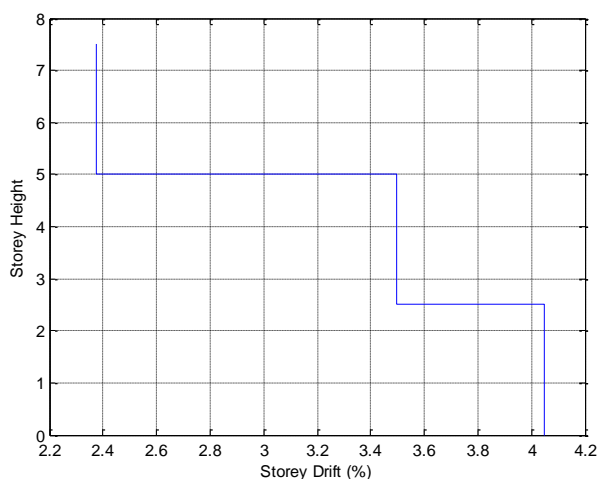
FUENTE: Blanca Chávez

Pórtico de tres vanos y luces de 5m.-

Punto de desempeño: 1GDL:	0.200 m
Múltiples GDL:	0.248 m
V =	12.908 Ton
Deriva:	4.049 %
Y pto:	4.3967 m/s ²

Derivas de piso:

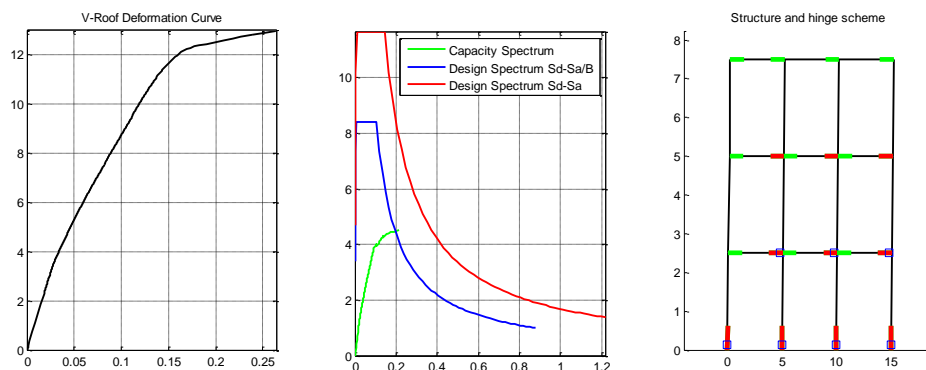
FIGURA No. 42 DERIVAS DE PISO PARA UN PÓRTICO DE 3 VANOS, 5 m DE LUZ Y 3 PLANTAS



FUENTE: Blanca Chávez

Sus resultados son los siguientes:

FIGURA No. 43 PUNTO DE DESEMPEÑO PARA EL PÓRTICO DE 3 VANOS, 5m DE LUZ Y 3 PLANTAS

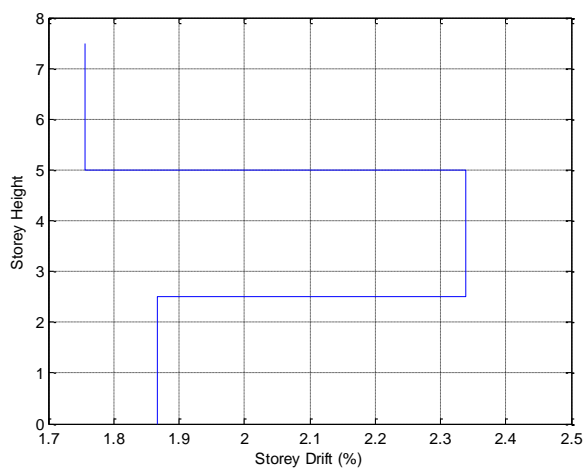


FUENTE: Blanca Chávez

*Pórtico de tres vanos y luces de 5m con columnas de 35*35 cm, y 6φ12.-*

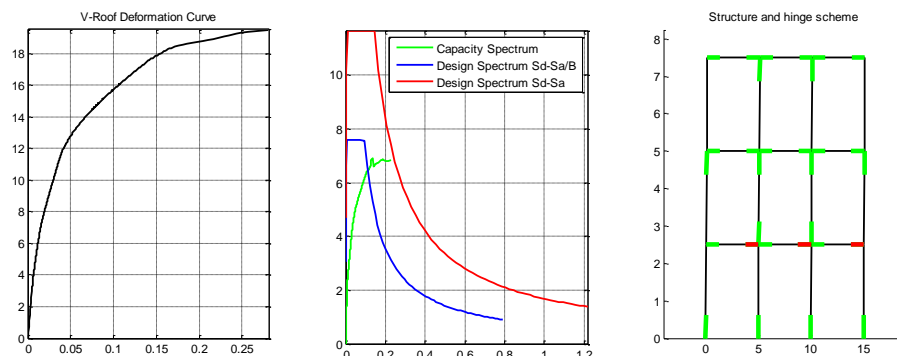
Punto de desempeño: 1GDL:	0.118 m
Múltiples GDL:	0.149 m
V =	17.837 Ton
Deriva:	2.338%

FIGURA No. 44 DERIVAS DE PISO PARA UN PÓRTICO DE 3 VANOS, 5m DE LUZ, 3 PLANTAS Y CON COLUMNAS DE 35*35 cm.



FUENTE: Blanca Chávez

FIGURA No. 45 PUNTO DE DESEMPEÑO PARA EL PÓRTICO DE 3 VANOS, 5m DE LUZ, 3 PLANTAS Y CON COLUMNAS DE 35*35 cm



FUENTE: Blanca Chávez

6.5.2.2. C11 de Dos Plantas

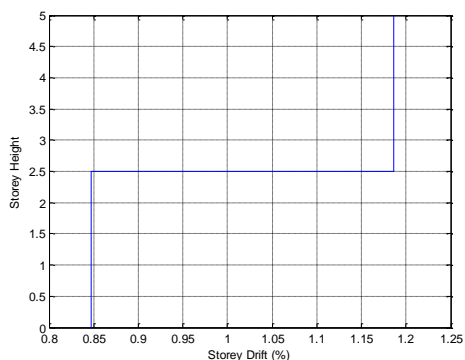
Al igual que para las estructuras de tres plantas, para estos pórticos se consideran columnas de 30x30 cm, con acero de refuerzo mínimo de 8 varillas $\Phi 12$ mm y estribos $\Phi 8$ mm cada 10 cm en los extremos y cada 20 cm en el centro de luz. Luces entre columnas que van entre 3 y 5 m.

6.5.2.2.1. Dos Plantas - Dos Vanos

Pórtico de dos vanos y luces de 3m.-

Punto de desempeño: 1GDL:	0.042 m
Múltiples GDL:	0.051 m
V =	8.078 Ton
Deriva:	1.186%
Y pto:	11.6535 m/s ²

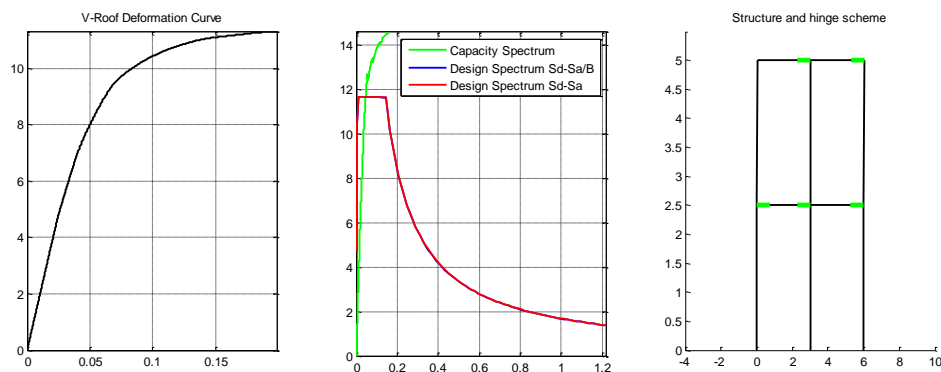
FIGURA No. 46 DERIVAS DE PISO PARA PÓRTICOS DE 2V – 3m – 2p



FUENTE: Blanca Chávez

Sus resultados son:

FIGURA No. 47 PUNTO DE DESEMPEÑO PARA EL PÓRTICO DE 2V – 3m – 2p

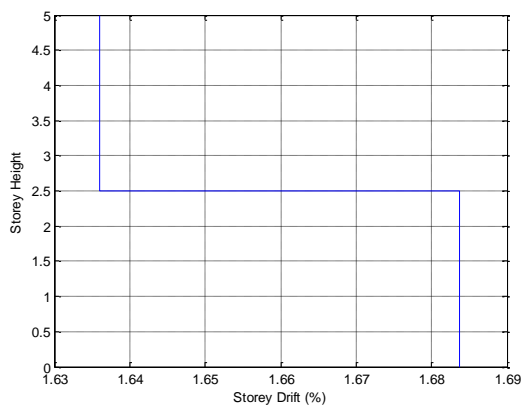


FUENTE: Blanca Chávez

Pórtico de dos vanos y luces de 4m.-

Punto de desempeño: 1GDL:	0.068 m.
Múltiples GDL:	0.083 m.
V =	9.442 Ton
Deriva:	1.684%
Y pto:	8.9238 m/s ²

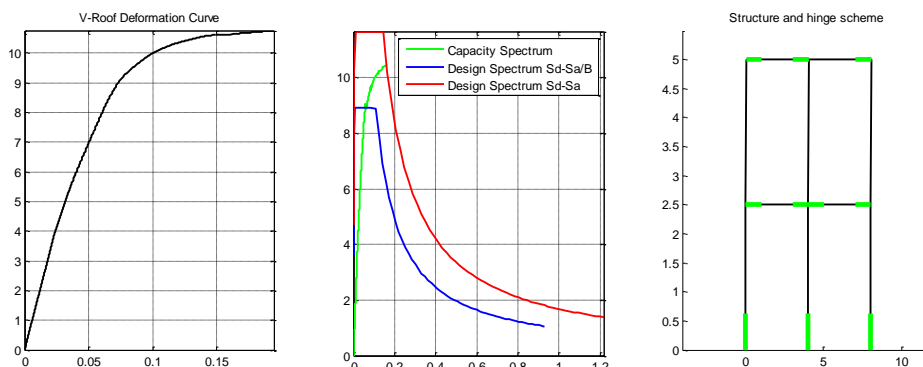
FIGURA No. 48 DERIVAS DE PISO PARA UN PÓRTICO DE 2V – 4m – 2p



FUENTE: Blanca Chávez

Sus resultados son:

FIGURA No. 49 PUNTO DE DESEMPEÑO PARA EL PÓRTICO DE 2V – 4m – 2p

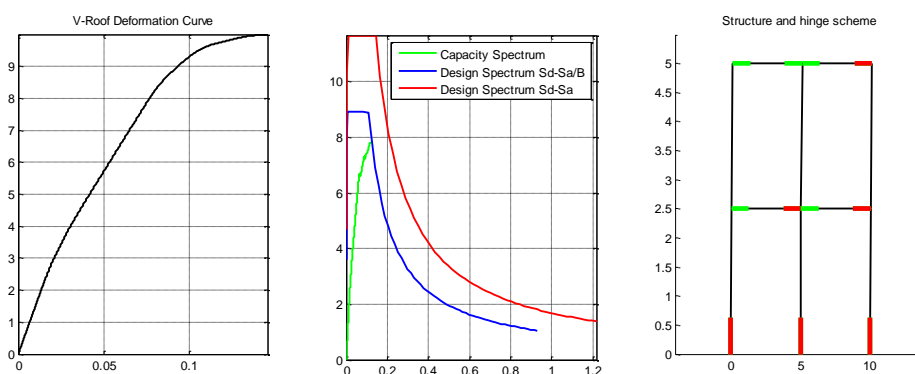


FUENTE: Blanca Chávez

Pórtico de dos vanos y luces de 5m.-

Punto de desempeño: 1GDL:	0.1212 m. cercano
Múltiples GDL:	0.1456 m. cercano
V =	9.997 Ton
Deriva:	colapsó
Y pto:	7.8144 m/s ²

FIGURA No. 50 SIN PUNTO DE DESEMPEÑO EN EL PÓRTICO DE 2V – 5m – 2p



FUENTE: Blanca Chávez

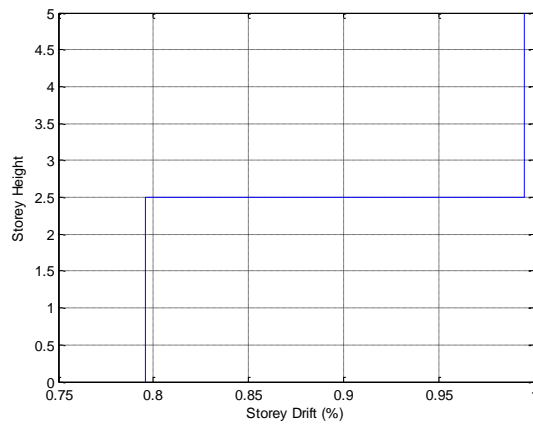
6.5.2.2.2. *Dos plantas - tres vanos*

Pórtico de tres vanos y luces de 3m.-

Punto de desempeño: 1GDL:	0.037 m. cercano
Múltiples GDL:	0.045 m. cercano
V =	10.778 Ton

Deriva: 0.995 %
Y pto: 10.9604 m/s²

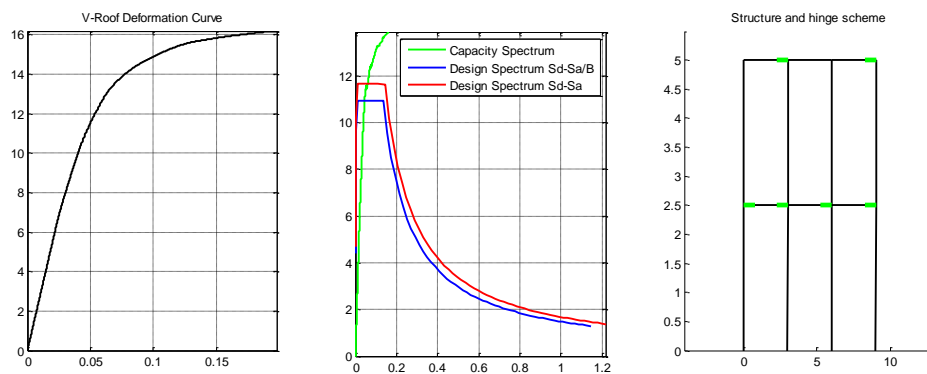
FIGURA No. 51 DERIVAS DE PISO PARA EL PÓRTICO DE 3V – 3m -2p



FUENTE: Blanca Chávez

Sus resultados son:

FIGURA No. 52 PUNTO DE DESEMPEÑO PARA EL PÓRTICO DE 3V – 3m – 2p

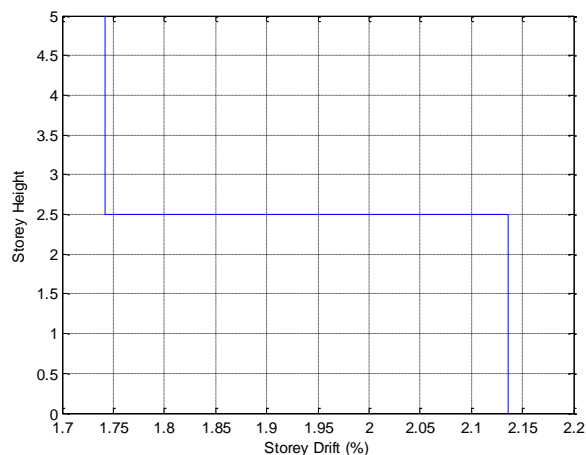


FUENTE: Blanca Chávez

Pórtico de tres vanos y luces de 4m.-

Punto de desempeño: 1GDL: 0.081 m. cercano
Múltiples GDL: 0.097 m. cercano
V = 14.076 Ton
Deriva: 2.137 %
Y pto: 8.4726 m/s²

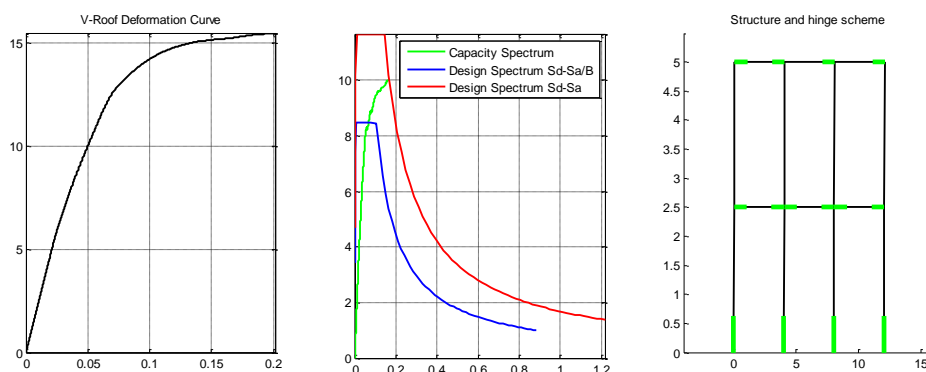
FIGURA No. 53 DERIVAS DE PISO PARA EL PÓRTICO DE 3V – 4m – 2p



FUENTE: Blanca Chávez

Sus resultados son:

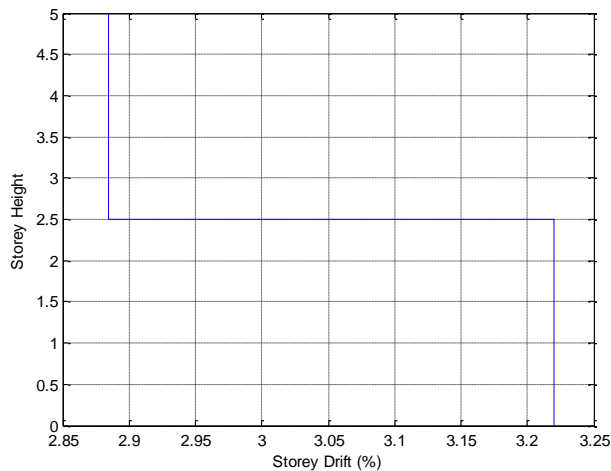
FIGURA No. 54 PUNTO DE DESEMPEÑO PARA EL PÓRTICO DE 3V – 4m – 2p



FUENTE: Blanca Chávez

Pórtico de tres vanos y luces de 5m.-

Punto de desempeño: 1GDL:	0.128 m. cercano
Múltiples GDL:	0.153 m. cercano
V =	14.297 Ton
Deriva:	3.22 %
Y pto:	7.2964 m/s ²

FIGURA No. 55 DERIVAS DE PISO PARA UN PÓRTICO DE 3V – 5m – 2p

FUENTE: Blanca Chávez

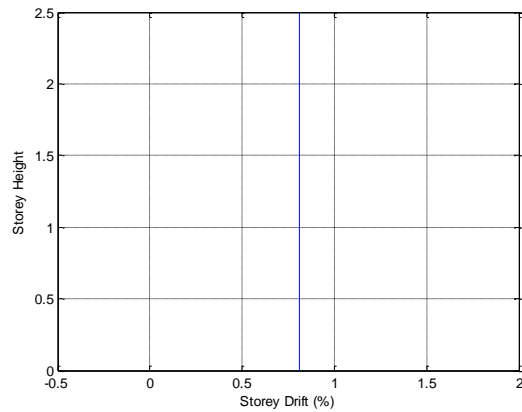
6.5.2.3. C11 de Una Planta

Al igual que para las estructuras de dos y tres plantas, para estos pórticos se consideran columnas de 30x30 cm, con acero de refuerzo mínimo de 8 varillas $\Phi 12$ mm y estribos $\Phi 8$ mm cada 10 cm en los extremos y cada 20 cm en el centro de luz. Luces entre vanos de 3 a 5 m.

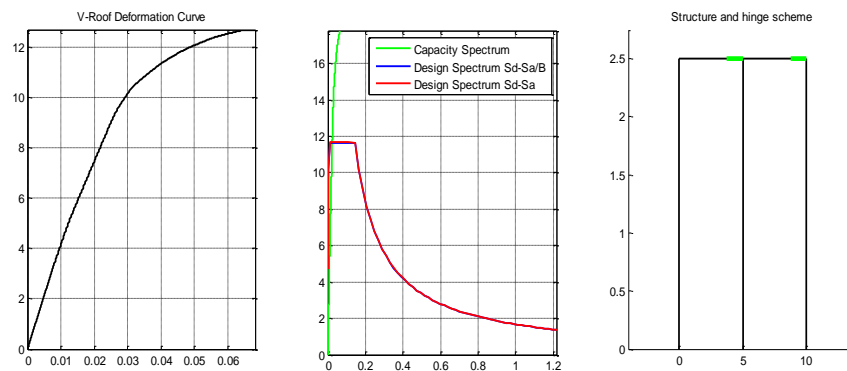
6.5.2.3.1. Una planta - dos vanos

Pórtico de dos vanos y luces de 3m.-

Punto de desempeño: 1GDL:	0.02 m
Múltiples GDL:	0.02 m
V =	7.538 Ton
Deriva:	0.81%
Y pto:	11.6535 m/s ²

FIGURA No. 56 DERIVAS DE PISO PARA UN PÓRTICO DE 2V – 3m – 1p

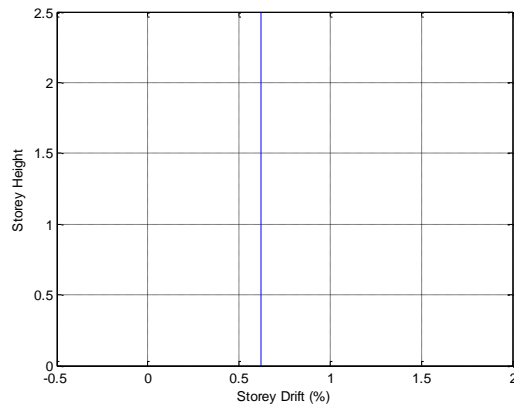
FUENTE: Blanca Chávez

FIGURA No. 57 PUNTO DE DESEMPEÑO PARA UN PÓRTICO DE 2V – 3m – 1p

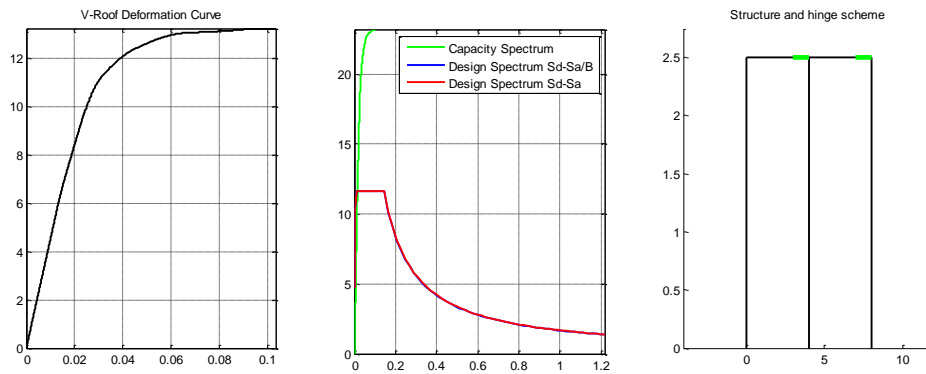
FUENTE: Blanca Chávez

Pórtico de dos vanos y luces de 4m.-

Punto de desempeño: 1GDL:	0.016 m
Múltiples GDL:	0.016 m
V =	6.883 Ton
Deriva:	0.62%
Y pto:	11.6535 m/s ²

FIGURA No. 58 DERIVAS DE PISO PARA UN PÓRTICO DE 2V – 4m – 1p

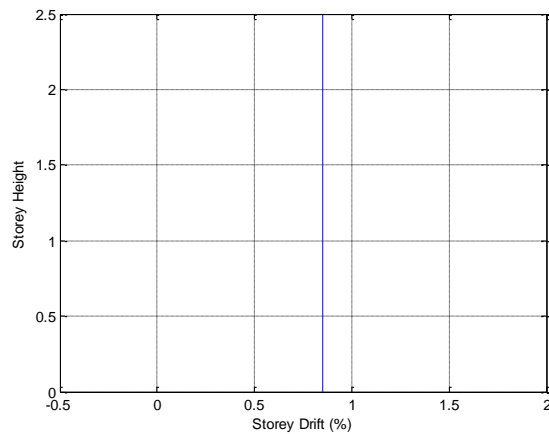
FUENTE: Blanca Chávez

FIGURA No. 59 PUNTO DE DESEMPEÑO PARA EL PÓRTICO DE 2V – 4m – 1p

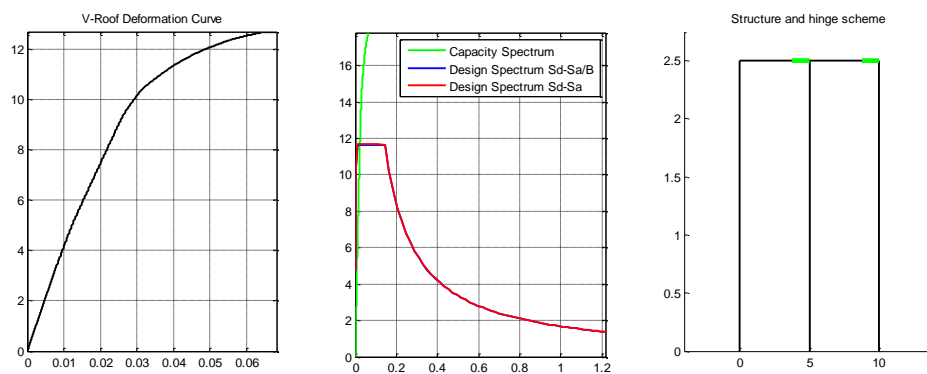
FUENTE: Blanca Chávez

Pórtico de dos vanos y luces de 5m.-

Punto de desempeño: 1GDL:	0.021 m
Múltiples GDL:	0.021 m
V =	7.875 Ton
Deriva:	0.853 %
Y pto:	11.6535 m/s ²

FIGURA No. 60 DERIVAS DE PISO PARA PÓRTICOS DE 2V – 5m – 1p

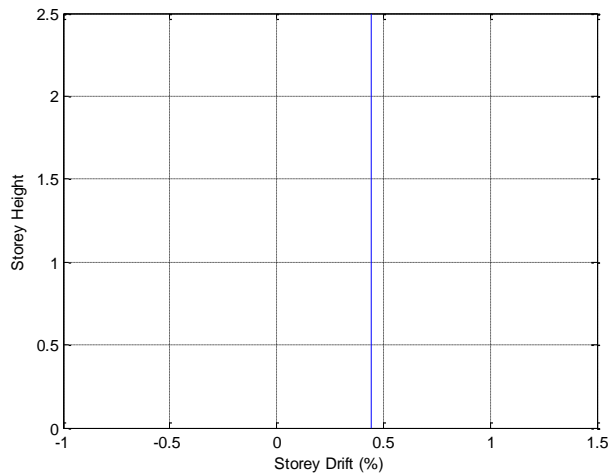
FUENTE: Blanca Chávez

FIGURA No. 61 PUNTO DE DESEMPEÑO PARA EL PÓRTICO DE 2V – 5m – 1p

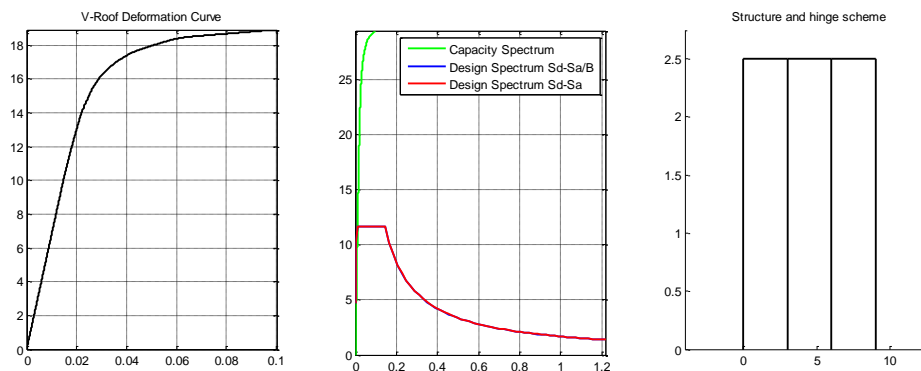
FUENTE: Blanca Chávez

6.5.2.3.2. Una Planta - Tres Vanos***Pórtico de tres vanos y luces de 3m.-***

Punto de desempeño:	1GDL:	0.011 m
	Múltiples GDL:	0.011 m
	V =	7.542 Ton
	Deriva:	0.443 %
	Y pto:	11.537 m/s ²

FIGURA No. 62 DERIVAS DE PISO PARA PÓRTICOS DE 3V – 3m – 1p

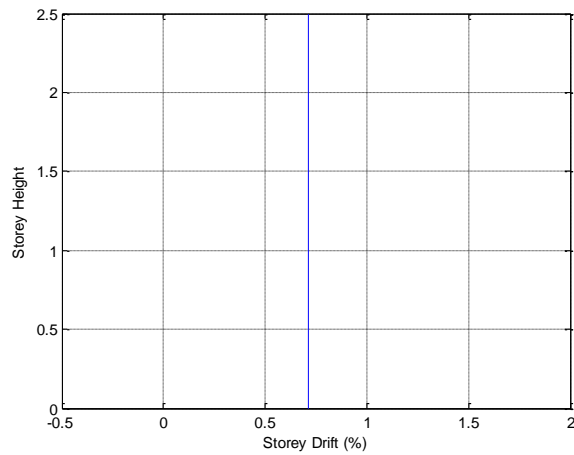
FUENTE: Blanca Chávez

FIGURA No. 63 PUNTO DE DESEMPEÑO PARA EL PÓRTICO DE 3V – 3m – 1p

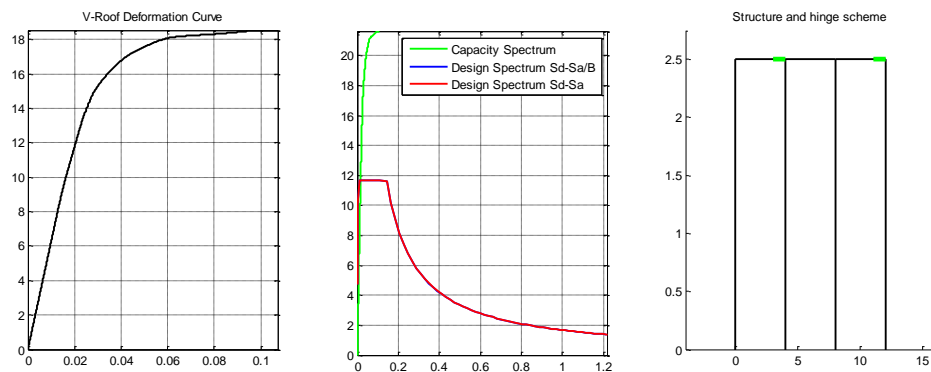
FUENTE: Blanca Chávez

Pórtico de tres vanos y luces de 4m.-

Punto de desempeño: 1GDL:	0.018 m
Múltiples GDL:	0.018 m
V =	10.691 Ton
Deriva:	0.711 %
Y pto:	11.6535 m/s ²

FIGURA No. 64 DERIVAS DE PISO PARA PÓRTICOS DE 3V – 4m – 1p

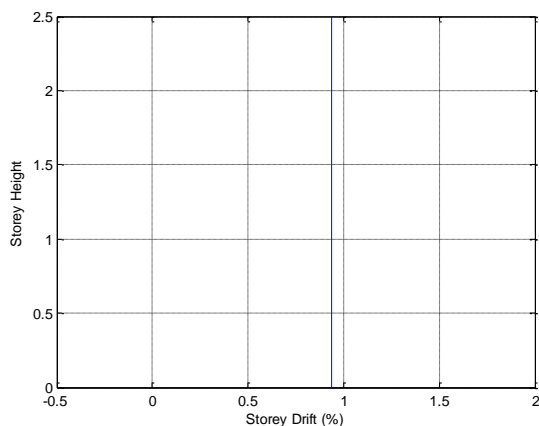
FUENTE: Blanca Chávez

FIGURA No. 65 PUNTO DE DESEMPEÑO PARA EL PÓRTICO DE 3V – 4m – 1p

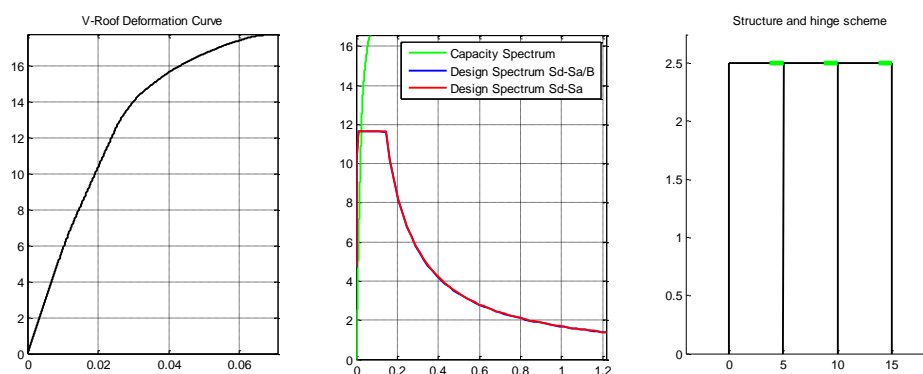
FUENTE: Blanca Chávez

Pórtico de tres vanos y luces de 5m.-

Punto de desempeño: 1GDL:	0.023 m
Múltiples GDL:	0.023 m
V =	11.855 Ton
Deriva:	0.939 %
Y pto:	11.6535 m/s ²

FIGURA No. 66 DERIVAS DE PISO PARA PÓRTICOS DE 3V – 5m – 1p

FUENTE: Blanca Chávez

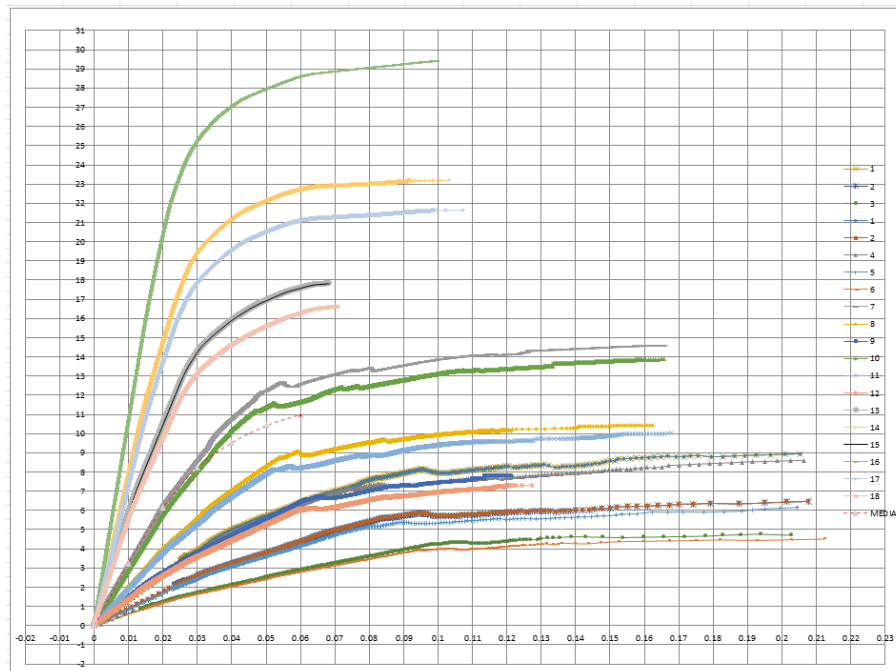
FIGURA No. 67 PUNTO DE DESEMPEÑO PARA EL PÓRTICO DE 3V – 5m – 1p

FUENTE: Blanca Chávez

6.5.3. SÍNTESIS DE LAS CURVAS DE CAPACIDAD PARA LAS EDIFICACIONES TIPO C1L

Del análisis de las estructuras tipo C1L en el Centro Histórico de Quito, se obtienen las 18 curvas de capacidad que se resumen en la FIGURA No. 68, en ella se muestra además la curva de capacidad media para las estructuras frágiles.

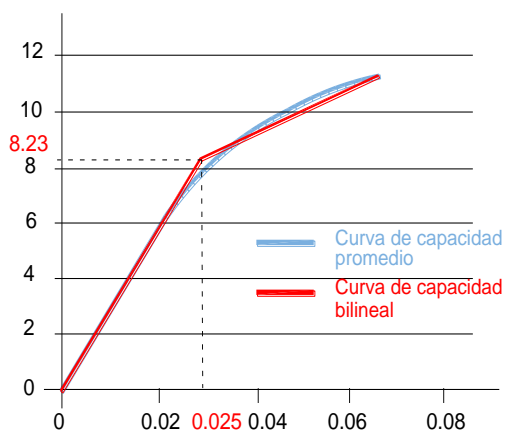
FIGURA No. 68 CURVAS DE CAPACIDAD PARA LAS ESTRUCTURAS TIPO C1L Y LA CURVA PROMEDIO PARA LAS ESTRUCTURAS FRÁGILES



FUENTE: Blanca Chávez

En la curva promedio se obtiene la curva bilineal correspondiente, siguiendo el criterio de igualar las áreas bajo las curvas, como se presenta a continuación (FIGURA No. 69):

FIGURA No. 69 CURVA PROMEDIO DE CAPACIDAD PARA C1L DEL CHQ Y SU EQUIVALENTE CURVA BILINEAL

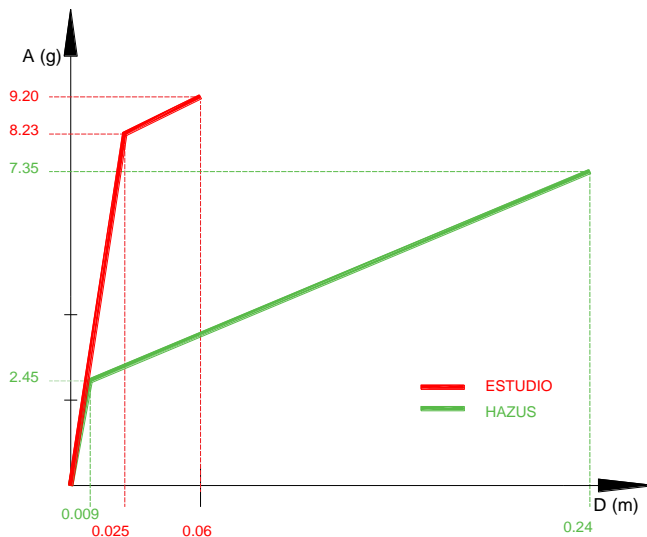


FUENTE: Blanca Chávez

El área bajo la curva de capacidad promedio obtenida con el programa es de 0.4309 y el área bajo la curva bilineal con el punto (0.025, 8.23) es 0.4307; con lo que se puede concluir que son equivalentes.

Si se comparan las curvas bilineales obtenidas mediante el estudio y la referida por HAZUS (PARRA, 2016), Se obtiene la FIGURA No. 70:

FIGURA No. 70 COMPARACIÓN ENTRE ESPECTROS DE CAPACIDAD ESTUDIO - HAZUS.



FUENTE: Blanca Chávez

La ductilidad queda de la siguiente manera:

$$\mu = \frac{D_u}{D_y} \quad (6.1)$$

HASUS: $\mu = 1.76$

Estudio: $\mu = 2.027/0.8173 = 2.48$

Es decir, la ductilidad es mayor en las estructuras del Centro Histórico de Quito, pese a que se considera estructuras sin diseño sísmico y con acero de refuerzo mínimo para carga vertical establecido por la norma (NEC15).

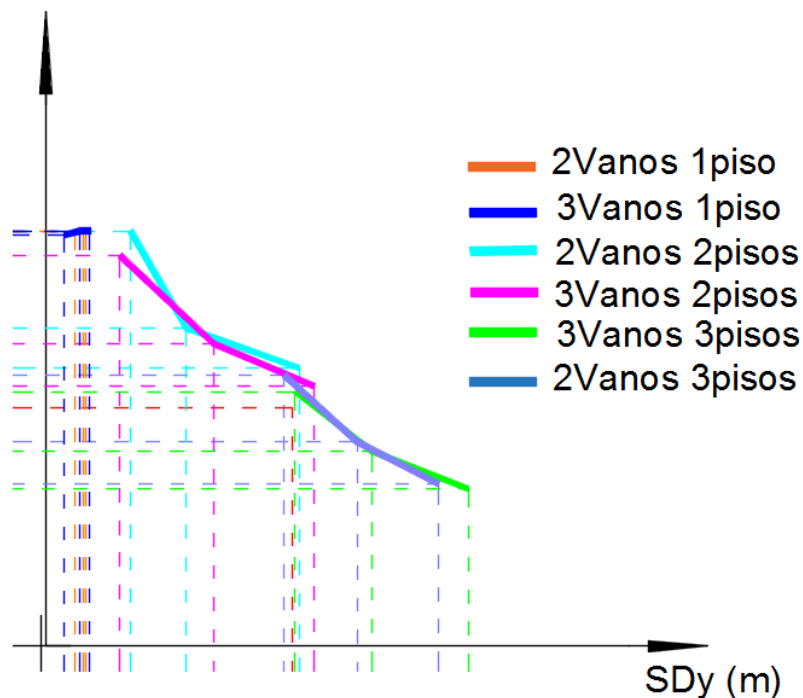
Por otra parte, con HAZUS se encuentra que la aceleración última $A_u = 0.187g$ y en este estudio, $A_u = 0.086$. En la FIGURA No. 70 se puede visualizar que las curvas en la etapa elástica tienen la misma pendiente, y son paralelas en la zona de última capacidad, lo que demuestra la necesidad de calibrar los espectros de capacidad sísmica del método HAZUS para las estructuras del Ecuador.

Un análisis adicional, muestra que el punto de desempeño que se obtuvo analíticamente (TABLA No. 15), es similar para estructuras de un mismo número de pisos y con luces entre vanos iguales, gráficamente se puede visualizar en la FIGURA N. 71:

TABLA No. 15 PUNTOS DE DESEMPEÑO ANALÍTICOS

	SDy (m)	SAy (m/s ²)	Deriva máx %
P 2V 3m 3p	0.114	7.5973	2.17
P 2V 4m 3p	0.148	5.7453	2.907
P 2V 5m 3p	0.186	4.5320	3.49
P 3V 3m 3p	0.119	7.1372	2.305
P 3V 4m 3p	0.155	5.4575	3.179
P 3V 5m 3p	0.200	4.3967	4.049
P 3V 5m 3p col 35x35	0.118	6.7000	2.338
P 2V 3m 2P	0.042	11.6535	1.186
P 2V 4m 2P	0.068	8.9238	1.684
P 2V 5m 2P	0.121	7.8144	---
P 3V 3m 2P	0.037	10.9604	0.995
P 3V 4m 2P	0.081	8.4726	2.137
P 3V 5m 2P	0.128	7.2964	3.22
P 2V 3m 1P	0.020	11.6535	0.81
P 2V 4m 1P	0.016	11.6535	0.62
P 2V 5m 1P	0.021	11.6535	0.853
P 3V 3m 1P	0.011	11.5370	0.443
P 3V 4m 1P	0.018	11.6535	0.711
P 3V 5m 1P	0.023	11.6535	0.939

FUENTE: Blanca Chávez

FIGURA No. 71 PUNTOS DE DESEMPEÑOSAy (m/s²)

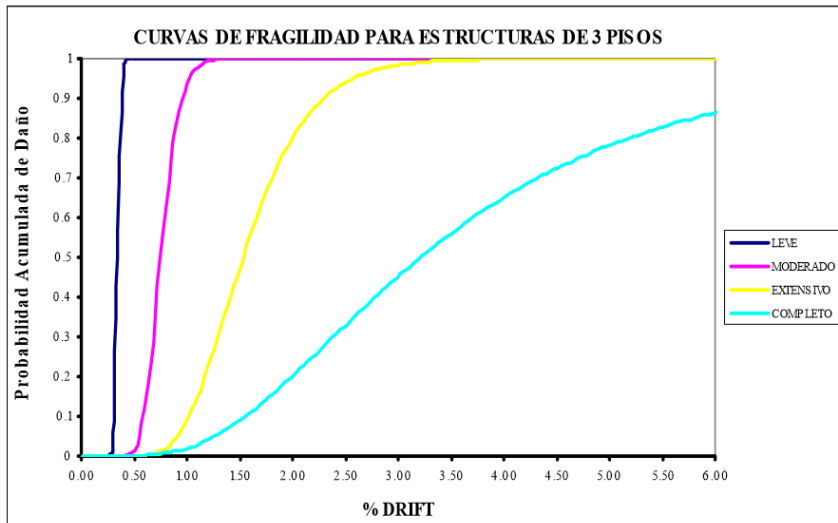
FUENTE: Blanca Chávez

En la FIGURA No. 71 se visualiza que en las curvas de un piso, los puntos no solamente son similares, sino que se superponen (curva azul y curva terracota).

6.6. CURVAS DE FRAGILIDAD Y PORCENTAJES DE DAÑO EN LAS ESTRUCTURAS TIPO C1L.

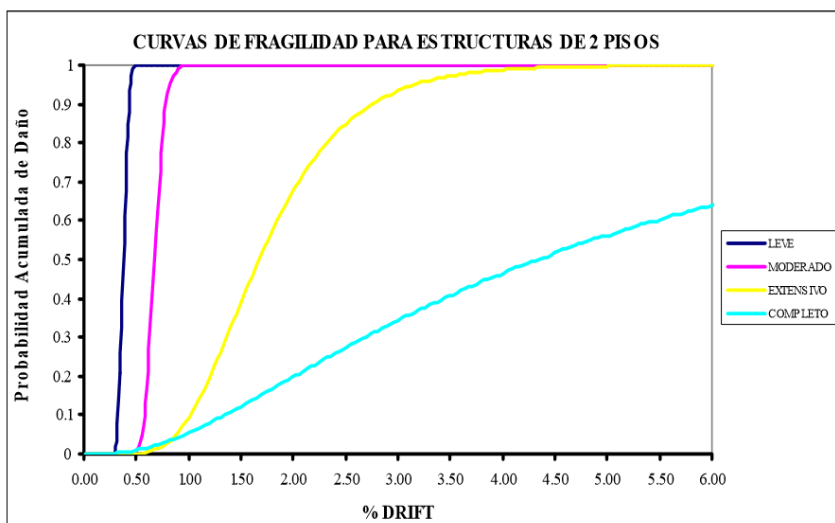
6.6.1. CURVAS DE FRAGILIDAD

Para determinar el estado de daño de las edificaciones de hormigón armado, la metodología requiere de curvas de fragilidad, que para este caso, se utilizan las curvas analizadas por Bobadilla (Bobadilla de la Torre, 2005). Estas Curvas de Fragilidad son el resultado de un amplio análisis para edificaciones ecuatorianas de uno (1) a seis (6) pisos. En estos gráficos, el eje de las ordenadas corresponde a la Probabilidad Acumulada de Daño y el de las abscisas es la deriva máxima.

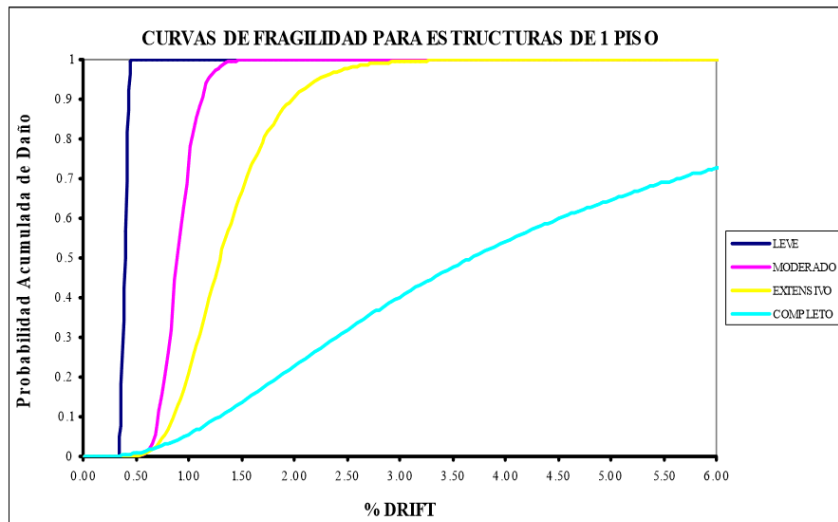
FIGURA No. 72 CURVAS DE FRAGILIDAD PARA ESTRUCTURAS DE 3 PISOS

FUENTE: (Bobadilla de la Torre, 2005)

Las curvas que corresponden a dos y un piso se muestran a continuación.

FIGURA No. 73 CURVAS DE FRAGILIDAD PARA EDIFICACIONES DE 2 PISOS

FUENTE: (Bobadilla de la Torre, 2005)

FIGURA No. 74 CURVAS DE FRAGILIDAD PARA EDIFICACIONES DE 1 PISO

FUENTE: (Bobadilla de la Torre, 2005)

Del análisis de la tipología C1L en el CHQ, se tiene que las derivas máximas para dos y tres vanos prácticamente coinciden, como se puede visualizar en la FIGURA No. 71, razón por la cual se toma un promedio para los diferentes tipos de vanos y tenemos como resultado la TABLA No. 16:

TABLA No. 16 DERIVAS MÁXIMAS PARA VIVIENDAS DE 1-2-3 PLANTAS EN PORCENTAJES

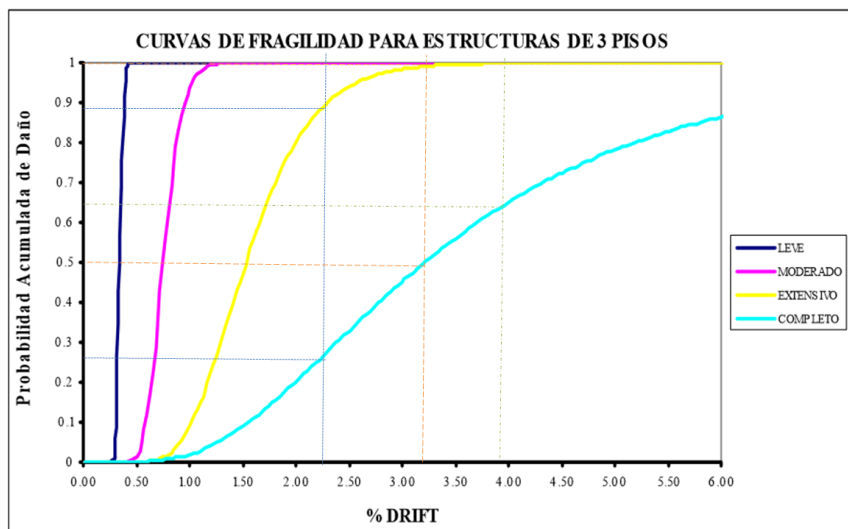
	3 pisos	2 pisos	1 piso
3 m	2.238	1.091	0.627
4 m	3.043	1.911	0.666
5 m	3.770	3.220	0.896

FUENTE: Blanca Chávez

6.6.2. PORCENTAJES DE DAÑO EN LAS ESTRUCTURAS TIPO C1L DEL CENTRO HISTORICO DE QUITO.

Con los valores de las derivas máximas (TABLA No. 16) al ingresar a las curvas de fragilidad de Bobadilla (Bobadilla de la Torre, 2005) se obtienen los porcentajes de daño que se espera en las estructuras de hormigón armado tipo C1L para el Centro Histórico de Quito.

FIGURA No. 75 PORCENTAJES DE DAÑO PARA ESTRUCTURAS DE 3 PISOS CON LUCES ENTRE VANOS DE 3m – 4m – 5m PARA EDIFICACIONES DEL CHQ



FUENTE: Blanca Chávez

Los resultados que se obtienen son:

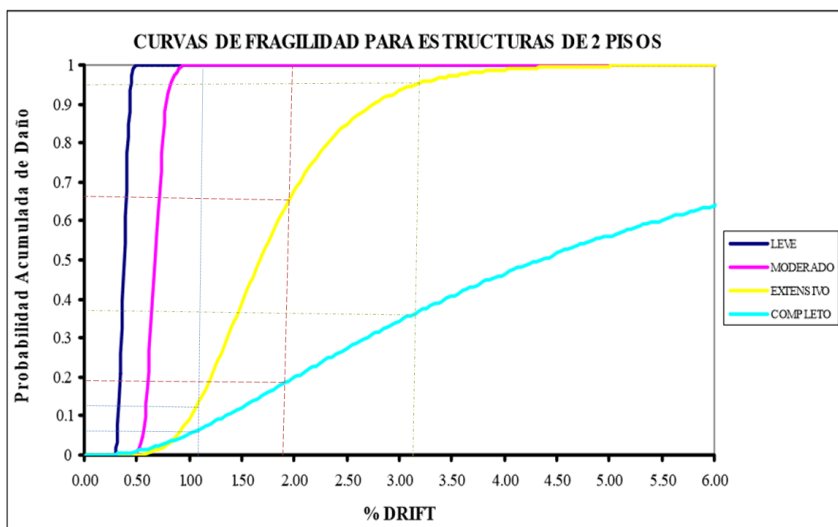
TABLA No. 17 PORCENTAJES DE DAÑO DE LAS ESTRUCTURAS DE 3 PISOS DEL CHQ

	3m	4m	5m
COMPLETO	22.50%	48.00%	62.00%
EXTENSIVO	64.00%	51.00%	38.00%
MODERADO	13.50%	1.00%	0.00%
LEVE	0.00%	0.00%	0.00%
TOTAL	100.00%	100.00%	100.00%

FUENTE: Blanca Chávez

Para las estructuras de 2 pisos se tiene:

FIGURA No. 76 PORCENTAJES DE DAÑO PARA ESTRUCTURAS DE 2 PISOS CON LUCES ENTRE VANOS DE 3m – 4m – 5m PARA EDIFICACIONES DEL CHQ



FUENTE: Blanca Chávez

Los resultados que se obtienen son:

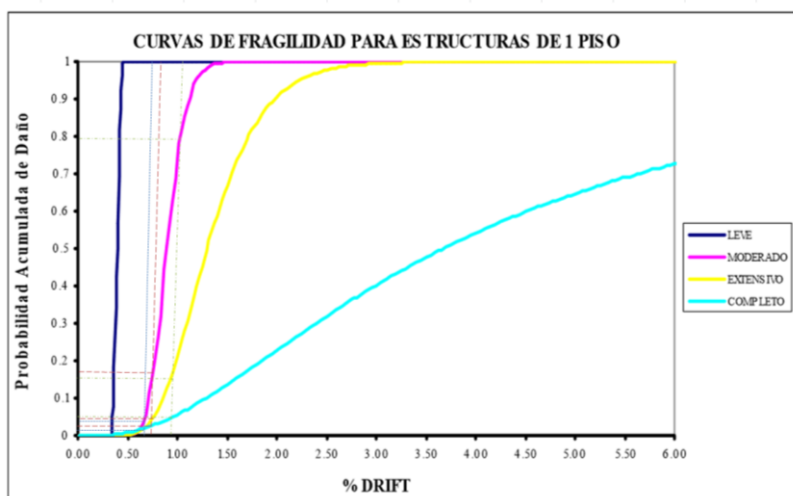
TABLA No. 18 PORCENTAJES DE DAÑO DE LAS ESTRUCTURAS DE 2 PISOS DEL CHQ

	3m	4m	5m
COMPLETO	6.00%	9.90%	38.00%
EXTENSIVO	6.00%	57.10%	58.00%
MODERADO	88.00%	33.00%	4.00%
LEVE	0.00%	0.00%	0.00%
	100.00%	100.00%	100.00%

FUENTE: Blanca Chávez

Para las estructuras de un piso se tiene:

FIGURA No. 77 PORCENTAJES DE DAÑO PARA ESTRUCTURAS DE UN PISO CON LUCES ENTRE VANOS DE 3m – 4m – 5m PARA EDIFICACIONES DEL CHQ.



FUENTE: Blanca Chávez

Los resultados que se obtienen son:

TABLA No. 19 PORCENTAJES DE DAÑO DE LAS ESTRUCTURAS DE 1 PISO DEL CHQ

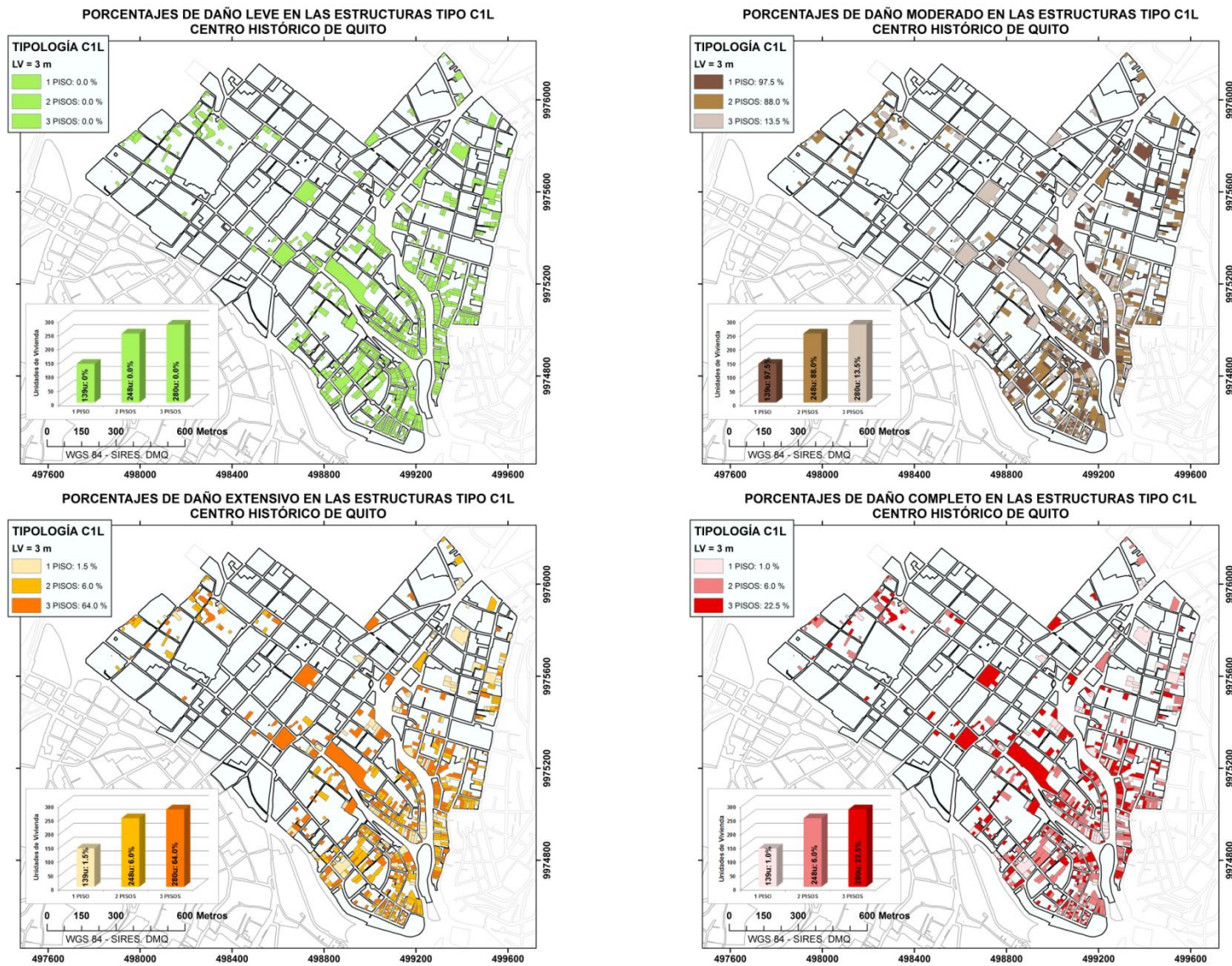
	3m	4m	5m
COMPLETO	1.00%	1.20%	2.70%
EXTENSIVO	1.50%	1.40%	12.30%
MODERADO	97.50%	15.40%	64.00%
LEVE	0.00%	82.00%	21.00%
	100.00%	100.00%	100.00%

FUENTE: Blanca Chávez

6.6.3. MAPAS DE PORCENTAJES DE DAÑO EN LAS ESTRUCTURAS TIPO C1L DEL CENTRO HISTÓRICO DE QUITO.

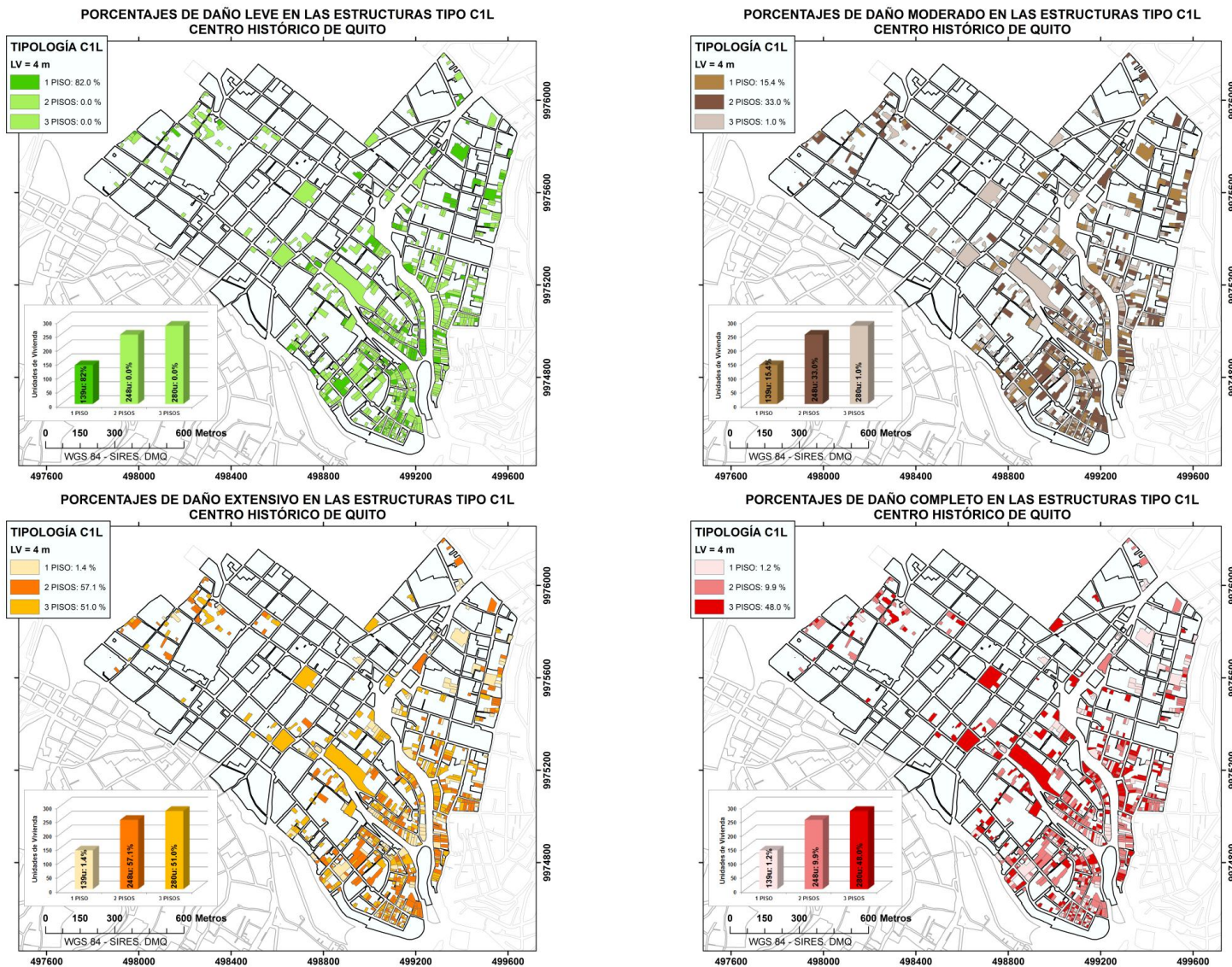
Con los resultados de TABLA No. 17, TABLA No. 18 y TABLA No. 19 se construyen los mapas que representan los diferentes porcentajes de daño de acuerdo a las características asumidas para las edificaciones tipo C1L del Centro Histórico de Quito.

FIGURA No. 78 DAÑO EN ESTRUCTURAS C1L CON LUCES ENTRE VANOS DE 3m



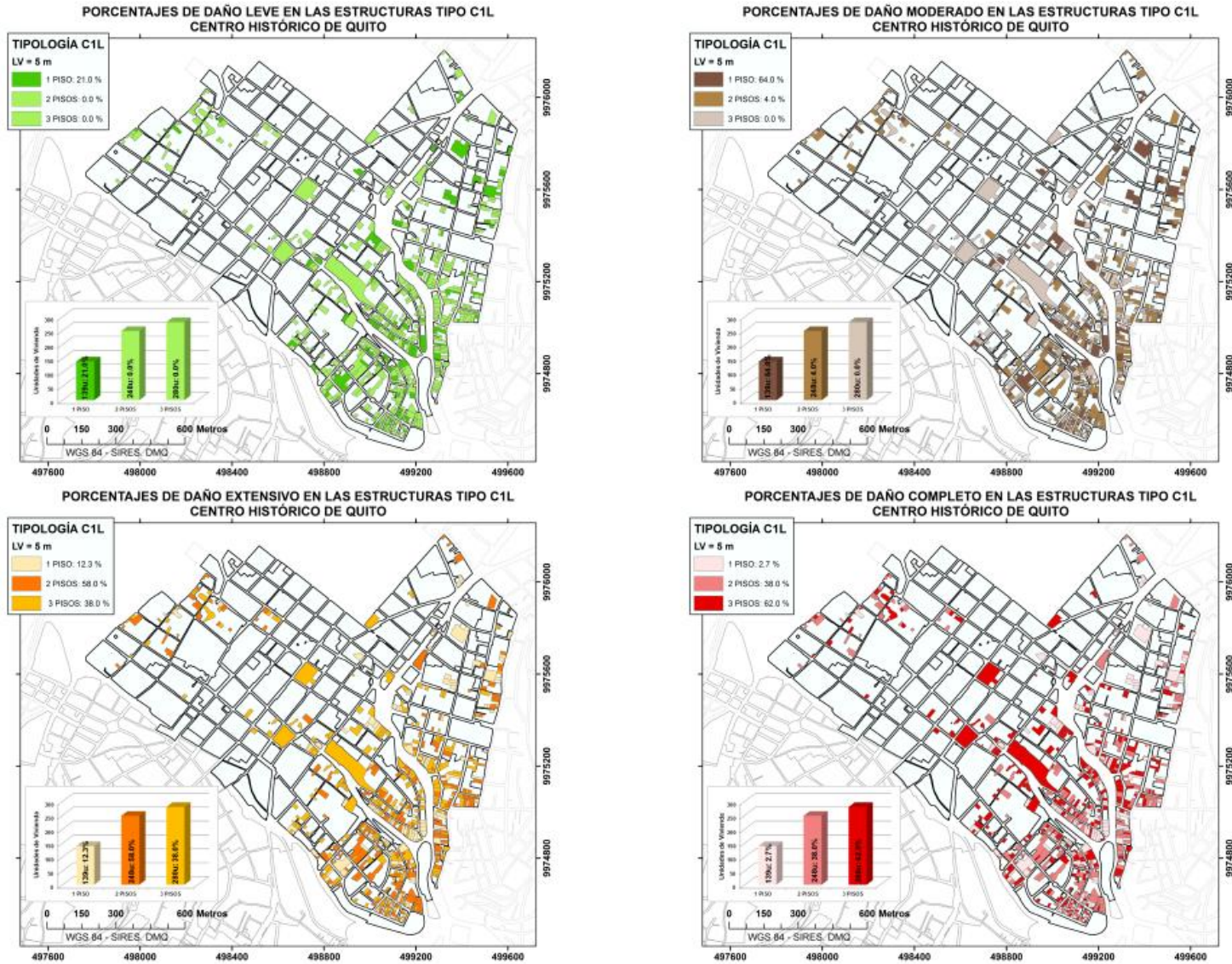
FUENTE: Blanca Chávez

FIGURA No. 79 DAÑO EN ESTRUCTURAS C1L CON LUCES ENTRE VANOS DE 4m



FUENTE: Blanca Chávez

FIGURA No. 80 DAÑO EN ESTRUCTURAS C1L CON LUCES ENTRE VANOS DE 5m



FUENTE: Blanca Chávez

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES

- El Centro Histórico de Quito cuyas características son muy heterogéneas, incluyen incertidumbres asociadas a la construcción, deterioro, mantenimiento, reconstrucción, así como factores humanos y riesgos de origen en la naturaleza, lo que implica que se realicen análisis exhaustivos de sus edificaciones con el fin de disminuir la vulnerabilidad existente.
- Los Centros Históricos y los bienes patrimoniales europeos son similares al Centro Histórico de Quito y sus bienes patrimoniales, ya que la tecnología constructiva de la época fue transferida desde Europa al nuevo mundo (similitud geométrica). De igual manera, en este estudio se pudo verificar que también existe una similitud en las magnitudes de los sismos determinados por códigos previamente establecidos. Para Europa se utiliza un valor de $M_w = 6.8$, y para Quito $M_w=6.2$ (similitud dinámica), lo que facilita adaptar, en el ámbito de la vulnerabilidad y los daños, el principio de similitud en términos de las características geométricas, cinemáticas y dinámicas.
- De los datos recopilados a través de la muestra, representativa de las tipologías generales de la ciudad, se puede concluir que los modelos utilizados en el cálculo de la vulnerabilidad y porcentajes de daño en este estudio, son válidos.
- En las edificaciones de mampostería portante como son los bienes patrimoniales, para definir si sufren o no daño sísmico, se asocia a los resultados obtenidos por PERPETUATE mediante el principio de similitud. El mayor porcentaje de edificaciones del análisis corresponde a esta tipología (URML 43.02%, URMM 20.26%). Del análisis previo se desprende que estas edificaciones serán afectadas ante un sismo de magnitud 6.2. Los resultados obtenidos para la estas tipologías no son concluyentes y son susceptibles de ser mejorados en función de la tecnología disponible.
- En edificaciones de hormigón armado, la metodología HAZUS define las curvas de capacidad en diferentes ámbitos físico-geográfico ante un mismo evento para valorar los posibles escenarios desde el punto de vista de vulnerabilidad

sísmica, de prevención y de estimación de riesgos, sin embargo, para adaptar la metodología a la realidad ecuatoriana, se tuvo que utilizar los programas desarrollados por Mora para ajustar las curvas de capacidad y por Bobadilla para ajustar las curvas de fragilidad.

- En edificaciones de hormigón armado, de acuerdo al análisis metodológico, se espera un buen comportamiento en las edificaciones cuyas luces entre vanos sea de 3m. En contraposición están las edificaciones con luces entre vanos de 5m que tienen un comportamiento de alto riesgo, más aún si son de mayor altura (para el estudio 3 pisos).
- El aporte de este análisis pormenorizado, de acuerdo a los tipos de edificaciones, puede contribuir en la toma de decisiones, tanto a nivel público como privado, no únicamente cuando ocurra un evento catastrófico, sino también para decidir sobre las medidas de prevención y/o rehabilitación.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AGUIAR, F. R. (2001). *SISTEMA DE COMPUTACIÓN CEINCI3 PARA EVALUAR DAÑO SISMICO EN PAÍSES BOLIVARIANOS*. Quito - Ecuador: Escuela Politécnica del Ejército.
- AGUIAR, R. (2001). *SISTEMA DE COMPUTACIÓN CEINCI3 PARA EVALUAR DAÑO SISMICO EN LOS PAISES BOLIVARIANOS*. Quito: Espe.
- AGUIAR, R. (2011). ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN SISMICA DE QUITO. *INSTITUTO PANAMERICANO DE GEOGRAFIA E HHISTORIA - 2DA REUNIÓN TECNICA CONJUNTA DE LAS COMISIONES DEL IPGH*, 1-31.
- AGUIAR, R. (2011). Estudios de Microzonificación Sísmica de Quito. *Instituto Panamericano de Geografía e Historia - 2da Reunión Técnica Conjunta de las Comisiones del IPGH*, 1-31.
- AGUIAR, R., RIVAS, A., BENITO, M., GASPAR, J., & al, e. (2014). *ACELERACIONES REGISTRADAS Y CALCULADAS DEL SISMO DEL 12 DE AGOSTO DE 2014 EN QUITO*. Quito - Ecuador: Universidad de La Fuerzas Armadas - ESPE.
- Barbat, A. H., & Pujades, L. (2004). Evaluación de la Vulnerabilidad y del Riesgo Sísmico en Zonas Urbanas. Aplicación a Barcelona. *Sísmica 2004, 6to Congreso Nacional de Sismología e Engenharia Sísmica*, 231.
- Barona, Z. D. (2010). Vulnerabilidad Sísmica en el Centro Histórico de Sangolquí. Sangolquí, Ecuador: ESPE.
- Bobadilla de la Torre, C. D. (2005). *Curvas de Fragilidad y Evaluación Rápida de la Vulnerabilidad de las Estructuras*. Quito: ESPE.
- Bommer, J., Salazar, W., & Samayoa, R. (1998). Riesgo sísmico en la Región Metropolitana de San Salvador. *PRISMA*, 5.
- Bonett Díaz, R. L. (2003). *Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico de EDificaciones: Aplicación a Entornos Urbanos - Zonas de amenaza alta y moderada*. Catalunya: ESt de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos.
- Calderini C., L. S. (2012). PERPETUATE PERFORMANCE-BASED APPROACH TO EARTHQUAKE PROTECTION OF CULTURAL HERITAGE IN EUROPEAN AND MEDITERRANEAN COUNTRIES . n° 244229 , 1-46.
- Calvi, G., Faccioli, E., Pessina, V., & Borzi, B. (1999). A study on damage scenarios for residential buildings in Catania city. *Journal of Seismology*, 81.
- Cardona A., e. a. (2011). *Informe Técnico ERN- Capra- T1-5 Vulnerabilidad de Edificaciones e Infraestructura*. Bogotá - Colombia; Barcelona - España; México D.F.
- Cardona, A. (2001). La necesidad de representar de manera holística los conceptos de Vulnerabilidad y Riesgo. *International Work - Conference on Vulnerability in Disaster Theory and Practice*, 11.
- Chatelian, J. -L., Guiller, B., Yepes, H. F., & otros, &. (1996). Projet Pilote de Scénario Sismique á Quito (Équateur): Méthode é Résultats. *Bull. Inst. fr.études andines*, 554.
- GUEVARA SAMANIEGO, T. A. (2013). *VIVIENDA POPULAR, AUTOCONSTRUCCION, GESTION DE ORGANIZACIONES Y FINANCIAMIENTO: DOS EJEMPLOS EN QUITO*. Quito: Flacso.
- HAZUS, S. (1996). *TEchnical Manual - Direct Physical Damage - General Building Stock* .
- Herrera, R. I., Vielma, J. C., Barbat, A. H., & Pujades, L. (2013). ESTADO DEL CONOCIMIENTO SOBRE MÉTODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD SÍSMICA DE EDIFICIOS. *Ingeniería y Sociedad VC Vol 8 NO.1, 2*.
- Icumi Nichiata, L. Y., Bertolozzi, M. R., Ferreira Takahashi, R., & Fraccolli, L. A. (2008). La utilización del concepto vulnerabilidad. *Latino-am Enfermagem*.
- Marcelo, B. Z. (2010). Vulnerabilidad Sísmica del Centro Histórico de SAngolquí. Sangolquí, Ecuador.
- Mora, D. M. (2015). Peligrosidad sísmica de Quito y el método del espectro de capacidad con CEINCI-LAB. *Revista Internacional de Estructuras*, Vol 20.

PARRA, C. H. (2016). *DESARROLLOS METODOLÓGICOS Y APLICACIONES HACIA EL CÁLCULO DE LA PELIGROSIDAD SÍSMICA EN EL ECUADOR CONTINENTAL Y ESTUDIO DE RIESGO SÍSMICO EN LA CIUDAD DE QUITO*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

Roberto Aguiar, K. S. (2013). Microzonificación Sísmica del Centro - Norte de Quito. 39.

Roldós Farías, P. B. (2012). Implementación de conexiones calificadas viga-columna en pórticos no arriostrados especiales de acero resistentes a momento en el Ecuador.

SR2, H. 9. (1996). Technical Manual.

Yépez, H. C. (2015). EStudio del riesgo sísmico en el Ecuador. 161.

ANEXOS

ANEXO 1

DATOS DE LA INVESTIGACIÓN

CENTRO HISTÓRICO DE QUITO