

Aplicación de Algoritmos en la Revisión Estructural como Mecanismo de Validación del  
Diseño

Ricardo Javier Gómez Serrano

Trabajo de Grado para optar al título de Especialista en Estructuras

Directores

Ricardo Alfredo Cruz Hernández

Doctor en Ciencias Técnicas

Oscar Javier Begambre Carrillo

Doctor en Ingeniería de Estructuras

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Especialización en Estructuras

Bucaramanga

2017

**Tabla de Contenido**

Introducción ..... 13

1. Marco Teórico ..... 20

1.1. Marco legal de la revisión de diseños estructurales. .... 20

1.1.1. Obligatoriedad de la revisión estructural. .... 20

1.1.2. Idoneidad de los revisores estructurales. .... 22

1.1.3. Alcance de la revisión de diseños estructurales según normativa colombiana..... 23

1.1.4. Curadurías en la revisión estructural..... 25

1.1.5. Reciente modificación a la normativa sobre Revisión Estructural. .... 28

1.2. Algoritmos De Evaluación Estructural ..... 33

1.2.1. Listas de Control o de Chequeo ..... 33

1.2.2. Hassan y Sozen – Índices de Rigidez ..... 39

1.2.3. Perfil Bio-Sísmico de Edificios. .... 41

1.2.4. Índice de Vulnerabilidad según el INME ..... 52

1.2.5. Sistemas automáticos de verificación de normas o SmartCodes..... 62

1.3. Glosario ..... 69

2. Revisión de diseños estructurales por expertos y pruebas de baja validez del procedimiento. .... 71

2.1. Procedimiento empleado actualmente por expertos. .... 71

2.1.1. Clasificación de los tipos de revisión de los diseños estructurales..... 74

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 2.1.2. | Resultados de la consulta a los profesionales. ....                                | 76  |
| 2.2.   | La Evaluación Estructural Como Entorno De Baja Validez .....                       | 77  |
| 2.2.1. | Procedimientos incompletos o inexactos .....                                       | 78  |
| 2.2.2. | Incertidumbres en la información de base. ....                                     | 80  |
| 2.2.3. | Factores socioculturales que afectan el ejercicio profesional. ....                | 80  |
| 2.2.4. | Literatura científica y soporte bibliográfico. ....                                | 81  |
| 2.2.5. | Principales sesgos mentales presentes en la revisión de diseños estructurales..... | 82  |
| 3.     | Aplicación de algoritmos. ....   | 85  |
| 3.1.   | Selección de Algoritmos que serán aplicados. ....                                  | 85  |
| 3.2.   | Selección de Casos de Aplicación .....   | 86  |
| 3.3.   | Caso 1. Edificio Residencial de Concreto reforzado de 24 pisos. ....               | 88  |
| 3.4.   | Caso 2. Edificio Institucional (educación) de Concreto Reforzado de 3 pisos. ....  | 96  |
| 3.5.   | Caso 3. Edificio institucional (Gobierno) de concreto reforzado de 2 pisos. ....   | 102 |
| 3.6.   | Edificio en concreto reforzado residencial – zona sísmica alta.....                | 110 |
| 4.     | Análisis De Resultados.....  | 115 |
| 5.     | Conclusiones .....   | 119 |
| 6.     | Nota Personal .....  | 123 |
|        | Referencias Bibliográficas.....  | 124 |

**Lista de Tablas**

Tabla 1. Lista de chequeo según contenido mínimo de memorias y planos..... 37

Tabla 2. Valores de vulnerabilidad de las clasificaciones de los parámetros y pesos de los parámetros..... 62

Tabla 3. Aspectos Relevantes de la Revisión a Diseños Estructurales..... 73

Tabla 4. Frecuencia de cada tipo de revisión según encuestas. .... 76

Tabla 5. Aspectos relevantes de la revisión estructural según expertos. .... 76

Tabla 6. Verificación documental y contenido del Caso 1. .... 88

Tabla 7. Cálculo del área resistente - Caso 1. .... 90

Tabla 9. Cálculo del coeficiente de seguridad  $\alpha$  para el Caso 1. .... 95

Tabla 10. Índice de vulnerabilidad del Caso 1..... 96

Tabla 11. Verificación documental y contenido mínimo. Caso 2..... 96

Tabla 12. Cálculo del área resistente - Caso 2..... 98

Tabla 13. Cálculo del coeficiente de seguridad  $\alpha$  para el Caso 2. .... 101

Tabla 14. Índice de vulnerabilidad del Caso 2..... 102

Tabla 15. Contenido mínimo de planos y memorias - Caso 3..... 102

Tabla 16. Cálculo de las áreas resistentes. Caso 3 – Diseño 1..... 104

Tabla 17. Cálculo del área resistente del caso 3 – Diseño 2. .... 105

Tabla 18. Cálculo del coeficiente de seguridad,  $\alpha$ , para el Caso 3 – Diseño 1..... 108

Tabla 19. Índice de Vulnerabilidad del Caso 3- Diseño 1. .... 108

Tabla 20. Cálculo del coeficiente de seguridad,  $\alpha$ , para el caso 3, diseño 2..... 109

Tabla 21. Verificación documental y de contenido mínimo - Caso 4. .... 110

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 22. Cálculo del área resistente - Caso 4. ....                       | 111 |
| Tabla 23. Cálculo del coeficiente de seguridad, alfa, para el caso 4. .... | 114 |
| Tabla 24. Índice de vulnerabilidad del Caso 4. ....                        | 114 |
| Tabla 25. Índices de vulnerabilidad según INME. ....                       | 116 |
| Tabla 26. Valores del coeficiente alfa, empleado en el I.V. ....           | 117 |

**Lista de Figuras**

Figura 1. Distribución de publicaciones por año. Adaptada de <https://www.scopus.com/> ..... 14

Figura 2. Distribución de publicación por país. Adaptado de <https://www.scopus.com/> ..... 15

Figura 3. Distribución de publicación por tipo de publicación en Colombia. Adaptado de <https://www.scopus.com/> ..... 17

Figura 4. Listado de factores analizados y su ponderación. Adaptado de Torrado y otros, 2017 35

Figura 5. Lista de chequeo de la resolución actual Adaptado de Minvivienda, Res 0463 de 2017. .... 36

Figura 6. Rango de valores del Indicador 1 (H/T). Adaptado de Guendelman et al, 2010. .... 45

Figura 7. Valores del Indicador 2 (Efecto P-Δ). Adaptado de Guendelman et al, 2010..... 46

Figura 8. Valores del Indicador 3 ( $1000 \cdot \delta_{cmN} / H$ ). Adaptado de Guendelman et al, 2010. .... 46

Figura 9. Valores del Indicador 4 ( $1000 \cdot \Delta_{cm} / h_{pi}$ ). Adaptado de Guendelman et al, 2010. .... 46

Figura 10. Valores del Indicador 5 ( $(\Delta_A - \Delta_{cm}) / h_{pi}$ ). Adaptado de Guendelman et al, 2010..... 47

Figura 11. Valores del Indicador 6 ( $T_R / T_x$  y  $T_R / T_y$ ). Adaptado de Guendelman et al, 2010..... 47

Figura 12. Valores del Indicador 7 ( $M_{nx0} / M_{nx}$ ). Adaptado de Guendelman et al, 2010. .... 49

Figura 13. Valores del Indicador 8 ( $e_{dinx} / r_o$ ). Adaptado de Guendelman et al, 2010..... 49

Figura 14. Valores del Indicador 9 ( $M_{nxy} / M_{nx}$ ). Adaptado de Guendelman et al, 2010. .... 49

Figura 15. Valores del Indicador 10 ( $Q_{oxy} / Q_{oxx}$ ). Adaptado de Guendelman et al, 2010. .... 50

Figura 16. Valores del Indicador 11 ( $Q_{oxy} / Q_{oxx}$ ). Adaptado de Guendelman et al, 2010) ..... 50

Figura 17. Valores del Indicador 12 ( $Q_{oxy} / Q_{oxx}$ ). Adaptado de Guendelman et al, 2010. .... 50

Figura 18. Valores del Indicador 13 ( $R^{**}$ ). Adoptado de Guendelman et al, 2010. .... 51

Figura 19. Comparación de la variación del R en la NCh433 vs NSR-10..... 51

Figura 20. Parámetros del Índice de Vulnerabilidad INME. .... 53

Figura 21. Terremoto del 23 de diciembre de 1972. Managua, Nicaragua. Adaptado de <https://kashikoidesu.blogspot.com.co/2013/12/terremoto-del-23-de-diciembre-de-1972.html> ... 54

Figura 22. Configuración en planta de las estructuras de concreto. Adaptado de Maldonado y Chío (2008). ..... 59

Figura 23. Conexiones. Adaptado de Maldonado y Chío (2008). ..... 60

Figura 24. Línea de tiempo de sistemas de verificación automática de códigos. Adaptado de Dimyadi y Amor, 2013. .... 66

Figura 25. Planta tipo del Caso 1. Fuente: Archivo Planeación Municipal Medellín. .... 92

Figura 26. Representación del edificio Caso 1, para los índices de Hassan y Sozen. .... 92

Figura 27. Comparación de los espectros de la NSR-10 con los de la NCh433..... 93

Figura 28. Resumen de valores del Perfil Bio-sísmico del caso 1..... 94

Figura 29. Planta tipo Caso 2. Fuente: Escuela Ingeniería Civil UIS..... 98

Figura 30. Representación de los Índices de Hassan y Sozen para el caso 2. .... 99

Figura 31. Perfil Bio-Sísmico del edificio del Caso 2. Elaborado según Guendelman (2010) .. 100

Figura 32. Índices de Hassan y Sozen para ambos diseños del Caso 3. .... 106

Figura 33. Perfil Bio-Sísmico del edificio del Caso 3. Adaptado de Guendelman (2010)..... 107

Figura 34. Planta tipo Caso 4..... 112

Figura 35. Representación de los índices de Hassan y Sozen para el caso. 4..... 113

Figura 36. Índices de Hassan y Sozen (1997) para los distintos casos. .... 115

Figura 37. Comparación coeficiente alfa vs valores normales y aceptables..... 117

## **Lista de Apéndices**

**(Ver apéndices adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la Base de Datos de la  
Biblioteca UIS)**

Apéndice A. Cálculos perfil bio-sísmico - modelo mínimo

Apéndice B. Cálculos perfil bio-sísmico - edificio caso 1

Apéndice C. Cálculos perfil bio-sísmico - edificio caso 2

Apéndice D. Cálculos perfil bio-sísmico - edificio caso 3 – diseño 2

## RESUMEN

TITULO: APLICACIÓN DE ALGORITMOS EN LA REVISIÓN ESTRUCTURAL COMO MECANISMO DE VALIDACIÓN DEL DISEÑO.\*

AUTOR: RICARDO JAVIER GÓMEZ SERRANO.\*\*

PALABRAS CLAVES: ALGORITMOS, REVISIÓN ESTRUCTURAL, DISEÑO ESTRUCTURAL

### DESCRIPCIÓN:

En esta monografía se realiza una evaluación de algunos algoritmos usados en la revisión de diseños estructurales. Se inicia con la revisión de la relevancia del tema de la revisión estructural de edificaciones mediante el análisis de las publicaciones científicas relacionadas sobre el tema.

Igualmente, se presenta un marco legal mediante la recopilación y el análisis de las normatividad vigente, sobre los aspectos más importantes de la revisión estructural, como son la obligatoriedad, el alcance, el procedimiento, y la idoneidad de los revisores estructurales.

Mediante encuestas se evalúan los procedimientos de revisión estructural empleados por expertos y personas encargadas de realizar esta labor en Curadurías y Oficinas de Planeación, entidades encargadas de emitir licencias de construcción. Posteriormente, se introduce el concepto de “entorno de baja validez” para el diseño y la revisión estructural de edificaciones y se sustenta el empleo de algoritmos versus expertos en dicho entorno.

Se identifican algoritmos que pueden ser empleados para una revisión estructural de edificaciones y que han sido validados mediante múltiples casos de aplicación y múltiples estudios científicos. Se seleccionan cuatro casos de aplicación y cuatro algoritmos a emplear para evaluar su capacidad de validar aspectos importantes del diseño estructural.

Finalmente se evalúan los resultados de la evaluación con algoritmos, se clasifican según su potencial uso como algoritmos de validación de diseños y proponen mejoras de los mismos.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Directores: Ricardo Alfredo Cruz Hernández, Doctor en Ciencias Técnicas. Oscar Javier Begambre Carrillo, Doctor en Ingeniería de Estructuras

**ABSTRACT**

**TITLE:** APPLICATION OF ALGORITHMS IN THE STRUCTURAL ASSESSMENT AS A DESIGN VALIDATION MECHANISM.\*

**AUTHOR:** RICARDO JAVIER GÓMEZ SERRANO.\*\*

**KEYWORDS:** ALGORITHMS, STRUCTURAL ASSESSMENT, STRUCTURAL DESIGN

**DESCRIPTION:**

In this monograph an evaluation is made of some algorithms used in the revision of structural designs. It begins with the review of the relevance of the topic of the structural revision of buildings through the analysis of related scientific publications on the subject.

Likewise, a legal framework is presented through the compilation and analysis of the current regulations, on the most important aspects of the structural review, such as the obligation, scope, procedure, and suitability of structural reviewers.

Through surveys, the structural revision procedures used by experts and persons in charge of carrying out this work in curatorships y planning offices, entities in charge of issuing construction permits, are evaluated. Subsequently, the concept of "low validity environment" is introduced for the design and structural revision of buildings and the use of algorithms versus experts in said environment is supported.

Algorithms are identified that can be used for a structural review of buildings and that have been validated through multiple application cases and multiple scientific studies. Four application cases and four algorithms to be used are selected to assess their ability to validate important aspects of structural design.

Finally, the evaluation results are evaluated with algorithms, classified according to their potential use as design validation algorithms and propose improvements to them.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Directores: Ricardo Alfredo Cruz Hernández, Doctor en Ciencias Técnicas. Oscar Javier Begambre Carrillo, Doctor en Ingeniería de Estructuras

## Introducción

“La ingeniería es un tema social que implica un riesgo social, por eso son profesiones controladas por el Estado. Le estamos diciendo a los estudiantes y egresados que ejerzamos con la idoneidad que tenemos que hacerlo, con la ética, para que estas cosas no sucedan”, concluyó Rubén Darío Ochoa Arbeláez, director general del COPNIA\*, en rueda de prensa (Cárdenas y Álvarez, 2017) donde anunciaba la cancelación de la matrícula profesional a dos ingenieros civiles: el diseñador y el revisor estructural del edificio Space.

En Colombia, las edificaciones y otras estructuras se diseñan, siguiendo los lineamientos de la Normas Sismo Resistente NSR-10 (AIS, 2010) que fueron adoptadas mediante la Ley 400 de 1997, con el objeto de “que sean capaces de resistir las fuerzas sísmicas y otras fuerzas impuestas por la naturaleza o el uso, reducir a un mínimo el riesgo de la pérdida de vidas humanas, y defender en lo posible el patrimonio del Estado y de los ciudadanos.” (Ley 400 de 1997). Con el fin de garantizar que los diseños estructurales cumplan con los requisitos de las Normas Sismo Resistentes, la ley exige que deban ser sometidos a una revisión.

“Con frecuencia estamos seguros de nosotros mismos cuando nos equivocamos, y es más probable que un observador objetivo detecte nuestros errores antes que nosotros mismos” (Kahneman, 2012), ahí yace la importancia de la revisión de los diseños estructurales.

---

\* Consejo Profesional Nacional de Ingeniería: entidad pública que tiene la función de inspeccionar y vigilar el ejercicio de la ingeniería, de sus profesiones afines y de sus profesiones auxiliares en general, en el territorio nacional.

Las investigaciones sobre “Evaluación Sísmica de Edificaciones”, han tenido un crecimiento a partir del año 2000 en adelante llegando a más de 500 publicaciones en los últimos años (ver Figura 1). Se encuentra una relación casi directa entre los países con mayores publicaciones y aquellos con alta sismicidad, se resalta por ejemplo que Italia, desarrolla gran cantidad de investigaciones sobre protección del patrimonio arquitectónico histórico.

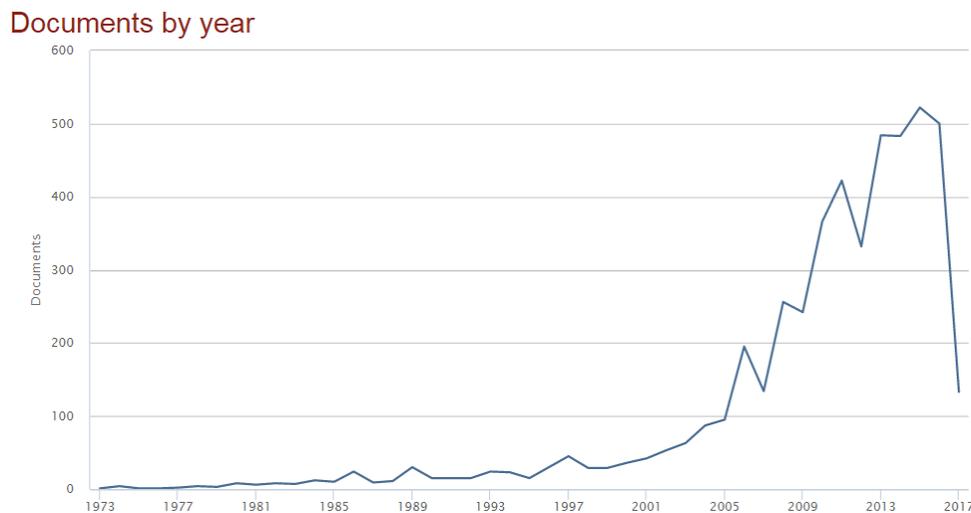


Figura 1. Distribución de publicaciones por año. Adaptada de <https://www.scopus.com/>

A los 10 principales países se han agregados los países latinoamericanos con más publicaciones que son México con 54 documentos, Colombia con 49, Chile con 23 y Perú con 19 publicaciones (ver Figura 2).

El propósito general de este trabajo es mostrar, el concepto de revisión de diseños estructurales tal como está expuesto en la normativa, como un procedimiento de baja validez, que no garantiza el cumplimiento de las normas sismo resistentes y proponer el empleo de algoritmos estadísticos, presentes en la literatura científica, con el mecanismo de validación de los diseños estructurales, como parte del procedimiento de revisión.

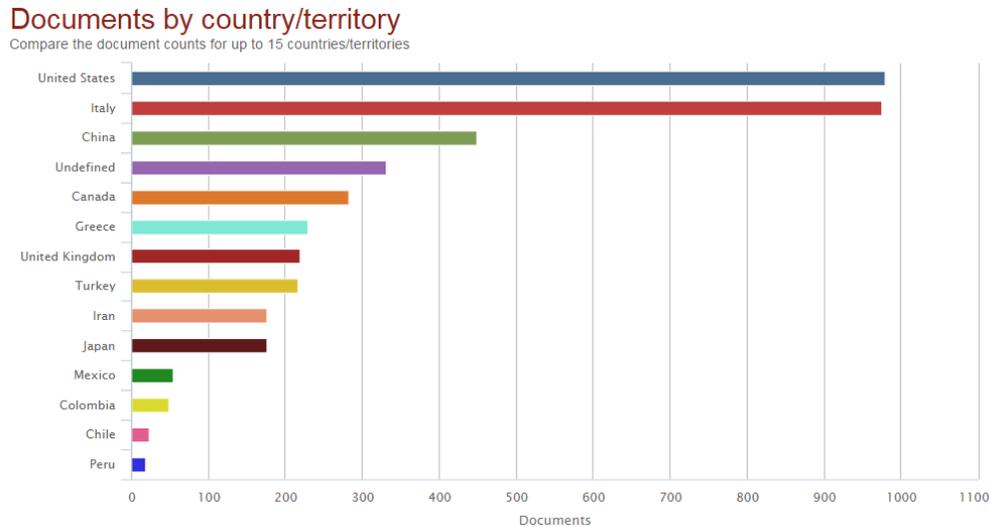


Figura 2. Distribución de publicación por país. Adaptado de <https://www.scopus.com/>

El desarrollo del contenido del presente trabajo va a la par con los objetivos planteados para el mismo, por lo cual se expondrán simultáneamente las partes y los objetivos.

En la primera parte (2.1) se realiza una revisión de la normatividad vigente sobre revisión a los diseños estructurales. Se verifica la obligatoriedad, pero se resalta la excepción de revisión en casos de revisión externa. La reciente ley 1796 de 2016 y su decreto reglamentario, eliminó dicha excepción exigiendo la revisión en curadurías, pero dejando la responsabilidad exclusivamente sobre los diseñadores y revisores externos.

De la revisión normativa se extrae el alcance de la revisión, el cual se limita a la verificación de una serie de pasos del diseño, sin mayor detalle sobre cuál debe ser el procedimiento para realizarla.

El resultado del proceso del diseño estructural de un edificio es una memoria de cálculo y

unos planos de construcción. La información contenida en los diseños estructurales, se podría dividir en dos tipos de datos. Un tipo son los datos de ingreso o variables supuestas. Estas son asumidas o determinadas en el procedimiento de diseño. Ejemplos de este tipo de información, son las dimensiones de los elementos, la resistencia de los materiales que la componen, su ubicación, etc. El otro tipo de información corresponde a los resultados que normalmente se obtiene de un modelo numérico de la estructura. Como ejemplos se tiene, las deformaciones y esfuerzos de los elementos antes las cargas. Es la revisión de esta información la que resta validez al proceso de revisión, pues no es fácilmente verificable o su verificación implica una considerable cantidad de trabajo.

En la segunda parte (sección 2.2), mediante la consulta bibliográfica y recursos sugeridos por profesores de la Especialización en Estructuras de la Universidad Industrial de Santander, se llegó a una serie de algoritmos que pueden emplearse en la validación estadística de los diseños estructurales. Muchos de ellos han sido empleados en la verificación de edificaciones tras sismos ocurridos en diferentes lugares del mundo (Hassan y Sozen, 1997; Zora, 2013). Otros han sido empleados para evaluar la vulnerabilidad de edificaciones existentes (Maldonado y Chío, 2008), donde se incluyen varias de las investigaciones en el país sobre el tema de evaluación sísmica. Y otros prometen a futuro, calificar todas las reglas de una norma de construcción sobre un diseño que se ha elaborado empleando Building Information Modeling (Nawari, 2011; Eastman et al, 2009).

Todos estos algoritmos con la característica de poder acumular información sobre las diferentes estructuras que se van diseñando y construyendo con el fin de que sirvan para validar nuevas estructuras a futuro. Tal es el caso del Perfil Bio-sísmico (Guendelman y otros, 1997), que es un

algoritmo avanzado de evaluación estructural que a partir de unos indicadores determina la “salud” de una estructura, y que sus autores han usado para evaluar 585 edificaciones en el trabajo inicial y que próximamente ampliarán con “datos de 8210 edificios, diseñados y construidos en Chile en los últimos 25 años”, (Guendelman, publicación próxima) con la trascendencia de que muchas de las estructuras evaluadas han resistido varios de los sismos más fuertes que ha ocurrido en la era moderna, como son Maule, 2010 y Valparaíso, 1985.

En el país se registran pocos trabajos sobre “evaluación sísmica de edificaciones” (ver Figura 3), pero de los trabajos encontrados se resaltan los estudios de vulnerabilidad, los estudios de microzonificación (Consortio, 2007). Igualmente se encuentran trabajos con algún grado de similitud al que se pretende desarrollar, donde se emplearon los algoritmos para la determinación de diferentes características de las estructuras (Zora, 2013).

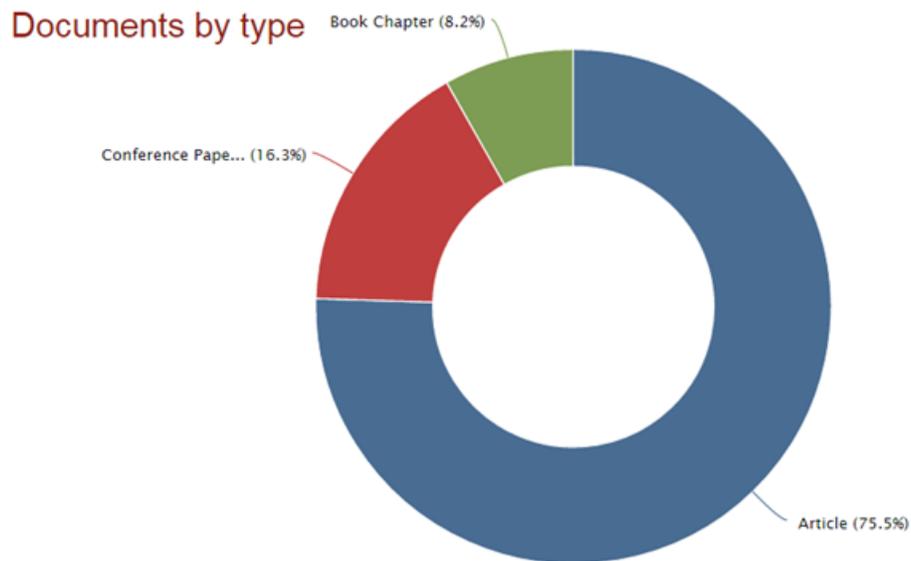


Figura 3. Distribución de publicación por tipo de publicación en Colombia. Adaptado de <https://www.scopus.com/>

Tras un pequeño glosario (sección 2.3) con la definición de algunos de los términos claves en el presente trabajo, se determina consultar a los profesionales que realizan labores de revisión a los diseños estructurales, sobre el procedimiento empleado por ellos y los aspectos que consideran más importante dentro de la revisión (ver sección 3.1).

Sólo con la excepción de algunos revisores externos, la mayoría de las personas encuestadas trabaja sin modelos matemáticos, sin lo cual es inviable verificar las deformaciones y los esfuerzos en los diseños de una edificación que se pretenda revisar.

Como se analiza en la sección 3.2, en la revisión estructural también “se da un grado importante de incertidumbre e impredecibilidad”, características de los dominios denominados por Kahneman (2012) como “entornos de baja validez”. Se analizan aspectos relacionados al entorno como los procedimientos empleados, la incertidumbre en la información, y aspectos socioculturales que afectan el ejercicio profesional.

Posteriormente (sección 3.2) se analizan los principales sesgos mentales que pueden presentarse en la revisión de diseños estructurales. Es muy difícil pensar estadísticamente y esto conduce a “nuestra excesiva confianza en lo que creemos saber y nuestra aparente incapacidad para reconocer las dimensiones de nuestra ignorancia y la incertidumbre del mundo en que vivimos.” (Kahneman, 2012). En su libro “Pensar rápido, pensar despacio” Daniel Kahneman (2012) describe y analiza varios problemas de la mente humana relacionados con la toma de decisiones, que conducen a errores. Por ejemplo, un revisor estructural puede ver sesgado su concepto sobre un diseño, por la simple identificación de quién es el diseñador a quien está

revisando, mediante una “heurística afectiva” que es aquella “en la que los juicios y las decisiones son directamente regidos por sentimientos de agrado y desagrado con escasa deliberación o razonamiento” (Kahneman, 2012).

Tras describir con múltiples ejemplos, los problemas y limitaciones de la mente humana Kahneman (2012) da una luz sobre cómo enfrentarlos. En el capítulo 21 donde habla sobre “Intuiciones versus Fórmulas”: expone la utilidad de algoritmos estadísticos en “muchos ámbitos, desde la selección de acciones de las bolsas de valores, hasta la elección de tratamientos médicos por doctores o pacientes”, y ¿por qué no?, en la revisión estructural.

“Un 60% de los estudios ...que refieren comparaciones entre intuiciones y fórmulas... han demostrado un acierto significativamente mayor de los algoritmos. En los demás hubo empate. Un vínculo como éste significa un triunfo de las reglas estadísticas, cuyo uso es normalmente mucho menos complicado que los juicios de los expertos.” En cada caso, el acierto de los expertos es igualado o excedido por un simple algoritmo” (Kahneman, 2012).

Tras seleccionar los algoritmos a utilizar (sección 4.1), basado en criterios de facilidad y tiempo de aplicación, se emplean éstos en unos casos de estructuras en concreto reforzado (tipología más común en Colombia) con el fin de analizar la información que provee cada algoritmo y clasificarlos según los recursos de tiempo y cognitivos (sección 5), para evaluar su aplicabilidad en el entorno de entidades que otorgan licencias de construcción. Finalmente, se presentan las conclusiones y una nota personal sobre revisión y ética profesional.

## 1. Marco Teórico

Con el fin de comprender el ámbito de las revisiones a los diseños estructurales, se revisan dos temas de relevancia con los objetivos, uno es la revisión al marco legal que rige la función de los ingenieros civiles, respecto a la realización de revisiones a diseños estructurales y otro es la referenciación a algoritmos o fórmulas con trascendencia en la literatura científica.

### 1.1. Marco legal de la revisión de diseños estructurales.

En primer lugar se revisa el marco legal de las construcciones en Colombia, con el fin de identificar todo aquello que se reglamente o defina la revisión a los diseños estructurales.

**1.1.1. Obligatoriedad de la revisión estructural.** La Ley 400 de 1997 (Congreso de Colombia, 1997) es por medio de la cual se adoptan las normas sobre construcciones sismo resistentes. En ella se encuentran tres capítulos que son el Título VII - Comisión asesora permanente para el régimen de construcciones sismo resistentes, Título IV – Revisión de los diseños y el Título VI – Profesionales.

Se nombra primero el título que crea la Comisión ya que a ésta se le asignan en la Ley 400 de 1997, las funciones de establecer el alcance de las revisiones estructurales y la experiencia e idoneidad de los profesionales que las realizan. En el Manual sobre Sismo Resistencia para Funcionarios de Planeación Municipal y otros profesionales de la ingeniería y arquitectura, (AIS,

2007), “documento redactado y aprobado por la Comisión” se encuentra la siguiente pregunta con su respectiva respuesta:

“¿Deben revisarse los diseños que se presentan para obtener una licencia de construcción?”

Sí. La Ley 400 de 1997 indica (Artículo 15º) que el Curador o las oficinas o las dependencias Distritales o Municipales a cargo de la expedición de las licencias, deben constatar previamente que la edificación propuesta cumple los requisitos exigidos por la Ley 400/97 y sus reglamentos, mediante la revisión de los planos, memorias y estudios de los diferentes diseños mencionados en la misma Ley.”

Esto indicaría que la revisión es obligación de la curaduría y sus funcionarios, pero en el párrafo del mismo artículo se leía:

“La revisión de los diseños puede ser realizada por el Curador o por funcionarios de las oficinas o dependencias municipales o distritales encargadas de expedir las licencias de construcción; o bien, a costo de quien solicita la licencia, con un profesional particular, calificado para tal fin de conformidad con los requisitos establecidos en el Capítulo 3, Título VI de esta Ley (Ley 400 de 1997), diferente del diseñador o independiente laboralmente de él, el cual por medio de un memorial dirigido a las oficinas o dependencias mencionadas, indique el alcance de la revisión efectuada, el cumplimiento de las normas de la presente Ley y sus decretos reglamentarios.”

El decreto 926 del 19 de marzo de 2010, por medio del cual se establecen los requisitos de

carácter técnico y científico para construcciones sismo resistentes NSR-10, es el componente técnico que rige las construcciones en el país. En el mismo se puede leer en el numeral A.1.3.7 “— REVISIÓN DE LOS DISEÑOS — Los planos, memorias y estudios realizados deben ser revisados para efectos de la obtención de la licencia de construcción tal como lo indica la Ley 400 de 1997, la Ley 388 de 1997 y sus respectivos reglamentos. Esta revisión debe ser realizada en la curaduría o en las oficinas o dependencias encargadas de estudiar, tramitar, y expedir las licencias de construcción, o bien por un profesional independiente, a costo de quien solicita la licencia.” Se observa claramente que el componente técnico (NSR-10) al igual que la Ley, llevan el mismo lineamiento para las revisiones estructurales.

**1.1.2. Idoneidad de los revisores estructurales.** Ahora revisando cuál es la idoneidad de los revisores estructurales según la ley 400 de 1997. El artículo 30, indica que: “se deberá acreditar ante la Comisión Asesora Permanente para el Régimen de Construcciones Sismo Resistentes, los requisitos de experiencia e idoneidad que se señalan en el siguiente artículo”. Y el artículo 31, señala que: “El revisor de los diseños debe acreditar una experiencia mayor de cinco (5) años de ejercicio profesional, contados a partir de la expedición de la tarjeta profesional, bajo la dirección de un profesional facultado para tal fin, en una o varias actividades tales como, diseño estructural, ... o acreditar estudios de posgrado en el área de estructuras, geotecnia o ingeniería sísmica.”

Sobre la idoneidad del revisor el decreto 926 de 2010 (NSR-10) dice “Los revisores de los diseños deben tener las cualidades establecidas en la Ley 400 de 1997.”

Desde el acta No. 1 de la Comisión asesora permanente para el régimen de construcciones sismo resistentes con fecha del 12 de mayo de 1998, se habla de “pruebas de idoneidad” sin que a la fecha éstas hayan sido implementadas en el país.

**1.1.3. Alcance de la revisión de diseños estructurales según normativa colombiana.** En el acta No. 135 de la Comisión asesora permanente para el régimen de construcciones sismo resistentes (2016), Luz Marina Guerra Martelo, abogada de la Procuraduría General de la Nación solicita “allegar en medio magnético, copia de todos los pronunciamientos emitidos en materia de procedimientos de revisión de diseños para construcciones sismo resistentes y el alcance de dicha actividad”. Como respuesta a la solicitud la comisión indica que se estableció la resolución 0015 de 2015 respecto a los procedimientos para fijar el alcance de las labores profesionales y los honorarios para retribuir las labores mencionadas en el artículo 42 de la Ley 400” entre las que se encuentra como número 4, la revisión de los diseños y estudios.

La resolución 0015 de 2015 de la Comisión asesora permanente para el régimen de construcciones sismo resistentes (2015) se encuentra publicada en el Diario Oficial No. 49734 de 2015, y establece respecto a la revisión de diseños estructurales:

#### “3.6.1. Objeto

Consiste en la revisión de los diseños estructurales para determinar la bondad de los procedimientos empleados y el cumplimiento de los requisitos de diseño contenidos en la normativa sismo resistente.

#### 3.6.2. Alcance de los trabajos

El revisor debe estudiar y emitir concepto sobre el cumplimiento del Reglamento NSR- 10 con respecto a lo siguiente:

- Avalúo de cargas utilizado.
- Definición de los parámetros de diseño sísmico.
- Definición de los parámetros que determinan la resistencia al fuego de los elementos estructurales.
- Procedimiento de análisis estructural empleado.
- Verificación de las derivas y deflexiones verticales de la estructura.
- Procedimientos de diseño de los elementos estructurales.
- Procedimientos de diseño de la resistencia al fuego de los elementos estructurales.
- Revisión de los planos estructurales.
- Revisión del seguimiento de las recomendaciones del estudio geotécnico.

#### 3.6.3. Entregas

El revisor de los diseños estructurales debe entregar como culminación de sus trabajos lo siguiente:

- Memoria de los trabajos de revisión realizados.
- Diagnóstico de si el proyecto fue realizado adecuadamente y cumpliendo el Reglamento NSR-10 o no.
- En caso de que haya deficiencias en el diseño debe entregarse una relación de las partes del diseño que deben ser corregidas.

#### 3.6.4. Grado de complejidad

Se utiliza el mismo grado de complejidad definido en 3.3.5 para los diseños estructurales.

#### 3.6.5. Formulación del costo

El costo de la revisión de diseños estructurales corresponde al 25% (veinticinco por ciento) de los honorarios de diseño estructural evaluados de acuerdo con 3.3.4.”

El grado de complejidad (3.3.5) dentro de la resolución 0015 de 2015, es definido únicamente con el fin de variar los honorarios por diseño, en función de la complejidad de la estructura, reduciendo hasta al 60% para las estructuras más sencillas (edificaciones de hasta 5 pisos sin sótano) el honorario básico (3.3.4) propuesto por diseño estructural de 5,2% del costo de la estructura.

Previamente se ha subrayado el texto correspondiente al alcance de la revisión de diseños estructurales. Del análisis a las normas hasta ahora citadas, se deduce que, este procedimiento debería realizarse para la revisión estructural bien sea por un particular o por personal de la curaduría correspondiente.

**1.1.4. Curadurías en la revisión estructural.** El artículo 101 de la ley 388 de 1997 define así:

“El curador urbano es un particular encargado de estudiar, tramitar y expedir licencias de parcelación, urbanismo, construcción o demolición, y para el loteo o subdivisión de predios, a petición del interesado en adelantar proyectos de parcelación, urbanización, edificación, demolición o de loteo o subdivisión de predios, en las zonas o áreas del municipio o distrito que la administración municipal o distrital le haya determinado como de su jurisdicción.

La curaduría urbana implica el ejercicio de una función pública para la verificación del cumplimiento de las normas urbanísticas y de edificación vigente en el distrito o municipio, a través del otorgamiento de licencias de urbanización y de construcción.”

El decreto 1469 de 2010, que rige el funcionamiento de las curadurías en su artículo 31 de la revisión del proyecto y en su parágrafo 2 se lee:

“Parágrafo 2°. La revisión del cumplimiento del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR10, y la norma que lo adicione, modifique o sustituya; en los diseños estructurales, estudios geotécnicos y de suelos y diseños de elementos no estructurales puede ser realizada por el curador urbano o por la autoridad municipal o distrital encargada de expedir las licencias urbanísticas; o bien, a costa de quien solicita la licencia, por uno o varios profesionales particulares, calificados para tal fin de conformidad con los requisitos establecidos en el Capítulo 3, Título VI de la Ley 400 de 1997, sus decretos reglamentarios, o las normas que los adicionen, modifiquen o sustituyan. El revisor o revisores de los diseños estructurales, estudios geotécnicos y de suelos y diseños de elementos no estructurales no puede ser el mismo profesional que los elaboró, ni puede tener relación laboral contractual o profesional con este, ni con la empresa que tuvo a su cargo la elaboración de cada uno de los diseños y estudios respectivamente.

Cuando se acuda a la modalidad de revisión por profesionales particulares, quienes efectúen la revisión deberán dirigir un memorial a la persona o entidad competente para expedir la licencia donde señalen el alcance de la revisión y certifiquen que los diseños y estudios propuestos se ajustan al Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente NSR10, y la norma que lo adicione, modifique o sustituya.

El alcance y procedimiento de la revisión de los diseños y estudios se sujetará a las prescripciones que para el efecto defina la Comisión Asesora Permanente para el Régimen de Construcciones Sismo Resistentes, de acuerdo con lo establecido en los artículos 16 y 42 de la Ley 400 de 1997, sus decretos reglamentarios, o las normas que los adicionen, modifiquen o sustituyan. Dicha Comisión también definirá el alcance y procedimiento que deben seguir los curadores urbanos y las autoridades municipales o distritales encargadas de la expedición de licencias para constatar el cumplimiento de la revisión de los diseños y estudios cuando la hagan profesionales particulares.”

Sobre la idoneidad el parágrafo 3 del mismo Artículo 31 dicta:

“Parágrafo 3°. Hasta tanto la Comisión Asesora Permanente para el Régimen de Construcciones Sismo Resistentes determine los procedimientos y mecanismos de acreditación de los profesionales que deben surtir este requisito para realizar labores de diseño estructural, estudios geotécnicos, diseño de elementos no estructurales, revisión de los diseños y estudios, y supervisión técnica de la construcción, estos acreditarán su experiencia e idoneidad ante la autoridad municipal o distrital encargada de la expedición de licencias, demostrando para el efecto un ejercicio profesional mayor de cinco (5) años cuando se trate de diseñadores estructurales, ingenieros geotecnistas, revisores de diseños y estudios, y supervisores técnicos de la construcción y de tres (3) años cuando se trate de diseñadores de elementos no estructurales y directores de la construcción, lo cual harán con copia de la matrícula profesional o el instrumento que haga sus veces, donde aparezca la fecha de expedición de la misma y certificaciones del ejercicio de la profesión.”

Se puede entrever que el reglamento para las curadurías se alinea completamente con el contenido de la Ley 400 de 1997 y el decreto 926 de 2010, respecto a los criterios sobre obligatoriedad y alcance de la revisión estructural e idoneidad de los revisores estructurales.

**1.1.5. Reciente modificación a la normativa sobre Revisión Estructural.** “El 12 de octubre de 2013 a las 20:20 horas, la Etapa 6 del edificio Space se desplomó en su totalidad segundo la vida de un residente, dos vigilantes y nueve obreros que se encontraban en el lugar” (Universidad de los Andes, 2014) realizando labores de reparación, después de que una de las columnas falló por aplastamiento del concreto el día anterior. El edificio “se cayó por su propio peso” (Universidad de los Andes, 2014), concluyó la investigación en octubre de 2014. Mediante comunicado tres años y medio después del colapso, el director del COPNIA informó que se cancelaba la matrícula profesional a los encargados del diseño y la revisión estructural del edificio Space de Medellín.

La revisión de la legislación nacional sobre la revisión estructural finaliza con la reciente Ley 1796 de 2016, denominada coloquialmente “Ley AntiSpace” y el posterior decreto que la reglamentó el 945 de 2017. La ley 1796 de 2016, se estableció una modificación al párrafo del artículo 15, quedando así:

“Parágrafo. La revisión de los diseños estructurales de las edificaciones cuyo predio o predios permitan superar más de dos mil (2.000) metros cuadrados de área construida, independientemente de su uso, será realizada a costo de quien solicita la licencia, con un profesional particular, calificado para tal fin, de conformidad con los requisitos establecidos en el Capítulo III Título VI de esta ley, diferente del diseñador e independiente laboralmente

de él, el cual luego de corregidos los ajustes solicitados mediante el acta de observaciones emitida por el curador urbano o la dependencia de la administración municipal o distrital encargada de la expedición de licencias de construcción, por medio de un memorial dirigido a esta certificará el alcance de la revisión efectuada, el cumplimiento de las normas de la presente ley y sus decretos reglamentarios y firmará los planos y demás documentos técnicos como constancia de haber efectuado la revisión.

El profesional encargado de la revisión de los diseños estructurales será escogido de manera autónoma por el solicitante de la licencia.

Esta revisión también la podrán realizar personas jurídicas que cuenten con personal calificado, acreditado y registrado que cumpla con los requisitos definidos en la presente ley para realizar la revisión de los diseños estructurales.

Cuando se presenten diferencias entre el diseñador estructural y el revisor del proyecto las mismas se resolverán de conformidad con el reglamento que para tal efecto adopte el Gobierno nacional.

Para edificaciones que deban someterse a una supervisión técnica de acuerdo con lo establecido en el Título V de la presente ley y sus decretos reglamentarios y que se localicen en municipios y distritos donde no se cuente con la figura de curador urbano, la revisión de que trata el presente párrafo correrá a costa de quien solicite la licencia y será ejercida por profesionales independientes o por el curador urbano del municipio más cercano del mismo departamento, en los términos y condiciones que establezca el Gobierno nacional a través del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.

La revisión de los diseños estructurales de las edificaciones cuyo predio o predios no permitan superar más de dos mil (2.000) metros cuadrados de área construida,

independientemente de su uso, deberá cumplir con la totalidad de las normas previstas en la presente ley y sus decretos reglamentarios, recayendo la responsabilidad sobre el diseñador estructural, el propietario del predio o el fideicomitente o el constructor en el caso de los patrimonios autónomos titulares de los derechos de dominio que hayan sido designados en el respectivo contrato de fiducia, de conformidad con lo previsto en la ley al respecto, y el titular de la licencia de construcción. Sin perjuicio de lo anterior, durante el trámite de la licencia se hará una revisión del proyecto estructural por parte de los encargados de estudiar y expedir las licencias.

Cuando la edificación que se pretende desarrollar tenga menos de dos mil (2.000) metros cuadrados de área construida, pero cuente con la posibilidad de tramitar ampliaciones que permitan alcanzar los dos mil (2.000) metros cuadrados exigidos, en la evaluación inicial del diseño estructural se analizará si el mismo soporta la futura ampliación en cuyo caso la edificación pese a tener menos de dos mil (2.000) metros cuadrados, deberá contar con la revisión estructural de que trata este artículo.

Cuando en uno o más predios se aprueben distintas edificaciones que en conjunto superen los dos mil (2.000) metros cuadrados de área construida, cada una de ellas independientemente de su área construida deberá contar con la revisión estructural exigida en este artículo.”

El texto arriba subrayado implica que el curador a través de sus funcionarios deberá en todo caso realizar una revisión estructural de oficio. Igualmente la Ley 1796 de 2016, establece sobre la idoneidad de los profesionales:

“Artículo 12. Registro Único Nacional de Profesionales Acreditados. Créase el Registro Único Nacional de Profesionales Acreditados para adelantar las labores de diseño, revisión y supervisión de que trata la Ley 400 de 1997, el cual será administrado por el Consejo Profesional Nacional de Ingeniería (COPNIA) y tendrá como insumo la calificación del examen de acreditación, que se realizará de acuerdo con los términos y condiciones que establezca el Reglamento Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes; y el reporte de sanciones suministrado por el Consejo Profesional Nacional de Ingeniería (COPNIA) y el Consejo Profesional Nacional de Arquitectura y sus Profesiones Auxiliares (CPNAA). El registro contará con un portal web de público acceso.”

A la fecha no se han realizado un examen de acreditación para la creación de dicho registro. De igual forma el decreto 945 de 2017, que reglamentó la ley anti-Space (Ley1796 de 2016), definió, entre otros: que la Curaduría en todos los casos revisará de oficio los diseños estructurales; que las revisiones independientes de los estudios geotécnicos y los diseños de los elementos no estructurales son de carácter voluntario; que la responsabilidad por los diseños recae en los profesionales que los elaboran y en quienes adelanten revisión independiente, construcción y supervisión técnica independiente; que los diseños que sean realizados por el método de análisis dinámico inelástico y el método de análisis no lineal estático de plastificación progresiva (pushover), deben ser objeto de una revisión externa por expertos en estos métodos de análisis; que dentro de las organizaciones (personas jurídicas), los revisores independientes no podrán intervenir en otra operación del proyecto (como la construcción); que los revisores estructurales deberán acreditarse ante el COPNIA.

Para la acreditación como revisor estructural, se deben realizar 3 pasos: paso 1 – Validación de la experiencia del profesional que le permite, una vez constatada, presentarse a las pruebas y exámenes, paso 2 – Obtención del puntaje requerido en las pruebas y exámenes para que el profesional pueda ser considerado idóneo, y paso 3 – Inscripción del profesional en el “Registro Único Nacional de Profesionales Acreditados”.

El decreto 945 de 2017, incorpora a la NSR-10 el apéndice A-6 De la Revisión Independiente de Los Diseños Estructurales, el cual describe los procedimientos jurídicos o trámites que se deben seguir para realizar esta tarea. Sólo los literales siguientes tratan sobre alcance o procedimiento técnico:

“A-6.2.4 — Contenido de la revisión independiente de los diseños estructurales — El revisor independiente de los diseños estructurales debe constatar que se cumplió con la totalidad de las normas exigidas por la Ley 400 de 1997, la Ley 1796 de 2016 y el presente Reglamento NSR-10, en cuanto al diseño estructural de la edificación.

A-6.2.5 — Alcance y metodología de la revisión independiente de los diseños estructurales — El revisor independiente de los diseños estructurales, debe cubrir en su alcance y metodología lo exigido por la Resolución 0015 de 2015 expedida por la “Comisión Asesora Permanente para el Régimen de Construcciones Sismo Resistente”, o la norma que la adicione, modifique o sustituya.”

Queda claro que, dentro de la normatividad revisada, no se define detalladamente un procedimiento para la realización de una revisión estructural. Al parecer queda al criterio del profesional quien la realice.

En este contexto es la intención de esta monografía, recopilar y aplicar algoritmos estadísticos que hayan sido empleados en la literatura científica, y que permitan al profesional encargado de la revisión de diseños estructurales, realizar una validación de aspectos importantes del diseño, sin tener que recurrir al modelamiento completo de un proyecto.

## **1.2. Algoritmos De Evaluación Estructural**

Los algoritmos que se pretenden emplear deben cumplir con la misión de facilitar la tarea de revisión estructural y validar el diseño, respecto a parámetros mínimos que dan los códigos y normas de diseño. Las principales características que buscadas en los algoritmos serían su fácil aplicación, la fiabilidad de resultados y su reconocimiento dentro de la comunidad científica.

**1.2.1. Listas de Control o de Chequeo.** Las listas de control son quizás la versión más primitiva de algoritmo. Kahneman (2012) cita un libro (Gawande, 2011) que ha sido traducido al español como *El efecto checklist: cómo una simple lista de comprobación reduce errores y salva vidas*, cuyo título hace referencia al Puntaje Apgar, que es una estimación del estado de un recién nacido, a partir de cinco variables (pulso, respiración, reflejos, tono muscular y color) y tres puntos (0, 1 o 2, según la vigorosidad de cada signo) (Kahneman, 2012; Apgar, V., 1953). Aplicando la puntuación de Apgar, el personal de las salas de parto disponía por fin de estándares consistentes para determinar si los bebés tenían problemas, y la fórmula se consideró una importante contribución a la reducción de la mortalidad infantil. El test de Apgar se sigue utilizando todos los días en las salas de partos.

Torrado-Gómez y otros (2016) elaboraron una lista de chequeo ponderada para la transferencia de conocimiento en el área geotécnica. Tras calificar cada uno de los aspectos relacionados en la NSR-10, concertaron que (a) el análisis geotécnico, (b) la definición de la profundidad de cimentación, y (c) las recomendaciones para el diseño, son los que mayor importancia tienen dentro del informe geotécnico, pero que un estudio que no supere el 90% de cumplimiento en dicha ponderación debería rechazarse o al menos objetarse, esto adicional a la verificación de la idoneidad (definida como “realizado por un ingeniero con experiencia para llevar a cabo este tipo de estudios”) de la persona que lo realiza. De esta forma, esta lista de chequeo ponderada se convierte en un algoritmo que valida o invalida un estudio geotécnico. En la Figura 4 se muestra la totalidad de los factores analizados y su ponderación.

En 2005, el ICONTEC (NTC 5341) realizó un formulario para el trámite de licencias de construcción, el cual se adoptó por Resolución 0984 (MinAmbiente, 2005) y se empezó a emplear en las curadurías urbanas como documento de control y a su vez se creó un formato de revisión e información de proyectos el cual se ha reglamentó mediante Resolución 0912 (Min Ambiente, 2009) del Ministerio de Vivienda hasta llegar al decreto 1077 de 2015, que recopiló la normativa como “Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio.”

Recientemente, el Ministerio de Vivienda, mediante Resolución de 0463 de 13 de julio de 2017, realizó la actualización del formulario y formato de revisión a los parámetros de la ley AntiSpace y su decreto Reglamentario que modificó la NSR-10. En dicho documento se incluye una pequeña lista de chequeo para la verificación de los documentos que deben presentarse y un contenido mínimo de dichos documentos. La Figura 5, contiene la lista para el diseño estructural.

Matriz para Elaboración de Estudios Geotécnicos

| Evaluación del cumplimiento del estudio suelos y geotecnia por el método de puntos |   |                   |                      |                          |                  |  |
|--|---|-------------------|----------------------|--------------------------|------------------|--|
| #  | Indicadores   | Peso criterio (A) | Peso subcriterio (B) | Valor cumplimiento % (C) | Vlr. Parcial B*C | Vlr. Total cumplimiento $\sum$ (Vlr.Parcial) |
| 1  | Art H.1.1.2.1 Firma de los estudios   | 1                 | 1                    | 100                      |                  |  |
| 2  | Art. H.2.2.2.1 Información del proyecto   | 1                 | 1                    | 100                      |                  |  |
| 3  | Art. H.2.2.2.1 Evaluación de Cargas   | 3                 | 1                    | 100                      |                  |  |
|  | Art. H.3.1 Definir el número de unidades de construcción                                    |                   | 2                    | 100                      |                  |  |
| 4  | Art. H.3.1.1 Clasificación de las unidades de construcción por categorías                   | 10                | 5                    | 100                      |                  |  |
|  | Art. H.2.2.2.1 Análisis geotécnico  |                   | 1                    | 100                      |                  |  |
|  | Art. H.2.2.2.1 Planos de localización   |                   | 2                    | 100                      |                  |  |
|  | Art. H.3.2.3, H.3.2.4, H.3.2.5 y H.3.2.6 Cálculo del número mínimo de sondeos               |                   | 2                    | 100                      |                  |  |
| 5  | Art. H.3.2.3, H.3.2.4, H.3.2.5 y H.3.2.6 Definición de la profundidad mínima de los sondeos | 4                 | 2                    | 100                      |                  |  |
|  | Cap. A.2 Definición de los niveles de amenaza sísmica y movimientos sísmicos de diseño      |                   | 2                    | 100                      |                  |  |
| 6  | Cap. H.7 Evaluación geotécnica de efectos sísmicos  | 11                | 3                    | 100                      |                  |  |
|  | Art. H.2.2.2.1 Información del subsuelo   |                   | 2                    | 100                      |                  |  |
|  | Art. H.2.2.2.1 Información de cada unidad geológica   |                   | 1                    | 100                      |                  |  |
|  | Art. H.2.2.2.1 Planos de localización   |                   | 1                    | 100                      |                  |  |
|  | Art. H.2.2.2.1 Ubicación de trabajos de campo   |                   | 2                    | 100                      |                  |  |
| 7  | Art. H.2.2.2.1 Registros de perforación   | 4                 | 2                    | 100                      |                  |  |
|  | Art. H.2.2.2.1 Resultado de pruebas y ensayos de campo y laboratorio                        |                   | 1                    | 100                      |                  |  |
| 8  | Art. H.2.5 Clasificación de los suelos como granulares o cohesivos                          | 24                | 2                    | 100                      |                  |  |
|  | Art. H.3.3.3 Propiedades básicas mínimas de los suelos                                      |                   | 1                    | 100                      |                  |  |
|  | Cap. H.9 Condiciones geotécnicas especiales   |                   | 2                    | 100                      |                  |  |
|  | rt. H.2.2.2 Memorias de cálculo   |                   | 2                    | 100                      |                  |  |
|  | Art. H.2.3 Análisis de la existencia de agua subterránea                                    |                   | 5                    | 100                      |                  |  |
|  | Art. H.4.6 Definición de la profundidad de cimentación                                      |                   | 2                    | 100                      |                  |  |
|  | Art. H.4.7 Calculo de factor de seguridad de las cimentaciones                              |                   | 3                    | 100                      |                  |  |
|  | Art. H.4.8 Cálculo de asentamientos   |                   | 3                    | 100                      |                  |  |
|  | Cap. H.5 Estudio de estabilidad de taludes y laderas  |                   | 2                    | 100                      |                  |  |
|  | Art. H.5.2.5 Definición del sismo de diseño para análisis seudoestático de taludes          |                   | 3                    | 100                      |                  |  |
| 9  | Art. H.2.4.3 Cumplimiento de factores de seguridad mínimos para estabilidad de taludes      | 10                | 2                    | 100                      |                  |  |
|  | Cap. H.6 Análisis de presiones de tierras y estructuras de contención                       |                   | 5                    | 100                      |                  |  |
|  | Art. H.2.2.2.1 Recomendaciones para el diseño   |                   | 3                    | 100                      |                  |  |
| 10   | Art. H.2.2.2.1 Recomendaciones para la protección de edificaciones y predios vecinos        | 14                | 2                    | 100                      |                  |  |
|  | Art. H.2.2.2.1 Recomendaciones para la construcción. Sistema constructivo                   |                   | 2                    | 100                      |                  |  |
|  | Cap. H.8.4 Sistema constructivo de cimentaciones  |                   | 4                    | 100                      |                  |  |
|  | Cap. H.8.1 Sistema Geotécnico constructivo  |                   | 3                    | 100                      |                  |  |
|  | Cap. H.8.2 Sistema constructivo de excavaciones   |                   | 3                    | 100                      |                  |  |
|  | Cap. H.8.3 Sistema constructivo de estructuras de contención                                |                   | 2                    | 100                      |                  |  |
| Totales  |   | 82                | 82                   |                          |                  |  |

Nota 1: La designación del criterio se hace en el equipo de trabajo. El peso de cada criterio corresponde a lo sugerido en la NSR-10 y el subcriterio es asignado por el equipo de trabajo.

Nota 2: Se establece una escala de ponderación de 1 a 100 o en porcentaje.

Nota 3: Este ejercicio se realiza para cada estudio y permite comparar resultados entre estudios realizados.

Fuente: [9]

Figura 4. Listado de factores analizados y su ponderación. Adaptado de Torrado y otros, 2017

|  | SI                       | NO                       | N/A                      |
|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| <b>PARA PROYECTOS SUJETOS AL TÍTULO E DEL REGLAMENTO NSR-10*:</b>  |                          |                          |                          |
| 1. APIQUE: _____   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 2. CUADRO DE LONGITUD DE MUROS CONFINADOS: _____   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 3. PLANOS CON ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE MUROS CONFINADOS, CIMENTACION ENTREPISOS Y CUBIERTA*  |                          |                          |                          |
| 3.1. Rótulo  |                          |                          |                          |
| • Dirección: _____   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| • Firma _____ del _____ arquitecto:  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| • Número de matrícula del _____ ingeniero:   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| • Escala: _____  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 3.2. Planta de cimentación con _____ ejes:   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 3.3. Plantas de vigas y muro con _____ ejes:   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 3.4. Despiece de elementos de _____ confinamiento:   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 3.5. Especificaciones de _____ materiales:   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| <b>PARA PROYECTOS NO SUJETOS AL TÍTULO E DEL REGLAMENTO NSR-10*:</b>   |                          |                          |                          |
| 1. ESTUDIO DE SUELOS Y _____ GEOTÉCNICO:   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 2. MEMORIAS DE _____ CÁLCULO ESTRUCTURAL:  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 3. PLANOS ESTRUCTURALES  |                          |                          |                          |
| 3.1. Rótulo  |                          |                          |                          |
| • Dirección: _____   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| • Firma _____ del _____ arquitecto:  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| • Número de matrícula del _____ ingeniero:   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| • Escala: _____  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 3.2. Planta de cimentación con _____ ejes:   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 3.3. Plantas estructurales con _____ ejes:   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 3.4. Despiece de elementos de _____ confinamiento:   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 3.5. Especificaciones de _____ materiales:   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 4. ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES  |                          |                          |                          |
| 4.1. Cálculo de los elementos no estructurales:  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 4.2. Planos de elementos no estructurales:   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| <b>PROYECTOS DE INGENIERIA PARA EL RECONOCIMIENTO DE LA EXISTENCIA DE EDIFICACIONES.</b>   |                          |                          |                          |
| 1. PARA PROYECTOS SUJETOS AL TÍTULO E DEL REGLAMENTO NSR-10<br>Peritaje simplificado según Manual de Construcción, Evaluación y Rehabilitación sísmo resistente de Viviendas de Mampostería de la Asociación de Ingeniería Sísmica, AIS (Decreto 1077, Artículo 2.2.6.4.2). Este manual está disponible en <a href="http://www.asosismica.org.co/producto/manual-de-construccion-evaluacion-y-rehabilitacion-sismo-resistente-de-viviendas-de-mamposteria/">http://www.asosismica.org.co/producto/manual-de-construccion-evaluacion-y-rehabilitacion-sismo-resistente-de-viviendas-de-mamposteria/</a> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 2. PARA PROYECTOS NO SUJETOS AL TÍTULO E DEL REGLAMENTO NSR-10<br>Copia de un peritaje técnico que sirva para determinar la estabilidad de la construcción y las intervenciones y obras a realizar que lleven progresiva o definitivamente a disminuir la vulnerabilidad sísmica de la edificación, cuando a ello hubiere lugar (Decreto 1077, Artículo 2.2.6.4.2.3).  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| <b>OBSERVACIONES</b>   |                          |                          |                          |
|  |                          |                          |                          |
|  |                          |                          |                          |

\*Todos los planos y estudios especializados deben ir debidamente rotulados y firmados por profesional idóneo de acuerdo con el Título VI – Ley 400 de 1997

Figura 5. Lista de chequeo de la resolución actual Adaptado de Minvivienda, Res 0463 de 2017.

Como se observa, esta tabla no alcanza a contener la suficiente información que permita realizar la validación de un diseño estructural. Es más, un simple listado de los literales A.1.5.2.1

y A.1.5.3.1, contenido mínimo de los planos y memorias estructurales respectivamente, que “se presenten para obtener una licencia de construcción” (NSR-10), arrojan una lista (ver

Tabla 1) más extensa que carecería también de elementos suficientes para realizar validaciones de los diseños estructurales. Pese a eso, una lista así, fue empleada por el autor para la evaluación preliminar de diseños estructurales en una Oficina de Planeación Municipal, y será empleada en el presente trabajo para evaluar el contenido mínimo de un proyecto estructural. La lista es,

Tabla 1.

*Lista de chequeo según contenido mínimo de memorias y planos.*

| Ley No. 400 de 19 de Agosto 1997: Por la cual se adopta las normas SR. |                                     |      |    |     |  |
|--|-------------------------------------|------|----|-----|--|
| NSR-10: Numeral A.1.5.2: Planos. A.1.5.2.1 Planos estructurales        |                                     |      |    |     |  |
| NSR-10: Numeral A.1.5.3: Memorias. A.1.5.3.1 Memorias estructurales    |                                     |      |    |     |  |
| Lista de chequeo diseño estructural                                    |                                     |      |    |     |  |
| Ítem y contenido   | Chequeo                             |      |    |     |  |
|  | SI                                  | Inc. | NO | N/A |  |
| 1  | Memorias                            |      |    |     |  |
| 2  | Descripción del sistema estructural |      |    | X   |  |
| 3  | Cargas verticales                   |      |    | X   |  |
| 4  | Grado de capacidad de disipación    |      |    | X   |  |
| 5  | Cálculo de la fuerza sísmica        |      |    | X   |  |
| 6  | Tipo de análisis estructural        |      |    | X   |  |
| 7  | Verificación de derivas             |      |    | X   |  |
| 8  | Diseños                             |      |    |     |  |
| 9  | Viguetas y/o losas                  |      |    | X   |  |
| 10   | Vigas                               |      |    | X   |  |
| 11   | Columnas y/o muros                  |      |    | X   |  |
| 12   | Escaleras                           |      |    | X   |  |
| 13   | Cimientos                           |      |    | X   |  |
| 14   | Formato                             |      |    |     |  |
| 15   | Portada                             |      |    | X   |  |
| 16   | Encabezados y pies de página        |      |    | X   |  |
| 17   | Numeración                          |      |    | X   |  |
| 18   | Paginación                          |      |    | X   |  |
| 19   | Final                               |      |    | X   |  |
| 20   | Planos                              |      |    |     |  |
| 21   | Especificaciones de los materiales  |      |    | X   |  |

|    |   |   |   |
|----|---|---|---|
| 22 | Resistencia del concreto  | X |   |
| 23 | Resistencia del acero   | X |   |
| 24 | Calidad de las unidades de mampostería                              |   | X |
| 25 | Tipo de mortero   |   | X |
| 26 | Calidad de la madera estructural                                    |   | X |
| 27 | Tamaño y localización de los elementos estructurales                | X |   |
| 28 | Cimentación   | X |   |
| 29 | Diafragmas estructurales  | X |   |
| 30 | Cotas de elementos (planta)   | X |   |
| 31 | Elementos especiales o tipo   | X |   |
| 32 | Pórticos (vigas y columnas)   | X |   |
| 33 | Muros estructurales   | X |   |
| 34 | Dimensiones y refuerzos   | X |   |
| 35 | Tipo y localización de las conexiones entre elementos estructurales |   | X |
| 36 | Empalmes entre los elementos de refuerzo                            |   | X |
| 37 | Grado de disipación de la energía                                   |   | X |
| 38 | Cargas vivas y de acabados  |   | X |
| 39 | Grupo de uso de la edificación                                      |   | X |
| 40 | Formato   |   |   |
| 41 | Rótulos   | X |   |
| 42 | Escalas   | X |   |

Una lista completa de los numerales de la NSR-10 (AIS, 2010) podría realizarse. Como lo indica el informe de revisión del Edificio Space publicado por la Universidad de los Andes (2014) son al menos 523 literales que contenía la NSR-98 (AIS, 1998, versión anterior a la NSR-10 vigente hoy en día) que aplican para un diseño como el del edificio Space el cual hoy en día es típico en Colombia (edificio alto en concreto reforzado). Una lista de chequeo que incluya ponderación de cada uno de los literales podría llegar a ser un buen algoritmo de verificación. Incluso se podrían incluir pequeños cálculos mediante una hoja de Excel y rangos de valores aceptables y tras una calificación de todos los aspectos, validar o no un diseño estructural.

**1.2.2. Hassan y Sozen – Índices de Rigidez.** En Ahmed F. Hassan y Mete A. Sozen (1997), los autores presentan un método simplificado para clasificar edificaciones monolíticas de concreto reforzado de baja altura de acuerdo a su vulnerabilidad al daño sísmico. El método requiere sólo las dimensiones de la estructura, con las cuales se calculan dos índices, que se grafican con el fin de comparar las edificaciones evaluadas.

A menores índices, mayor es la vulnerabilidad sísmica de la estructura. Los índices son:

Índice de muros:

$$WI = \frac{A_{cw} + 0.1A_{mw}}{A_{ft}} \times 100 \quad (1)$$

Índice de columnas:

$$CI = \frac{0.5A_{col}}{A_{ft}} \times 100 \quad (2)$$

Donde,

$A_{cw}$ , es la suma de las áreas de las secciones transversales de los muros en concreto reforzado en cada dirección horizontal en la base,

$A_{mw}$ , es la suma de las áreas de las secciones transversales de los muros divisorios en mampostería no reforzada en cada dirección horizontal en la base,

$A_{ft}$ , es la suma de las áreas de piso por encima de la base de la edificación,

$A_{col}$ , es la suma de las áreas de las secciones transversales de columnas en la base.

El daño a las edificaciones durante un terremoto puede ser relacionado directamente a la deriva, y esta es controlada por la rigidez de la edificación que depende a su vez de la rigidez de

los elementos estructurales y no estructurales de la edificación. Desafortunadamente, determinar la rigidez de la estructura requeriría un tiempo considerable de cálculo.

El índice de prioridad, que se expresa así,

$$PI = WI + CI \quad (3)$$

Aquellas edificaciones con bajos valores de PI serían candidatas para una revisión más exhaustiva de su vulnerabilidad. Indudablemente, el método deja afuera más variables que las que incluye, pero es un primer filtro para identificar las estructuras que requieran un análisis más detallado (Zora 2013).

Aceptando que el juicio de un ingeniero es el más importante criterio para determinar la vulnerabilidad sísmica, el método propuesto conserva el ingrediente más costoso: tiempo del profesional experimentado. Es común representar los índices de Hassan-Sozen en gráfico donde el eje X representa el índice de columnas y el eje Y representa el índice de muros.

En 2012, Wei Zhou y Wenzhong Zheng, emplearon los índices propuestos por Hassan y Sozen, (1997) para correlacionar éstos, con el nivel de daños que había sufrido un inventario de edificaciones en un terremoto que devastó Wenchuan, China, en 2008. Zhou y Zheng (2012), escogieron los índices propuestos por Hassan sobre otros por varias razones que se citan:

- ✓ Es sencillo, y su sencillez lo hace una buena alternativa para evaluar grandes inventarios de estructuras,
- ✓ Fue diseñado y calibrado para usar con estructuras que no cumplen requisitos normativos, para áreas con alto riesgo sísmico y estructuras con muros divisorios de

mampostería similares a los que se encuentran en Wenchuan,

- ✓ Ha sido probado en áreas con diferentes prácticas constructivas, y,
- ✓ Es la base para las recomendaciones de diseño publicadas por el American Concrete Institute, ACI, comité 314 (2012).

Pese a que los índices de Hassan y Sozen (1997) han sido empleados en múltiples ocasiones para evaluar el nivel de daño que han sufrido múltiples edificaciones en diferentes sismos, los autores consideran innegable que el mejor camino para identificar la vulnerabilidad de una edificación es considerando el juicio de un profesional experimentado.

**1.2.3. Perfil Bio-Sísmico de Edificios.** El Perfil Bio-Sísmico, es definido (Guendeman et al, 2010) como una metodología de calificación sísmica de edificios de concreto reforzado mediante indicadores. Tomas Guendelman B. y otros (1997) emplearon una muestra de 585 edificios en Chile, y con ella establecieron rangos confiables de 13 indicadores sísmicos, que han sido empleados para calificar los diseños estructurales de nuevos proyectos. “Ha sido empleado permanentemente con útiles resultados” y su uso se ha extendido no sólo dentro de Chile (Cornejo y Music, 2011), sino a otros países como México (Teranishi, 2014), por lo que se le reconoce confiabilidad y eficiencia como instrumento de calificación estructural.

Su elaboración fue motivada, por el comportamiento satisfactorio que tuvieron los edificios chilenos en el sismo de 1985, donde hubo una mínima cuantía de daños y pérdidas de vida. El Perfil Bio-sísmico (Guendeman et al, 2010) “Permite detectar errores, deficiencias o debilidades que son poco transparentes, en las revisiones convencionales, y recomendar estudios más

rigurosos cuando realmente es necesario”. Los autores, trabajan en aplicar este instrumento en edificios que sufrieron o no daños en el sismo de 2010, ampliando su muestra a 8210 edificios construidos durante los últimos 25 años en Chile (publicación futura).

En el trabajo *Perfil Bio-sísmico de Rascacielos*, Henoch y otros (2010), hacen extensiva la evaluación de indicadores a los rascacielos, ya que éste estaba limitado a edificios de hasta 30 pisos. El empleo, cada vez más común, de rascacielos en los centros urbanos, motivó a determinar la validez del Perfil Bio-Sísmico con edificios altos chilenos e internacionales. En edificios altos las cargas de viento (normalmente) controlan el diseño por cargas laterales. Pero en zona sísmica, se revisan y diseñan elementos para la demanda sísmica. En los edificios altos, sus periodos fundamentales mayores generan aceleraciones menores pero mayores desplazamientos. El control, que se realiza sobre los desplazamientos evita daños en elementos principales y no estructurales. Esto se controla, en el perfil, mediante, los límites el desplazamiento entre entrepisos.

El sistema estructural de un edificio es un todo (Henoch y otros, 2010). Es un sistema integrado que va a sufrir grandes esfuerzos, algunos más allá de su rango elástico haciendo fallar ciertas partes del sistema. Deben existir otros elementos que soportarán la redistribución de esfuerzos ayudando a la estabilidad y seguridad del edificio. En su trabajo Henoch y otros (2010) concluyen que indicadores siguen teniendo validez para calificar edificios altos.

Antes de pasar a describir los indicadores, se transcriben algunas reflexiones de los ingenieros Guendelman y otros (2010), respecto al ejercicio de la profesión: El significativo aumento en el

uso de software para el análisis y diseño de edificios de concreto reforzado se asocia a una pérdida de comprensión del comportamiento de la estructura. Existe un amplio margen para errores humanos de difícil detección e indiscutible gravedad. La experiencia acumulada pierde terreno frente a la destreza computacional. Citando a Michael Pregnoff (EERI, 1996) el autor del perfil indica que “un ingeniero joven, sin experiencia, normalmente cree que mientras más complejo sea el modelo teórico que utilice, los resultados estarán más próximos a la verdad”. Y el mismo Pregnoff, reflexiona “Los ingenieros estructurales deben saber que el modelo computacional de la estructura es sólo una imagen aproximada de su comportamiento. El ingeniero debe basarse en su conocimiento intuitivo, comprensión y experiencia para visualizar el comportamiento actual de la estructura.”

Finalmente, Guendelman y otros (2010) resaltan: “El ingeniero estructural no debe acotarse al cumplimiento de la norma; sino que debe estudiar el efecto de otros factores críticos: mecanismos potenciales de falla (vulnerabilidad), debilidades de la estructuración (peligrosidad), exposición sísmica durante la construcción, acoplamiento entre direcciones de análisis; redundancia, ductilidad y direcciones alternativas. Es factible calificar los resultados de un análisis, mediante el empleo de la experiencia acumulada y el buen criterio.

Los 13 indicadores del perfil bio-sísmico como fueron propuestos por el profesor Guendelman (2010), se agrupan en: 1) Rigidez, 2) Acoplamiento, 3) Redundancia, y son:

### **Indicadores de Rigidez**

1. Altura total / Periodo traslacional (m/s)
2. Efecto P- $\Delta$  ( $M_{p-\Delta} / M_b$ )

3. Desplazamiento total nivel superior ( $1000 \cdot \delta/H$ )
4. Máximo desplazamiento de entrepiso en centros de gravedad ( $1000 \cdot \delta_{cg}/h$ )
5. Máximo desplazamiento de entrepiso en puntos extremos ( $1000 \cdot \delta_{ext}/h$ )

#### **Indicadores de Acoplamiento**

6. Periodo rotacional / Periodo traslacional
7. Masa equivalente rotacional acoplada / Masa equivalente traslacional directa.
8. Excentricidad dinámica ( $Mt/Qb$ ) / Radio de Giro Basal
9. Masa equivalente traslacional acoplada / Masa equivalente traslacional directa
10. Corte basal acoplada / Corte basal directo
11. Momento volcante basal acoplado / Momento volcante basal directo.

#### **Indicadores de redundancia y demanda de ductilidad.**

12. Número de elementos relevantes en la resistencia sísmica
13. Factor de reducción espectral efectivo ( $R^{**}$ )

Como se observa la obtención completa de los parámetros del Perfil Bio-sísmico, implica la elaboración de un modelo numérico completo de la edificación que se desea evaluar. Igualmente algunos de los parámetros requieren una traducción o traspaso a la normativa colombiana, ya que aunque algunas cosas son comunes entre la norma chilena y la NSR-10 colombiana, existen diferencias, se quiere evaluar indicador por indicador cuáles son esas diferencias y cuál sería la adaptación a normas colombianas. No está en el alcance de la presente monografía, la traducción completa a la norma colombiana, por lo que el perfil se empleará en su versión original. Para especificar los valores aceptables de los indicadores se ha empleado la misma convención de Guendelman (2010), (figuras de la 4 a la 17) pero cambiando la convención de colores a una tipo

semáforo, donde VERDE indica los valores dentro de rangos normales, AMARILLO indica valores aceptables ligeramente apartados de rangos normales y ROJO indica valores fuera de rango. A continuación se describen los indicadores del Perfil Bio-sísmico.

1. Altura total / Periodo traslacional (m/s)

La altura total del edificio sobre el nivel basal (H) no requiere aclaración y el periodo es el del primer modo traslacional en cada una de las direcciones de análisis (Cornejo y Music, 2011).

Cabe destacar que en la norma chilena (INN, 2010) al peso de la edificación se le adiciona un 25% de la carga viva para efectos del análisis sísmico, mientras que la norma colombiana (AIS, 2010), sólo recomienda agregar carga viva en el caso de bodegas o depósitos, pero si resalta que se deben incluir todos los elementos y equipos permanentes, tanques y sus contenidos.

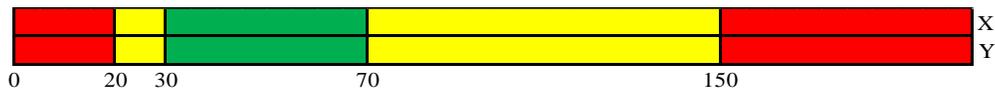


Figura 6. Rango de valores del Indicador 1 (H/T). Adaptado de Guendelman et al, 2010.

2. Efecto P-Δ ( $M_{p-\Delta} / M_b$ )

Es la relación entre el momento producido por el efecto PΔ, denominado  $M_{p-\Delta}$  que se calcula realizando el equilibrio estático a nivel basal de los momentos generados por la carga gravitacional  $P_k$  de cada nivel por su respectivo desplazamiento del centro de masas  $\delta_{cmk}$ , y el momento volcante directo generado por las fuerzas sísmicas (Cornejo y Music, 2011).

Conforme a la NSR-10 este parámetro debe medirse con el espectro elástico, y debe tenerse en cuenta (incluir efectos PΔ en el diseño) cuando este valor sea mayor 0,1 y no debe exceder de 0,3 calificando a la estructura que exceda dicho valor como inestable y que requiere rigidizarse.

Los valores para el Espectro de Diseño Chileno son, -siendo amarillo que los efectos  $P\Delta$  deben incluirse en el análisis-

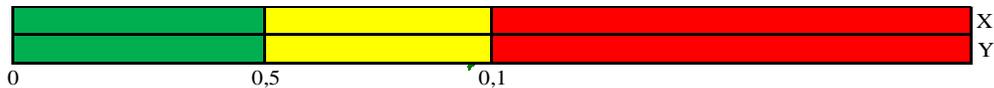


Figura 7. Valores del Indicador 2 (Efecto P-Δ). Adaptado de Guendelman et al, 2010.

3. Desplazamiento total nivel superior ( $1000 \cdot \delta/H$ )

Mide la rigidez traslacional de un edificio. El desplazamiento del nivel superior no se encuentra restringido en la norma chilena, ni en la colombiana. El indicador se toma como la relación entre el desplazamiento relativo entre la base y el último piso,  $\delta_{cmN}$ , y la altura total del edificio (H).

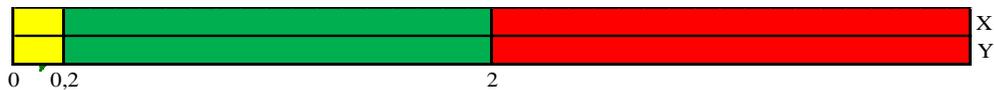


Figura 8. Valores del Indicador 3 ( $1000 \cdot \delta_{cmN} /H$ ). Adaptado de Guendelman et al, 2010.

4. Máximo desplazamiento de entrepiso en centros de gravedad ( $1000 \cdot \delta_{cg}/h$ )

Mide la rigidez traslacional de un edificio, considerando la deformación entre pisos consecutivos. Dicho parámetro es conocido en el entorno nacional como deriva de piso, pero en el caso específico del indicador, medidos para el centro de masa del piso. Tanto en la norma chilena se encuentra restringido a un 0,002 de hpi para el espectro de diseño, como en la colombiana, donde se emplea un límite de 0,01 de hpi, para el espectro elástico, pero teniendo en cuenta deformaciones torsionales debidas a excentricidades. Se expresa en partes por mil.



Figura 9. Valores del Indicador 4 ( $1000 \cdot \Delta_{cm} /h_{pi}$ ). Adaptado de Guendelman et al, 2010.

5. Máximo desplazamiento de entrepiso en puntos extremos ( $1000 \cdot \delta_{ext}/h$ )

Mide el grado de rigidez rotacional que presenta un edificio, restringido a 0,001 en la norma chilena, mientras que para colombiana se podría indicar que la restricción a la deriva cubija ambos indicadores (el 4 y el 5), aunque también en la NSR-10, la rigidez torsional, afecta el factor de reducción, R. En este caso no se mide entre punto extremo y centro masa, sino entre dos puntos  $\Delta_1$  y  $\Delta_2$ , en cada extremo de la estructura a lo largo de un eje de referencia (ver NSR-10, Tabla A.3-6. Irregularidades en planta, tipos 1aP y 1bP). Se calcula como la diferencia entre el desplazamiento del punto extremo (aquel que haya tenido el mayor desplazamiento en el piso,  $\Delta_A$ ) y el desplazamiento del centro de masa,  $\Delta_{cm}$ , dividido en la altura del piso,  $h_{pi}$ , expresado en partes por mil.



Figura 10. Valores del Indicador 5  $((\Delta_A - \Delta_{cm})/h_{pi})$ . Adaptado de Guendelman et al, 2010.

6. Periodo rotacional / Periodo traslacional ( $T_R/T_x$  y  $T_R/T_y$ )

Es el primer indicador de acoplamiento modal, definido éste, como la interacción en la respuesta final que generan dos modos que poseen similar frecuencia de vibración. Este fenómeno es conocido como sintonía modal y puede producir una amplificación dinámica de la respuesta de la estructura. Se estima conveniente que las frecuencias entre los modos de vibración se alejen por lo menos un 20% una de otra. (Cornejo y Music, 2011). Se divide el periodo rotacional, entre el periodo del primer modo traslacional en cada dirección de análisis.

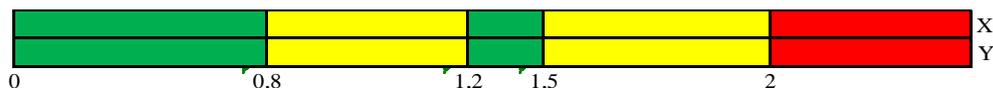


Figura 11. Valores del Indicador 6  $(T_R/T_x$  y  $T_R/T_y)$ . Adaptado de Guendelman et al, 2010.

## 7. Masa equivalente rotacional acoplada / Masa equivalente traslacional directa.

Para este indicador es necesario analizar algunos conceptos de dinámica empleando la notación de la norma chilena. Del numeral 6.3 de la norma, se tiene que “una vez determinados los periodos naturales y modos de vibrar, las masas equivalentes para cada modo n, están dadas por las expresiones:

$$M_{nx} = \frac{L_{nx}^2}{M_n}, M_{ny} = \frac{L_{ny}^2}{M_n}, M_{n\theta} = \frac{L_{n\theta}^2}{M_n} \quad (4)$$

Donde  $L_{nx}$ ,  $L_{ny}$  y  $L_{n\theta}$ , son escalares definidos como la masa asociada al modo n, que es desplazada por el sismo en la dirección adoptada.

$$\text{Dirección sísmica X} \rightarrow L_{nx} = \{\phi\}_n^T [M] \{r_x\} = \sum_{j=1}^N m_j \phi_{j,n}$$

$$\text{Dirección sísmica Y} \rightarrow L_{ny} = \{\phi\}_n^T [M] \{r_y\} = \sum_{j=N+1}^{2N} m_j \phi_{j,n}$$

$$\text{Dirección sísmica } \theta \rightarrow L_{n\theta} = \{\phi\}_n^T [M] \{r_\theta\} = \sum_{j=2N+1}^{3N} J_j \phi_{j,n}$$

Donde,  $\{\phi\}_n^T$  es la transpuesta del vector que representa la forma de vibrar asociada al modo n,  $[M]$  la matriz masa de la estructura de orden  $3N \times 3N$ , y  $\{r_x\}$  es el vector que tiene 1 en cada posición correspondiente a los grados de libertad de desplazamientos en dirección X y ceros en todas las otras posiciones. Ver Ríos y otros (2005) para ampliar estos conceptos.

Estos se relacionan con la masa generalizada  $M_n$ , que representa la masa asociada a cada modo de vibrar, mediante los factores de participación modal del modo n,  $\lambda_n$ , así,

$$\lambda_{nx} = \frac{L_{nx}}{M_n} = \frac{\{\phi\}_n^T [M] \{r_x\}}{\{\phi\}_n^T [M] \{\phi\}_n}, \lambda_{ny} = \frac{L_{ny}}{M_n} = \frac{\{\phi\}_n^T [M] \{r_y\}}{\{\phi\}_n^T [M] \{\phi\}_n}, \lambda_{n\theta} = \frac{L_{n\theta}}{M_n} = \frac{\{\phi\}_n^T [M] \{r_\theta\}}{\{\phi\}_n^T [M] \{\phi\}_n}$$

Conforme a (Cornejo y Music, 2011) para que el indicador tome unidades consistentes, se debe sustituir la masa rotacional acoplada por una lineal equivalente. De manera, que la masa equivalente rotacional acoplada queda redefinida (en dirección X) como,

$$M_{nx\theta} = \frac{L_{nx} \cdot \left( \sum_{j=2N+1}^{3N} \left( \frac{J_j}{r_j} \right) \varphi_{j,n} \right)}{M_n}$$



Figura 12. Valores del Indicador 7 ( $M_{nx0}/M_{nx}$ ). Adaptado de Guendelman et al, 2010.

8. Excentricidad dinámica ( $Mt/Qb$ ) / Radio de Giro Basal

Cociente entre la excentricidad dinámica,  $e_{din}$ , que se calcula como el momento torsionante basal dividido en el cortante basal, y el radio de giro basal,  $r$ , que es la raíz cuadrada del cociente entre la inercia rotacional y el área de la planta.

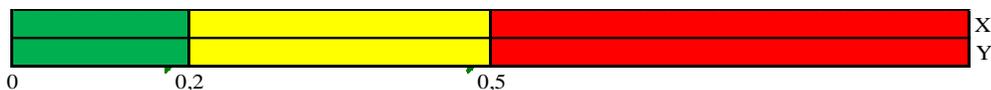


Figura 13. Valores del Indicador 8 ( $e_{din}/r_o$ ). Adaptado de Guendelman et al, 2010.

9. Masa equivalente traslacional acoplada / Masa equivalente traslacional directa.

Mide el grado de acoplamiento traslacional que presenta un edificio, es decir, la tendencia a desarrollar desplazamientos y esfuerzos en dirección ortogonal a la de análisis. Se evalúa sobre el modo que presenta una mayor masa equivalente traslacional directa en cada dirección de análisis. Es la relación entre la masa equivalente traslacional acoplada y la directa en cada dirección de análisis.



Figura 14. Valores del Indicador 9 ( $M_{nxy}/M_{nx}$ ). Adaptado de Guendelman et al, 2010.

10. Corte basal acoplada / Corte basal directo.

Mide el grado de acoplamiento traslacional de la respuesta combinada de un edificio. Se obtiene de la combinación modal ante una carga sísmica en una dirección, relacionando el esfuerzo cortante basal generado ortogonalmente a ésta (acoplado) y el esfuerzo de corte basal en la misma dirección de análisis (directo). (Cornejo y Music, 2011)

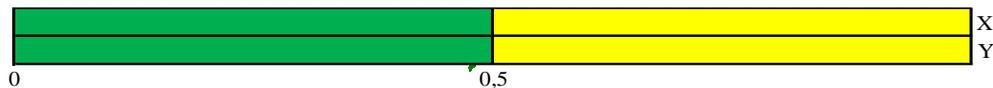


Figura 15. Valores del Indicador 10 ( $Q_{oxy}/Q_{oxx}$ ). Adaptado de Guendelman et al, 2010.

11. Momento volcante basal acoplado / Momento volcante basal directo.

Al igual que el anterior, el indicador mide el grado de acoplamiento traslacional que presenta un edificio. Se calcula sobre la respuesta combinada de la estructura. Relaciona momentos volcantes acoplado u ortogonal con el directo o en la dirección de análisis.



Figura 16. Valores del Indicador 11 ( $Q_{oxy}/Q_{oxx}$ ). Adaptado de Guendelman et al, 2010)

12. Número de elementos relevantes en la resistencia sísmica.

Mide la capacidad que posee una estructura de distribuir los esfuerzos generados por las cargas sísmicas. Números de ejes de mayor importancia que toman los esfuerzos de corte, recomendando que sean más de tres. Como se verá en el siguiente indicador (indicador 13) el número de ejes afecta el valor R en la norma colombiana.



Figura 17. Valores del Indicador 12 ( $Q_{oxy}/Q_{oxx}$ ). Adaptado de Guendelman et al, 2010.

13. Factor de reducción espectral efectivo ( $R^{**}$ )

En la norma colombiana el R, es denominado, coeficiente de capacidad de disipación de energía, siendo llamado “para el diseño”, el denominado en la norma chilena “efectivo”. Es decir, en la norma chilena se establece que el diseño se debe obtener de un análisis sísmico dinámico, con un espectro elástico reducido por el factor R\*. Éste se encuentra en función del valor máximo del factor de modificación de respuesta, Ro, y el periodo de mayor masa traslacional, así,

$$R^* = 1 + \frac{T^*}{0,10T_0 + \frac{T^*}{R_0}} \tag{5}$$

Se observa que mientras en la norma chilena el factor de reducción R, disminuye para estructuras con periodos cortos y para diferentes características del suelo (T<sub>0</sub>), el R en la norma colombiana permanece constante (Ver *Figura 19*). Lo que si afecta el R, para el caso de la norma colombiana, son las irregularidades en planta, en altura y por ausencia de redundancia (número de ejes) del sistema estructura, como se describe en literal A.3 de la NSR-10.

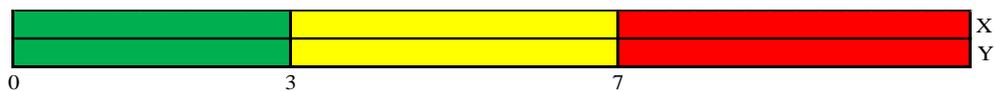


Figura 18. Valores del Indicador 13 (R\*\*). Adoptado de Guendelman et al, 2010.

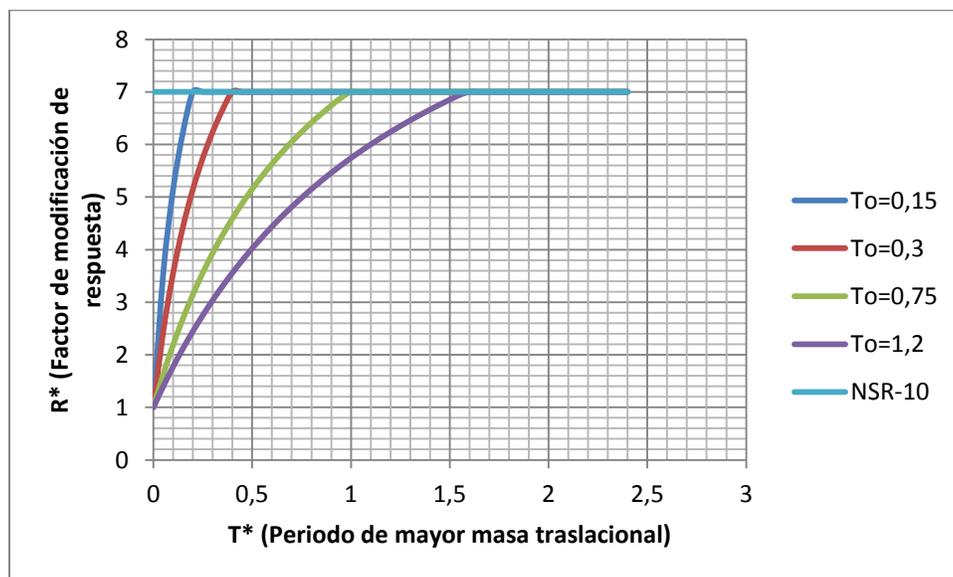


Figura 19. Comparación de la variación del R en la NCh433 vs NSR-10

Para la verificación de la correcta aplicación del Perfil Biosísmico, se ha realizado su medición sobre un modelo simplificado el cual se incluye en el anexo 1, éste fue enviado al autor del Perfil, ingeniero Tomas Guendelman, quien ha verificado la correcta aplicación de los indicadores del Perfil Bio-sísmico en dicha estructura simplificada.

**1.2.4. Índice de Vulnerabilidad según el INME\*.** La mayoría de los parámetros que se emplean para la medición de la vulnerabilidad de edificaciones existentes, pueden ser evaluados en estructuras diseñadas que van a ser construidas, como es el caso de aquellas en trámite de licencias de construcción.

En el INME\* (Maldonado y Chío, 2008) se han realizado investigaciones importantes en el área de vulnerabilidad sísmica de edificaciones en el Área Metropolitana de Bucaramanga, llegando a calificar mediante funciones de daño, la afectación que sufrirían las diferentes configuraciones de edificaciones existentes y para diferentes intensidades de sismos.

Partiendo del Índice de Vulnerabilidad propuesto por Benedetti y Petrini (1984) y tomando elementos de otros métodos de evaluación de vulnerabilidad, el método INME propuso una nueva ponderación para los parámetros evaluados en el índice original, empleando para esto una técnica consistente en consultar la opinión de expertos de la región, con el fin de tener una ponderación más confiable y adaptada a las tipologías presentes en Colombia y específicamente en el área metropolitana de Bucaramanga.

---

\* Grupo de Investigación de Materiales y Estructuras de Construcción. Universidad Industrial de Santander.

En el caso del índice de vulnerabilidad del INME, aplicado a estructuras de mampostería, 9 de los 11 parámetros de calificación pueden ser evaluados en planos (ver Figura 20). Sólo dos parámetros que son la calidad del sistema estructura y el estado de conservación de la estructura, hacen referencia a conceptos que no pueden ser evaluados en una estructura que no ha sido construida aún. En el caso de edificaciones de concreto reforzado, de los 14 parámetros evaluados, sólo dos no podrían ser determinados en diseños, es decir sobre planos, pues están asociados a la calidad constructiva y a la conservación a futuro de la estructura. En resumen, en la Figura 20 se tienen los parámetros que pueden ser evaluados en etapa de diseño de una edificación para los distintos tipos de estructuras estudiadas por el INME.

| EDIFICACIONES CONCRETO |                                    | EV | MUROS MAMPOSTERÍA |                                   | EV | MUROS EN TIERRA |                                 | EV |
|------------------------|------------------------------------|----|-------------------|-----------------------------------|----|-----------------|---------------------------------|----|
| 1                      | Sistema Estructural                | Si | 1                 | Sistema Estructural               | Si | 1               | Distribución de los muros       | Si |
| 2                      | Año de construcción                | Si | 2                 | Calidad del sistema resistente    | No | 2               | Tipo y organización estructural | Si |
| 3                      | Calidad del sistema resistente     | No | 3                 | Resistencia estructural           | Si | 3               | Calidad del sistema resistente  | No |
| 4                      | Resistencia convencional           | Si | 4                 | Posición de la cimentación        | Si | 4               | Relación demanda capacidad      | Si |
| 5                      | Posición edificación y cimentación | Si | 5                 | Suelo y pendiente del terreno     | Si | 5               | Suelo y pendiente del terreno   | Si |
| 6                      | Suelo y pendiente                  | Si | 6                 | Diafragmas horizontales           | Si | 6               | Configuración en planta         | Si |
| 7                      | Diafragma de piso                  | Si | 7                 | Configuración en planta           | Si | 7               | Entrepisos                      | Si |
| 8                      | Configuración en planta            | Si | 8                 | Configuración en elevación        | Si | 8               | Cubierta o sistemas de techo    | Si |
| 9                      | Configuración en altura            | Si | 9                 | Distancia máxima entre los muros. | Si | 9               | Aberturas en los muros          | Si |
| 10                     | Conexiones elementos críticos      | Si |                   |                                   |    | 10              | Estado de conservación          | No |
| 11                     | Presencia de columnas cortas*      | Si | 10                | Tipo de cubierta                  | Si | 11              | Elementos no estructurales      | Si |
| 12                     | Elementos no estructurales         | Si | 11                | Estado de conservación            | No | 12              | Edad                            | Si |
| 13                     | Estado de conservación             | No |                   |                                   |    |                 |                                 |    |
| 14                     | Edificaciones adyacentes           | Si |                   |                                   |    |                 |                                 |    |

Figura 20. Parámetros del Índice de Vulnerabilidad INME.

Existen parámetros como la presencia de columnas cortas, que muchas veces no se verifican y terminan existiendo en edificaciones en las cuales no se identificaron en planos; la presencia de columnas cortas (o columnas cautivas) implica una alta vulnerabilidad en las estructuras ya que dichas columnas fallan frecuentemente en eventos sísmicos, dado que una reducción de la mitad de la altura puede multiplicar por 10 el cortante que debe soportar dicha columna y una reducción a la cuarta parte de la altura aumenta en 70 veces dicho cortante (Rojas, 2005).

Un mecanismo para la correcta identificación de éste fenómeno podría ser la obligatoriedad de la inclusión de la totalidad de los ejes estructurales en los planos arquitectónicos con el fin de descartar adecuadamente la presencia de columnas cortas y sugerir las variaciones necesarias para ajustar los diseños. Puede sugerirse un correcto aislamiento de los muros liberando así dichas columnas, por ejemplo. Actualmente conforme a la lista de chequeo de la resolución, sólo se requiere presentar un corte longitudinal y uno transversal de la edificación para el trámite de licencias y normalmente ese corte no se realiza en ejes estructurales. Obsérvese en la *Figura 21*, la gravedad de las fallas en este tipo de columnas, situación que es muy común en estructuras de instituciones educativas, identificadas como de atención a la comunidad, en caso de sismos.



*Figura 21.* Terremoto del 23 de diciembre de 1972. Managua, Nicaragua. Adaptado de <https://kashikoidesu.blogspot.com.co/2013/12/terremoto-del-23-de-diciembre-de-1972.html>

Dado que los parámetros se evalúan según un peso asignado, la eliminación de algunos parámetros no afecta en gran medida el valor del índice de vulnerabilidad el cual se calcula como,

$$I.V.j = \frac{\sum_{i=1}^n W_i K_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (6)$$

Donde I.V.j es el índice de vulnerabilidad sísmica de la edificación j,  $K_i$  es una medida del grado de vulnerabilidad del parámetro i, y  $W_i$  es una medida de la importancia asociada al parámetro i respecto a los demás parámetros y n es el número de parámetros del modelo.

Las clasificaciones de los parámetros del índice vulnerabilidad INME, que pueden evaluarse en la etapa de diseño, se extraen de Maldonado y otros (2008) y son:

### **1. Parámetro 1. Sistema estructural.**

Las clasificaciones para este parámetro son las siguientes:

- A. Sistema muro, sistema dual o sistema combinado
- B. Edificios aporticados con siete o menos pisos
- C. Edificios aporticados con más de siete pisos
- D. Sistema losa-columna u otros no definidos

### **2. Parámetro 2. Año de construcción**

Las clasificaciones de este parámetro se plantean de la siguiente forma:

- A. Edificaciones construidas después de 1998
- B. Edificaciones construidas entre 1984 y 1998

C. Edificaciones construidas antes de 1984

**3. Parámetro 4. Resistencia convencional**

Las clasificaciones para este parámetro se definen a continuación:

- A. Edificación con un valor de  $\alpha \geq 1.5$
- B. Edificación con un valor de  $1.5 > \alpha \geq 0.8$
- C. Edificación con un valor de  $\alpha < 0.8$

La expresión para alfa es la siguiente:

$$\alpha = \frac{R * C}{S_a} \tag{7}$$

Donde C es el coeficiente sísmico, R el coeficiente de disipación de energía y Sa es la aceleración espectral obtenida del espectro elástico definido en el estudio de amenaza.

$$C = \frac{\alpha_0 \tau}{q * N} \tag{8}$$

$$\alpha_0 = \frac{A}{A_t}; A = \min[A_x, A_y] \tag{9}$$

$$q = \frac{(A_x + A_y) * h}{A_t} * P_c + P_s \tag{10}$$

El valor de Sa se toma de los expectores del estudio de amenaza. Para ello, se determina el tipo de suelo y el periodo de la estructura este último se calcula mediante la expresión:

$$T = C_t h_n^{3/4} \tag{11}$$

Donde  $h_n$  es la altura del edificio medida desde la base hasta el último piso y  $C_t$  es un coeficiente que toma los siguientes valores según el sistema estructural

$C_t = 0.08$  para edificaciones aporricadas

$C_t = 0.05$  para edificaciones de muros

#### **4. Parámetro 5. Posición de la edificación y de la cimentación**

Este parámetro se clasifica de la siguiente manera:

- A. La fundación está ubicada a una misma cota. Ausencia de empuje no equilibrado debido a un terraplén
- B. La diferencia máxima entre las cotas de la fundación es inferior a un metro. Ausencia de empuje no equilibrado debido a un terraplén
- C. La diferencia máxima entre las cotas de la fundación es superior a un metro o hay presencia de empuje no equilibrado debido a un terraplén

#### **5. Parámetro 6. Suelo y pendiente**

La clasificación de este parámetro fue realizada en función del tipo de suelo y de la pendiente del terreno sobre el que se encuentra la cimentación, así:

- A. Edificación cimentada sobre la roca con pendiente inferior al 30% o terreno estable con pendiente menor del 15%
- B. Edificaciones que no cumplen con los requisitos para ser clasificadas como A o B
- C. Edificación cimentada sobre suelos blandos con pendiente mayor al 30%, o, roca o suelo rígido con pendiente mayor al 60%

## 6. Parámetro 7. Diafragma de piso

Las clasificaciones de este parámetro se plantean de la siguiente forma:

- A. Edificación que presenta diafragma con deformabilidad despreciable y correctamente conectada a los elementos verticales
- B. Edificaciones que no se pueden clasificar como A o C
- C. Edificación con losas conectadas deficientemente o poco rígidas o cuya área cubre menos de un 70% del área total

## 7. Parámetro 8. Configuración en el planta

Para este parámetro, se tienen las siguientes clasificaciones:

A. Edificación que cumple con:

- $a/L \geq 0.6$  o  $b/L \leq 0.2$
- $e \leq 0.1d$

B. Edificación que cumple con:

- $a/L \geq 0.6$  o  $b/L \leq 0.2$
- $0.1d < e \leq 0.2d$

C. Edificación que no cumple las condiciones A o B, o que presentan las irregularidades en planta de sistemas no paralelas o desplazamientos de los planos de acción.

Donde ( $e$ ) es la excentricidad entre el centro de masa (CM), y el centro de rigidez (CR).

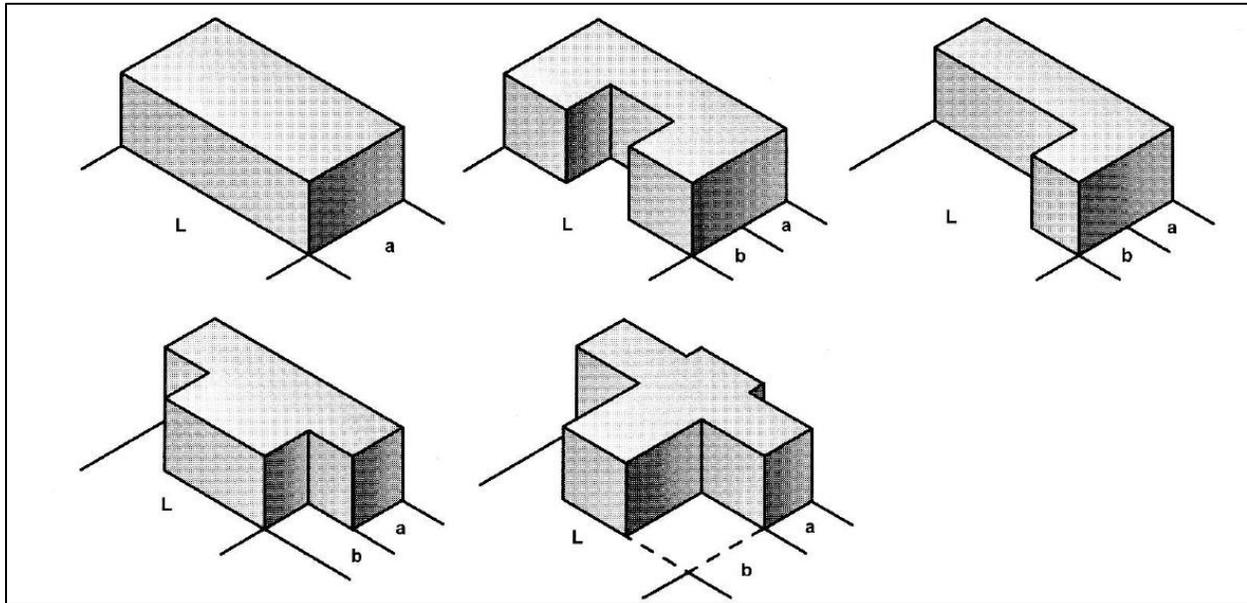


Figura 22. Configuración en planta de las estructuras de concreto. Adaptado de Maldonado y Chío (2008).

### 8. Parámetro 9. Configuración en altura

La clasificación de este parámetro se hará de la siguiente manera:

- A. Edificación que presenta disminución en las áreas de piso menores al 10%. No existen cambios considerables en rigidez de un piso a otro
- B. Edificación que presenta disminución en las áreas de piso mayores al 10% y menores del 20%. No existen cambios considerables en rigidez de un piso a otro
- C. Edificación que presenta una de las siguientes condiciones:
  - Disminución de las áreas de piso mayores al 20% o aumentos mayores al 5%
  - Fenómeno de piso flexible
  - Fenómeno de piso débil
  - La masa de un piso es mayor a 1.5 veces la masa de los pisos adyacentes
  - Muros que presenten relaciones de esbeltez (altura/ancho) mayores a 5

**9. Parámetro 10. Conexiones entre elementos críticos**

Este parámetro se ha clasificado de la siguiente manera:

- A. Edificación con conexiones correctamente detalladas, en el cual se satisface que  $S \leq 0.25b$  o  $S \leq h/2$  y  $e \leq 0.2b'_{min}$ , ver figura 5. En sistemas duales las vigas de acople son ancladas dentro del nucleó con ganchos de 135° o mas
- B. Edificación que no cumplen las condiciones A o C
- C. Edificación con conexiones pobremente detalladas en el cual más del 70% de las conexiones no cumplen la condición A, o se puede verificar que más de 30% delas conexiones cumple que  $S > 0.4b$  o  $S > h$  o  $e \geq 0.3b'_{min}$ .

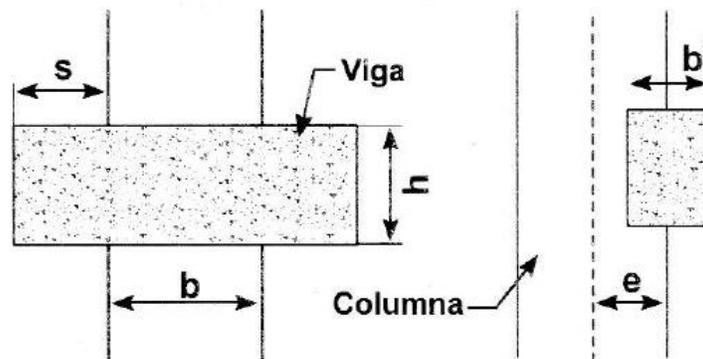


Figura 23. Conexiones. Adaptado de Maldonado y Chío (2008).

**10. Parámetro 11. Presencia para columnas cortas**

Este parámetro se ha clasificado de la siguiente manera:

- A. Edificación que no presenta columnas cortas
- B. Edificación que presenta columnas cortas cuyo elemento más corto tiene una altura inferior a la mitad de la altura del piso

- C. Edificación que presenta columnas cortas cuyo elemento más corto tiene una altura inferior a la cuarta parte de la altura del piso.

### **11. Parámetro 12. Elementos no estructurales**

Las clasificaciones definidas para este parámetro son las siguientes:

- A. Edificación que no cumple con las condiciones de B o C
- B. Edificación con voladizo sosteniendo balcones o con presencia de tanques elevados soportados por varios pórticos o muros en ambas direcciones
- C. Edificación con tanques elevados sostenidos por un solo pórtico, columna o muro, o con voladizos sosteniendo fachadas

### **12. Parámetro 14. Edificaciones adyacentes**

A continuación se presenta la clasificación de este parámetro:

- A. Edificación que se encuentra separados de los adyacentes un 1% de la altura del edificio más bajo entre los dos adyacentes
- B. Edificación que no cumple la condición A y que presenta las siguientes características:
- Losas al mismo nivel
  - La relación entre la altura del edificio y su adyacente es mayor a 0.5
- C. Edificación que no cumple con las condiciones de A o B

La calificación de los parámetros según su calificación y su ponderación dentro del Índice de vulnerabilidad como fue ajustado por el INME en Maldonado y Chío (2008), que fueron

expresados mediante funciones de pertenencia, una vez medido su centro de gravedad se resumen así,

Tabla 2.

*Valores de vulnerabilidad de las clasificaciones de los parámetros y pesos de los parámetros.*

| No. | PARÁMETRO                                      | A    | B    | C    | D   | PESO |
|-----|--|------|------|------|-----|------|
| 1   | Sistema estructural                            | 2,13 | 3,35 | 5,57 | 8,1 | 7,43 |
| 2   | Año de construcción                            | 2,61 | 6    | 7,63 |     | 7,1  |
| 3   | Resistencia convencional                       | 2,02 | 4,98 | 8,01 |     | 7,04 |
| 4   | Posición de la edificación y de la cimentación | 1,38 | 2,87 | 6,23 |     | 6,28 |
| 5   | Suelo y pendiente                              | 1,76 | 5,13 | 7,82 |     | 7,22 |
| 6   | Diafragma de piso                              | 1,97 | 5,24 | 7,99 |     | 6,04 |
| 7   | Configuración en el planta                     | 2,03 | 4,79 | 7,78 |     | 6,79 |
| 8   | Configuración en altura                        | 1,89 | 3,87 | 7,85 |     | 6,79 |
| 9   | Conexiones entre elementos críticos            | 1,64 | 5,13 | 8,06 |     | 8,9  |
| 10  | Presencia para columnas cortas                 | 1,33 | 5,6  | 8,21 |     | 7,46 |
| 11  | Elementos no estructurales                     | 1,79 | 4,44 | 7,44 |     | 4,67 |
| 12  | Edificaciones adyacentes                       | 1,46 | 4,69 | 7,52 |     | 6    |

**1.2.5. Sistemas automáticos de verificación de normas o SmartCodes.** Los ingenieros estructurales son responsables de cumplir muchas regulaciones y especificaciones que van desde resistencia sísmica, colapso progresivo, explosiones hasta seguridad ante incendios y requisitos de diseño energético. Se enfrentan a cumplir normativas en los ámbitos nacional, internacional y local y cada vez son más sometidos a mayores expectativas respecto a diseños con mejor desempeño y calidad. Estos retos requieren de una intensa colaboración entre los participantes de un proyecto y de una profunda verificación del diseño del edificio, desde las etapas más tempranas del proceso de diseño. La introducción de códigos inteligentes (SmartCodes) mejorará en gran medida la práctica de diseño actual simplificando el acceso a la comprobación de las disposiciones y exigencias del código (Nawari, 2011).

Los sistemas automáticos de verificación de normas buscan verificar el diseño estructural contra las disposiciones de la norma y otras reglas definidas por el usuario. Norma inteligente (smartCode) se refiere a la versión electrónica digital de las normas de construcción que permiten la verificación automática de reglas y regulaciones sin modificar el diseño de un edificio, sino más bien evaluar el diseño con base en la configuración de objetos paramétricos sus relaciones y sus atributos (Nawari, 2011). El objetivo es lograr crear, de manera automática, una lista de chequeo de inspección de los elementos del edificio, para buscar y observar componentes del mismo que no cumplan con las disposiciones de la norma y por qué motivos no están cumpliendo (Nawari, 2011).

La práctica convencional de verificación del cumplimiento de códigos en la industria ha sido mayormente un proceso manual, el cual es laborioso, costoso y susceptible a errores. Ha habido numerosos intentos en las 3 últimas décadas de automatizar el proceso, pero el progreso ha sido lento. Ha habido una cantidad extensa de investigaciones dirigidas internacionalmente en las últimas cuatro décadas en el área de sistemas de verificación automáticas o semiautomáticas de cumplimiento de normativas para la industria de la arquitectura, ingeniería y construcción (AEC). (Dimyadi y Amor, 2013).

Los sistemas automáticos de verificación de reglas evalúan los diseños de edificios de acuerdo a varios criterios (Eastman et al., 2009), y nuevos criterios continuamente emergen en la arquitectura (construcción). Algunos criterios involucran análisis por computador (ejemplo estructuras), pero aún los detalles de factores de seguridad e interpretación de resultados ha sido una tarea manual centrada en personas (Eastman et al., 2009). Revisión automática de código

tiene el potencial de ahorrar una cantidad significativa de tiempo y costo (Eastman et al., 2009). Los sistemas de validación de reglas (códigos) puede ser, en general, estructurada en cuatro pasos: (1) interpretación de reglas y estructuración lógica de reglas para su aplicación; (2) preparación del modelo del edificio, en el cual se prepare la información necesaria para validar; (3) fase de ejecución de reglas, donde se realiza la verificación, y (4) reporte de los resultados de la verificación (Eastman et al., 2009). Cada uno de éstos pasos tiene sus propias dificultades.

Entre las dificultades en estos desarrollos, se encuentran: los códigos de construcción pueden llegar a ser extremadamente subjetivas en algunas disposiciones. La causa más frecuente de indeterminación en una disposición del código son los conceptos de textura abierta, que son aquellos en los cuales la aplicación de situaciones posibles no puede ser automática, ya que requieren decisiones subjetivas y dependen del contexto (Nawari, 2011). Convertir Normas y Estándares de un formato textual rígido a formatos digitales que permiten acciones dinámicas es el asunto clave (Nawari, 2012).

Los textos de los códigos no están generalmente escritos para interpretación por máquinas y el esfuerzo puesto en hacer de eso una posibilidad no ha sido muy exitoso. Los estándares y las regulaciones de construcción frecuentemente consisten en múltiples documentos complejos e interrelacionados que están pobremente estructurados y son sometidos frecuentemente a modificaciones lo que dificulta su automatización (Dimyadi y Amor, 2013).

Las regulaciones y reglas fueron escritas por personas, y por mucho tiempo, sólo leídas y aplicadas por personas. Como resultado, a veces son incompletas (condiciones particulares no

cubiertas) o contradictorias (Eastman et al., 2009).

Requerimientos de modelado del modelo del edificio: En el dibujo asistido por computador tradicional, el objetivo era trazar representaciones en 2D que las personas pudieran interpretar para construir un edificio. Hoy, los modelos son orientados a objetos, que tienen tipos y propiedades que pueden ser verificadas. Los modelos construidos a la fecha no incluyen por defecto el nivel de detalle necesario para ser empleados en sistemas de verificación automática (Eastman et al., 2009).

El principal requisito en la aplicación de SmartCodes es que el Modelo de Información del Edificio (Building Information Modeling, BIM) basado en objetos, debe tener la información necesaria para permitir una verificación completa del código. Los arquitectos e ingenieros que creen modelos BIM que serán empleados para la verificación automática, deben preparar dichos modelos, para que provean el nivel de detalle necesario en un esquema bien definido y aceptado. A la fecha, los modelos BIM generados por plataformas BIM comunes, como REVIT y ArchiCAD, típicamente no contienen el nivel de detalle necesario para sistemas automáticos de verificación de reglas o códigos de construcción (Nawari, 2011).

Algunas de las propiedades de un diseño que necesitan verificarse están basadas en desempeño, por lo que requieren análisis o simulaciones para ser derivadas. Un Análisis estructural es requerido para cada edificio y el análisis energético es cada día más común. Las reglas basadas en desempeño generalmente requieren una vista especial derivada del modelo, con su propia geometría, material y otros parámetros, propiedades y cargas asumidas, como entrada para la simulación y/o análisis. Los resultados del análisis son combinados con los supuestos del mode-

lado para determinar su ajuste a las reglas. El autor reporta que a la fecha no existe un sistema que integre estos diferentes pasos en un sistema automático de revisión (Eastman et al., 2009). Importantes reglas de diseño, se aplican a propiedades que requieren simulaciones complejas o análisis, como los necesarios para verificar la integridad estructural o el uso de energía. Éstos requieren la aplicación de un modelo de análisis para derivar información compleja, para luego aplicar las reglas a los datos obtenidos del análisis (Nawari, 2011).

Algunos de los sistemas más significativos y su influencia se presentan en la línea de tiempo de la Figura 24 (parte alta). Se incluye en la representación (parte baja) las etapas del desarrollo del computador personal, tecnología de internet y sistemas CAD (Diseño Asistido por Computador) como marco de referencia.

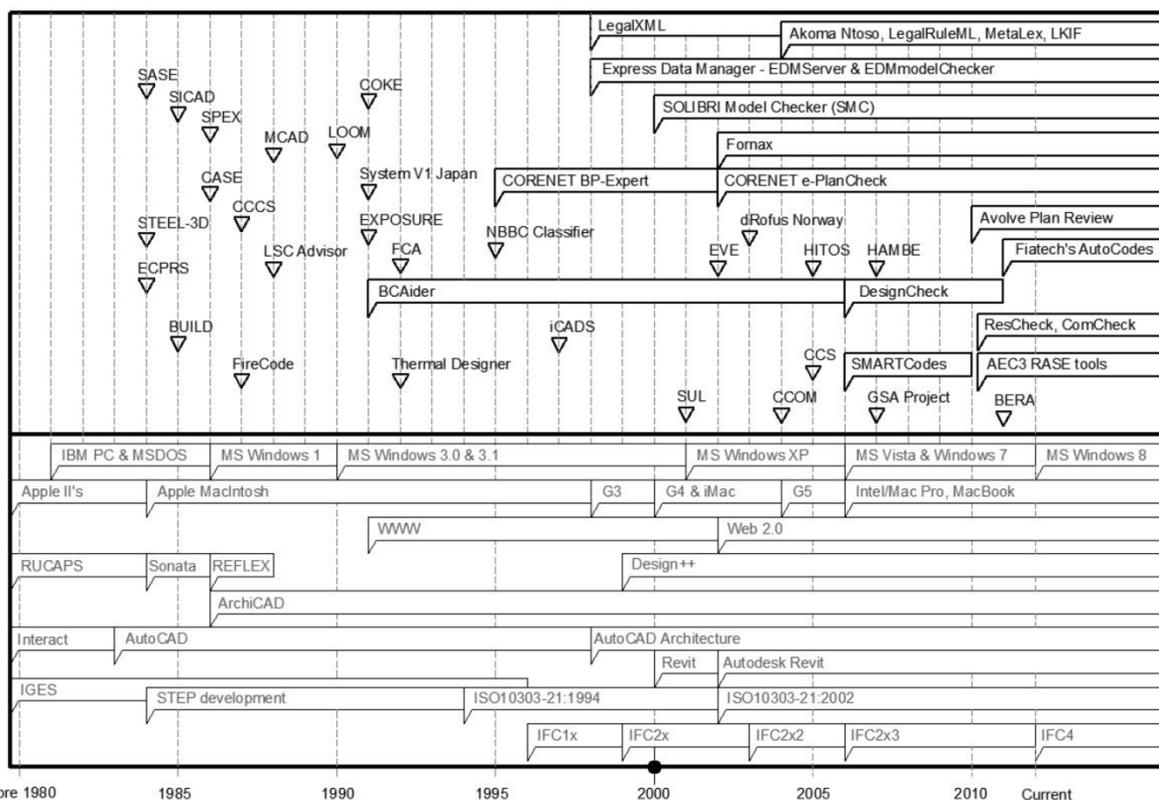


Figura 24. Línea de tiempo de sistemas de verificación automática de códigos. Adaptado de Dimyadi y Amor, 2013.

Los primeros esfuerzos por tener este tipo de sistemas, se realizaron en 1966 cuando Fenvers (1969) empleó tablas de decisión con programación IF-THEN que podían emplearse para representar disposiciones normativas de diseño en una forma precisa y sin ambigüedades. Este concepto fue empleado en 1969 para representar las especificaciones de la AISC\* como un conjunto de tablas de decisión interrelacionadas (Nawari, 2011).

Los SmartCodes son una iniciativa del ICC (International Code Council), que busca automatizar la verificación de cumplimiento de las normas de diseño, los cuales toman el proyecto de construcción como representado en un Modelo de Información del Edificio (BIM) e instantáneamente verifica el cumplimiento de las normas por medio de software de verificación de modelos (Nawari, 2011). Los SmartCodes mejorarán enormemente la actual práctica de diseño, simplificando el acceso a requisitos normativos y verificando el cumplimiento de éstos. (Nawari, 2011)

El proyecto CORENET (Construction and Real Estate Network) de Singapur fue el esfuerzo más temprano de producción de un sistema de verificación de códigos, iniciado en 1995 por el Ministerio de Desarrollo Nacional (Eastman et al., 2009). Empezaron realizando verificaciones sobre planos en 1995 y posteriormente iniciaron el sistema CORENET que trabaja con modelos en 3D de edificios en formato IFC (Industry Foundation Classes) (Nawari, 2011). IFC es el único modelo de representación que describe un edificio para verificación de reglas y es soportado por la mayoría de herramientas de diseño BIM (Eastman et al., 2009). También CORENET, ha sido el proyecto más largo y se usa productivamente hoy en día y es ejemplo de cómo tales esfuerzos

---

\* American Institute of Steel Construction – Instituto Americano de Construcción en Acero.

pueden ser emprendidos. CORENET establece que el 92% de las reglas del Integrated Building Plan (IBP) y 77% de las del Integrated Building Services Plan (IBS) están actualmente cubiertas por el sistema CORENET. Más de 2500 empresas, donde se incluyen arquitectos, ingenieros, topógrafos y otros profesionales, se reporta que usan CORENET para presentar proyectos al gobierno de Singapur (Eastman et al., 2009).

Otras iniciativas de investigación han implementado la verificación automática de reglas, para el acceso a discapacitados y las disposiciones para incendios. Igualmente, se han desarrollado reglas de verificación de diseño para las cortes de los Estados Unidos, el cual fue un ejemplo temprano de verificación de reglas aplicado a guías de automatización del diseño (Nawari, 2011). Desde el 2007, para todos los proyectos del GSA (General Services Administration) que involucren nuevas construcciones, se requiere presentar datos BIM que permitan revisión de validación espacial en la etapa final de concepción. Una vez presentada la información BIM es rápidamente analizada y revisada por el equipo de proyectos de la GSA (Eastman et al., 2009).

Los SmartCodes y tecnologías de verificación automática de modelos para asistir las prácticas de análisis y diseño de edificios, demuestran un inmenso avance para lograr un diseño óptimo (Nawari, 2012). La tecnología es aún joven y evoluciona rápidamente (Eastman et al., 2009).

En la práctica muchos programas de diseño empleados hoy en día son un tipo de software automático de verificación de normas, en su componente de diseño, que una vez se ha construido el modelo de una edificación propuesta, éstos realizan la verificación del cumplimiento de ciertas normas de diseño. Por ejemplo, en el software SAP2000, es posible construir un modelo con el

contenido de planos, indicando que las secciones de los elementos deben “verificarse” (check) en lugar de diseñarse, y el software puede verificar el cumplimiento de normas como la ACI 318, para las secciones de los elementos propuestos en el diseño. Igualmente se puede requerir sólo algunos comandos para verificar otros parámetros del diseño como el cumplimiento de los límites a las derivas o las cargas sobre las cimentaciones.

No cabe duda que, en el futuro, estos sistemas automáticos de verificación de reglas y, versiones digitales de los futuros códigos (SmartCodes) emergerán listos para ser empleados conjuntamente para lograr una rápida y completa revisión de diseños tanto arquitectónicos (accesibilidad, ambiente, temperatura) como estructurales (solicitaciones, resistencias, detallados). Por ahora no existe una versión de uso extendido de éstos sistemas, pero el esfuerzo individual de países como Singapur, es una muestra de que otras naciones pueden emprender también este tipo de proyectos con el fin de garantizar a sus habitantes, construcciones más seguras y eficientes.

### **1.3. Glosario**

Validación: Proceso mediante el cual se comprueba la validez de un diseño estructural, definida ésta como un alto grado de certeza de que el diseño cumple con todas las reglas aplicables, según la ley 400 de 1997 y sus decretos reglamentarios.

Experto: Ingeniero civil matriculado que cumpla cualquiera de dos condiciones: (1) haya completado 5 años de experiencia y/o (2) tenga un título de posgrado en estructuras.

Reglas, normas, códigos: Es el conjunto de normativas que deben cumplir los diseños, según el contexto. Hay normas arquitectónicas, contra incendios, estructurales, etc.

Entorno de baja validez: Según Kahneman (2012). Son dominios del conocimiento o actividades humanas en las que se da un grado importante de incertidumbre e impredecibilidad. En el presente trabajo, la revisión a los diseños estructurales, se asimila a un entorno de baja validez.

## **2. Revisión de diseños estructurales por expertos y pruebas de baja validez del procedimiento.**

Se ha decidido emplear la palabra “experto” para el presente trabajo el cual parte de la yuxtaposición que realiza Kahneman (2012) entre algoritmos y expertos, por lo tanto se hace necesario aportar una definición para efectos de identificar quien es un experto en la revisión de diseños estructurales. Volviendo a la normatividad allí se definió quien pueda realizar legalmente actividades de revisión estructural en el territorio nacional. Se trata de un ingeniero civil matriculado que cumpla cualquiera de dos condiciones: (1) haya completado 5 años de experiencia y/o (2) tenga un título de posgrado en estructuras (Artículo 31, ley 400 de 1997; Apéndice A.5 – NSR-10; Parágrafo 3, Artículo 31, Decreto 1469 de 2010). De manera que un profesional que cumpla con éstos requisitos será para efectos del presente trabajo, un experto.

En el trámite de otorgamiento de licencias de construcción las curadurías cuentan con personal que cumple estas condiciones (expertos) para la revisión estructural. Se hace necesario entonces conocer, cuál es el procedimiento que están hoy en día empleando estos profesionales para la revisión estructural.

### **2.1. Procedimiento empleado actualmente por expertos.**

Para lograr este objetivo se ha seleccionado a los expertos agrupándolos en 3 grupos diferentes que son: curadurías urbanas del área metropolitana de Bucaramanga, Oficinas de Planeación Municipal (para municipios que no cuentan con Curadurías urbanas) y profesionales

independientes que realicen revisión estructural. Se les ha enviado un formulario preguntando lo siguiente: (Fuente: Autor)

¿Cuál es el procedimiento empleado por usted para realizar una revisión estructural?

¿Cuál es el procedimiento de revisión estructural de diseños conforme al Título E, de la NSR-10?

¿Conoce usted el procedimiento indicado en la normativa colombiana para la realización de éste tipo de revisiones?

¿Cuál es el procedimiento de revisión para el informe del revisor externo?

¿Conoce usted el procedimiento indicado en la normativa colombiana para la realización de éste tipo de revisiones? Descríbalo.

¿Cree usted que la revisión que debe realizarse en las curadurías como resultado de la Ley AntiSpace (Ley 1796 de 2016) debe tener el mismo rigor de la realizada por el revisor estructural externo? Justifique.

¿Qué aspectos del diseño considera usted que deben ser los más importantes en las revisiones a diseños?

¿Emplea usted como apoyo a su revisión, una lista de chequeo o de control que pueda proporcionarnos?

De la Tabla 3 a continuación, qué aspectos considera usted que deben ser los más importantes en las revisiones de los diseños? Califíquelos de 1 a 5 de acuerdo a la importancia (donde 5 es lo más importante, 4 es muy importante, 3 es importante, 2 es poco importante y 1 no es importante) cada uno de los aspectos de la revisión estructural numerados a continuación:

Tabla 3.

*Aspectos Relevantes de la Revisión a Diseños Estructurales*

| <b>Aspectos relevantes de la revisión estructural</b> |  |
|---|--|
| <b>1</b>  | Evaluación de cargas muertas y vivas   |
| <b>2</b>  | Evaluación de fuerzas de sismo   |
| <b>3</b>  | Calidad del modelo numérico empleado   |
| <b>4</b>  | Diseño individual de los elementos que conforman la estructura.                    |
| <b>5</b>  | Cumplimiento del límite de derivas y deformaciones.                                |
| <b>6</b>  | Calidad del detallado estructural  |
| <b>7</b>  | Trayectoria del diseñador e idoneidad  |
|   | Identifica usted algún otro aspectos o aspectos importantes? Califíquelo de 1 a 5. |
|   |  |
|   |  |

Se pretendió con la aplicación de esta encuesta analizar si existe un consenso o no, sobre el procedimiento de revisión estructural, entendido este consenso como la claridad en los pasos necesarios para validar completamente los diseños estructurales respecto a la norma que los rige.

Igualmente se le preguntó a quienes presiden estas oficinas, es decir Curadores Urbanos y Secretarios de Planeación, sobre las calidades profesionales y la experiencia de las personas que realizan la revisión a los diseños estructurales en sus respectivas entidades.

¿Cuántos profesionales realizan en su entidad la actividad de Revisión Estructural?

¿Cuáles son las cualidades (académicas, experiencia, etc.) de estos profesionales en su entidad?

¿Cuál fue el mecanismo de selección de los profesionales encargados de la revisión estructural?

**2.1.1. Clasificación de los tipos de revisión de los diseños estructurales.** Dado que a la fecha se ha recibido pocas respuestas a las encuestas enviadas se procede a describir los posibles tipos que se pueden estar presentando en el caso de las revisiones. Como diseñador y exfuncionario a la cabeza de una oficina de Planeación el autor posee experiencia sobre los posibles tipos de revisión que se pueden presentar.

**2.1.1.1. Revisión netamente documental:** Es aquella revisión que se limita exclusivamente a la existencia o no de unos documentos, como son memorias de cálculos, estudios de suelos y planos. En este tipo de revisión no se requiere conocimientos de diseño estructural, ni de revisión de diseños estructurales.

**2.1.1.2. Revisión superficial de aspectos estructurales:** Es una revisión realizada por un arquitecto o ingeniero, que normalmente ha tenido experiencia en construcción y que logra identificar en los planos, elementos como secciones transversales, refuerzos longitudinales y transversales, despieces de elementos transversales y otros detalles en los planos. Normalmente no conocen el procedimiento de diseño y no realizan una revisión a las memorias de cálculo más allá de su simple existencia. Pueden revisar o no, que las profundidades de cimentación indicadas en los estudios de suelos, se cumplan en los planos.

**2.1.1.3. Revisión completa del contenido mínimo:** Como se expuso en 2.2.1, la NSR-10 en sus literales A.1.5.2.1 y A.1.5.3.1, listan el contenido mínimo de los planos y memorias estructurales respectivamente, que “se presenten para obtener una licencia de construcción”. En este tipo de revisión se requiere la participación de un ingeniero con conocimientos en diseño

que logre identificar todos los componentes en los planos y memorias, que conozca la forma de describir correctamente los materiales a emplear y que logre identificar completamente el procedimiento de diseño. Normalmente estos revisores ya saben, por ejemplo, que una placa de entrepiso que no cumple con una altura mínima conforme al C.9.5, debería contar con un análisis detallado de las deflexiones. Logran identificar que las secciones y aceros de refuerzo cumplan condiciones mínimas, especialmente para aquellos diseños con categorías de disipación moderada (DMO) o especial (DES).

**2.1.1.4. Revisión mediante análisis completo:** En este tipo de revisión, el profesional realiza un modelo numérico a partir de los planos estructurales, emplea los planos arquitectónicos para definir sus propias cargas a medida que va revisando que las memorias de diseño concuerden con sus propios cálculos. Elabora un procedimiento completo de análisis sísmico conforme al tipo de estructura que esté analizando y verifica que su propio modelo no exceda las derivas máximas permitidas. Posteriormente, aplica al modelo las combinaciones típicas de carga y revisa la capacidad de los elementos estructurales de manera individual. Posteriormente revisa la cimentación, teniendo en cuenta no sólo la profundidad de cimentación, sino además que la capacidad portante sea coherente con los resultados de los ensayos. Para esa capacidad portante revisa las dimensiones de las zapatas y para esas dimensiones analiza los refuerzos y dimensiones de diseño. Luego investiga la estabilidad general y otros elementos de peligrosidad estructural, como la presencia de laderas, columnas cortas, cambios de rigidez, etc. Básicamente este profesional realiza un procedimiento completo de análisis y diseño (chequeo) de toda la estructura la cual compara contra la del diseño y acepta o no algunos márgenes de variaciones (subjetivos) entre el diseño en los planos y memorias y el realizado por él mismo.

**2.1.2. Resultados de la consulta a los profesionales.** Una vez se ha recibido la información sobre los procedimientos de revisión empleados por los expertos encargados de las mismas, se han clasificado en algunos de los alcances antes descritos. Para esto, se ha empleado la descripción realizada por los expertos sobre el procedimiento que ellos realizan para efectuar la revisión a los diseños estructurales, la cual se ha comparado en su alcance y procedimiento con cada uno de los tipos descritos en 3.1.1. y 3.1.4. La información se muestra (ver Tabla 4) de manera estadística por frecuencia de cada tipo de revisión.

Tabla 4.

*Frecuencia de cada tipo de revisión según encuestas.*

| Documental | Superficial | Contenido mínimo | Análisis completo |
|------------|-------------|------------------|-------------------|
| 0          | 3/9         | 5/9              | 1/9               |

De igual manera se clasifican (Tabla 5) los aspectos de la revisión estructural que fueron clasificados como los más importantes por parte de los expertos encuestados, promediando los puntajes.

Tabla 5.

*Aspectos relevantes de la revisión estructural según expertos.*

| Aspectos relevantes de la revisión estructural |   |         |
|--|---|---------|
| 1  | Evaluación de cargas muertas y vivas                            | 4,67(9) |
| 2  | Evaluación de fuerzas de sismo                                  | 4,56(9) |
| 3  | Calidad del modelo numérico empleado                            | 4,11(9) |
| 4  | Diseño individual de los elementos que conforman la estructura. | 4,56(9) |
| 5  | Cumplimiento del límite de derivas y deformaciones.             | 4,44(9) |
| 6  | Calidad del detallado estructural                               | 4,33(9) |
| 7  | Trayectoria del diseñador e idoneidad                           | 4,11(9) |
| 8  | Coincidencia planos arquitectónicos y estructurales             | 4(1)    |
| 9  | Análisis de irregularidades                                     | 4(1)    |
| 10   | Planos legibles y entendibles                                   | 3(1)    |
| 11   | Sistema estructural   | 4(2)    |

Sobre los profesionales se tiene que no todas las entidades que otorgan licencias de construcción cuentan con el personal idóneo para dar cumplimiento a la exigencia de revisión por parte de la entidad. Se destaca que en donde existen estos profesionales, y están facultados (expertos), sólo asisten pocas horas a la semana en las cuales deben revisar varios proyectos, lo cual hace inviable una revisión mediante análisis completo como se define en 3.1.4. En éstos casos los algoritmos serían de gran utilidad para verificar aspectos como la rigidez y la vulnerabilidad de la estructura que se pretende construir.

**2.1.3. La Evaluación Estructural Como Entorno De Baja Validez.** Como se ha corroborado en 2.1 y en 3.1, hasta el momento la revisión de diseños estructurales encaja perfectamente en la definición de “entorno de baja validez” dado por Kahneman (2012). Primero no se cuenta con un procedimiento claro para la revisión de diseños estructurales (ver 2.1) y segundo no hay un consenso entre los profesionales que realizan esta labor sobre cuál debe ser el alcance (ver 3.1).

Por otra parte en la resolución de la Comisión (Resolución 0015, 2015), se sugiere un costo de la revisión de diseños estructurales de sólo al 25% (veinticinco por ciento) de los honorarios de diseño estructural, lo cual estaría sugiriendo que no se requiere de un procedimiento completo de análisis, ya que lo único que diferencia este procedimiento de un diseño es la creación o no de planos al final del proceso, los cuales no corresponden al mayor costo de un diseño. Analizaremos ahora otros elementos adicionales que proporcionan “baja validez” a la revisión estructural.

**2.1.4. Procedimientos incompletos o inexactos.** En Searer et al (2008) grupos separados de expertos, llegaron a conclusiones opuestas tras evaluar varios casos de aplicación empleando las normas ASCE 31 y ASCE 41 (Después agrupadas en el ASCE 41-13, ASCE, 2013). En la página del ASCE\* se lee sobre el ASCE41-13:

“Describe los procedimientos sistemáticos que usan los principios de Diseño por performance para evaluar y remodelar edificios existentes para soportar los efectos de los sismos. Este estándar de nueva generación plantea un proceso en 3 etapas para la evaluación sísmica desde prevención del colapso a la continuidad operacional que una la performance estructural con la performance de los elementos no estructurales. El procedimiento que se usa basado en las vulnerabilidades permite que el esfuerzo de evaluación y remodelación se focalice en las vulnerabilidades potenciales específicas detectadas, en base a las observaciones sísmicas pasadas, que fueran motivo de preocupación para determinados tipos y alturas de edificios. Este procedimiento sistemático aplicable a cualquier edificio, establece una metodología para evaluar el edificio entero en una forma rigurosa.”

Los autores afirman que “tienen experiencia significativa usando estos estándares y sus predecesores y han visto varias ocasiones donde el uso o mal uso de estos documentos, han conducido a resultados sobre conservadores y sin sentido.”

En los casos citados en el artículo (Searer et al, 2008) se leen cosas como: El ingeniero falló en reconocer que la estructura tiene un sistema de resistencia lateral, que ha trabajado

---

\* American Society of Civil Engineers.

adecuadamente por un siglo...asignándole un valor de cero a todo el sistema de resistencia a fuerzas laterales y especificando la construcción de un gran número de paredes de madera con la consecuente destrucción de los acabados históricos existentes. Aunque el asentamiento eran sólo unos centímetros en una longitud de 30 metros, el ingeniero especificó excavación manual bajo el entarimado y construcción de una losa de concreto reforzado de 60 cm bajo una estructura de dos pisos con pórticos livianos de madera.

En otro caso, en una estructura que ya había sido reforzada con numerosos muros de cortante en madera contrachapada, un ingeniero concluyó que la estructura no tenía capacidad sísmica. Especificó la adición de láminas de madera a casi todas las paredes dentro de la estructura, láminas también a los pisos que contaban con diagonales y casi increíble, agregar muros de concreto reforzado en ciertas áreas para proveer soporte a la estructura de pórticos en madera. Dicha actualización innecesaria y excesivamente costosa se realizó (Searer et al, 2008).

En un tercer caso de una estructura con pórticos de acero con riostras, un ingeniero en lugar de trabajar con el sistema existente, hizo lo que muchos ingenieros hacen, cuando encuentran una estructura existente, diseño un nuevo sistema de resistencia sísmica (Searer et al, 2008).

En un último caso dos grupos diferentes de ingenieros, con experiencia en diseño sísmico, evaluaron una estructura de varios pisos con muros de cortante en concreto. Un equipo concluyó que la estructura representaba un riesgo de seguridad para la vida (life-safety) bajo el sismo de diseño, mientras que el otro equipo concluyó que la estructura tenía una baja capacidad, tanto que experimentaría daño estructural, casi al nivel del colapso, con un sismo preliminar. Ambos

equipos emplearon la norma ASCE41-13 para sus estudios con conclusiones diametralmente opuestas (Searer et al, 2008).

**2.1.5. Incertidumbres en la información de base.** Existen factores que hacen del diseño estructural de edificaciones, y por lo tanto de la revisión de los diseños estructurales, un “entorno de baja validez” como son las incertidumbres asociadas a gran parte de los datos empleados, se tiene por ejemplo las fuerzas sísmicas, las cuales actualmente se calculan para una aceleración pico efectiva de 0,25g, cuando hay estudios recientes (no publicados) que sugieren valores mayores a 0,3g. Igualmente, los procesos constructivos presentan altas falencias, principalmente por mano de obra deficiente, y muchas veces las tolerancias son excedidas, como las de colocación de aceros o recubrimientos. Los materiales presentan una alta variabilidad, especialmente el concreto que es un material completamente anisótropo, y sus propiedades son asumidas en el diseño, -y con excepción de la resistencia a la compresión-, pero nunca se verifican completamente durante la construcción, esto sumado a los procesos de fraguado y curado altamente exigente para garantizar su durabilidad y calidad.

**2.1.6. Factores socioculturales que afectan el ejercicio profesional.** A todos los anteriores factores asociados a los entornos de baja validez de deben adicionar factores socioculturales propios de nuestro entorno nacional, como son la corrupción, la ausencia de controles, la idoneidad del personal encargado de las actividades constructivas.

En Le y otros (2014), establecieron que en la industria de la construcción, la corrupción puede ocurrir en cualquier fase de un proyecto, incluyendo la planeación y el diseño. Igualmente

afirman que la industria de la construcción se ha vuelto la industria más corrupta debido al rápido crecimiento del mercado de la construcción a nivel mundial después de iniciado el siglo XXI.

Sohail y Cavill (2008) resumen las principales causas de la corrupción en la construcción, así: (1) sobre competencia en las licitaciones y concursos, (2) insuficiente transparencia en los criterios de selección de contratistas, (3) injerencia política inapropiada en decisiones sobre los costos, (4) complejidad en los roles y funciones institucionales, y (5) información asimétrica entre los participantes de los proyectos.

El ASCE promovió una política de “cero tolerancia” para cultivar una cultura anticorrupción en la industria de la construcción de los Estados Unidos. (Crist, 2009). Aunque ninguno de los 56 artículos sobre “Corrupción en la construcción” citados por Le y otros (2014), trata el tema específico de Colombia, el colapso en el edificio Blas de Lezo II durante su construcción en la ciudad de Cartagena, es una muestra de la presencia y de los efectos de dicha situación en Colombia.

**2.1.7.Literatura científica y soporte bibliográfico.** Otro factor asociado al entorno, se refiere a las limitaciones por idioma debido a la cantidad de literatura de soporte que se encuentra traducida. Por ejemplo, se ha traducido la norma del ACI-318 (ACI, 2008) como parte de las NSR-10, pero no se cuenta con el suficiente acceso a documentación adicional tal como ejemplos de diseño, compendios y documentos de soporte de entidades como ATC (Applied Technology Council), FEMA (Federal Emergency Management Agency), NEHRP (National Earthquake Hazards Reduction Program), etc. Estos documentos contienen no solo la

formulación teórica, sino que enuncian todas las investigaciones que soportan los cambios en las normas. Todo esto limitado al idioma también ya que toda la documentación se encuentra en inglés y aun no es obligatorio el uso de un segundo idioma en estas profesiones. Ante esta falencia, las universidades han establecido algunos requisitos propios sobre el nivel de idioma que se requiere para optar a un título profesional, especialmente a nivel de maestría y doctorado.

### **2.1.8. Principales sesgos mentales presentes en la revisión de diseños estructurales.**

Aparte de los sesgos mentales citados en la introducción, como la heurística afectiva<sup>\*</sup>, existen otros que afectan el proceso de diseño y revisión estructural, como ejemplo se puede nombrar la falacia de la narración:

“Se graduó como ingeniero civil de la Universidad Nacional en 1976 y participó con diseños estructurales de viviendas, unidades residenciales, empresas, universidades, colegios, centros comerciales, moteles, más de 1.800 proyectos ejecutados entre 1981 y 2007 en Medellín y municipios de Antioquia como Caucasia, El Carmen de Viboral y Rionegro, también en por lo menos otras nueve capitales: Bogotá, Cali, Bucaramanga, Tunja, Pereira, Cartagena, Montería y Barranquilla.” (Cárdenas y Álvarez, 2017).

Falacia de la planeación: “En 2002, un sondeo hecho a propietarios estadounidenses de viviendas que habían remodelado sus cocinas encontró que estos esperaban que el trabajo les costaría una media de 18.658 dólares; en realidad, terminaron pagando una media de 38.769

---

\* El concepto de heurística afectiva fue desarrollado por Paul Slovic (Kahneman, 2012)

dólares.” (Kahneman, 2012) “Estamos haciendo una inversión adicional porque no estamos dispuestos a admitir el fracaso. Este es un ejemplo de falacia del coste irrecuperable.”

Exceso de confianza: “No implica en lo absoluto ningún peligro de colapso del edificio, ni de seguridad para las personas, ni paso nada que lamentar. Técnicamente yo conozco toda la funcionalidad del edificio como estructura, columnas, placas, todo. Aquí no se ha caído ningún techo. Yo ya revisé toda la estructura y no hay ningún daño en la estructura. Pues, en todo el edificio. ¿Las personas se podrían quedar tranquilamente en el edificio sin correr ningún riesgo? Sí.” (Teleantioquia, 2013). “Los que saben más, predicen ligeramente mejor que los que saben menos. Pero los que más saben son a menudo menos de fiar. La razón es que la persona que adquiere más conocimientos desarrolla una ilusión de su aptitud algo mejorada, lo cual hace que tenga un exceso de confianza poco realista.” (Kahneman, 2012; Tetlock et al., 2005).

Existen muchos otros tipos de sesgos más: el *priming*, el contexto, inconsistencia, por ejemplo respecto a éste último Kahneman (2012) indica: “Cuando se les pide evaluar dos veces la misma información, frecuentemente dan respuestas diferentes.”

Las fórmulas no tienen estos problemas. Recibiendo los mismos datos, siempre darán la misma respuesta. Para maximizar el acierto en las predicciones, deben fiarse las decisiones finales a las fórmulas, sugiere Kahneman (2012).

Una combinación mecánica de unas pocas variables puede dominar la sutil complejidad del juicio humano. Si han de tomarse decisiones importantes, es poco ético quedarse en juicios

intuitivos cuando se dispone de un algoritmo que cometerá menos errores.

El empleo de algoritmos estadísticos es “aplicable a tareas distintas... y requiere relativamente poco esfuerzo, pero mucho disciplina.” “Siempre que podamos sustituir el juicio humano por una fórmula, al menos hemos de considerar esa posibilidad.” (Kahneman, 2012)

Un buen algoritmo deberá ponderar lo importante. De la encuesta a los expertos se tiene que los aspectos más importantes de la revisión estructural son (1) la evaluación de cargas y fuerzas sísmicas y (2) el diseño individual de los elementos que conforman la estructura, y muchos de estos aspectos son del primer tipo de datos que se definieron en la introducción, pero cuando se trata por ejemplo de derivas, es inviable verificar si dicha información es verídica sin el empleo de un modelo numérico, pero podría validarse mediante índices de rigidez, por ejemplo.

Confirmando que, la revisión estructural encaja perfectamente en la definición de “entorno de baja validez” dado por Kahneman (2012). Como él planteó, en dichos casos se debería dejar a los algoritmos las decisiones finales. Es posible apoyarse en los algoritmos para hacer verificaciones que no son realizables en una revisión de rutina.

Habrán casos, donde una estructura amerite un análisis y revisión más avanzado y donde por ejemplo, sea conveniente tener una calificación completa mediante un Perfil Bio-Sísmico (Guendelman y otros, 1997) y otros casos de estructuras sencillas donde los índices de Hassan y Sozen (1997) puedan dar tranquilidad sobre si la estructura cuenta con la suficiente rigidez para soportar un evento sísmico considerable.

### **3. Aplicación de algoritmos.**

Para la aplicación de los algoritmos se requiere realizar dos selecciones. La primera consiste en seleccionar de los algoritmos descritos en el marco teóricos aquellos que pueden aplicarse hoy a los procesos de revisión a los diseños estructurales. Posteriormente se realizará la selección de unos casos de aplicación, a los cuales se realizará un procedimiento de aplicación de los algoritmos seleccionados.

#### **3.1. Selección de Algoritmos que serán aplicados.**

De los algoritmos estudiados en el marco teórico, sólo los sistemas de verificación automática de códigos o SmartCodes, no son de posible aplicación, ya que no existe un sistema de uso extendido aún que pudiera emplearse en la revisión a diseños estructurales.

Respecto a los otros algoritmos, se empleará una lista de chequeo para verificar el contenido mínimo de memorias y planos de los casos de aplicación, posteriormente se aplicarán los índices de Hassan y Sozen (1997) como medición del grado de rigidez de la estructura. Posteriormente, se calculará el índice de vulnerabilidad, como fue propuesto por el INME (Maldonado y Chio, 2008) empleando simplemente mediciones sobre los planos. Finalmente, mediante el empleo de un modelo numérico de las estructuras de los casos de aplicación, se calculará el Perfil Bio-Sísmico (Guendelman y otros, 1997) el cual es el algoritmo más completo de los estudiados en el presente trabajo y que evalúa rigidez, acoplamiento y redundancia en las estructuras.

Para la correcta aplicación del Perfil Bio-Sísmico se realiza el cálculo del espectro de cada estructura según la norma NCh 433 Of. 1996, Mod. 2009 (INN, 2010) ya que para este espectro de diseño es que están definidos los rangos saludables de los indicadores sísmicos. No está en el alcance del presente trabajo determinar qué pasa con el Perfil si se emplea el espectro de la NSR-10, ni se cuenta con una base de datos de edificaciones robusta como la que generó el Perfil para establecer rangos saludables de los indicadores sísmicos.

### **3.2. Selección de Casos de Aplicación**

Para la selección de casos de aplicación se realizó una revisión bibliográfica en busca de trabajos previos que hubieran clasificado las viviendas según su tipología de construcción. En general se encontraron algunos documentos con contenido al respecto.

En un estudio de vulnerabilidad sísmica de las escuelas de Medellín (Zora, 2013), la autora emplea los Índices de Hassan y Sozen (1997), para realizar un análisis del nivel de vulnerabilidad sísmica de un inventario de escuelas en las ciudades de Medellín, Itagüí y Sabaneta. Dentro de su trabajo discute el tema de las tipologías estructurales empleadas en el país. Cita el proyecto World Housing Encyclopedia encabezado por: Earthquake Engineering Research Institute (EERI) y la International Association for Earthquake Engineering (IAEE), el cual, se ha encargado de recolectar información acerca del tipo de edificaciones que se construye en varios países del mundo, incluido Colombia. En los reportes que se han realizado para este proyecto (Mejía et al, 2002a; Mejía et al, 2002b) se han resaltado las vulnerabilidad de las tipologías descritas, pero los porcentajes de utilización, han sido estimados por los autores.

De manera similar, el proyecto South America integrated Risk Assessment (SARA) del Global Earthquake Model (GEM), ha realizado sesiones de trabajos con expertos de varios países para “describir e identificar tipologías de edificaciones residenciales” (SARA, 2014).

En Zora (2013) también se indica que “de acuerdo con el Consorcio Microzonificación 2006 (2007), un 85% de las edificaciones de 1 a 5 niveles en la ciudad de Medellín, corresponden a edificios con un sistema estructural de mampostería no reforzada y aproximadamente un 8% de las edificaciones corresponden a pórticos de concreto reforzado, siendo éstos dos, los tipos de construcción más comunes en Medellín.”. Estos porcentajes son similares a los reportados por expertos en SARA (2014) donde se indicaba que la tipología de mampostería no reforzada llegaba a un 79% mientras que la de pórticos de concreto reforzado llegaba a 15%.

En Maldonado (2007), tras un trabajo estadístico manzana por manzana en la ciudad de Bucaramanga se concluyó que la tipología de vivienda más común corresponde a mampostería no confinada con un 38%, seguido de la mampostería confinada y/o reforzada con un 34%. Para dicha fecha aún se conservaban un 11% de viviendas en muros de tapia, quedando un 17% para estructuras de concreto en muros o pórticos de diferentes características.

Es evidente que en los últimos 10 años el perfil de edificaciones de la ciudad ha cambiado, produciéndose un crecimiento considerable de las edificaciones en concreto reforzado con alturas mayores a 8 pisos, las cuales para el 2007, representaban menos del 6%.

Se decide trabajar para efectos de aplicación de los algoritmos seleccionados, únicamente con estructuras de concreto, dada la gran demanda que tienen esta configuración de estructuras actualmente. A partir de esta parte se analizarán los 4 casos seleccionados para la aplicación de los algoritmos.

### 3.3. Caso 1. Edificio Residencial de Concreto reforzado de 24 pisos.

El edificio del Caso 1, fue construido, y una vez habitado se identificaron fallencias estructurales, atribuidas al diseño y construcción. Tras ser evacuado, se le realizó un reforzamiento completo. El presente análisis se refiere al proyecto original (antes del reforzamiento). Se omiten mayores detalles de la edificación por tratarse éste, de un trabajo netamente académico.

**3.3.1. Contenido Mínimo de las Memorias y Planos.** Como se indicó en el numeral 6.1, se empleará una lista de chequeo para verificar el contenido mínimo (ver Tabla 6) de las memorias de cálculo y planos que se emplearon para la obtención de la licencia de construcción.

Tabla 6.

*Verificación documental y contenido del Caso 1.*

| Ley No. 400 de 19 de Agosto 1997: Por la cual se adopta las normas SR. |                                     |      |    |     |         |
|--|-------------------------------------|------|----|-----|---------|
| NSR-10: Numeral A.1.5.2: Planos. A.1.5.2.1 Planos estructurales        |                                     |      |    |     |         |
| NSR-10: Numeral A.1.5.3: Memorias. A.1.5.3.1 Memorias estructurales    |                                     |      |    |     |         |
| Lista de chequeo diseño estructural                                    |                                     |      |    |     |         |
|  |                                     |      |    |     | Chequeo |
| Ítem y contenido   | SI                                  | Inc. | NO | N/A |         |
| 1  | Memorias                            |      |    |     |         |
| 2  | Descripción del sistema estructural |      |    | X   |         |
| 3  | Cargas verticales                   |      | X  |     |         |
| 4  | Grado de capacidad de disipación    |      |    | X   |         |
| 5  | Cálculo de la fuerza sísmica        |      | X  |     |         |
| 6  | Tipo de análisis estructural        |      | X  |     |         |

|    |   |   |   |
|----|---|---|---|
| 7  | Verificación de derivas   |   | X |
| 8  | Diseños   |   |   |
| 9  | Viguetas y/o losas  | X |   |
| 10 | Vigas   |   | X |
| 11 | Columnas y/o muros  |   | X |
| 12 | Escaleras   |   | X |
| 13 | Cimientos   |   | X |
| 14 | Formato   |   |   |
| 15 | Portada   | X |   |
| 16 | Encabezados y pies de página  | X |   |
| 17 | Numeración  | X |   |
| 18 | Paginación  | X |   |
| 19 | Final   |   | X |
| 20 | Planos  |   |   |
| 21 | Especificaciones de los materiales                                  | X |   |
| 22 | Resistencia del concreto  | X |   |
| 23 | Resistencia del acero   | X |   |
| 24 | Calidad de las unidades de mampostería                              |   | X |
| 25 | Tipo de mortero   |   | X |
| 26 | Calidad de la madera estructural                                    |   | X |
| 27 | Tamaño y localización de los elementos estructurales                | X |   |
| 28 | Cimentación   | X |   |
| 29 | Diafragmas estructurales  | X |   |
| 30 | Cotas de elementos (planta)   | X |   |
| 31 | Elementos especiales o tipo   | X |   |
| 32 | Pórticos (vigas y columnas)   | X |   |
| 33 | Muros estructurales   | X |   |
| 34 | Dimensiones y refuerzos   | X |   |
| 35 | Tipo y localización de las conexiones entre elementos estructurales |   | X |
| 36 | Empalmes entre los elementos de refuerzo                            |   | X |
| 37 | Grado de disipación de la energía                                   |   | X |
| 38 | Cargas vivas y de acabados  |   | X |
| 39 | Grupo de uso de la edificación                                      |   | X |
| 40 | Formato   |   |   |
| 41 | Rótulos   | X |   |
| 42 | Escalas   | X |   |

Verificación mediante lista de chequeo del contenido mínimo de memorias y planos estructurales. Se observa que para el caso del edificio Caso 1, no se cumplía con los contenidos mínimos exigidos por la NSR-10.

**3.3.2. Índices de Hassan-Sozen. Aplicación al Caso 1.** Considerando que el edificio presenta una irregularidad en altura (ver anexo 2) se emplea el piso tipo para el cálculo de los índices. En dicho piso tipo, el área construida es de 1385 m<sup>2</sup>, y se encuentra que el eje 8 (ver *Figura 25*) soporta la totalidad de los 24 pisos que tiene la estructura, se simplifica el área total de construcción como el total de pisos por el área del piso tipo, es decir 24 pisos por 1385 m<sup>2</sup>, para un área total de construcción de 33.240 metros cuadrados de placa sobre el nivel de cimentación (Ap=33.240 para el cálculo de los índices).

Dado que los muros rotan (ejes no paralelos) se ha realizado un cálculo ponderado para determinar el aporte de cada eje estructural a los ejes globales X y Y de la estructura, los cálculos de los aportes de cada eje a los ejes principales se muestran en la tabla.

Tabla 7.

*Cálculo del área resistente - Caso 1.*

| Eje | Acw  | Ángulo | Acwx       | Acwy       |
|-----|------|--------|------------|------------|
| 1   | 1,1  | 64,926 | 0,46616729 | 0,99633732 |
| 2   | 1,1  | 67,634 | 0,41857384 | 1,0172492  |
| 3   | 0,74 | 70,34  | 0,24896405 | 0,69686218 |
| 4   | 0,74 | 73,05  | 0,21573742 | 0,70785406 |
| 5   | 1,1  | 75,76  | 0,27058254 | 1,06620124 |
| 6   | 1,1  | 78,47  | 0,21986909 | 1,0778022  |
| 6'  | 1,8  | 81,15  | 0,27692671 | 1,7785701  |
| 6'' | 0,82 | 171,15 | 0,81023749 | 0,1261555  |
| 7   | 0,74 | 81,174 | 0,11354136 | 0,73123755 |
| 8   | 1,1  | 83,88  | 0,11727227 | 1,09373087 |

|                |      |        |            |            |
|----------------|------|--------|------------|------------|
| 9              | 0,74 | 86,59  | 0,04401564 | 0,7386898  |
| 10             | 0,74 | 89,3   | 0,00904058 | 0,73994477 |
| 11             | 0,74 | 91,11  | 0,01433524 | 0,73986114 |
| 12             | 0,74 | 93,82  | 0,04930042 | 0,73835592 |
| 13             | 1,1  | 96,53  | 0,12509577 | 1,09286369 |
| 14             | 0,74 | 99,24  | 0,11882202 | 0,73039806 |
| 14'            | 1,8  | 99,27  | 0,28995675 | 1,77649235 |
| 14'            | 0,82 | 189,27 | 0,80929096 | 0,13209141 |
| 15             | 1,1  | 101,95 | 0,22776382 | 1,07616153 |
| 16             | 1,1  | 104,66 | 0,27839086 | 1,06418914 |
| 17             | 0,74 | 107,36 | 0,22079716 | 0,70629216 |
| 18             | 0,74 | 110,07 | 0,25394427 | 0,69506281 |
| 19             | 1,1  | 112,78 | 0,42591315 | 1,0141982  |
| 20             | 1,1  | 115,49 | 0,47338892 | 0,99292645 |
| Acw<br>totales |      |        | 6,49792763 | 21,5295277 |

Los índices se calculan a partir de la ecuación ( 1) como,

$$WI_x = \frac{A_{cw} + 0.1A_{mw}}{A_{ft}} \times 100 = \frac{6,498}{33.240} \times 100 = 0,0195\% \quad (12)$$

$$WI_y = \frac{A_{cw} + 0.1A_{mw}}{A_{ft}} \times 100 = \frac{21,530}{33.240} \times 100 = 0,0648\% \quad (13)$$

El índice de columna tiene un valor de cero. Aunque en la memoria se emplea el nombre de ‘columnas’ para los elementos de resistencia vertical, es claro que la configuración de éstos elementos corresponde realmente a muros, de manera equivalente a como lo calificó la Universidad de Los Andes, para el edificio Space (Universidad de los Andes, 2017), que también presentaba éste tipo de elementos estructurales.

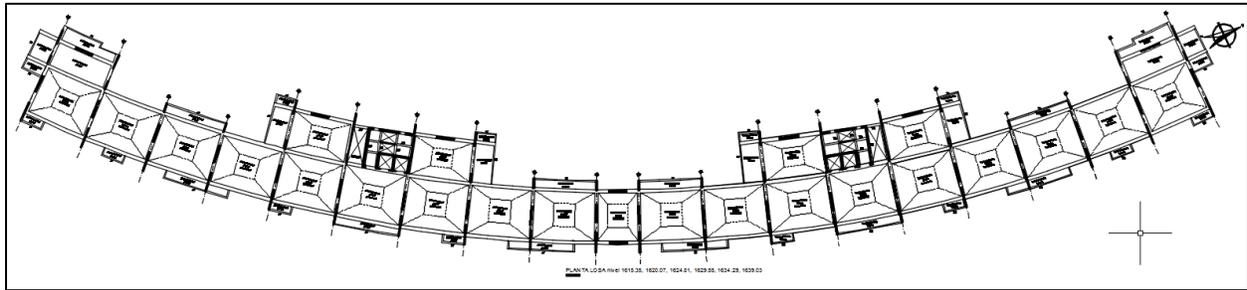


Figura 25. Planta tipo del Caso 1. Fuente: Archivo Planeación Municipal Medellín.

Al representar gráficamente (ver Figura 26) estos índices tenemos,

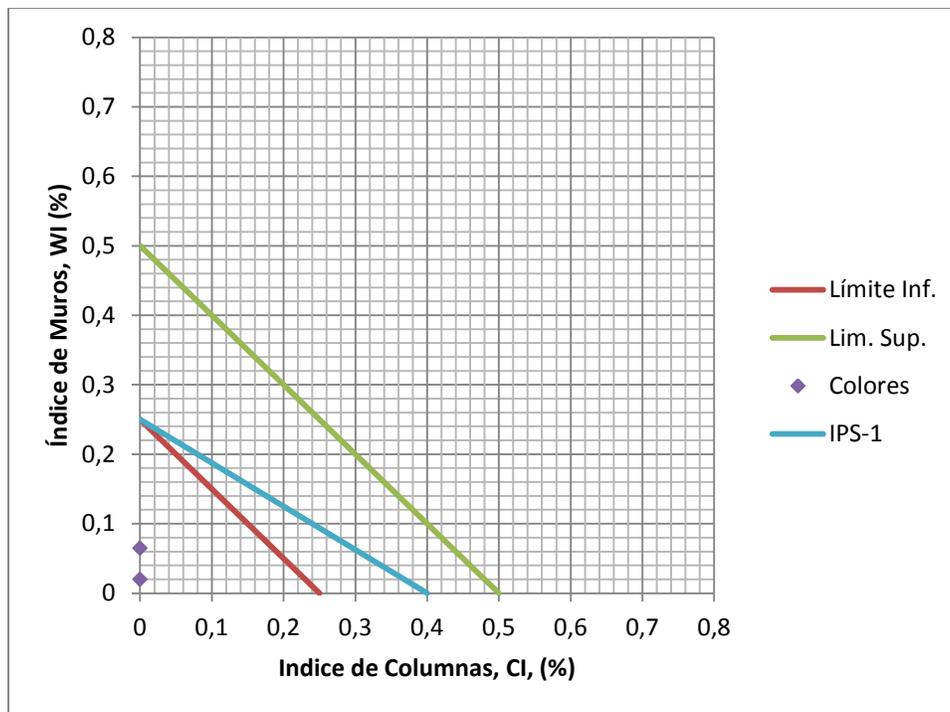


Figura 26. Representación del edificio Caso 1, para los índices de Hassan y Sozen.

En la figura, la rigidez de la edificación está representada por dos puntos identificados como “Colores”, para cada eje principal de la edificación. Los límites superior e inferior son los establecidos en el documento original (Hassan y Sozen, 1997) y el límite en azul corresponden al IPS-1 (ACI, 2002).

**3.3.3. Perfil Bio-Sísmico – Caso 1.** Para la calificación del edificio Caso 1, se elaboró un modelo numérico de la estructura en SAP2000, que posteriormente fue convertido al formato de ETABS mediante la extensión ConnectSAP2000v19andETABS2016.

Se hace necesario comparar los espectros elásticos y de diseños conforme a las dos normas (NSR-10, AIS, 2010 y NCh 433, INN,2010), para lograr identificar cuál implica una mayor excitación de la estructura. Sobre el modelo se han realizado la extracción de los datos necesarios para el cálculo de los indicadores del Perfil Bio-sísmico. Para el Perfil Bio-sísmico se emplea el espectro original del mismo, es decir el de la norma chilena NCh 433 (INN, 2010), conforme como se declaró en 4.1.

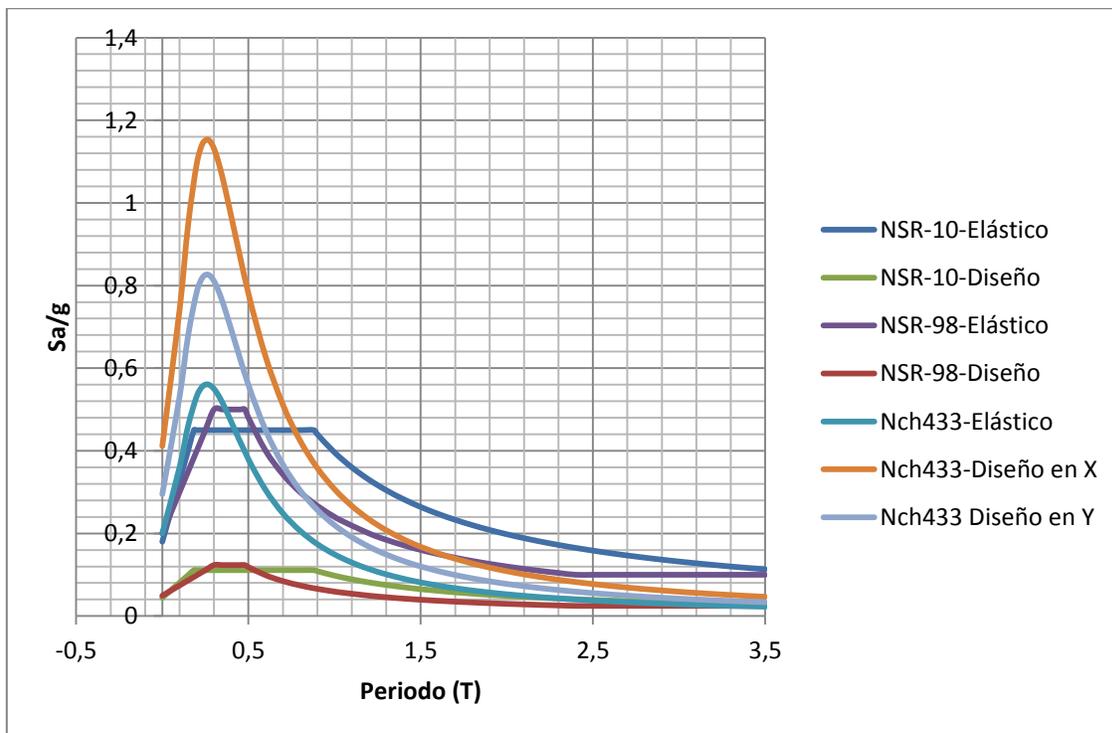


Figura 27. Comparación de los espectros de la NSR-10 con los de la NCh433

En el anexo 2 se encuentran los cálculos de los indicadores del Perfil Bio-sísmico. Al analizar los resultados (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) se observa que seis (6) de los trece (13) indicadores del Perfil Bio-sísmico, se encuentran en valores no aceptables, cinco de ellos asociados a la falta de rigidez de la estructura, más el sexto asociado a la excesiva diferencia entre el largo y ancho de la estructura. Los indicadores asociados al acoplamiento de los modos se encuentran en rangos normales o aceptables. Los indicadores de redundancia y demanda de ductilidad, tienen valores normales.



Figura 28. Resumen de valores del Perfil Bio-sísmico del caso 1.

**3.3.4. Índice de vulnerabilidad – Caso 1.** La evaluación del índice de vulnerabilidad inicia con la clasificación (A, B, C, o D) de los 12 parámetros que son aplicables a un proyecto en etapa de diseño. Esta clasificación es la siguiente: 1) Sistema estructural: Sistema muros, A; 2) Año de construcción: 2006, A; 3) Resistencia convencional,  $\alpha < 0,08$ , C (ver Tabla 8, para el cálculo de la resistencia convencional referirse a la sección 2.2.4); 4) Posición de la edificación y de la cimentación: desnivel mayor a 1m, C; 5) Suelo y pendiente, pendiente del 68%, C; 6) Diafragma de piso, longitud/ancho de diafragma mayor a 5, C; 7) Configuración en el planta, ejes no paralelos, C; 8) Configuración en altura, cambio de área mayor de 20% en transición entre losas de parqueo y losas de apartamentos, C; 9) Conexiones entre elementos críticos, menos del 70% de las conexiones son excéntricas, B; 10) Presencia para columnas cortas, columnas cortas en pasillos de circulación, con parapetos  $h < 0,5H$ , B; 11) Elementos no estructurales, balcones pequeños, sin tanques elevados, A; 12) Edificaciones adyacentes, no hay edificaciones adyacentes, A.

Tabla 8.

Cálculo del coeficiente de seguridad  $\alpha$  para el Caso 1.

| Coeficiente de seguridad, $\alpha$ , mide la resistencia convencional |                            |             |                         | $\alpha =$                   | <b>0,03067</b>       |
|---|----------------------------|-------------|-------------------------|------------------------------|----------------------|
| <b>R</b> =  | 7                          | <b>N</b> =  | 24 pisos                | <b>Pc</b> =                  | 24 kN/m <sup>3</sup> |
| <b>C</b> =  | 0,001019                   | <b>A</b> =  | 6,497928 m <sup>2</sup> | <b>Ps</b> =                  | 7 kN/m <sup>2</sup>  |
| <b>Sa</b>   | 0,2326                     | <b>At</b> = | 33240 m <sup>2</sup>    | <b>T</b> =                   | 1,031964 s           |
| =   |                            |             |                         |                              |                      |
| <b>ao</b>   | 0,000195                   | <b>Ax</b>   | 6,497928 m <sup>2</sup> | <b>Ct</b> =                  | 0,049                |
| =   |                            | =           |                         |                              |                      |
| <b><math>\tau</math></b> =  | 881,9171 kN/m <sup>2</sup> | <b>Ay</b>   | 21,52953 m <sup>2</sup> | <b>Hn</b>                    | 58,16 m              |
|   |                            | =           |                         | =                            |                      |
| <b>q</b> =  | 7,04904 kN/m <sup>2</sup>  | <b>h</b> =  | 2,423333 m              | <b><math>\alpha</math></b> = | 0,75                 |

Ya definidas las clasificaciones de los parámetros se realiza el cálculo del Índice de vulnerabilidad, para el edificio del caso 1, se observa (ver

Tabla 9) que el Índice de Vulnerabilidad del INME da un valor de 5,449 lo que representa una estructura medianamente vulnerable.

Tabla 9.

Índice de vulnerabilidad del Caso 1.

| No. | PARÁMETRO                                      | A                       | B    | C    | D   | PESO  |
|-----|--|-------------------------|------|------|-----|-------|
| 1   | Sistema estructural                            | 2,13                    | 3,35 | 5,57 | 8,1 | 7,43  |
| 2   | Año de construcción                            | 2,61                    | 6    | 7,63 |     | 7,1   |
| 3   | Resistencia convencional                       | 2,02                    | 4,98 | 8,01 |     | 7,04  |
| 4   | Posición de la edificación y de la cimentación | 1,38                    | 2,87 | 6,23 |     | 6,28  |
| 5   | Suelo y pendiente                              | 1,76                    | 5,13 | 7,82 |     | 7,22  |
| 6   | Diafragma de piso                              | 1,97                    | 5,24 | 7,99 |     | 6,04  |
| 7   | Configuración en el planta                     | 2,03                    | 4,79 | 7,78 |     | 6,79  |
| 8   | Configuración en altura                        | 1,89                    | 3,87 | 7,85 |     | 6,79  |
| 9   | Conexiones entre elementos críticos            | 1,64                    | 5,13 | 8,06 |     | 8,9   |
| 10  | Presencia para columnas cortas                 | 1,33                    | 5,6  | 8,21 |     | 7,46  |
| 11  | Elementos no estructurales                     | 1,79                    | 4,44 | 7,44 |     | 4,67  |
| 12  | Edificaciones adyacentes                       | 1,46                    | 4,69 | 7,52 |     | 6     |
|     | ÍNDICE DE VULNERABILIDAD                       | Medianamente vulnerable |      |      |     | 5,449 |

### 3.4. Caso 2. Edificio Institucional (educación) de Concreto Reforzado de 3 pisos.

El edificio del caso 2, fue construido, tras su puesta en funcionamiento se encontraron algunos problemas como excesivos asentamientos y deflexiones.

**3.4.1. Contenido Mínimo de las Memorias y Planos.** Del Mencionado Proyecto sólo se cuentan con planos de construcción por lo que se evalúa únicamente el contenido de éstos.

Tabla 10.

*Verificación documental y contenido mínimo. Caso 2.*

Ley No. 400 de 19 de Agosto 1997: Por la cual se adopta las normas sismo resistentes.

NSR-10: Numeral A.1.5.2: Planos. A.1.5.2.1 Planos estructurales

NSR-10: Numeral A.1.5.3: Memorias. A.1.5.3.1 Memorias estructurales

### Lista de chequeo diseño estructural

| Item y contenido   | Chequeo |      |    |     |
|--|---------|------|----|-----|
|  | SI      | Inc. | NO | N/A |
| 20 Planos  |         |      |    |     |
| 21 Especificaciones de los materiales                                  | X       |      |    |     |
| 22 Resistencia del concreto  | X       |      |    |     |
| 23 Resistencia del acero   | X       |      |    |     |
| 24 Calidad de las unidades de mampostería                              | X       |      |    |     |
| 25 Tipo de mortero   | X       |      |    |     |
| 26 Calidad de la madera estructural                                    |         |      |    | X   |
| 27 Tamaño y localización de los elementos estructurales                | X       |      |    |     |
| 28 Cimentación   | X       |      |    |     |
| 29 Diafragmas estructurales  | X       |      |    |     |
| 30 Cotas de elementos (planta)   | X       |      |    |     |
| 31 Elementos especiales o tipo   | X       |      |    |     |
| 32 Pórticos (vigas y columnas)   | X       |      |    |     |
| 33 Muros estructurales   | X       |      |    |     |
| 34 Dimensiones y refuerzos   | X       |      |    |     |
| 35 Tipo y localización de las conexiones entre elementos estructurales | X       |      |    |     |
| 36 Empalmes entre los elementos de refuerzo                            | X       |      |    |     |
| 37 Grado de disipación de la energía                                   | X       |      |    |     |
| 38 Cargas vivas y de acabados  |         | X    |    |     |
| 39 Grupo de uso de la edificación                                      |         |      | X  |     |
| 40 Formato   | X       |      |    |     |
| 41 Rótulos   | X       |      |    |     |
| 42 Escalas   | X       |      |    |     |

Respecto al contenido mínimo de planos, se observa que se omitieron dos datos importantes como son el peso de los acabados y el grupo de uso de la edificación.

**3.4.2. Índices de Hassan-Sozen. Aplicación al Caso 2.** Para aplicar los índices a este edificio se requiere omitir el muro de contención ubicado al primer piso (ver Figura 29). Aunque este muro aporta rigidez al primer piso, también puede generar efectos torsionales, por lo que se hace



|         |      |      |      |      |
|---------|------|------|------|------|
| H       | 0,32 | 0,16 |      | 0,9  |
| I       | 0,32 | 0,16 |      |      |
| J       | 0,48 | 0,24 |      | 0,35 |
| K       | 0,32 | 0,16 |      |      |
| L       | 0,8  | 0,4  |      |      |
| M       | 0,48 | 0,24 |      |      |
| N       | 0,64 | 0,32 |      |      |
| 6       |      |      | 1,05 |      |
| TOTALES | 6,24 | 3,12 | 1,05 | 2,5  |

Los índices de muros en cada dirección se calculan con la ecuación (1) como,

$$WI_x = \frac{A_{cw} + 0.1A_{mw}}{A_{ft}} \times 100 = \frac{1,05}{2.519} \times 100 = 0,042\% \tag{14}$$

$$WI_y = \frac{A_{cw} + 0.1A_{mw}}{A_{ft}} \times 100 = \frac{2,5}{2.519} \times 100 = 0,099\% \tag{15}$$

El índice de columna tiene un valor igual a  $3,12/2519 \times 100 = 0,124\%$ . Al representar gráficamente estos índices tenemos,

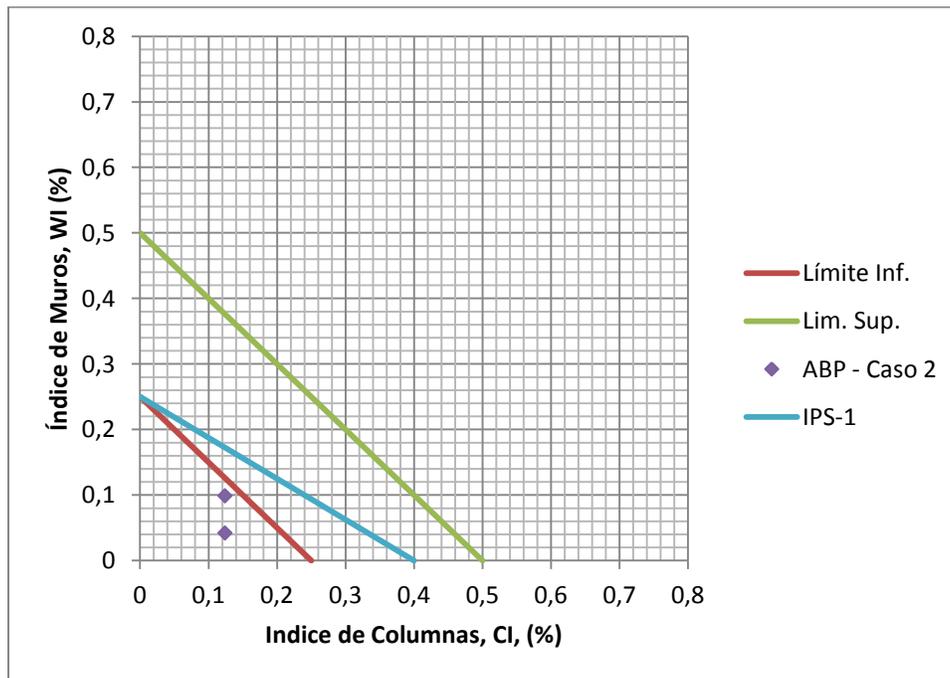


Figura 30. Representación de los Índices de Hassan y Sozen para el caso 2.

**3.4.3. Perfil Bio-Sísmico – Caso 2.** Para la calificación del caso 2, se empleó un modelo numérico elaborado por el ingeniero Hernán Agredo, basado en SAP2000. Se empleó el espectro de la norma NCh433 que es el empleado por el perfil original.



Figura 31. Perfil Bio-Sísmico del edificio del Caso 2. Elaborado según Guendelman (2010)

En el anexo 2 se encuentran los cálculos de los indicadores del Perfil Bio-sísmico. Al analizar los resultados se observa que seis (6) de los trece (13) indicadores del Perfil Bio-sísmico, se

encuentran en razón no aceptables, cinco de ellos asociados a la falta de rigidez de la estructura, más el sexto asociado a la excesiva diferencia entre el largo y ancho de la estructura.

**3.4.4. Índice de vulnerabilidad.** La evaluación del índice de vulnerabilidad inicia con la clasificación de los 12 parámetros que son aplicables a un proyecto en etapa de diseño. Esta clasificación es la siguiente: 1) Sistema estructural: Sistema combinado, A; 2) Año de construcción: 2006, A; 3) Resistencia convencional,  $0,08 < \alpha \leq 1,5$ , B (ver Tabla 12); 4) Posición de la edificación y de la cimentación: desnivel mayor a 1m, C; 5) Suelo y pendiente, pendiente del 83%, C; 6) Diafragma de piso, con deformabilidad despreciable, A; 7) Configuración en el planta, pantalla en sótano, C; 8) Configuración en altura, cambio de área mayor de 20% en transición entre sótano y piso 1, C; 9) Conexiones entre elementos críticos, no hay excéntricas, A; 10) Presencia de columnas cortas, se presentan columnas cortas en fachadas,  $h < 0,5H$ , B; 11) Elementos no estructurales, voladizo pronunciado, sin tanques elevados, B; 12) Edificaciones adyacentes, no hay edificaciones adyacentes, A.

Tabla 12.

*Cálculo del coeficiente de seguridad  $\alpha$  para el Caso 2.*

| Coeficiente de seguridad, $\alpha$ , mide la resistencia convencional |                            |             |                     | $\alpha =$                   | <b>0,99359</b>       |
|---|----------------------------|-------------|---------------------|------------------------------|----------------------|
| <b>R =</b>  | 7                          | <b>N =</b>  | 3 pisos             | <b>Pc =</b>                  | 24 kN/m <sup>3</sup> |
| <b>C =</b>  | 0,110891                   | <b>A =</b>  | 7,29 m <sup>2</sup> | <b>Ps =</b>                  | 7 kN/m <sup>2</sup>  |
| <b>Sa =</b>   | 0,78125                    | <b>At =</b> | 2519 m <sup>2</sup> | <b>T =</b>                   | 0,479308 s           |
| <b><math>\alpha_0</math> =</b>  | 0,002894                   | <b>Ax =</b> | 7,29 m <sup>2</sup> | <b>Ct =</b>                  | 0,047                |
| <b><math>\tau</math> =</b>  | 881,9171 kN/m <sup>2</sup> | <b>Ay =</b> | 8,74 m <sup>2</sup> | <b>Hn =</b>                  | 13,2 m               |
| <b>q =</b>  | 7,672 kN/m <sup>2</sup>    | <b>h =</b>  | 4,4 m               | <b><math>\alpha</math> =</b> | 0,9                  |

Ya definidas las clasificaciones de los parámetros se realiza el cálculo del Índice de vulnerabilidad, para el edificio del caso 2,

Tabla 13.

*Índice de vulnerabilidad del Caso 2.*

| No. | PARÁMETRO                                      | A                       | B    | C    | D   | PESO  |
|-----|--|-------------------------|------|------|-----|-------|
| 1   | Sistema estructural                            | 2,13                    | 3,35 | 5,57 | 8,1 | 7,43  |
| 2   | Año de construcción                            | 2,61                    | 6    | 7,63 |     | 7,1   |
| 3   | Resistencia convencional                       | 2,02                    | 4,98 | 8,01 |     | 7,04  |
| 4   | Posición de la edificación y de la cimentación | 1,38                    | 2,87 | 6,23 |     | 6,28  |
| 5   | Suelo y pendiente                              | 1,76                    | 5,13 | 7,82 |     | 7,22  |
| 6   | Diafragma de piso                              | 1,97                    | 5,24 | 7,99 |     | 6,04  |
| 7   | Configuración en el planta                     | 2,03                    | 4,79 | 7,78 |     | 6,79  |
| 8   | Configuración en altura                        | 1,89                    | 3,87 | 7,85 |     | 6,79  |
| 9   | Conexiones entre elementos críticos            | 1,64                    | 5,13 | 8,06 |     | 8,9   |
| 10  | Presencia para columnas cortas                 | 1,33                    | 5,6  | 8,21 |     | 7,46  |
| 11  | Elementos no estructurales                     | 1,79                    | 4,44 | 7,44 |     | 4,67  |
| 12  | Edificaciones adyacentes                       | 1,46                    | 4,69 | 7,52 |     | 6     |
|     | <b>ÍNDICE DE VULNERABILIDAD</b>                | Medianamente vulnerable |      |      |     | 4,514 |

### 3.5. Caso 3. Edificio institucional (Gobierno) de concreto reforzado de 2 pisos.

El edificio del caso 3, tuvo dos diseños diferentes, se realiza la revisión a ambos diseños simultáneamente.

**3.5.1. Contenido Mínimo de las Memorias y Planos.** Se emplea una lista de chequeo para la verificación del contenido mínimo de planos y memoria de cálculo conforme a la NSR-10.

Tabla 14.

*Contenido mínimo de planos y memorias - Caso 3.*

|  |
|--|
| Ley No. 400 de 19 de Agosto 1997: Por la cual se adopta las normas sismo resistentes |
| NSR-10: Numeral A.1.5.2: Planos. A.1.5.2.1 Planos estructurales                      |
| NSR-10: Numeral A.1.5.3: Memorias. A.1.5.3.1 Memorias estructurales                  |
| Lista de chequeo diseño estructural  |

| Item y contenido   | Chequeo: Diseño 1 |     |        |         | Chequeo: Diseño 2 |     |        |         |
|--|-------------------|-----|--------|---------|-------------------|-----|--------|---------|
|  | SI                | Inc | N<br>O | N/<br>A | SI                | Inc | N<br>O | N/<br>A |
| 1 Memorías   | X                 |     |        |         | X                 |     |        |         |
| 2 Descripción del sistema estructural                                  | X                 |     |        |         | X                 |     |        |         |
| 3 Cargas verticales  | X                 |     |        |         | X                 |     |        |         |
| 4 Grado de capacidad de disipación                                     | X                 |     |        |         | X                 |     |        |         |
| 5 Cálculo de la fuerza sísmica   |                   |     |        | X       | X                 |     |        |         |
| 6 Tipo de análisis estructural   | X                 |     |        |         | X                 |     |        |         |
| 7 Verificación de derivas  | X                 |     |        |         | X                 |     |        |         |
| 8 Diseños  |                   |     |        | X       | X                 |     |        |         |
| 9 Viguetas y/o losas   |                   |     |        | X       | X                 |     |        |         |
| 10 Vigas   |                   |     |        | X       | X                 |     |        |         |
| 11 Columnas y/o muros  |                   |     |        | X       | X                 |     |        |         |
| 12 Escaleras   |                   |     |        | X       | X                 |     |        |         |
| 13 Cimientos   |                   |     |        | X       | X                 |     |        |         |
| 14 Formato   | X                 |     |        |         | X                 |     |        |         |
| 15 Portada   | X                 |     |        |         | X                 |     |        |         |
| 16 Encabezados y pies de página  |                   | X   |        |         | X                 |     |        |         |
| 17 Numeración  |                   | X   |        |         | X                 |     |        |         |
| 18 Paginación  |                   |     |        | X       | X                 |     |        |         |
| 19 Final   |                   |     |        | X       | X                 |     |        |         |
| 20 Planos  | X                 |     |        |         | X                 |     |        |         |
| 21 Especificaciones de los materiales                                  |                   | X   |        |         | X                 |     |        |         |
| 22 Resistencia del concreto  |                   | X   |        |         | X                 |     |        |         |
| 23 Resistencia del acero   |                   | X   |        |         | X                 |     |        |         |
| 24 Calidad de las unidades de mampostería                              |                   |     |        | X       |                   |     | X      |         |
| 25 Tipo de mortero   |                   |     |        | X       |                   |     | X      |         |
| 26 Calidad de la madera estructural                                    |                   |     |        | X       |                   |     |        | X       |
| 27 Tamaño y localización de los elementos estructurales                | X                 |     |        |         | X                 |     |        |         |
| 28 Cimentación   |                   | X   |        |         | X                 |     |        |         |
| 29 Diafragmas estructurales  |                   | X   |        |         | X                 |     |        |         |
| 30 Cotas de elementos (planta)   |                   | X   |        |         | X                 |     |        |         |
| 31 Elementos especiales o tipo   |                   | X   |        |         | X                 |     |        |         |
| 32 Pórticos (vigas y columnas)   | X                 |     |        |         | X                 |     |        |         |
| 33 Muros estructurales   | X                 |     |        |         | X                 |     |        |         |
| 34 Dimensiones y refuerzos   | X                 |     |        |         | X                 |     |        |         |
| 35 Tipo y localización de las conexiones entre elementos estructurales | X                 |     |        |         | X                 |     |        |         |
| 36 Empalmes entre los elementos de refuerzo                            |                   | X   |        |         | X                 |     |        |         |

|    |                                   |   |   |   |
|----|-----------------------------------|---|---|---|
| 37 | Grado de disipación de la energía |   | X | X |
| 38 | Cargas vivas y de acabados        |   | X | X |
| 39 | Grupo de uso de la edificación    | X |   | X |
| 40 | Formato                           | X |   | X |
| 41 | Rótulos                           | X |   | X |
| 42 | Escalas                           |   | X | X |

En el diseño 1, se omiten varios elementos como los diseños de los elementos estructurales, en el diseño 2, se omiten el grupo de uso y las características de la mampostería.

**3.5.2. Índices de Hassan-Sozen. Aplicación al Caso 3.** En el caso 3 se trata de una estructura sin irregularidades en altura, por lo que el cálculo del índice de Hassan y Sozen no requiere simplificaciones. Si se requiere de cálculos separados para el primer (ver Tabla 15) y segundo diseño (ver Tabla 16), ya que las áreas variaron tanto en área de construcción como de estructura. Área piso diseño 1: 702 m<sup>2</sup> y diseño 2: 655 m<sup>2</sup>.

Tabla 15.

*Cálculo de las áreas resistentes. Caso 3 – Diseño 1.*

| Ejes           | Acol  | Acol X | Acol Y | Amx   | Amy   |
|----------------|-------|--------|--------|-------|-------|
| 1              |       | 1,1625 | 0,3    | 0,6   | 2,325 |
| 2              | 0,096 | 0,498  | 0,198  | 0,3   | 0,9   |
| 3              |       | 0,525  | 0,4875 | 0,975 | 1,05  |
| 4              |       | 0,15   | 0,45   | 0,9   | 0,3   |
| 5              |       | 0,15   | 0,45   | 0,9   | 0,3   |
| 6              |       | 0      | 0,57   | 1,14  | 0     |
| 7              | 0,15  | 0,225  | 1,05   | 1,95  | 0,3   |
| 8              |       | 0      | 0,6    | 1,2   | 0     |
| 9              | 0,15  | 0,7    | 0,375  | 0,6   | 1,25  |
| <b>TOTALES</b> |       | 3,411  | 4,481  | 8,565 | 6,425 |

Para el diseño 1 se tiene un índice de columnas de  $3,411/702 \times 100 = 0,48\%$  en X y de  $4,481/702 \times 100 = 0,638\%$  en Y, los índices de muros se calculan como,

$$WI_x = \frac{A_{cw} + 0.1A_{mw}}{A_{ft}} \times 100 = \frac{8,565}{702} \times 100 = 1,22\% \tag{16}$$

$$WI_y = \frac{A_{cw} + 0.1A_{mw}}{A_{ft}} \times 100 = \frac{6,425}{702} \times 100 = 0,915\% \tag{17}$$

Tabla 16.

*Cálculo del área resistente del caso 3 – Diseño 2.*

| Ejes           | Acol | Acol X o<br>Y | Amx | Amy  |
|----------------|------|---------------|-----|------|
| 1              | 0,36 | 0,18          | 0,8 | 0,46 |
| 2              | 0,54 | 0,27          |     |      |
| 3              | 0,36 | 0,18          |     |      |
| 4              | 0,36 | 0,18          |     |      |
| 5              | 0,36 | 0,18          |     |      |
| 6              | 0,36 | 0,18          |     |      |
| 7              | 0,54 | 0,27          |     |      |
| 8              | 0,36 | 0,18          | 0,8 | 0,46 |
| <b>TOTALES</b> |      | 1,62          | 1,6 | 0,92 |

Para el diseño 2 se tiene un índice de columnas de  $1,62/655 \times 100 = 0,247\%$  y, los índices muros se calculan como,

$$WI_x = \frac{A_{cw} + 0.1A_{mw}}{A_{ft}} \times 100 = \frac{1,6}{655} \times 100 = 0,244\%$$

$$WI_y = \frac{A_{cw} + 0.1A_{mw}}{A_{ft}} \times 100 = \frac{0,92}{655} \times 100 = 0,14\%$$

Al representar gráficamente estos índices se obtiene la *Figura 32*. Se observa que para un edificio con exagerada rigidez los índices de Hassan y Sozen califican adecuadamente esta condición, también refleja la posibilidad de errores graves de cálculo pues en la memoria de cálculo de dicho diseño No. 1, las derivas están muy próximas al 1% aceptado en la normativa.

En el diseño 2, se tienen una rigidez dentro de los límites establecidos para los índices.

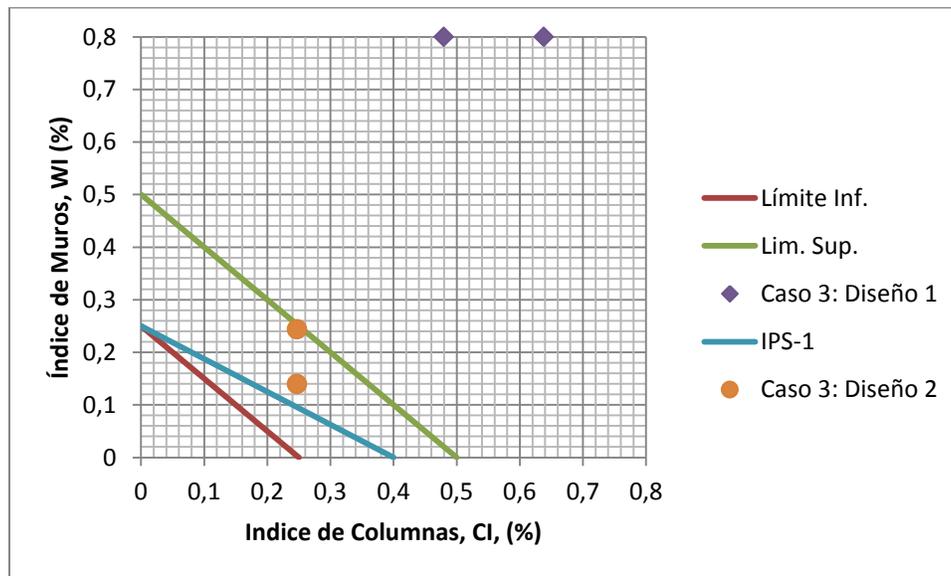


Figura 32. Índices de Hassan y Sozen para ambos diseños del Caso 3.

**3.5.3. Perfil Bio-Sísmico aplicado al caso 3 - Diseño 2.** Para el caso 3 (diseño 2), se emplea un modelo numérico elaborado por el autor, como parte de la corrección del exceso de rigidez del diseño 1. Al aplicar el espectro de la norma NCh 433 (INN,2010) y medir los datos de entrada del perfil bio-sísmico, conforme a como se calcularon en el anexo 4.

Los resultados del perfil bio-sísmico son los siguientes: De los indicadores de rigidez, 2 de ellos tiene valores no aceptables, asociados ambos a la dirección Y de la estructura. Con excepción de puntos extremos para la dirección Y, los indicadores asociados con el desplazamiento son normales. De los indicadores de acoplamiento, dos presentan valores no aceptables, éstos están asociados al fuerte acoplamiento en Y que genera la acción sísmico en X y al acoplamiento rotacional que generan el hecho de que los elementos (2 muros) que aportan mayor rigidez en la dirección X, se encuentren alineados en un solo eje.



Figura 33. Perfil Bio-Sísmico del edificio del Caso 3. Adaptado de Guendelman (2010).

**3.5.4. Índice de Vulnerabilidad. Aplicación al Caso 3.** Se evalúan en primera instancia los 12 parámetros del índice de vulnerabilidad para el diseño 1. Para el diseño 1 se tiene: 1) Sistema estructural: Sistema muros, A; 2) Año de construcción: 2015, A; 3) Resistencia convencional,  $\alpha > 1,5$ , A (ver Tabla 17); 4) Posición de la edificación y de la cimentación: desnivel menor a 1m, B; 5) Suelo y pendiente, pendiente del 10%, A; 6) Diafragma de piso, sin deformabilidad apreciable, A; 7) Configuración en el planta, forma de C con  $0.4 \leq a/L < 0,6$ , B; 8) Configuración en altura, no hay cambios de área, A; 9) Conexiones entre elementos críticos, no

hay conexiones excéntricas, A; 10) Presencia para columnas cortas, no hay presencia de columnas cortas, B; 11) Elementos no estructurales, balcones pequeños, sin tanques elevados, A; 12) Edificaciones adyacentes, sin separación, losas al mismo nivel, B.

Tabla 17.

*Cálculo del coeficiente de seguridad,  $\alpha$ , para el Caso 3 – Diseño 1.*

| Coeficiente de seguridad, $\alpha$ , mide la resistencia convencional |          |                   |             |                |                | $\alpha =$                   | <b>5,78314</b>    |
|---|----------|-------------------|-------------|----------------|----------------|------------------------------|-------------------|
| <b>R =</b>  | 7        | <b>N =</b>        | 2           | pisos          | <b>Pc =</b>    | 24                           | kN/m <sup>3</sup> |
| <b>C =</b>  | 0,681585 | <b>A =</b>        | 10,906      | m <sup>2</sup> | <b>Ps =</b>    | 7                            | kN/m <sup>2</sup> |
| <b>Sa =</b>   | 0,825    | <b>At =</b>       | 702         | m <sup>2</sup> | <b>T =</b>     | 0,2287                       | s                 |
| <b><math>\alpha_o</math> =</b>  | 0,015536 | <b>Ax =</b>       | 11,976      | m <sup>2</sup> | <b>Ct =</b>    | 0,049                        |                   |
| <b><math>\tau</math> =</b>  | 881,9171 | kN/m <sup>2</sup> | <b>Ay =</b> | 10,906         | m <sup>2</sup> | <b>Hn =</b>                  | 7,8 m             |
| <b>q =</b>  | 10,05093 | kN/m <sup>2</sup> | <b>h =</b>  | 3,9            | m              | <b><math>\alpha =</math></b> | 0,75              |

El cálculo del Índice de Vulnerabilidad para el diseño 1 del Caso 3, es,

Tabla 18.

*Índice de Vulnerabilidad del Caso 3- Diseño 1.*

| No.                             | PARÁMETRO                                      | A               | B    | C    | D   | PESO         |
|---------------------------------|--|-----------------|------|------|-----|--------------|
| 1                               | Sistema estructural                            | 2,13            | 3,35 | 5,57 | 8,1 | 7,43         |
| 2                               | Año de construcción                            | 2,61            | 6    | 7,63 |     | 7,1          |
| 3                               | Resistencia convencional                       | 2,02            | 4,98 | 8,01 |     | 7,04         |
| 4                               | Posición de la edificación y de la cimentación | 1,38            | 2,87 | 6,23 |     | 6,28         |
| 5                               | Suelo y pendiente                              | 1,76            | 5,13 | 7,82 |     | 7,22         |
| 6                               | Diafragma de piso                              | 1,97            | 5,24 | 7,99 |     | 6,04         |
| 7                               | Configuración en el planta                     | 2,03            | 4,79 | 7,78 |     | 6,79         |
| 8                               | Configuración en altura                        | 1,89            | 3,87 | 7,85 |     | 6,79         |
| 9                               | Conexiones entre elementos críticos            | 1,64            | 5,13 | 8,06 |     | 8,9          |
| 10                              | Presencia para columnas cortas                 | 1,33            | 5,6  | 8,21 |     | 7,46         |
| 11                              | Elementos no estructurales                     | 1,79            | 4,44 | 7,44 |     | 4,67         |
| 12                              | Edificaciones adyacentes                       | 1,46            | 4,69 | 7,52 |     | 6            |
| <b>ÍNDICE DE VULNERABILIDAD</b> |  | Poco vulnerable |      |      |     | <b>2,418</b> |

Se procede ahora a evaluar los 12 parámetros del índice de vulnerabilidad para el diseño 2. Para el diseño 1 se tiene: 1) Sistema estructural: Sistema muros, A; 2) Año de construcción: 2015, A; 3) Resistencia convencional,  $\alpha > 1,5$ , A (ver Tabla 19); 4) Posición de la edificación y de la cimentación: desnivel menor a 1m, B; 5) Suelo y pendiente, pendiente del 10%, A; 6) Diafragma de piso, sin deformabilidad apreciable, A; 7) Configuración en el planta, forma de C con  $0.4 \leq a/L < 0,6$ , B; 8) Configuración en altura, no hay cambios de área, A; 9) Conexiones entre elementos críticos, no hay conexiones excéntricas, A; 10) Presencia para columnas cortas, no hay presencia de columnas cortas, B; 11) Elementos no estructurales, balcones pequeños, sin tanques elevados, A; 12) Edificaciones adyacentes, sin separación, losas al mismo nivel, B.

Tabla 19.

*Cálculo del coeficiente de seguridad,  $\alpha$ , para el caso 3, diseño 2.*

| Coeficiente de seguridad, $\alpha$ , mide la resistencia convencional |                            |             |                     | $\alpha =$                   | <b>1,76284</b>       |
|---|----------------------------|-------------|---------------------|------------------------------|----------------------|
| <b>R =</b>  | 7                          | <b>N =</b>  | 2 pisos             | <b>Pc =</b>                  | 24 kN/m <sup>3</sup> |
| <b>C =</b>  | 0,207763                   | <b>A =</b>  | 2,54 m <sup>2</sup> | <b>Ps =</b>                  | 7 kN/m <sup>2</sup>  |
| <b>Sa =</b>   | 0,825                      | <b>At =</b> | 702 m <sup>2</sup>  | <b>T =</b>                   | 0,208609 s           |
| <b>ao =</b>   | 0,003618                   | <b>Ax =</b> | 3,22 m <sup>2</sup> | <b>Ct =</b>                  | 0,049                |
| <b><math>\tau =</math></b>  | 881,9171 kN/m <sup>2</sup> | <b>Ay =</b> | 2,54 m <sup>2</sup> | <b>Hn =</b>                  | 6,9 m                |
| <b>q =</b>  | 7,679385 kN/m <sup>2</sup> | <b>h =</b>  | 3,45 m              | <b><math>\alpha =</math></b> | 0,75                 |

Se puede observar que los parámetros conservan sus clasificaciones. Pese a la reducción del área resistente, el coeficiente de seguridad,  $\alpha$ , continúa siendo mayor que 1,5. Por lo tanto el índice de vulnerabilidad para el diseño 2 del caso 3, es 2.418, es decir, poco vulnerable. El índice de vulnerabilidad, no tiene como calificar el cambio de un diseño con una rigidez exagerada a uno con una rigidez dentro de los rangos aceptados.

### 3.6. Edificio en concreto reforzado residencial – zona sísmica alta

Se incluye un cuarto edificio residencial con 13 pisos de altura, 1 semisótano y 3 sótanos.

**3.6.1. Contenido Mínimo de las Memorias y Planos.** De este proyecto sólo se cuenta con planos de construcción. Se evalúa sólo el contenido de éstos.

Tabla 20.

*Verificación documental y de contenido mínimo - Caso 4.*

| Ley No. 400 de 19 de Agosto 1997: Por la cual se adopta las normas sismo resistentes. |   |    |      |    |         |
|---|---|----|------|----|---------|
| NSR-10: Numeral A.1.5.2: Planos. A.1.5.2.1 Planos estructurales                       |   |    |      |    |         |
| NSR-10: Numeral A.1.5.3: Memorias. A.1.5.3.1 Memorias estructurales                   |   |    |      |    |         |
| Lista de chequeo diseño estructural   |   |    |      |    | Chequeo |
| Item  | Contenido   | SI | Inc. | NO | N/A     |
| 20  | Planos  | X  |      |    |         |
| 21  | Especificaciones de los materiales                                  |    | X    |    |         |
| 22  | Resistencia del concreto  |    | X    |    |         |
| 23  | Resistencia del acero   |    | X    |    |         |
| 24  | Calidad de las unidades de mampostería                              |    |      | X  |         |
| 25  | Tipo de mortero   |    |      | X  |         |
| 26  | Calidad de la madera estructural                                    |    |      |    | X       |
| 27  | Tamaño y localización de los elementos estructurales                | X  |      |    |         |
| 28  | Cimentación   | X  |      |    |         |
| 29  | Diafragmas estructurales  | X  |      |    |         |
| 30  | Cotas de elementos (planta)   | X  |      |    |         |
| 31  | Elementos especiales o tipo   | X  |      |    |         |
| 32  | Pórticos (vigas y columnas)   | X  |      |    |         |
| 33  | Muros estructurales   | X  |      |    |         |
| 34  | Dimensiones y refuerzos   | X  |      |    |         |
| 35  | Tipo y localización de las conexiones entre elementos estructurales | X  |      |    |         |
| 36  | Empalmes entre los elementos de refuerzo                            | X  |      |    |         |
| 37  | Grado de disipación de la energía                                   |    |      | X  |         |
| 38  | Cargas vivas y de acabados  |    | X    |    |         |
| 39  | Grupo de uso de la edificación                                      |    |      | X  |         |
| 40  | Formato   | X  |      |    |         |
| 41  | Rótulos   | X  |      |    |         |
| 42  | Escalas   | X  |      |    |         |

Las especificaciones de materiales sólo están presentes en dos de los 11 planos, no se especifican cargas vivas de parqueaderos, ni cargas de acabados. No se especifica el grupo de uso ni el grado de disipación de energía.

**3.6.2. Índices de Hassan-Sozen. Aplicación al Caso 4.** El edificio presenta una discontinuidad en el primer piso, por lo que el índice se calculará en el nivel del semisótano, ya que parte de la estructura pasa del piso del semisótano directo hasta el segundo piso. El área del piso tipo del edificio es de 253,77 m<sup>2</sup>.

Tabla 21.

*Cálculo del área resistente - Caso 4.*

| Ejes           | Acol | Acol X o<br>Y | Amx  | Amy   |
|----------------|------|---------------|------|-------|
| 1              | 1,32 | 0,66          |      |       |
| 2              | 0,96 | 0,48          |      |       |
| 3              | 0,64 | 0,32          |      |       |
| 4              | 0    | 0             |      | 0,864 |
| 5              | 1    | 0,5           | 0,48 |       |
| 6              | 0    | 0             |      |       |
| 7              | 0    | 0             |      | 0,8   |
| 8              | 1    | 0,5           |      |       |
| <b>TOTALES</b> | 4,92 | 2,46          | 0,48 | 1,664 |

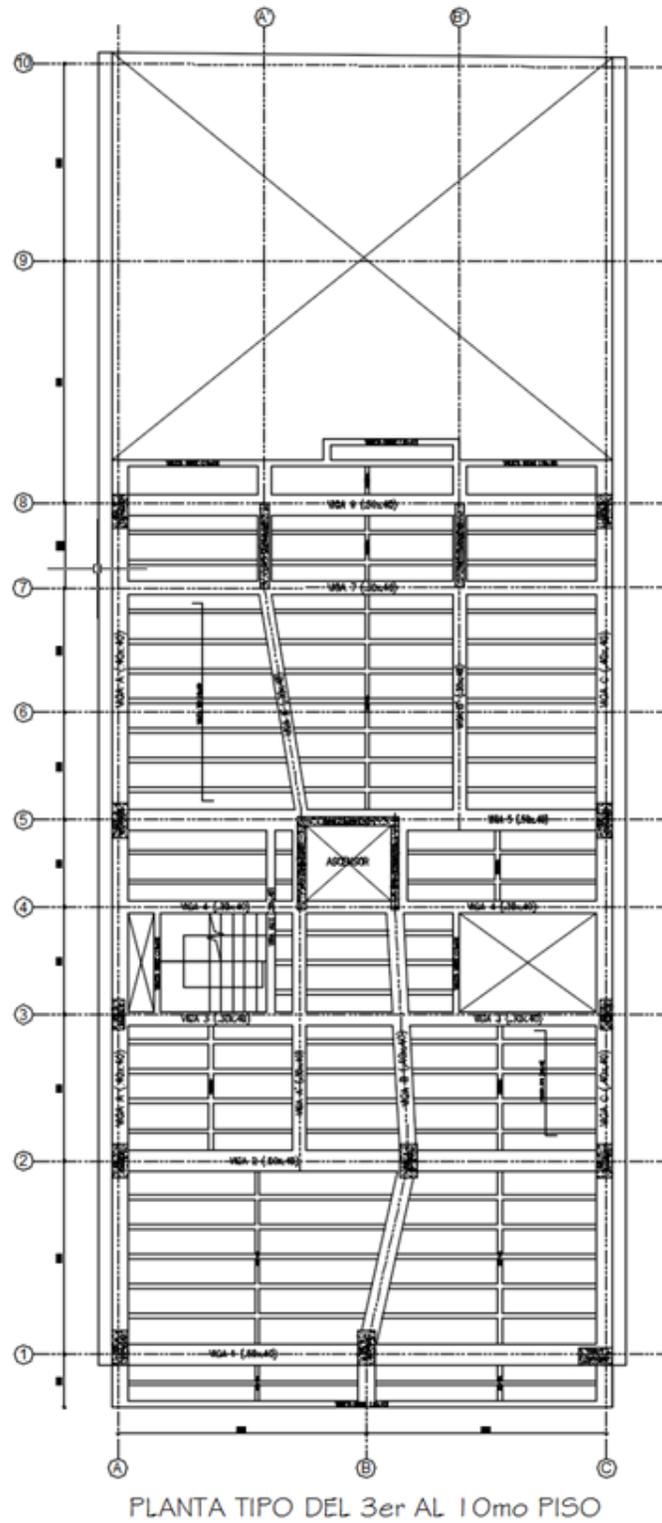
Los índices de muros en cada dirección se calculan como,

$$WI_x = \frac{A_{cw} + 0.1A_{mw}}{A_{ft}} \times 100 = \frac{0,48}{13 \times 253,77} \times 100 = 0,0145\% \tag{18}$$

$$WI_y = \frac{A_{cw} + 0.1A_{mw}}{A_{ft}} \times 100 = \frac{1,664}{13 \times 253,77} \times 100 = 0,0504\% \tag{19}$$

El índice de columna tiene un valor igual a 2,46/(13x253,77)x100 = 0,0746%. Se muestra la

planta tipo de edificio del caso 4 en la *Figura 34*. Igualmente, al representar gráficamente estos índices se obtiene la *Figura 35*.



*Figura 34.* Planta tipo Caso 4.

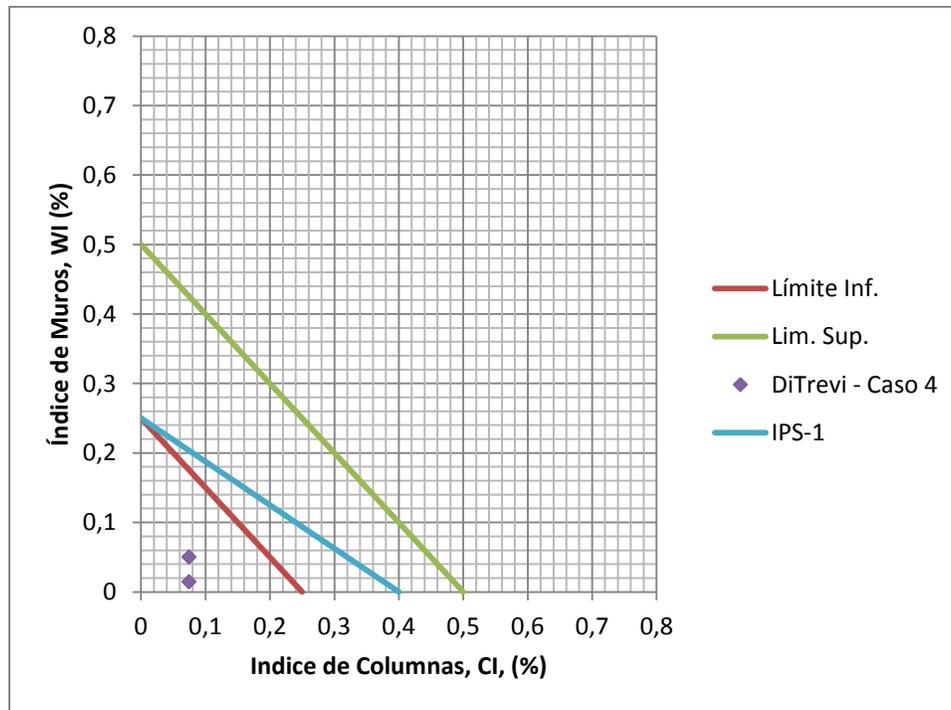


Figura 35. Representación de los índices de Hassan y Sozen para el caso. 4.

**3.6.3. Índice de vulnerabilidad.** La evaluación del índice de vulnerabilidad inicia con la clasificación de los 12 parámetros que son aplicables a un proyecto en etapa de diseño. Esta clasificación es la siguiente: 1) Sistema estructural: Sistema combinado, A; 2) Año de construcción: 2015, A; 3) Resistencia convencional,  $0,08 < \alpha \leq 1,5$ , B (ver Tabla 22); 4) Posición de la edificación y de la cimentación: desnivel mayor a 1m, C; 5) Suelo y pendiente, pendiente del 10%, A; 6) Diafragma de piso, con deformabilidad despreciable, A; 7) Configuración en el planta, es regular en planta, A; 8) Configuración en altura, cambio de área mayor de 20% en transición entre semisótano y piso 1, C; 9) Conexiones entre elementos críticos, no hay excéntricas, A; 10) Presencia de columnas cortas, se presentan columnas cortas en fachadas,  $h < 0,5H$ , B; 11) Elementos no estructurales, voladizo pronunciado, sin tanques elevados, B; 12) Edificaciones adyacentes, no hay edificaciones adyacentes, A.

Tabla 22.

*Cálculo del coeficiente de seguridad,  $\alpha$ , para el caso 4.*

| Coeficiente de seguridad, $\alpha$ , mide la resistencia convencional |                            |             |                        | $\alpha =$  | <b>0,19917</b>       |
|---|----------------------------|-------------|------------------------|-------------|----------------------|
| <b>R</b> =  | 7                          | <b>N</b> =  | 14 pisos               | <b>Pc</b> = | 24 kN/m <sup>3</sup> |
| <b>C</b> =  | 0,014284                   | <b>A</b> =  | 5,4 m <sup>2</sup>     | <b>Ps</b> = | 7 kN/m <sup>2</sup>  |
| <b>Sa</b>   | 0,502                      | <b>At</b> = | 3299,01 m <sup>2</sup> | <b>T</b> =  | 1,157556 s           |
| <b>αo</b>   | 0,001637                   | <b>Ax</b>   | 5,4 m <sup>2</sup>     | <b>Ct</b> = | 0,047                |
| <b>τ</b> =  | 881,9171 kN/m <sup>2</sup> | <b>Ay</b>   | 6,584 m <sup>2</sup>   | <b>Hn</b>   | 35,16 m              |
| <b>q</b> =  | 7,218953 kN/m <sup>2</sup> | <b>h</b> =  | 2,511429 m             | <b>α</b> =  | 0,9                  |

Ya definidas las clasificaciones de los parámetros se realiza el cálculo del Índice de Vulnerabilidad, para el edificio del caso 4,

Tabla 23.

*Índice de vulnerabilidad del Caso 4.*

| No.                             | PARÁMETRO                                      | A               | B    | C    | D   | PESO         |
|---------------------------------|--|-----------------|------|------|-----|--------------|
| 1                               | Sistema estructural                            | 2,13            | 3,35 | 5,57 | 8,1 | 7,43         |
| 2                               | Año de construcción                            | 2,61            | 6    | 7,63 |     | 7,1          |
| 3                               | Resistencia convencional                       | 2,02            | 4,98 | 8,01 |     | 7,04         |
| 4                               | Posición de la edificación y de la cimentación | 1,38            | 2,87 | 6,23 |     | 6,28         |
| 5                               | Suelo y pendiente                              | 1,76            | 5,13 | 7,82 |     | 7,22         |
| 6                               | Diafragma de piso                              | 1,97            | 5,24 | 7,99 |     | 6,04         |
| 7                               | Configuración en el planta                     | 2,03            | 4,79 | 7,78 |     | 6,79         |
| 8                               | Configuración en altura                        | 1,89            | 3,87 | 7,85 |     | 6,79         |
| 9                               | Conexiones entre elementos críticos            | 1,64            | 5,13 | 8,06 |     | 8,9          |
| 10                              | Presencia para columnas cortas                 | 1,33            | 5,6  | 8,21 |     | 7,46         |
| 11                              | Elementos no estructurales                     | 1,79            | 4,44 | 7,44 |     | 4,67         |
| 12                              | Edificaciones adyacentes                       | 1,46            | 4,69 | 7,52 |     | 6            |
| <b>ÍNDICE DE VULNERABILIDAD</b> |  | Poco vulnerable |      |      |     | <b>3,501</b> |

### 4. Análisis De Resultados

Se observa que la aplicación de los índices de Hassan y Sozen, son una buena estimación inicial de una adecuada rigidez estructural. Aunque para estructuras irregulares requiere múltiples asunciones para definir sus parámetros, en general su aplicación es muy sencilla, requiriendo muy corto tiempo para la evaluación. En este algoritmo sólo se evalúa la rigidez de la estructuras y se omiten muchos otros aspectos que pueden ser relevantes en la revisión.

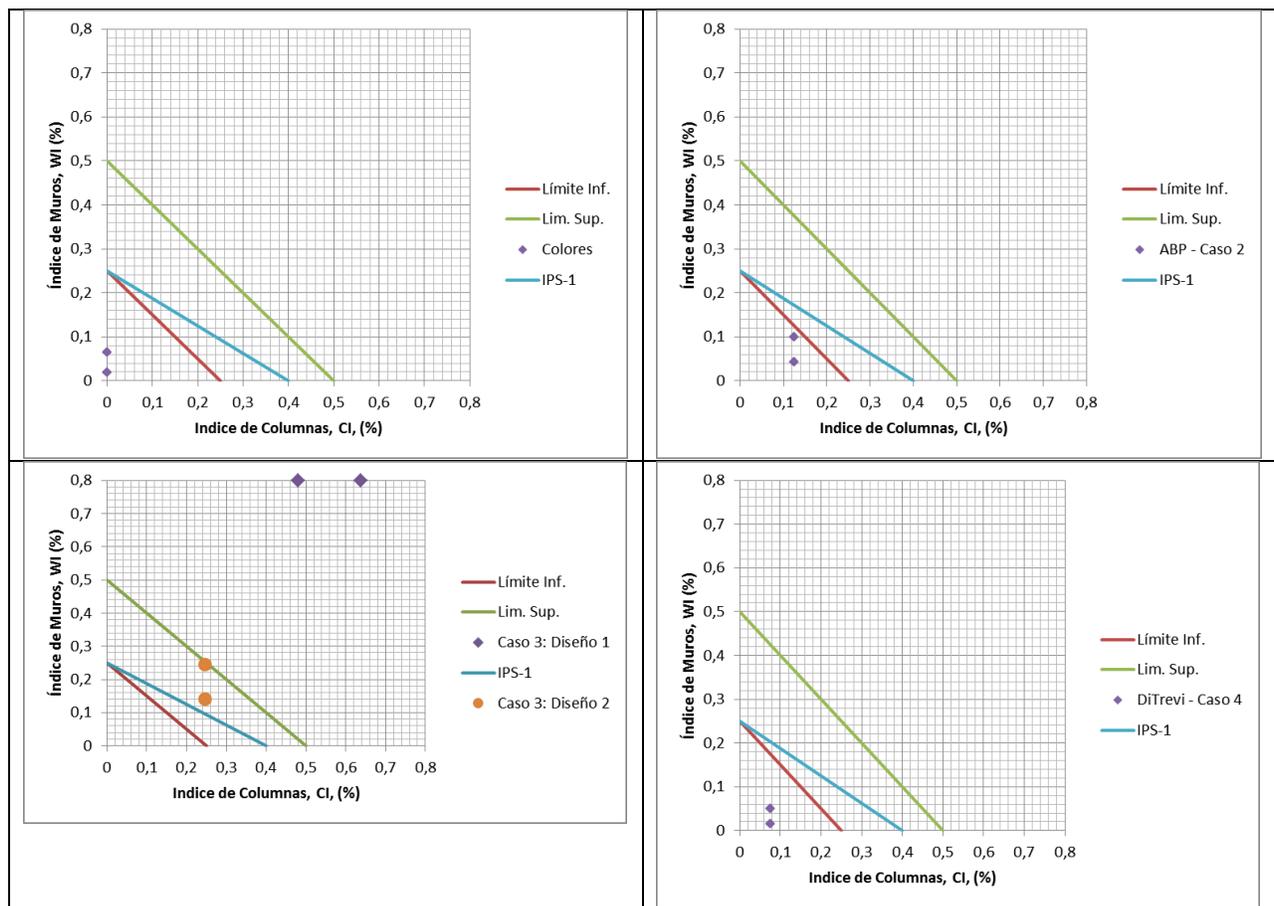


Figura 36. Índices de Hassan y Sozen (1997) para los distintos casos.

Los índices de Hassan y Sozen (1997) describen las estructuras de los casos 1, 2 y 4, como poco

rígidas y por lo tanto susceptibles de sufrir daños severos en el caso de un sismo fuerte. Respecto a la estructura del caso 3, se observa que el diseño 1 de la misma tenía una rigidez muy alta que produciría un costo elevado, mientras que el diseño 2 se ajusta a los límites establecidos por Hassan y Sozen (1997) para los índices y al límite inferior establecido en el IPS-1 (ACI, 2002).

El índice de vulnerabilidad como fue propuesto por el INME (Maldonado y Chío, 2008), evalúa una serie de aspectos muy importante en la vulnerabilidad de las estructuras.

Tabla 24.

*Índices de vulnerabilidad según INME.*

| <b>Caso 1.</b>          | <b>Caso 2.</b>          | <b>Caso 3.</b>  | <b>Caso 4.</b>  |
|-------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|
| 5,449                   | 4,514                   | 2,418           | 3,501           |
| Medianamente vulnerable | Medianamente vulnerable | Poco vulnerable | Poco vulnerable |

En el caso del índice de vulnerabilidad, éste está asociado a la cantidad de parámetros que saltan a las categorías de mayor vulnerabilidad, lo cual se debe a que el método que se empleó para calificar los pesos de los parámetros fue la consulta a expertos lo que generó valores muy cercanos entre sí. A mayor cantidad de parámetros con categorías B o C, mayor la vulnerabilidad. Así por ejemplo el caso 1, tiene 6 parámetros con categorías C, mientras que el caso 3 sólo se presenta dos parámetros con categoría C.

Se observa que el coeficiente de seguridad,  $\alpha$ , empleado para medir la resistencia convencional es un excelente indicador de la rigidez de las edificaciones, ya que a diferencia del Índices de Hassan y Sozen, éste incorpora la altura de la edificación, calculando un cortante sísmico en función del espectro de respuesta, pero al tener todos los parámetros pesos medianamente iguales dentro del valor del índice de vulnerabilidad, este parámetro no logra

variar notablemente la vulnerabilidad. Se comparan los valores de dicho coeficiente para los distintos casos, empleando un diagrama de semáforo como los empleados en el perfil biosísmico.

Tabla 25.

Valores del coeficiente alfa, empleado en el Índice de Vulnerabilidad.

| No. caso        | $\alpha$ |
|-----------------|----------|
| Caso 1          | 0,03067  |
| Caso 2          | 0,99000  |
| Caso 3-Diseño 1 | 5,78314  |
| Caso 3-Diseño 4 | 1,76284  |
| Caso 4          | 0,19917  |

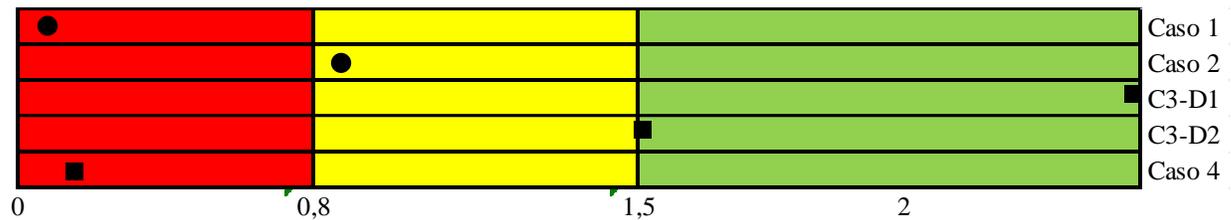


Figura 37. Comparación coeficiente alfa vs valores normales y aceptables.

El coeficiente de seguridad,  $\alpha$ , deja en evidencia la falta de rigidez, para resistir un cortante sísmico de las estructuras de los casos 1 y 4, pese a eso el cálculo del Índice de Vulnerabilidad no refleja esta situación.

El Perfil Bio-Sísmico, es una excelente herramienta para la medición de la salud estructural de un edificio. Su aplicación requiere de la elaboración de un modelo numérico completo y de la medición de múltiples parámetros sobre dicho modelo. En general, predice de manera muy completa dos aspectos fundamentales de las estructuras como es su rigidez y la sintonía entre los modos de vibración lo cual puede generar mayores esfuerzos en caso de sismo.

El caso 1, es una estructura irregular (planta y altura) con muy baja rigidez. Los 3 algoritmos empleados logran identificar claramente esta situación. El Índice de vulnerabilidad detecta también otra serie de falencias que servirían de suministro para identificar si en el diseño fueron tenidos en cuenta estos aspectos de la vulnerabilidad. Por ejemplo si se aplicaron los factores de reducción al R por efectos de irregularidades.

El caso 2, es una estructura irregular (planta y altura) algo corta de rigidez, situación que es evidenciada por los 3 algoritmos. El perfil bio-sísmico detecta el fuerte acoplamiento que genera el muro de contención el cual se encuentra únicamente hacia el frente de la estructura. El Índice de Vulnerabilidad identifica las irregularidades de la estructura y del terreno, calificándola como medianamente vulnerable.

En el caso 3, los índices de Hassan y Sozen (1997) y el coeficiente  $\alpha$ , del parámetros de resistencia del Índice de Vulnerabilidad (Maldonado y Chío, 2008), detectan la excesiva rigidez del diseño 1. La rigidez es corregida en el diseño 2, pero el perfil bio-sísmico detecta tres situaciones acoplamiento en Y para la acción en X, acoplamiento rotacional y el hecho de que la estructura cuente sólo con dos muros en cada dirección como sistema principal de resistencia sísmica.

En el caso 4, los índices de Hassan y Sozen (1997) y el coeficiente  $\alpha$ , del parámetros de resistencia del Índice de Vulnerabilidad (Maldonado y Chío, 2008), detectan la escasa rigidez de la estructura, pese a eso el Índice de Vulnerabilidad no lo estima con una vulnerabilidad acorde a esa situación.

## 5. Conclusiones

- Aunque la normatividad vigente define un alcance de la revisión de los diseños estructurales, el listado de verificaciones que contempla dicho alcance, no logra validar un diseño estructural, definida la validación como la absoluta certeza de que un diseño estructural cumple con la totalidad de las Normas Sismo Resistentes vigentes (AIS,2010).
- La existencia de algoritmos verificados en la literatura científica, es abundante y pueden contribuir a la acumulación de información estadística sobre parámetros de los edificios que se diseñan y construyen en el país, con el fin de validar nuevos diseños que se presenten para la obtención de licencias de construcción.
- Existe poca información sobre el comportamiento de las diferentes configuraciones estructurales empleadas en el país, en el caso de la ocurrencia de sismos.
- Los Índices de Hassan y Sozen, son una excelente herramienta preliminar para evaluar la rigidez de una estructura en concreto, dada su sencillez y fácil obtención a partir de los planos estructurales en etapa de diseño.
- Los Índices de Hassan y Sozen pueden ser usados como un primer filtro para identificar las estructuras que requieran un análisis más detallado. (Zora 2013).
- Del Índice de Vulnerabilidad propuesto por el INME (Maldonado y Chío, 2008), se encuentra

que los pesos asignados a los diferentes parámetros por parte de los expertos tienden a darle igual importancia a todos. (Peso promedio=6,82, desviación=0,99). Se sugiere la revisión de estos pesos ya que por ejemplo en Cruz y Cortés (2002) se encuentra variaciones a los pesos más amplias (Peso promedio=6,14, desviación=3,64) y con un mejor método de obtención como es la simulación directa.

- Ante la peligrosidad estructural consistente en la presencia de columnas cortas, sólo el Índice de Vulnerabilidad califica esta situación, pero dadas las exigencias mínimas respecto a los detalles de dibujo en alzado, que incorporen estructura y mampostería, su detección en etapa de diseño es limitada.
- Los expertos quienes realizan revisión de los diseños estructurales, en las entidades que otorgan licencias de construcción, no emplean modelos matemáticos para verificar deformación y esfuerzos en los elementos de la estructura. Sino que se limitan a la revisión del contenido de memorias de cálculo y planos de construcción, y a la verificación de datos de entrada o asumidos en el diseño.
- Los sesgos mentales tales como son las falacias de la narración, planeación o del costo irrecuperable, o la heurística afectiva y el priming, restan validez a un procedimiento de revisión que está basado sólo en expertos y donde no se recurre a la estadística y a los algoritmos para validar diferentes aspectos de los diseños estructurales, que son de difícil verificación sin incluir el modelado matemáticos de las estructuras al proceso de revisión.

- Como trabajos futuros se propone continuar la evaluación de algoritmos, ejecutando una completa traducción a la normativa colombiana, hasta llegar a definir un procedimiento de revisión apoyado en la estadística de proyectos que han sobrevivido fuertes solicitaciones sísmicas.
  
- Los índices de Hassan y Sozen (1997) y el Índice de Vulnerabilidad (Maldonado y otros 2008) son algoritmos de fácil aplicación en entornos como los de las oficinas de planeación municipal y las curadurías urbanas, y la información obtenida de la aplicación de estos algoritmos, puede ser la fuente para una base de datos de edificios local que permita la determinación de los valores recomendados y aceptables para un algoritmo como el Perfil Bio-Sísmico desarrollado por Guendelman y otros (1997).
  
- En general, se observa que aún existe gran restricción a proporcionar información sobre el actuar de las entidades que otorgan licencias de construcción, cuando dicha actividad debería ser más abierta y transparente, como mecanismo para evitar la corrupción en aspectos del diseño de las construcciones.
  
- Mientras no existan base de datos de edificios locales que hayan sido verificadas con la información de los algoritmos y los niveles de daño ante la ocurrencia de un sismo, se concluye que el único procedimiento para la correcta validación de un diseño, como está descrito en 4.1.4., consiste en que el profesional realice un modelo numérico a partir de los planos estructurales, empleando los planos arquitectónicos para definir sus propias cargas a medida que va revisando que las memorias de diseño concuerden con sus propios cálculos. Elabora un procedimiento completo de análisis sísmico conforme al tipo de estructura que esté analizando y verifica que su

propio modelo no exceda las derivas máximas permitidas. Posteriormente, aplica al modelo las combinaciones típicas de carga y revisa la capacidad de los elementos estructurales de manera individual. Posteriormente analiza la cimentación, teniendo en cuenta no sólo la profundidad de cimentación, sino además que la capacidad portante sea coherente con los resultados de los ensayos. Para esa capacidad portante analiza las dimensiones de las zapatas y para esas dimensiones analiza los refuerzos y dimensiones de diseño. Luego analiza la estabilidad general y otros elementos de peligrosidad estructural, como la presencia de laderas, columnas cortas, cambios de rigidez, etc. Este profesional realiza un procedimiento completo de análisis y diseño (chequeo) de toda la estructura la cual compara contra la del diseño y acepta algunos márgenes de variaciones entre el diseño en los planos y memorias y el realizado por él mismo. Se sugiere el empleo de algoritmos como el Perfil Bio-sísmico y el Índice de Vulnerabilidad adicionalmente, para identificar posible falencias que hayan pasado desapercibidas en la etapa de revisión.

- En los casos en que una revisión no pueda realizarse como se ha descrito anteriormente, deberían emplearse algoritmos para evaluar la rigidez general de la estructura como los propuestos por Hassan y Sozen (1997) o el coeficiente  $\alpha$  del parámetros de resistencia estructural, cuyo rango aceptable se encuentra definido en el Índice de Vulnerabilidad (Maldonado y Chío, 2008). De no ser posible la elaboración de un modelo numérico propio, se sugiere la aplicación de algoritmos como el perfil bio-sísmico sobre el modelo numérico del diseñador, y la verificación de esfuerzos y deformaciones.

## 6. Nota Personal

Como seres humanos, somos susceptibles al error y a los sesgos de la mente, como se ha expuesto en la parte inicial de este trabajo. Como profesionales, tenemos aversión a la calificación de nuestro trabajo por parte de otras personas u otros profesionales. Pero es necesario que, como profesionales y seres humanos, entendamos que en la interacción con otros profesionales, quienes puedan llegar a revisar con el fin de calificar o validar nuestro trabajo, realmente estamos ganando la oportunidad de obtener nuevos conocimientos o corregir en etapas tempranas como el diseño, errores que en la ejecución podrían resultar muy costosos, llegando hasta valernos nuestro prestigio como profesionales e incluso nuestra profesión. Como profesionales del diseño estructural, debemos ver en la revisión por terceros, una herramienta beneficiosa para nuestro desarrollo técnico y humano.

Nuestro código de ética (Ley 842, 2003) es muy claro en señalar que debemos “actuar con prudencia y diligencia cuando se emitan conceptos sobre las actuaciones de los demás profesionales. Abstenernos de emitir públicamente juicios adversos sobre la actuación de algún colega, señalando errores profesionales en que presuntamente haya incurrido, a no ser de que ello sea indispensable por razones ineludibles de interés general o, que se le haya dado anteriormente la posibilidad de reconocer y rectificar aquellas actuaciones y errores, haciendo dicho profesional caso omiso de ello.” Pero no es ético tampoco omitir el error ajeno y permitir que recursos públicos o el patrimonio de las personas se vea afectado por evitar una confrontación con otro profesional o simplemente porque, no es nuestra responsabilidad, aunque realmente si lo es.

### Referencias Bibliográficas.

American Concrete Institute - ACI (2002). IPS-1. Requisitos esenciales para edificación de concreto reforzado. ACI Committee 314.

American Concrete Institute - ACI (2008). 318-08: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. ACI Committee 318.

American Society of Civil Engineers – ASCE (2013). 41-13: Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. DOI: 10.1061/9780784412855.

Apgar, V. (1953). A Proposal for a New Method of Evaluation of the Newborn Infant. *Current Researches in Anesthesia and Analgesia*, 32, 260-267.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, AIS (1998). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-98. Bogotá: AIS.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, AIS (2010); Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Bogotá: AIS.

Benedetti, D. y Petrini, V. (1984). Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura i proposte di un metodo di valutazione. *L'industria delle Costruzioni*, 149(1), 66-74.

Dimiyadi, J. y Amor, R. (Mayo 2013). Automated Building Code Compliance Checking - Where is it at?. *Proceedings of 19th International CIB World Building Congress , Brisbane 2013: Construction and Society*, 172–185. doi: 10.13140/2.1.4920.4161.

Cárdenas, S. y Álvarez, V.A. (2017, 18 de abril). Cancelan matrícula profesional a ingenieros del edificio Space. *El Colombiano*. Recuperado de <http://www.elcolombiano.com>

Comisión Asesora Permanente Del Régimen De Construcciones Sismo Resistentes (Octubre 12, 2016). Acta No. 135 de reunión de la Comisión.

Consorcio Microzonificación 2006, Área Metropolitana del Valle de Aburrá (2007); Microzonificación y Evaluación del Riesgo Sísmico del Valle de Aburrá, Medellín: Prográficas Ltda, 184p.

Cornejo, F. y Music, J. (2011). Comparación de resultados del Perfil Bio-sísmico aplicando las disposiciones de NCh433 of.96 Mod. 2009, decreto 117 y decreto 61 a edificios de Antofogasta. *Revista de Ingeniería Innova*, 2, 83-98.

Crist, R. A. (2009). The ASCE committee of global principles for professional conduct. *Leadership and Management in Engineering*, 9 (3), 144–146. DOI: 10.1061/(ASCE)1532-6748(2009)9:3(144).

Cruz, R. A. y Cortés, W. L. (2002). Evaluación sismo resistente de edificaciones antiguas de tapia pisada de adobe. *UIS Ingenierías*, 1 (1), 51-57.

Decreto 926 de 2010. [Presidencia de la República de Colombia]. Por el cual se establecen los requisitos de carácter técnico y científico para construcciones sismorresistentes NSR-10. 19 de marzo de 2010. DO: 47.656.

Decreto 1469 de 2010. [Presidencia de la República de Colombia]. Por el cual se reglamentan las disposiciones relativas a las licencias urbanísticas; al reconocimiento de edificaciones; a la función pública que desempeñan los curadores urbanos y se expiden otras disposiciones. 30 de abril de 2010. DO: 47.698.

Decreto 1077 de 2015. [Ministro De Vivienda, Ciudad Y Territorio]. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio. 26 de mayo de 2015. DO: 49.523.

Decreto 945 de 2017. [Presidencia de la República de Colombia]. Por el cual se modifica parcialmente el Reglamento Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes NSR-10. 5 de junio de 2017. DO: 50.255.

Earthquake Engineering Research Institute – EERI (1996). Michael V. Pregnoff, John E. Rinne/ Stanley Scott, interviewer. *Connections: the EERI oral history series*, 3. Recuperado de <https://www.eeri.org/monographs-and-oral-histories/oral-history-series/>

Eastman, C., Lee, J. [Jae-min], Jeong, Y y Lee, J. [Jin-kook]. (2009). Automatic rule-based checking of building designs. *Automation in Construction*, 18 (8), 1011-1033.

ETABS {Versión 16.2.0} [Programa de Computador]. Walnut Creek, CA: Computers and Structures, Inc.

Gawande, A. (2011). El efecto checklist: cómo una simple lista de comprobación reduce errores y salva vidas. [Traducido al español de *The Checklist Manifesto: How to Get Things Right*, Metropolitan Books, (2009, Nueva York)]. Barcelona: Antoni Bosch.

Guendelman, T., Guendelman, M. y Lindenberg, J. (1997). *Perfil Bio-Sísmico de Edificios*. Trabajo presentado en VII Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica y Primer Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica, de Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Antisísmica (ACHISINA), La Serena, Chile.

Guendelman, T., Guendelman, M. y Lindenberg, J. (2010) Perfil Bio-Sísmico de Edificios: Instrumento de Calificación Sísmica, *Revista BIT*, 72, (44-48), Chile.

Guendelman, T. y Lindenberg, J. (Agosto 2015). Efectos sísmicos indirectos. *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile 2015*, 127(2),45-55.

Hassan, A. F. y Sozen, M. A. (1997) Seismic Vulnerability Assessment of Low-Rise Buildings in Regions with Infrequent Earthquakes. *ACI Journal*, 94 (1), 31-39.

Henoch, R. (2007) *Calificación sísmica de edificios altos*. (Tesis de grado, Universidad de Chile). Recuperado de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104800>

Henoch, R. Lindenberg, J., Guendelman, T. y Guendelman, M. (Mayo 2010). *Perfil Bio-Sísmico de Rascacielos*. Trabajo presentado en X Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica, de Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Antisísmica (ACHISINA), Valdivia-Santiago, Chile.

Instituto Nacional de Normalización, INN (2010), NCh 433 Of. 1996, Mod. 2009. Diseño Sísmico de Edificios, Santiago, Chile.

Kahneman, D. (2012). *Pensar rápido, pensar despacio*. [Traducido al español de Thinking, Fast and Slow]. Barcelona: Random House Mondadori, S.A.

Lagos, R., Kupfer, M., Lindenberg, J., Bonelli, P., Saragoni, R., Guendelman, T., Massone, L., Boroschek, R. y Yañez, F. (2012). Seismic Performance of High-rise Concrete Buildings in Chile. *International Journal of High-Rise Buildings*, 1(3), 181-194.

Le, Y., Shan, M., Chan, A. P. C. y Hu, Y. (2014). Overview of Corruption Research in Construction. *Journal of Management in Engineering*. 30 (4). DOI: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000300

Ley 400 de 1997. [Congreso de Colombia]. Por el cual se adoptan normas sobre construcciones sismo resistentes. 19 de agosto de 1997. DO: 43.113.

Ley 842 de 2003. [Congreso de Colombia]. Por la cual se modifica la reglamentación del ejercicio de la ingeniería, de sus profesiones afines y de sus profesiones auxiliares, se adopta el Código de Ética Profesional y se dictan otras disposiciones. 9 de octubre de 2003. DO: 45.340.

Ley 1796 de 2016. [Congreso de Colombia]. Por la cual se establecen medidas enfocadas a la protección del comprador de vivienda, el incremento de la seguridad de las edificaciones y el fortalecimiento de la Función Pública que ejercen los curadores urbanos, se asignan unas funciones a la Superintendencia de Notariado y Registro y se dictan otras disposiciones. 13 de julio de 2016. DO: 49.933.

Maldonado, E. y Chio, G. (2007). *Visión estructural de las edificaciones de la ciudad de Bucaramanga*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Maldonado, E. y Chio, G. (2008). *Vulnerabilidad sísmica en centros urbanos*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Mejía, L.G., Alcocer, S. (2002a); Gravity Concrete Frame Buildings (Predating Seismic Codes), En: Report of World Housing Encyclopedia, Earthquake Engineering Research Institute (EERI) and International Association of Earthquake Engineering (IAEE), Colombia, 11: 15p.

Mejía, L.G., Alcocer, S. (2002b); Non-Engineered Unreinforced Brick Masonry Building, En: Report of World Housing Encyclopedia, Earthquake Engineering Research Institute (EERI) and International Association of Earthquake Engineering (IAEE), Colombia, 10: 14p.

Nawari, N., (2011). A framework for automating codes conformance in structural domain, *Journal of Computer and Information Technology*, 1 (1), 569-577.

Nawari, N., (2012). Automating code conformance, *Journal of Architectural Engineering*, 18 (4), 315-323.

Oyarzún, C. A. (2013) *Registro estructural para la evaluación del edificio Emilio Pugín de la Universidad Austral de Chile*. (Tesis de grado, Universidad Austral de Chile). Recuperado de [cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2013/bmficio.971r/doc/bmficio.971r.pdf](http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2013/bmficio.971r/doc/bmficio.971r.pdf)

Resolución 0984 de 2005. [Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial]. Por la cual se adopta el formulario único nacional para la solicitud de licencias de parcelación, urbanización, subdivisión y construcción y para el reconocimiento de edificaciones y la guía para su diligenciamiento. 21 de julio de 2005. DO: 45.980.

Resolución 0912 de 2009. [Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial]. Por la cual se adopta el formato de revisión e información de proyectos. 15 de mayo de 2009. DO: 47.363.

Resolución 0015 de 2015 [Comisión Asesora Permanente Del Régimen De Construcciones Sismo Resistentes]. Por medio de la cual se actualiza la Resolución 0004 de octubre 28 de 2004 respecto a los procedimientos para fijar el alcance de las labores profesionales y establecer los honorarios mínimos que se utilicen para retribuir las labores mencionadas en el artículo 42 de la Ley 400 de 1997. 15 de octubre de 2015. DO: 49.734.

Resolución 0463 de 2017. [Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio]. Por medio de la cual se adopta el Formulario Único Nacional para la solicitud de licencias urbanísticas y el reconocimiento de edificaciones y otros documentos. 13 de julio de 2017. DO: 50.306

Ríos, H., Music, J. y Vladilo, I. (2005). *Perfil Bío-Sísmico de Edificios Representativos de la Construcción en Altura de la Ciudad de Antofagasta*. (Tesis de grado, Universidad Católica del Norte).

Rojas, N. J. (2005). *Consideración De Las Columnas Cortas En La Vulnerabilidad Sísmica De Las Estructuras*. (Tesis de maestría). Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, Puerto Rico.

SAP2000 {Versión 19.2.1} [Programa de Computador]. Walnut Creek, CA: Computers and Structures, Inc.

Searer, G., Paret, T. y Freeman, S. (Abril 2008). *ASCE-31 and ASCE-41: What Good are They?*. Trabajo presentado en Structures Congress 2008: Crossing Borders de American Society of Civil Engineers, ASCE, Vancouver, British Columbia, Canada.

Sohail, M., y Cavill, S. (2008). Accountability to prevent corruption in construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 134 (9), 729–738. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2008)134:9(729).

South America Risk Assessment (SARA) project (2014). Report on the SARA Exposure and Vulnerability Workshop in Medellín, Colombia. Global Earthquake Model.

Teleantioquia (13 de octubre de 2013). Ingeniero estructural del edificio Space había dicho que no se corría riesgo de colapso. [Archivo de video]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=Z6HJ0gjs1Qo>

Teranishi, A. A. y García, O. (2014). *Evaluación del comportamiento de edificios existente a partir de metodologías para calificar la salud estructural ante solicitaciones sísmicas*. Trabajo presentado en XIX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural de Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, Puerto Vallarta, Jalisco.

Torrado-Gómez, L.M., Serrano-Guzmán, M.F., Pérez-Ruiz, D.D. y Rondón, J.A. (2016). Responsabilidad educativa en transferencia de conocimiento para estudios geotécnicos confiables. *Revista Educación en Ingeniería*, 11 (22), 57-62.

Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería. (2014). Caso de Estudio. Investigación sobre el edificio Space de Medellín. *Revista Contacto*, 9, 5-10. Recuperado de <https://revistacontacto.uniandes.edu.co/contacto/?mz=12>

Zora, F. N. (2013). *Identificación Del Índice De Vulnerabilidad Sísmica De Escuelas De Medellín*. (Tesis de Magister). Universidad EAFIT, Medellín.

Zhou, W., Zheng, W., Pujol, S. (2013); Seismic Vulnerability of Reinforced Concrete Structures affected by the 2008 Wenchuan Earthquake, En: <<https://nees.org/warehouse>>, 21p.