

UCUENCA

Facultad de Arquitectura y Urbanismo

Carrera de Arquitectura

DETERMINACIÓN DE ZONAS MENOS VULNERABLES EN EL EDIFICIO DE LA FACULTAD DE PSICOLOGÍA DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA ANTE UN EVENTO SÍSMICO.

Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de Arquitecto

Autores:

Jonnathan Isaac Flores Sánchez

CI: 0107350803

Jhota271023@gmail.com

Jorge Renato Andrade Cornejo

CI: 0106614472

renatoa1996@gmail.com

Director:

Ing. Hernán Alfredo García Erazo

C.I. 0102116654

Cuenca – Ecuador
03 de agosto de 2022

**DETERMINACIÓN DE ZONAS MENOS VULNERABLES EN EL EDIFICIO DE LA FACULTAD DE
PSICOLOGÍA DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA ANTE UN EVENTO SÍSMICO.**

UCUENCA

Facultad de Arquitectura y Urbanismo

Carrera de Arquitectura

DETERMINACIÓN DE ZONAS MENOS VULNERABLES EN EL EDIFICIO DE LA FACULTAD DE PSICOLOGÍA DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA ANTE UN EVENTO SÍSMICO.

Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de Arquitecto

Autores:

Jonnathan Isaac Flores Sánchez
CI: 0107350803
jhota271023@gmail.com

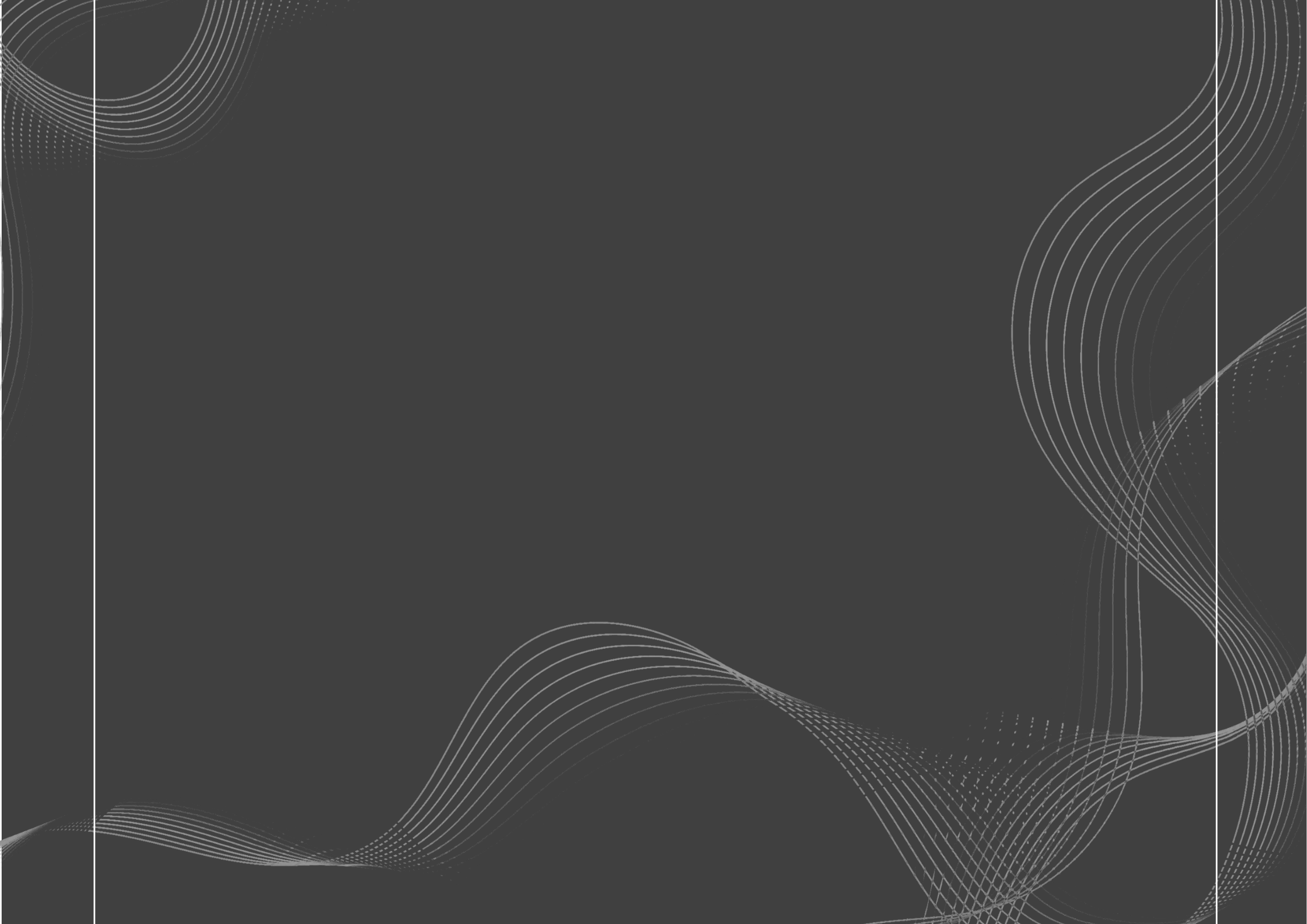
Jorge Renato Andrade Cornejo
CI: 0106614472
renatoa1996@gmail.com

Director:

Ing. Hernán Alfredo García Erazo
C.I. 0102116654

Cuenca – Ecuador

03 de agosto de 2022



RESUMEN

Ecuador es un país con alto riesgo sísmico debido a su ubicación geográfica y tiene un historial importante de sismos de gran magnitud en la mayor parte de su territorio, una de las ciudades con potencial afectación es Cuenca que tiene una amenaza y vulnerabilidad sísmica altas en sus edificaciones.

Para mitigar los riesgos que puede tener una edificación, existen evaluaciones de vulnerabilidad desarrolladas con diferentes métodos que van desde analizar aspectos cualitativos de las edificaciones antes de un desastre, generar estadísticas mediante la observación de daños después de una catástrofe, hasta realizar métodos numéricos en los que se cuantifican los posibles daños con la ayuda de simulaciones mediante el uso de software especializado en este tema. La importancia de estas evaluaciones de vulnerabilidad radica en que mediante su realización se pueden generar planes de contingencia que permitan a los ocupantes de una edificación saber cómo actuar ante un desastre y así contribuir a preservar vidas y los bienes materiales.

El presente trabajo tiene como objetivo analizar la vulnerabilidad del edificio de la Facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca para localizar las zonas de mayor y menor riesgo mediante una línea metodológica que contempla el levantamiento estructural y arquitectónico de la edificación para conocer sus características físicas y geométricas, la elaboración de un modelo matemático tridimensional que simule el movimiento del edificio en caso de sismo utilizando el método de elementos finitos mediante el uso de softwares como MATLAB, Stabil, SAP2000, entre otros y finalmente el análisis de resultados principalmente los valores de derivas de piso y de muros que permitan obtener conclusiones sobre el comportamiento y funcionamiento de la edificación.

Palabras clave:

Vulnerabilidad sísmica. Sismos. MATLAB. Peligro sísmico. Cuenca.

ABSTRACT

Ecuador is a country with high seismic risk due to its geographical location and has an important history of earthquakes of great magnitude in most of its territory, one of the cities with potential affectation is Cuenca that has a high seismic threat and vulnerability in its buildings.

To mitigate the risks that a building can have, there are vulnerability assessments developed with different methods ranging from analyzing qualitative aspects of buildings before a disaster, generating statistics by observing damage after a catastrophe, to performing numerical methods in which possible damages are quantified with the help of simulations through the use of software specialized in this subject. The importance of these vulnerability assessments lies in the fact that through their realization contingency plans can be generated that allow the occupants of a building to know how to act in the face of a disaster and thus contribute to preserving lives and material goods.

The present work aims to analyze the vulnerability of the building of the Faculty of Psychology of the University of Cuenca to locate the most and least vulnerable areas through a methodological line that contemplates the structural and architectural survey of the building to know its physical and geometric characteristics, the elaboration of a three-dimensional mathematical model that simulates the movement of the building in case of earthquake using the method of elements finite through the use of software such as MATLAB, Stabil, SAP2000, among others and finally the analysis of results that allows to obtain conclusions about the behavior and operation of the building.

Keywords

Seismic vulnerability. Earthquakes. MATLAB. Seismic hazard. Cuenca.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Capítulo 01

1.1 Introducción15

1.2 Hipótesis16

1.3 Objetivo General17

1.4 Objetivos específicos17

1.5 Planteamiento del problema18

Capítulo 02

2.1 Sismicidad en Ecuador21

2.1.1 Contexto geológico y geográfico21

2.1.2 Contesto histórico21

2.2 Sismicidad en Cuenca22

2.3 Vulnerabilidad sísmica23

2.3.1 Vulnerabilidad sísmica en Ecuador23

2.3.2 Vulnerabilidad sísmica en Cuenca23

2.4 Métodos de evaluación de vulnerabilidad25

2.5 Mitigación de desastres25

2.6 Normativa Ecuatoriana de la Construcción26

2.7 Ensayos no destructivos26

2.8 Método de Elementos Finitos27

2.9 Análisis Modal28

2.10 Análisis Espectral28

2.11 Derivas29

2.12 MEF y Software MATLAB29

Capítulo 03

3.1 Metodología33

3.2 Aplicación de la metodología38

3.2.1 Etapa 1 / Recolección de datos38

Características del edificio de la Facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca38

Características generales38

Características geométricas38

Características estructurales42

Ensayo no destructivo42

3.2.2 Etapa 2 / Modelo e ingreso de datos a MATLAB46

Modelo Matemático47

Condiciones de borde56

Análisis Modal58

Período de vibración58

Modos de vibración58

Análisis Espectral70

Cálculo de derivas73

3.2.3 Etapa 3 / Análisis de resultados82

Análisis Modal82

Cálculo de derivas85

Zonas más vulnerables y más seguras86

Discusión89

Capítulo 04

- Conclusiones93

- Recomendaciones94

- Bibliografía97

Anexos103

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 01:** Cinturón de Fuego del Pacífico - Daza Diego, 2017
- Figura 02:** Interacción entre la placa de Nazca y la Placa Sudamericana - Granados Kerys
- Figura 03:** Sismicidad en el Ecuador de 1587 a 2020 – Instituto Geofísico
- Figura 04:** Peligro sísmico en el Ecuador – Instituto Geofísico
- Figura 05:** Mapa integrado de daño estructural en el centro histórico de Cuenca – NEC
- Figura 06:** Esquema de martillo de Schmidt
- Figura 07:** Proceso de discretización.
- Figura 08:** Representación del análisis modal
- Figura 09:** Representación de derivas
- Figura 10:** Imagen de vivienda tipo y Plano arquitectónico de la vivienda en centímetros - Revista de Ingeniería de Construcción (RIC), 2019
- Figura 11:** Facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca, componentes estructurales - Flores J. & Andrade R., 2021
- Figura 12:** Distribución de los perfiles de acero galvanizado - Revista Ingeniería de Construcción (RIC), 2019
- Figura 13:** Características geométricas de los perfiles galvanizados - Revista ingeniería de construcción (RIC), 2019
- Figura 14:** Modos de vibración sin techo verde y con techo verde respectivamente - Revista de Ingeniería de Construcción (RIC), 2019
- Figura 15:** Espectro elástico de diseño para un coeficiente con respecto al crítico del 5% - Revista de Ingeniería de Construcción (RIC), 2019
- Figura 16:** Comparación de la distorsión de piso para la vivienda con y sin techo verde - Revista de Ingeniería de Construcción (RIC), 2019
- Figura 17:** Metodología aplicada para el presente caso de estudio
- Figura 18:** Ubicación, facultad de Psicología - Flores J. & Andrade R., 2021
- Figura 19:** Planta Baja, Facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca - Flores J. & Andrade R., 2021
- Figura 20:** Plano de planta tipo, Facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca - Flores J. & Andrade R., 2021
- Figura 21:** Elevación frontal, Facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca - Flores J. & Andrade R., 2021
- Figura 22:** Elemento compuesto por diafragma -columna y diafragma - Flores J. & Andrade R., 2021
- Figura 23:** Plano de ejes y columnas - Flores J. & Andrade R., 2021
- Figura 24:** Sección longitudinal a través del martillo mostrando sus componentes - Lozano, 2014
- Figura 25:** Principio de funcionamiento del martillo - Lozano 2014
- Figura 26:** Puntos de muestra para ensayo esclerométrico - Flores J. & Andrade R., 2021
- Figura 27:** Numeración de columnas - Flores J. & Andrade R., 2021
- Figura 28:** Tabla de equivalencias de rebotes y resistencias - Flores J. & Andrade R., 2021
- Figura 29:** Etapas del análisis sísmico. - Flores J. & Andrade R., 2021
- Figura 30:** Fases del modelo matemático - Flores J. & Andrade R., 2021
- Figura 31:** Proceso de discretización - Flores J. & Andrade R., 2021
- Figura 32:** Modelado en AutoCAD - Flores J. & Andrade R., 2021
- Figura 33:** Columnas exteriores, Sap2000 - Flores J. & Andrade R., 2021
- Figura 34:** Estructura vertical compuesta (diafragma y columna) - Flores J. & Andrade R., 2021
- Figura 35:** Columnas interiores, Sap2000 - Flores J. & Andrade R., 2021
- Figura 36:** Estructura vertical (diafragma) - Flores J. & Andrade R., 2021
- Figura 37:** Vigas, Sap2000 - Flores J. & Andrade R., 2021
- Figura 38:** Estructura horizontal (viga) - Flores J. & Andrade R., 2021
- Figura 39:** Muros, Sap2000 - Flores J. & Andrade R., 2021
- Figura 40:** Estructura superficial en sentido vertical (muro) - Flores J. & Andrade R., 2021
- Figura 41:** Losas, Sap2000 - Flores J. & Andrade R., 2021
- Figura 42:** Estructura superficial en dirección horizontal (losa) - Flores J. & Andrade R., 2021
- Figura 43:** Modelo completo en SAP2000 - Flores J. & Andrade R., 2021
- Figura 44:** Modelación de nodos - Flores J. & Andrade R., 2021
- Figura 45:** Modelación de elementos tipo *Shell* - Flores J. & Andrade R., 2021
- Figura 46:** Modelación de elementos tipo *Frame* - Flores J. & Andrade R., 2021
- Figura 47:** Empotramiento, restricción en todos los grados de libertad - López Carlos, 2012
- Figura 48:** Gráfico de nodos y elementos de la facultad de psicología - Flores J. & Andrade R., 2021
- Figura 49:** Desplazamiento de la edificación modo de vibrar 01
- Figura 50:** Primer modo de vibrar (planta) - Flores J. & Andrade R., 2021
- Figura 51:** Primer modo de vibrar (3D) - Flores J. & Andrade R., 2021
- Figura 52:** Primer modo de vibrar (alzado) - Flores J. & Andrade R., 2021
- Figura 53:** Desplazamiento de la edificación / modo de vibrar 03
- Figura 54:** Segundo modo de vibrar (planta) - Flores J. & Andrade R., 2021
- Figura 55:** Segundo modo de vibrar (alzado) - Flores J. & Andrade R., 2021
- Figura 56:** Segundo modo de vibrar (3D) - Flores J. & Andrade R., 2021
- Figura 57:** Desplazamiento de la edificación / modo de vibrar 03
- Figura 58:** Tercer modo de vibrar (planta) - Flores J. & Andrade R., 2021
- Figura 59:** Tercer modo de vibrar (3D) - Flores J. & Andrade R., 2021
- Figura 60:** Tercer modo de vibrar (alzado) - Flores J. & Andrade R., 2021

Figura 61: Cuarto modo de vibrar (planta) - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 62: Cuarto modo de vibrar (3D) - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 63: Cuarto modo de vibrar (alzado) - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 64: Desplazamiento de la edificación modo de vibrar 05
Figura 65: Esquema de muros, ventanas y viga.
Figura 66: Quinto modo de vibrar (planta) - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 67: Quinto modo de vibrar (3D) - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 68: Sexto modo de vibrar (planta) - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 69: Sexto modo de vibrar (3D) - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 70: Sexto modo de vibrar (alzado) - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 71: Séptimo modo de vibrar (planta) - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 72: Séptimo modo de vibrar (3D) - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 73: Séptimo modo de vibrar (alzado) - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 74: Octavo modo de vibrar (planta) - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 75: Octavo modo de vibrar (3D) - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 76: Octavo modo de vibrar (alzado) - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 77: Noveno modo de vibrar (planta) - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 78: Noveno modo de vibrar (3D) - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 79: Noveno modo de vibrar (alzado) - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 80: Décimo modo de vibrar (planta) - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 81: Décimo modo de vibrar (3D) - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 82: Décimo modo de vibrar (alzado) - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 83: Zonas sísmicas para propósitos de diseño y valor del factor de zona Z - NEC, 2014
Figura 84: Espectro de diseño - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 85: División de zonas para el cálculo de derivas - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 86: Nodos de planta baja, MATLAB - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 87: Deriva de planta baja en X, MATLAB - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 88: Nodos de planta baja, MATLAB - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 89: Deriva de planta baja en Y, MATLAB - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 90: Nodos de primera planta alta, MATLAB - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 91: Deriva de primera Pa en X, MATLAB - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 92: Nodos de primera planta alta, MATLAB - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 93: Deriva de primera Pa en Y, MATLAB - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 94: Nodos de segunda planta alta, MATLAB - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 95: Deriva de segunda Pa en X, MATLAB - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 96: Nodos de segunda planta alta, MATLAB - Flores J. & Andrade R., 2021

Figura 97: Deriva de segunda Pa en Y, MATLAB - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 98: Nodos de tercera planta alta, MATLAB - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 99: Deriva de tercera Pa en X, MATLAB - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 100: Nodos de tercera planta alta, MATLAB - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 101: Deriva de tercera Pa en Y, MATLAB - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 102: Deformación estática en la edificación - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 103: Deformación sísmica en el eje X - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 104: Deformación sísmica en el eje Y - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 105: Comparación de deformaciones (estática y sísmica X, Y) en metros - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 106: Nivel de riesgo de falla o colapso por piso en el edificio de Psicología - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 107: Ubicación de la zona con mayor y menor deriva, planta baja - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 108: Ubicación de la zona con mayor y menor deriva, primera planta alta - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 109: Ubicación de la zona con mayor y menor deriva, segunda planta alta - Flores J. & Andrade R., 2021
Figura 110: Ubicación de la zona con mayor y menor deriva, tercera planta alta - Flores J. & Andrade R., 2021

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

- Fotografía 01:** Sismo suscitado en abril de 2016 - AP, 2016
- Fotografía 02:** Sismo suscitado en abril de 2016 - AP, 2016
- Fotografía 03:** Instrumento usado para el caso de estudio (Izquierda), Esclerómetro usado para la facultad de Psicología (Derecha) - Revista de Ingeniería de Construcción (RIC), 2019 / Flores J. & Andrade R., 2021
- Fotografía 04:** Facultad de Psicología - Sebastián Crespo, 2011
- Fotografía 05:** Facultad de Psicología - Sebastián Crespo, 2011
- Fotografía 06:** Resultados (rebotes) del ensayo no destructivo con instrumento de vibración - Flores J. & Andrade R., 2021

ÍNDICE DE TABLAS

- Tabla 01:** Rebotes en planta baja - Flores J. & Andrade R., 2021
- Tabla 02:** Rebotes en primera planta alta - Flores J. & Andrade R., 2021
- Tabla 03:** Representación de la matriz de nodos - Flores J. & Andrade R., 2021
- Tabla 04:** Extracto de la matriz de nodos esportada de Excel - Flores J. & Andrade R., 2021
- Tabla 05:** Representación de matriz de elementos (lineales) - Flores J. & Andrade R., 2021
- Tabla 06:** Elementos lineales exportados de Sap2000 a Excel - Flores J. & Andrade R., 2021
- Tabla 07:** Elementos superficiales exportados de Sap2000 a Excel - Flores J. & Andrade R., 2021
- Tabla 08:** Información de las secciones para la facultad de Psicología - Flores J. & Andrade R., 2021
- Tabla 09:** Módulo de elasticidad (Facultad de psicología) - Flores J. & Andrade R., 2021
- Tabla 10:** Coeficiente de Poisson (Facultad de psicología) - Flores J. & Andrade R., 2021
- Tabla 11:** Densidades de los materiales (Facultad de psicología) - Flores J. & Andrade R., 2021
- Tabla 12:** Densidad de la mampostería, NEC 2014 - Flores J. & Andrade R., 2021
- Tabla 13:** Densidad del hormigón, NEC 2014 - Flores J. & Andrade R., 2021
- Tabla 14:** Cálculo de carga muerta para entrepiso - Flores J. & Andrade R., 2021
- Tabla 15:** Densidad entrepiso de hormigón, NEC 2014 - Flores J. & Andrade R., 2021
- Tabla 16:** Cálculo de carga muerta para cubierta no transitable - Flores J. & Andrade R., 2021
- Tabla 17:** Densidad cubierta no transitable de hormigón, NEC 2014 - Flores J. & Andrade R., 2021
- Tabla 18:** Representación de grados de libertad (desplazamiento) - Flores J. & Andrade R., 2021
- Tabla 19:** Representación de grados de libertad (rotación) - Flores J. & Andrade R., 2021
- Tabla 20:** Primer modo de vibrar - Flores J. & Andrade R., 2021
- Tabla 21:** Primer modo de vibrar - Flores J. & Andrade R., 2021
- Tabla 22:** Tercer modo de vibrar - Flores J. & Andrade R., 2021
- Tabla 23:** Cuarto modo de vibrar - Flores J. & Andrade R., 2021
- Tabla 24:** Quinto modo de vibrar - Flores J. & Andrade R., 2021
- Tabla 25:** Sexto modo de vibrar - Flores J. & Andrade R., 2021
- Tabla 26:** Séptimo modo de vibrar - Flores J. & Andrade R., 2021
- Tabla 27:** Octavo modo de vibrar - Flores J. & Andrade R., 2021
- Tabla 28:** Noveno modo de vibrar - Flores J. & Andrade R., 2021
- Tabla 29:** Décimo modo de vibrar - Flores J. & Andrade R., 2021
- Tabla 30:** Valores del factor Z en función de la zona adoptada, NEC 2014 - Flores J. & Andrade R., 2021
- Tabla 31:** Tipo de suelo y factores de sitio Fa - Flores J. & Andrade R., 2021
- Tabla 32:** Tipo de suelo y factores de sitio Fd - Flores J. & Andrade R., 2021
- Tabla 33:** Tipo de suelo y factores de sitio Fs - Flores J. & Andrade R., 2021
- Tabla 34:** Valores η (eta), en las tres regiones principales del Ecuador. - Flores J. & Andrade R., 2021
- Tabla 35:** Coeficientes del tipo de suelo en Cuenca - Flores J. & Andrade R., 2021

Tabla 36: Derivas máximas para el hormigón y la mampostería, NEC 2014 - Flores J. & Andrade R., 2021

Tabla 37: Cálculo de derivas máximas de la edificación - Flores J. & Andrade R., 2021

Tabla 38: Derivas de planta baja por cuadrantes en dirección X - Flores J. & Andrade R., 2021

Tabla 39: Derivas de planta baja por cuadrantes en dirección Y - Flores J. & Andrade R., 2021

Tabla 40: Derivas de primera planta alta por cuadrantes en dirección X - Flores J. & Andrade R., 2021

Tabla 41: Derivas de primera planta alta por cuadrantes en dirección Y - Flores J. & Andrade R., 2021

Tabla 42: Derivas de segunda planta alta por cuadrantes en dirección X - Flores J. & Andrade R., 2021

Tabla 43: Derivas de segunda planta alta por cuadrantes en dirección Y - Flores J. & Andrade R., 2021

Tabla 44: Derivas de tercera planta alta por cuadrantes en dirección X - Flores J. & Andrade R., 2021

Tabla 45: Derivas de tercera planta alta por cuadrantes en dirección Y - Flores J. & Andrade R., 2021

Tabla 46: Modos de vibrar en el eje X - Flores J. & Andrade R., 2021

Tabla 47: Modos de vibrar en el eje Y - Flores J. & Andrade R., 2021

Tabla 48: Derivas en muros y losas, planta baja - Flores J. & Andrade R., 2021

Tabla 49: Derivas en muros y losas, primera planta alta - Flores J. & Andrade R., 2021

Tabla 50: Derivas en muros y losas, segunda planta alta - Flores J. & Andrade R., 2021

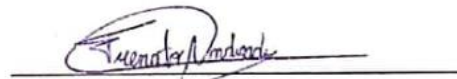
Tabla 51: Derivas en muros y losas, tercera planta alta - Flores J. & Andrade R., 2021

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional

Jorge Renato Andrade Cornejo en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "DETERMINACIÓN DE ZONAS MENOS VULNERABLES EN EL EDIFICIO DE LA FACULTAD DE PSICOLOGÍA DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA ANTE UN EVENTO SÍSMICO", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 03/08/2022



Jorge Renato Andrade Cornejo

C.I: 0106614472

Cláusula de Propiedad Intelectual

Jorge Renato Andrade Cornejo, autor del trabajo de titulación "DETERMINACIÓN DE ZONAS MENOS VULNERABLES EN EL EDIFICIO DE LA FACULTAD DE PSICOLOGÍA DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA ANTE UN EVENTO SÍSMICO", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 03/08/2022



Jorge Renato Andrade Cornejo

C.I: 0106614472

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Jonnathan Isaac Flores Sánchez, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "DETERMINACIÓN DE ZONAS MENOS VULNERABLES EN EL EDIFICIO DE LA FACULTAD DE PSICOLOGÍA DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA ANTE UN EVENTO SÍSMICO", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 03/08/2022



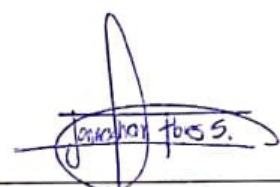
Jonnathan Isaac Flores Sánchez

C.I: 0107350803

Cláusula de Propiedad Intelectual

Jonnathan Isaac Flores Sánchez, autor del trabajo de titulación DETERMINACIÓN DE ZONAS MENOS VULNERABLES EN EL EDIFICIO DE LA FACULTAD DE PSICOLOGÍA DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA ANTE UN EVENTO SÍSMICO", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 03/08/2022



Jonnathan Isaac Flores Sánchez

C.I: 0107350803

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación se lo dedico a María Augusta Cornejo Romero,
mi madre.

RENATO ANDRADE

A Dios, el motor de mi vida.
A mi familia: mis padres Marco y Verónica; mis hermanos, David y Kevin.
Gracias por su apoyo y la formación que me han brindado.

JHONATAN FLORES

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi madre por todo el esfuerzo y sacrificio que ha realizado por mí en este duro y difícil camino, agradezco a mi familia por haber constituido un importante apoyo, así mismo agradezco a mi compañero de tesis Jhonatan Flores que ha sido como un hermano y a su familia por haberme acompañado durante estos años.

También agradezco al Ing. Hernán García por habernos brindado sus conocimientos para la consecución de este trabajo de titulación, de igual forma a la Universidad de Cuenca y a la Facultad de Arquitectura y Urbanismo.

RENATO ANDRADE

A JESÚS por permitirme alcanzar esta meta y darme las fuerzas para seguir adelante cuando más lo necesitaba.

A mis padres, quienes estuvieron presentes en mis veladas con todo su apoyo, les agradezco infinitamente por sus oraciones y sacrificio. A mis hermanos quienes han estado siempre conmigo.

A mi familia en general, y en una manera especial a mi tío Franklin Flores y mi tía Fernanda Crespo por el apoyo brindado en esta etapa.

A mi compañero Renato Andrade por ser parte de este logro y compartir estos años de estudio universitario, y a su familia que de manera directa o indirecta nos han brindado su ayuda.

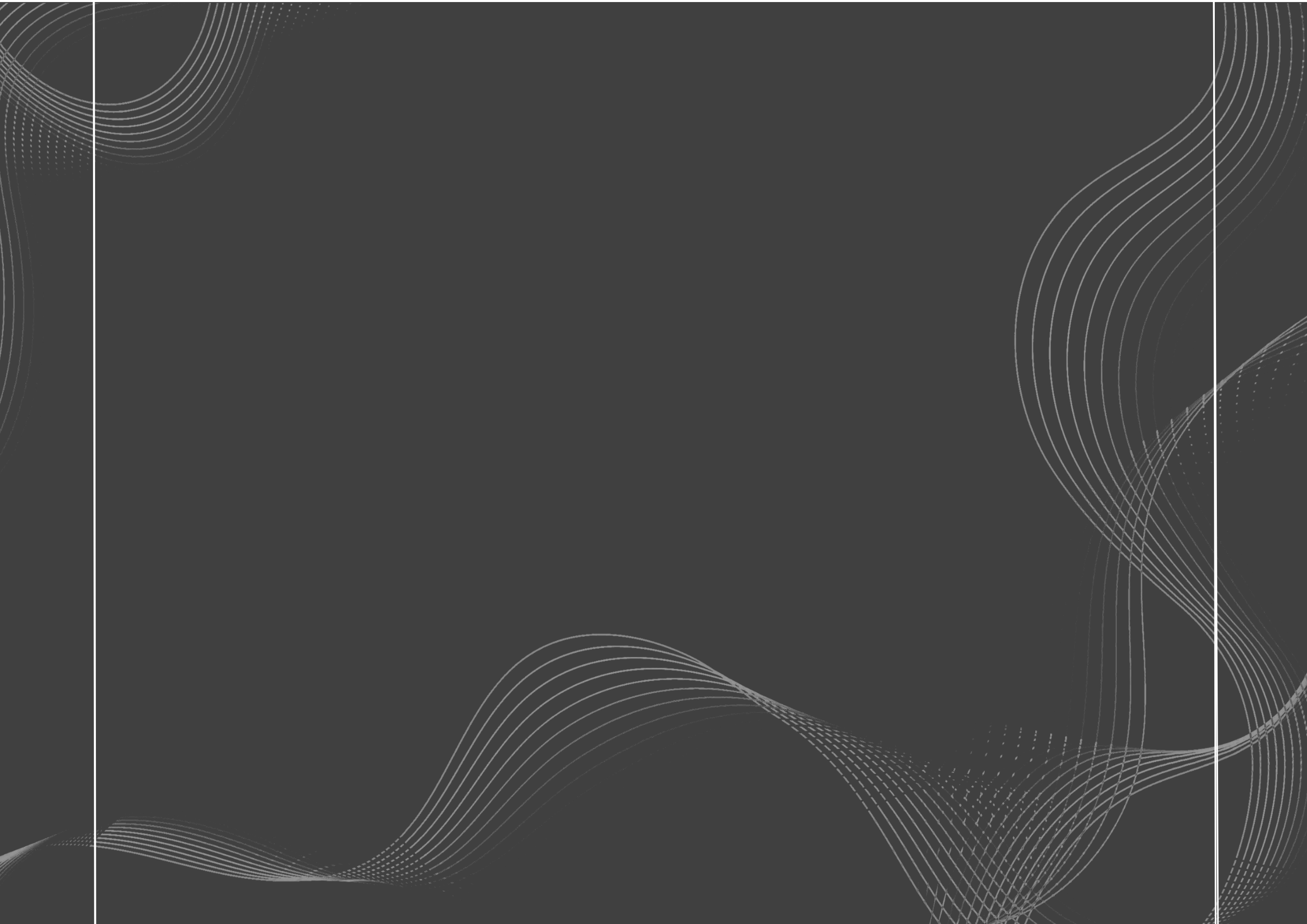
A nuestro director, Ing. Hernán García y docentes de la facultad de arquitectura y Urbanismo por compartirnos sus conocimientos durante toda la carrera.

JONNATHAN FLORES

CAPÍTULO 01

Antecedentes

01



INTRODUCCIÓN

Los terremotos son fenómenos naturales que suceden de forma inesperada y actúan sobre un área grande de territorio produciendo severos daños y afectando a miles de personas de manera directa, dejando muertos, heridos y destrucción material (Vidal, 1994).

El Ecuador ha sido un país castigado por varios eventos sísmicos que datan desde 1541; el terremoto más fuerte se dio en 1797 con una magnitud de 8.3 Mw. en la ciudad de Riobamba dejando 40.000 fallecidos. En 1868 se registraron dos terremotos de 8.0 y 7.7 Mw. en la ciudad El Ángel y en la provincia de Imbabura dejando como resultado 70.000 decesos y múltiples edificios caídos (Nikolaou & Vera, 2016).

El último evento sísmico de gran magnitud registrado en Ecuador se dio el 16 de abril de 2016 que tuvo como epicentro la provincia de Manabí y una magnitud de 7.8 Mw dejando como resultado 663 fallecimientos, miles de personas en refugios temporales y más de dos millones de personas afectadas de forma directa. En cuanto a lo material, 29672 edificaciones resultaron afectadas incluyendo viviendas, infraestructura educativa, de salud, etc. (Chunga, 2017).

Históricamente en la ciudad de Cuenca, de acuerdo al catálogo elaborado por la Red Sísmica del Austro (RSA), han habido cuatro acontecimientos telúricos de magnitud considerable: el primero ocurrió en 1758, el siguiente en 1856, luego el 29 de junio de 1887 y finalmente el 23 de febrero de 1913, siendo el terremoto de 1887 el más fuerte y destructivo del que cuya magnitud se estima que fue de VII – VIII (Dañino – Gravemente dañino) en la Escala Macrosísmica Europea (EMS-98) y tuvo múltiples réplicas hasta el mes de octubre dejando como resultado 2 víctimas y cuantiosas

pérdidas materiales (Jiménez Pacheco, Cabrera Cajamarca, Sánchez Beltrán, & Avilés Tenorio, 2018).

La ciudad de Cuenca tiene una alta amenaza sísmica que aumenta la vulnerabilidad de las edificaciones (Jiménez, 2018). Según Barbat la vulnerabilidad es una característica propia de las edificaciones, sin embargo, existen construcciones que pueden ser más o menos vulnerables que otras de acuerdo a distintos factores (Barbat, H., Oller, S., & Vielma, J. C., 2005), no obstante, a pesar del riesgo sísmico presente en la ciudad no han sucedido terremotos de gran magnitud en los últimos 100 años lo que ha provocado que se construya sin considerar un diseño sismo resistente haciendo más vulnerables las edificaciones de Cuenca (García, Degrande, 2017).

En este contexto, la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos (SNGR) por medio de la Constitución elaborada en el año 2008 establece que se debe proteger a las personas, colectividades y a la naturaleza de desastres creando planes de recuperación y mitigación de daños para minimizar la vulnerabilidad y en caso de terremoto se vuelve oportuno disminuir la vulnerabilidad de las edificaciones para evitar pérdidas humanas y materiales.

A lo largo del tiempo se han desarrollado formas y métodos que estudian la manera de analizar la vulnerabilidad en caso de catástrofes, entre esos métodos se encuentra el cualitativo en el que se establecen variables y se identifican las zonas con indicadores críticos para obtener niveles de vulnerabilidad, también existe el método heurístico en el que se pondera a cada variable de acuerdo a su importancia en caso de sismo y se asignan valores a cada indicador según el nivel de criticidad (Lozano, 2008).

En la actualidad también existen métodos numéricos que ayudan al estudio de la vulnerabilidad y entendimiento del comportamiento estructural de las edificaciones en los que generalmente se contemplan tres etapas, un pre proceso en el que se recolectan todos los datos preliminares como la geometría de la estructura, las propiedades mecánicas de los materiales, los elementos estructurales, entre otros. En segunda instancia se determinan fuerzas y esfuerzos en los elementos que dependen del tipo de problema y de las hipótesis realizadas y finalmente el postproceso donde se interpretan los datos y resultados obtenidos (Muñoz, Peña, & Meza, 2012).

El presente trabajo estudia la vulnerabilidad y el comportamiento estructural del edificio de la Facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca siguiendo una metodología compuesta de tres pasos sistemáticos que son: la recolección de datos por medio de un levantamiento arquitectónico - estructural y la ejecución de un ensayo no destructivo, la realización de un modelo tridimensional con el uso de programas de computadora y la obtención e interpretación de datos con el objetivo localizar las zonas con mayor y menor riesgo dentro de la edificación.

Entre los resultados que se requieren obtener están los modos de vibrar de la estructura, las deformaciones, los valores de deriva de muro y de piso, entre otros. Cabe recalcar que la vulnerabilidad se determinará comparando la normativa vigente con los valores obtenidos principalmente en el cálculo de derivas. Los resultados obtenidos además de comprobar la hipótesis planteada servirán para reconocer cuales son los lugares más y menos vulnerables ante un sismo de la Facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca con el fin de preservar la vida de los ocupantes y contribuir a la mitigación de daños ante un posible sismo.

1.2. HIPÓTESIS

¿Puede un modelo numérico tridimensional, utilizando análisis modal, proporcionar la información suficiente para determinar y localizar las áreas de menor riesgo de una edificación ante un sismo?

1.3. OBJETIVO GENERAL

- Determinar mediante el análisis estructural modal el comportamiento sísmico del edificio de la Facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca y reconocer las zonas de menor riesgo.

1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Reconocer las características geométricas y físicas del edificio de Psicología mediante su levantamiento arquitectónico y estructural para la creación del modelo numérico tridimensional.
- Realizar un modelo tridimensional de la edificación utilizando el espectro de diseño para calcular las fuerzas sísmicas que permitan identificar los lugares más y menos vulnerables.

1.5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Ecuador se encuentra en El Cinturón de Fuego del Pacífico por lo que su actividad sísmica es alta, lo que ha provocado alrededor de 37 sismos de magnitudes mayores a 7.0 Mw., producidos generalmente por fallas geológicas y actividad volcánica lo que ha ocasionado la muerte de aproximadamente 80.000 personas (Rivadeneira et al., 2007)

El riesgo sísmico se conforma por la amenaza o peligro que están ligados directamente a un desastre o fenómeno natural como los terremotos y por la vulnerabilidad que está asociada con lo susceptibles que pueden llegar a ser las viviendas y edificaciones y la capacidad del ser humano para responder y minimizar los daños (Rivadeneira et al., 2007).

Cuenca, ubicada al centro – sur del Ecuador, es una ciudad con un riesgo sísmico alto, según la Red Sísmica del Austro la fuente crítica de posibles sismos es la falla geológica de Girón que tendría un potencial sísmico de 7.1 Mw., no obstante, en Cuenca se han producido sismos entre 4.00 Mw. y 4.9 Mw. además, que existen pocos datos de terremotos destructivos en la ciudad.

A pesar del riesgo sísmico alto, el escaso historial de terremotos en Cuenca ha ocasionado que las practicas constructivas se realicen con poca rigurosidad sin tomar en cuenta un diseño resistente a terremotos y sin un control de calidad (García & Degrande, 2017) además, la baja calidad de los materiales, la carencia de detalles constructivos sísmicos y la falta de fiscalización durante la construcción (Nikolaou, 2016) son factores que contribuyen a que las edificaciones se vuelvan más vulnerables.

Los análisis y estudios de vulnerabilidad son importantes para determinar el riesgo sísmico de una edificación, así como también

son una herramienta fundamental para la creación de planes de contingencia ante desastres que incluso permitan prever los resultados negativos tanto económicos como sociales (Caicedo, 1994).

Generalmente las edificaciones no cuentan con planes de contingencia adecuados en los que se identifiquen las zonas más y menos vulnerables en caso de sismo, o si los tienen, las personas que las ocupan desconocen de estos planes lo que dificulta la evacuación del edificio y la posibilidad de salvar vidas (Ortiz, 2019).

Por tanto, se vuelve indispensable realizar una evaluación de la vulnerabilidad de una edificación para comprobar su comportamiento ante un sismo. La evaluación de la vulnerabilidad se la puede realizar de dos maneras, en algunos casos por medio de la observación de los daños después de un desastre y generando estadísticas para reconocer qué estructuras son más y menos resistentes y en otros casos se evalúa la vulnerabilidad por medio de un análisis matemático creando un modelo estructural y realizando ensayos de laboratorio (Caicedo, 1994).

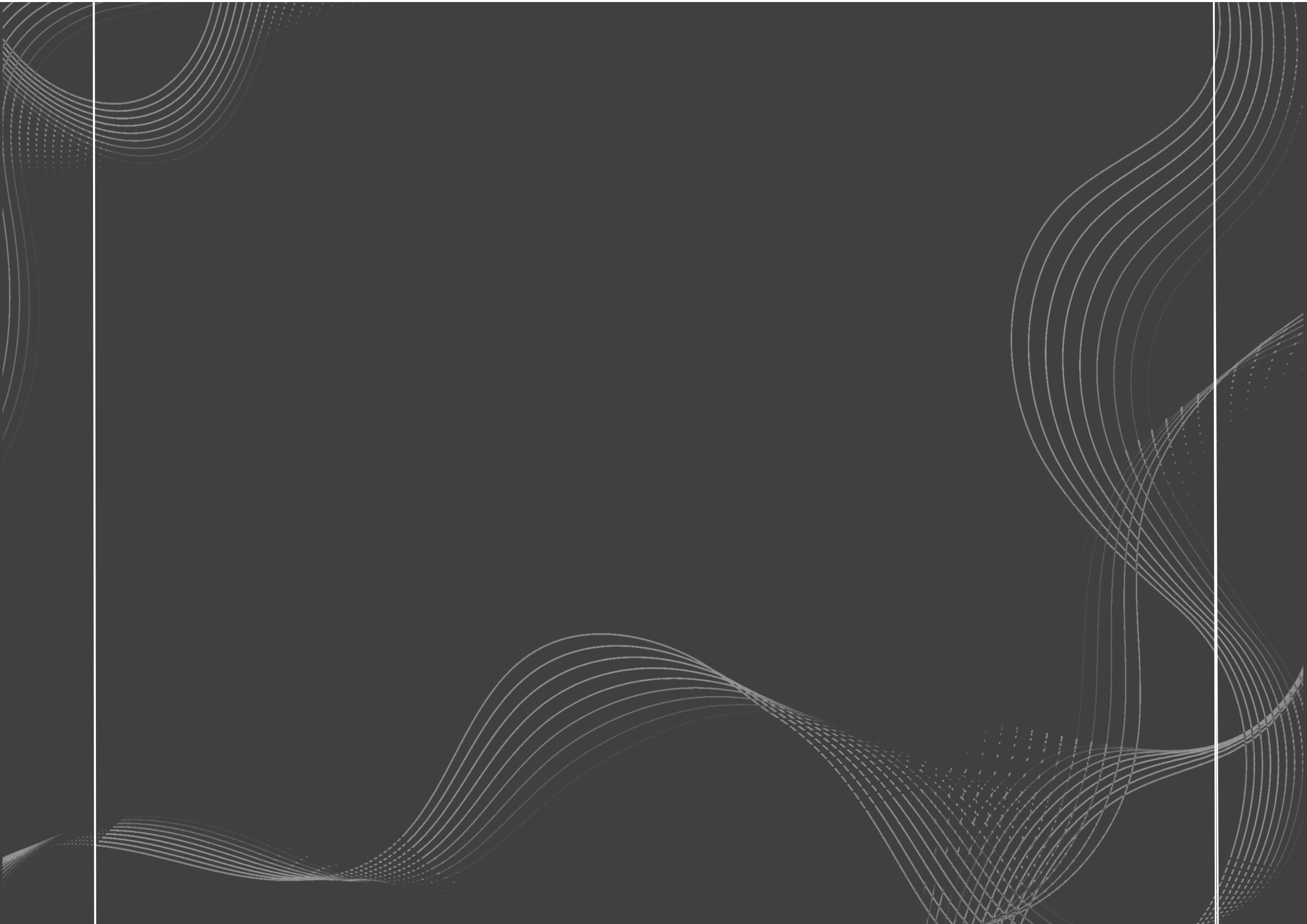
En este contexto se optó por estudiar la vulnerabilidad sísmica tomando como caso de estudio el edificio de la Facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca dado que no existe un estudio parecido de esta edificación y por la gran importancia que merece el tema del análisis de vulnerabilidad ante sismos y terremotos sobre todo en construcciones de carácter educativo, de salud y otros que albergan un gran número de personas con el fin de preservar vidas y evitar daños materiales.

Este estudio realiza una evaluación de vulnerabilidad en la que se ejecuta un análisis matemático, un modelo estructural, ensayos no destructivos, obtención e interpretación de datos, etc., que según Caicedo es una evaluación de vulnerabilidad calculada en la que se requiere comparar los valores obtenidos con las normativas vigentes en el país y de esta manera identificar si la edificación tiene una vulnerabilidad baja o alta y saber qué zonas son las de mayor y menor riesgo.

CAPÍTULO 02

Marco Teórico

02



2.1. Sismicidad en Ecuador

2.1.1. Contexto geológico y geográfico

Ecuador en su contexto geográfico es conocido por estar ubicado en el Cinturón de Fuego del Pacífico, esta zona del planeta adquiere esta denominación por ser la región más susceptible a experimentar los efectos de terremotos y erupciones volcánicas (Rivadeneira, et al., 2007). Según el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN), Ecuador está rodeado de aproximadamente 84 volcanes continentales, que están constantemente en erupción, lo cual activa el Cinturón de Fuego del Pacífico, este, llamado también “anillo de fuego” cubre un área estimada de 40000 Km, entre el oeste de América y este de Asia y representa el área con la mayor actividad sísmica del planeta y volcánica (E. Romero, 2018).

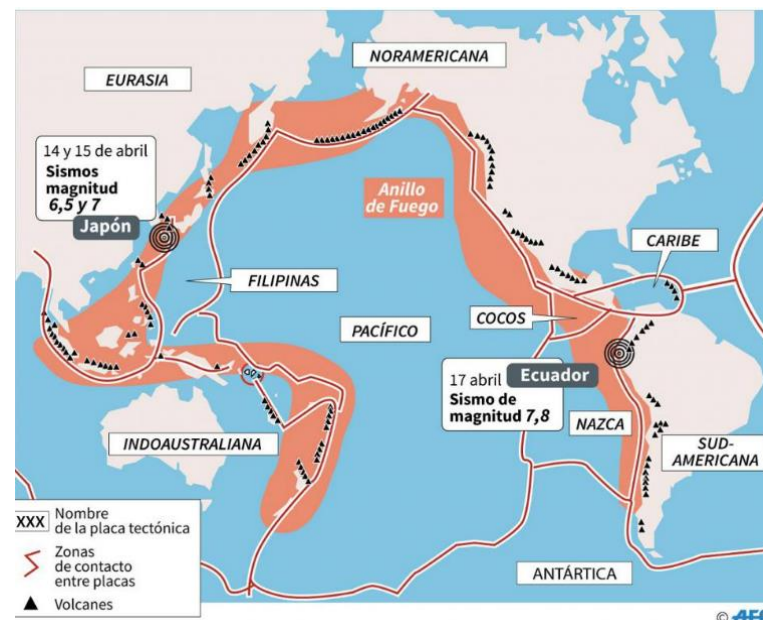


Figura 01: Cinturón de Fuego del Pacífico
Daza Diego, 2017

La Interacción entre la Placa Sudamericana y la Placa de Nazca es la consecuencia de los cambios en la superficie ecuatoriana, (debido a los efectos de terremotos y erupciones volcánicas) esta interacción genera una zona de subducción, donde la Placa de Nazca se hunde bajo la Placa Sudamericana a una velocidad de 60 mm/año, (Trenkamp et al., 2002) frente a las costas y en varias

zonas tectónicas activas al interior del territorio, y es allí donde se origina la mayor parte de sismos en el país (Rivadeneira, et al., 2007).



Figura 02: Interacción entre la placa de Nazca y la Placa Sudamericana
Granados Kerys

Las fallas geológicas es una de muchas causas que originan los movimientos telúricos en todo el mundo, la interacción entre las Placas mencionadas en el párrafo anterior es una de ellas. En el Ecuador hay varios tipos de fallas que se clasifican por el movimiento relativo que experimentan los bloques que la forman y, existen casi todo tipo de fallas que se agrupan en sistemas de fallas que se caracterizan por su geometría, extensión y tipo de movimiento (Rivadeneira, et al., 2007).

2.1.2. Contexto histórico

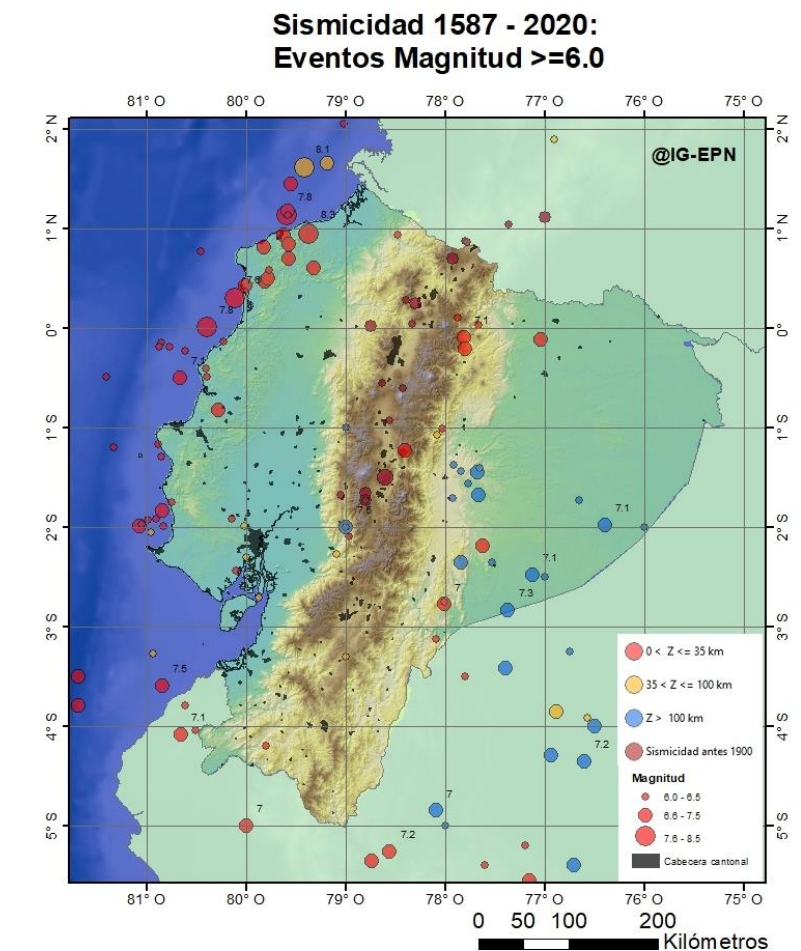


Figura 03: Sismicidad en Ecuador de 1587 a 2020
Instituto Geofísico

El primer sismo en territorio ecuatoriano ocurrió en 1541, cuyo epicentro se ubicó en la provincia de Napo, este es el evento que da inicio al catálogo sísmico del país. Anualmente en el Ecuador pueden darse miles de eventos telúricos, tanto los que son sentidos por las personas como los que únicamente pueden ser detectados con los sismógrafos. De estos, desde 1541 hasta el 2016 han ocurrido en nuestro país 40 terremotos mayor o igual a VIII (bastante dañino) en la escala de intensidad MSK (Medvedev – Sponheuer - Karnik), y si tomamos en cuenta desde la intensidad VI (fuerte) se han registrado 86 eventos históricos de sismos importantes hasta el año 2007 (GEC, 2016). A lo largo de los años y debido a la gran cantidad de sismos es imposible cuantificar las

pérdidas materiales, pero en lo que se refiere a pérdidas humanas se estima que se supera las 80.000 muertes, sin contar con los 673 fallecidos oficialmente en el terremoto de abril de 2016 (Rivadeneira, et al, 2007).

Parra, data que al año se suscitan como promedio 2600 sismos de los cuales sólo el 12% pueden ser sentidos por las personas. Según los 37 terremotos ocurridos desde 1541 hasta 1998, se reconocen las siguientes cifras: veinte y cuatro sismos fueron de intensidad VIII, nueve con una intensidad IX, dos con una intensidad X en los años 1698 y 1949 y dos con intensidad XI en 1797 y 1834, cuyos epicentros fueron en Chimborazo y Carchi respectivamente (todos en escala Mercalli) (Rivadeneira, et al. 2007).

Es importante conocer los sismos que más impacto han causado en el país, entre los más destacados están los siguientes: (Datos tomados del Instituto Geofísico del Ecuador -EPN)

1698 Cotopaxi – Azuay: Este sismo causó varias muertes en Ambato (3.000 aprox.), Latacunga (2.000 aprox.), Patate (200), Riobamba (100).

1797 Riobamba: Causante de la destrucción total de Riobamba, con una magnitud de 8,3 Mw.

1906 Esmeraldas: Con una magnitud de 8,8 Mw, es el sismo de mayor intensidad registrado en el territorio ecuatoriano.

1949 Tungurahua: Terremoto de 6,8 grados cuyo epicentro fue en Ambato, fue uno de los sismos con mayor impacto en pérdidas humanas y materiales.

1958 Esmeraldas: Este sismo ocasionó 36 pérdidas humanas debido a un Tsunami, tuvo una intensidad de 7,7 Mw.

1998 Manabí: El epicentro tuvo lugar en Bahía de Caráquez, y tuvo una magnitud de 7,1 Mw.

2016 Manabí: El 16 de abril de 2016 Ecuador enfrentó un sismo que sacudió fuertemente la Costa ecuatoriana, este terremoto alcanzó una magnitud de 7,8 Mw cuyo epicentro fue en el cantón Pedernales, en donde las zonas más afectadas fueron las provincias de Esmeraldas, Manabí, Santo Domingo de los Tsáchilas, Guayas, Los Ríos y Santa Elena. El Instituto Sísmico ESPE (Universidad de las Fuerzas Armadas) registró 671 pérdidas humanas, 17.674 heridos, 3 desaparecidos y un aproximado de 3.34 millones en pérdidas materiales. A partir de este movimiento telúrico las zonas afectadas presentaron índices de mayor actividad sísmica, con un aproximado de 1500 réplicas.



Fotografía 01: Sismo suscitado en abril de 2016
AP, 2016



Fotografía 02: Sismo suscitado en abril de 2016
AP, 2016

2.2. Sismicidad en Cuenca

Cuenca es una ciudad situada al sur del Ecuador que, de acuerdo a la Red Sísmica del Austro, tiene una amenaza sísmica y vulnerabilidad alta, principalmente en su Centro Histórico ante un eventual terremoto (Jiménez Pacheco, Cabrera Cajamarca, Sánchez Beltrán, & Avilés Tenorio, 2018).

2.2.1. Contexto histórico de sismos en Azuay y Cuenca

1856 – Terremoto que provocó la caída de una torre de la iglesia de San Blas y la muerte de varias personas.

1887 – El terremoto más importante con epicentro en la provincia del Azuay, provocó la destrucción de iglesias y casas en Cuenca.

1893 – Sismo que produjo daños de consideración En Gima y Girón, se registró un muerto.

1901 – Sismo que ocasionó daños moderados en Gima y Cuenca con caída de casas y la iglesia de Gima, se registró un muerto.

1913 – Terremoto que provocó la destrucción total de viviendas en las provincias de Loja, Guayas y Azuay principalmente en Molleturo.

1971 – Fue un sismo sentido desde Venezuela hasta Perú, en Ecuador, los mayores daños se localizaron en Culca, parroquia de Cuenca.

2007 – Sismo que causó daños leves en las provincias de Zamora Chinchipe, Azuay, Morona Santiago y Loja. (Investigación realizada por José Egred A. Instituto Geofísico)

2.3. Vulnerabilidad sísmica

El concepto de vulnerabilidad ha sido definido de varias formas, sin embargo, se ha adoptado el concepto de “grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos en riesgo como resultado de la probable ocurrencia de un suceso desastroso, expresada en una escala desde 0 (sin daño) a 1 (pérdida total)”, no obstante, la UNDRP y la UNESCO definieron lo que es vulnerabilidad basada en varios conceptos:

Peligrosidad sísmica: La peligrosidad sísmica se la define como la probabilidad de ocurrencia de un suceso potencialmente desastroso durante cierto período de tiempo en un sitio dado (Oller y Vielma, 2005).

Elementos de riesgo: Son la población, los edificios, las actividades económicas, los servicios públicos y demás elementos expuestos a una amenaza en un área determinada (Oller y Vielma, 2005).

Riesgo total: Se define como el número de pérdidas humanas, heridos, daños a las propiedades y efectos sobre la actividad económica generados por un desastre (Oller y Vielma, 2005)

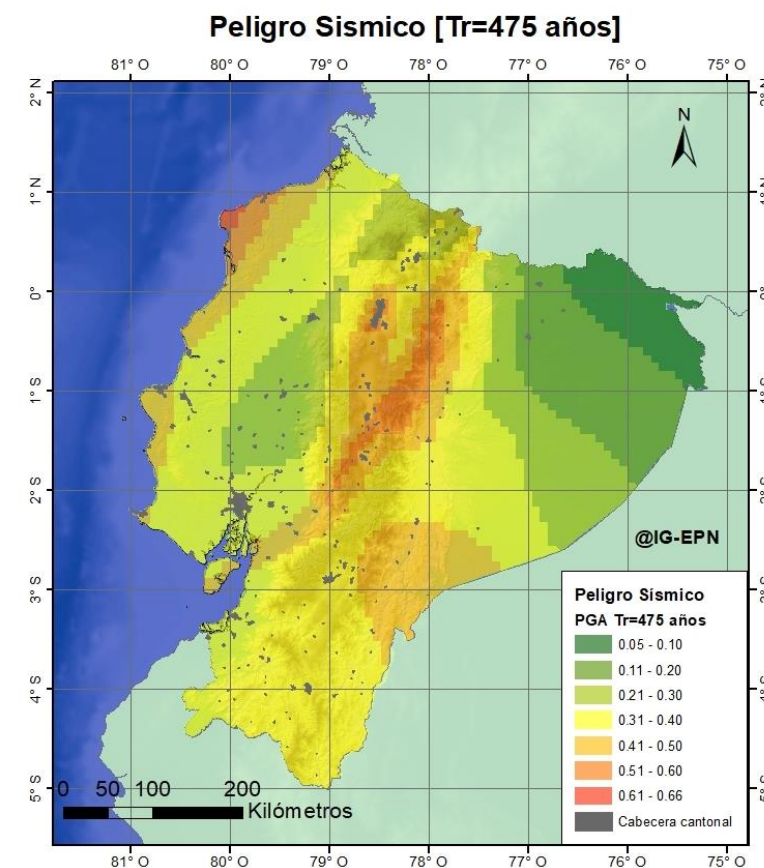


Figura 04: Peligro sísmico en Ecuador
Instituto Geofísico

En este contexto, existe de manera particular el riesgo físico, que está ligado de forma directa con la calidad de diseño sismorresistente que debe realizarse de acuerdo a normas establecidas en donde se puede diseñar admitiendo un grado de vulnerabilidad de la estructura para disipar la energía absorbida (Oller y Vielma, 2005).

Para Caicedo, la vulnerabilidad es una característica intrínseca de las estructuras que independientemente de su sistema constructivo, mientras sea susceptible de afectarse por un terremoto, puede ser objeto de estudio de su vulnerabilidad, por tanto, elementos como puentes, líneas de conducción de agua y energía, edificios, etc., pueden ser sometidos a una evaluación de este tipo.

2.3.1. Vulnerabilidad sísmica en Ecuador

El fuerte sismo en Pedernales de 2016, dejó en evidencia a un Ecuador susceptible a estos efectos naturales, y también un país con carencia de criterios respecto a la construcción de edificios. Se han extraído datos importantes de las edificaciones colapsadas y de las que tuvieron un deterioro avanzado, en donde se evidenciaron tres características en común: 1. Construcciones sin criterios estructurales normados; 2. Ausencia de control profesional en el proceso constructivo y 3. Falta de previsión de posibles daños estructurales ante la incidencia de un sismo de gran intensidad (Fernández I., et al, 2018).

La causa principal de daño en las edificaciones que dejan los movimientos telúricos, es debido a un inapropiado comportamiento de las estructuras, para Fernández I., et al (2018) es necesario encontrar el grado de vulnerabilidad que presenta la configuración de la estructura y así dar una solución para una mejor respuesta de las edificaciones ante un sismo de intensidad media o alta.

2.3.2. Vulnerabilidad sísmica en Cuenca

Entre los años 1998 y 2001, se realizó el proyecto conocido como P-BID 400 (*Amenaza sísmica en el Austro, vulnerabilidad y riesgo sísmico en la Ciudad de Cuenca*) realizado por la RSA, cuyas siglas significan **Red Sísmica de Austro**. En este proyecto se dio a conocer que la fuente sismogénica crítica para la ciudad de Cuenca es la falla geológica de Girón. Se obtuvo también mapas de amenaza sísmica en toda la región austral del Ecuador, y en la ciudad de Cuenca se determinó una aceleración máxima en roca de 0.25 g que corresponde a un periodo de retorno de 475 años, entrando en el rango del nivel normativo (sismo de diseño), que se ha verificado en las edificaciones del Código Ecuatoriano de la construcción, y se determinó a Cuenca como una ciudad

alta en amenaza sísmica (Red Sísmica de Austro, 2002; Jiménez, 2002).

El proyecto resaltó mapas de daño sísmico del patrimonio edificado en la ciudad de Cuenca para 5 niveles de acción sísmica con sus respectivas medidas en términos de aceleración máxima en roca: 0.05 g, 0.10 g, 0.20g, 0.25g, 0.30g. Se

consideraron edificaciones de mampostería no reforzada y estructuras de hormigón armado. A continuación, se muestra un mapa de daño sísmico en la ciudad de Cuenca con PGA= 0.05g, tomado de la RSA, 2002.

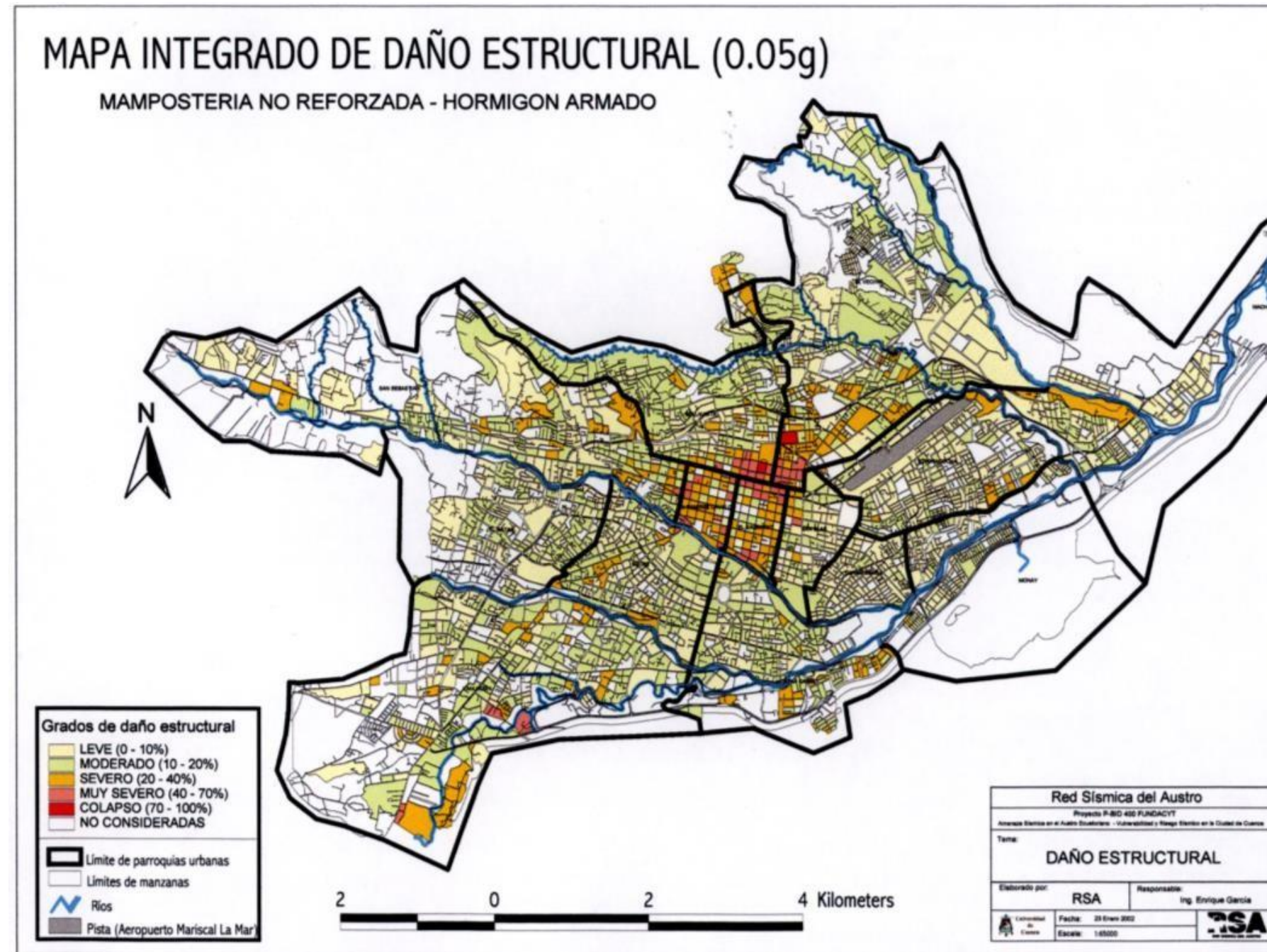


Figura 05: Mapa integrado de daño estructural en el centro histórico de Cuenca
Red Sísmica del Austro

En el gráfico se aprecia la vulnerabilidad en el CHC (Centro Histórico de Cuenca) frente a eventos sísmicos, el proyecto P-BID refuerza el argumento de que Cuenca es una ciudad con alta amenaza sísmica y vulnerable a eventos telúricos.

Cuenca fue catalogada en 1999 como Patrimonio Cultural de la Humanidad por la UNESCO por su trama urbana y arquitectura construida principalmente por materiales como adobe y madera, sin embargo, con el pasar del tiempo esta arquitectura tradicional fue sustituida por estructuras compuestas de marcos de hormigón y rellenas de mampostería como ladrillos o bloques (H. García, G. Degrande 2017).

La escasa historia de terremotos en la ciudad, ha dado paso a que en la práctica constructiva no se consideren normativas relacionadas al diseño resistente a terremotos, por lo que, las nuevas edificaciones de mampostería han sido construidas sin un control de calidad (H. García, G. Degrande 2017).

Según Jiménez (2002) el 80% de las edificaciones en Cuenca son de mampostería y de baja altura, esta situación aumenta el nivel de incertidumbre en el correcto funcionamiento de las edificaciones y a su vez incrementa la vulnerabilidad de las mismas en caso de terremoto (H. García, G. Degrande 2017).

En edificios de hormigón armado, como la Facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca, los fallos estructurales más comunes en caso de sismo se pueden dar en las columnas y vigas con la presencia de grietas diagonales o verticales, mientras que los daños no estructurales se muestran en muros divisorios, por tanto, la vulnerabilidad física de un edificio afecta su vulnerabilidad funcional por lo que este aspecto a considerar es de suma importancia para el diseño de edificios (Oller y Vielma, 2005).

2.4. Métodos de evaluación de vulnerabilidad

Existen dos alternativas para tratar de reducir la vulnerabilidad de una edificación, en primer lugar se plantea una profunda planificación antes de realizar una construcción identificando zonas del territorio que sean de menor riesgo y ubicando en esos lugares las nuevas construcciones, en segundo lugar se puede “modificar” la vulnerabilidad de las estructuras con dos acciones específicas, la primera es mejorar y crear códigos y normas que guíen adecuadamente al constructor con respecto a edificaciones sismo resistentes y la segunda es que durante la construcción se tenga una supervisión estricta y eficiente de los procesos constructivos (Caicedo, 1994).

Según Caicedo existen dos formas de evaluar la vulnerabilidad sísmica, la primera es la “vulnerabilidad observada” que se realiza por medio de la observación de los daños después de un terremoto y el análisis de estadísticas, la segunda es la “vulnerabilidad calculada” en la que se realiza un proceso más técnico con la elaboración de un análisis matemático mediante un modelo estructural, ensayos de laboratorio, etc.

Estas evaluaciones además de analizar el riesgo sísmico, constituyen un instrumento importante para la generación de planes de emergencia para mitigar un desastre, integrando análisis de impacto económico y social. También pueden servir para evaluar si es más conveniente restaurar o reconstruir una edificación después de un terremoto para no desperdiciar recursos (Caicedo, 1994).

De estos dos tipos de evaluación de vulnerabilidad se desprenden:

Métodos analíticos: consisten en evaluar edificios de mampostería u hormigón armado bajo cargas estáticas y

dinámicas inelásticas mediante la modelización de éstos, la obtención de resultados y su respectivo análisis (Caicedo, 1994).

Métodos subjetivos: son formas rápidas de evaluar la vulnerabilidad de una edificación que, si bien no son tan precisos, sirven para tener una idea general de la situación de una determinada zona (Caicedo, 1994).

Otras denominaciones de estos métodos de evaluación de vulnerabilidad son de **métodos cualitativos y cuantitativos** y según Hernández y Castro, una edificación debe someterse a una evaluación de vulnerabilidad sísmica que debe comenzar con un método cualitativo y de no cumplir con los parámetros positivos, posteriormente se debe realizar un método cuantitativo.

Uno de los métodos cualitativos es el método FEMA que consiste en identificar las edificaciones que tienen más y menos riesgos ante un sismo evaluándolos por medio de puntajes que oscilan en un rango de 0 a 7 donde el puntaje más alto representa un mejor rendimiento de la estructura (Orostegui, 2020).

Por otro lado, los métodos cuantitativos son análisis más completos que evalúan la resistencia de los materiales, el tipo y cantidad de acero en los elementos estructurales, características dinámicas, características del suelo, la relación de los elementos estructurales con los elementos no estructurales, etc. (Hernández & Castro, 2011).

2.5. Mitigación de desastres

En el contexto geográfico ecuatoriano se hace imprescindible que, a nivel nacional, local y específico de cada establecimiento educativo, comercial, de salud y demás espacios donde se congregue un número importante de personas se establezcan planes de mitigación y prevención de desastres que tengan el objetivo de preservar la vida de sus ocupantes.

A nivel nacional, en la Constitución de 2008 se establece que el Estado debe proteger a las personas, colectivos y naturaleza frente a los efectos negativos de un desastre por medio de la prevención ante un riesgo, la mitigación del desastre, la recuperación y mejoramiento de las condiciones sociales, económica y ambientales para disminuir el estado de vulnerabilidad (SNGR, 2010).

Análisis de riesgos	Estudio de amenazas y vulnerabilidad.
Reducción de riesgos	Prevención, mitigación
Manejo de emergencias	Preparación, alerta y respuesta.
Recuperación	Rehabilitación y reconstrucción

En Cuenca se han realizado múltiples estudios llevados a cabo por la Red Sísmica del Austro, en uno de ellos denominado “Amenaza sísmica en el Austro, vulnerabilidad y riesgo sísmico en la ciudad de Cuenca” se obtuvieron importantes datos y se elaboraron mapas de riesgo sísmico colocando a Cuenca con una alta amenaza sísmica con el fin de analizar la situación a futuro para contribuir a la mitigación de daños.

En el caso del edificio de la Facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca, dado que no existe una adecuada señalética que guíe a los ocupantes en caso de presentarse un sismo, se vuelve fundamental realizar su evaluación de vulnerabilidad que permita reconocer las zonas de mayor y menor riesgo para mitigar futuros desastres.

En el contexto que enmarca esta investigación, una herramienta importante para la mitigación de los daños provocados por un sismo es la evaluación de la vulnerabilidad de las edificaciones, esta herramienta también puede servir para realizar una mejor planificación urbana y protección de las personas (Caicedo, 1994).

2.6. Normativa Ecuatoriana de la Construcción

La Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) en su capítulo 2 denominado “Peligro sísmico y requisitos de diseño sismo resistente” realiza un acercamiento a definiciones, requisitos y datos para guiar a los técnicos diseñadores y constructores en el proceso constructivo sismorresistente.

Esta normativa está sometida a constantes actualizaciones de acuerdo a los nuevos conocimientos que se van obteniendo sobre la situación sísmológica del país y de acuerdo a las necesidades existentes, actualmente se ha mantenido una filosofía de diseño que tiene como fin evitar pérdidas humanas, sin embargo, se vuelve necesario además evitar pérdidas materiales, por lo que esta normativa también tiene como propósito precautelar por el estado de los recursos materiales (NEC, 2015).

El objetivo de esta norma es de: “establecer un conjunto de especificaciones básicas y mínimas, adecuadas para el diseño de estructuras de edificación que están sujetas a los efectos de terremotos que podrían presentarse en algún momento de su vida útil” orientado a que los profesionales a nivel nacional cumplan con los requisitos mínimos de diseño, construcción y fiscalización en términos de resistencia ante sismos (NEC, 2015).

2.7. Ensayos no destructivos

La aplicación de ensayos no destructivos se remonta hace mucho tiempo, en la actualidad es muy frecuente su uso sobre todo en edificaciones de hormigón dado que no provocan daños sobre los elementos que son analizados (Ortega & Ripani, 2007).

Generalmente estos ensayos se clasifican en dos grupos de acuerdo a su finalidad:

- a. Establecer las propiedades de la materia**
 - Ultrasonido
 - Esclerómetro
 - Resistividad del hormigón
 - Electroquímicos de corrosión
- b. Determinar el comportamiento mecánico**
 - Extensometría
 - Medición de flechas o de frecuencias naturales de vibración

Estos ensayos tienen como fin obtener una estimación de la resistencia del hormigón y observar si la armadura está sujeta a corrosión todo esto sin que la pieza a analizar sufra algún daño (Ortega & Ripani, 2007).

Para el caso de estudio de la Facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca se vio necesario realizar un ensayo esclerométrico, este método permite conocer un valor aproximado de la dureza superficial del hormigón mediante un mecanismo en el que una masa es impulsada con una determinada energía que golpea el hormigón y rebota, esta energía del rebote se cuantifica en un rango que varía entre 20 y 50 (Ortega & Ripani, 2007).

Este método es utilizado principalmente para estudiar cuan homogéneo es un hormigón, para comparar la calidad de un hormigón con otro y para estimar la resistencia de un hormigón "In situ", el instrumento que realiza estas mediciones se denomina esclerómetro Schmidt que es un martillo que rebota sobre la superficie y arroja un número de rebotes (Ortega & Ripani, 2007) (figura 06).

De acuerdo a la norma internacional ASTM C805 el procedimiento consiste en sostener de manera firme el martillo perpendicularmente a la superficie de la estructura e incrementar la presión sobre el émbolo hasta que el martillo golpee, así mismo, esta normativa indica que se deben descartar las mediciones realizadas si 2 o más valores difieren en 6 unidades con respecto al promedio. El ensayo debe ser realizado con el mismo martillo y la superficie a ser analizada debe tener 10cm de espesor y no presentar una textura rugosa e irregular (ASTM C805).



Figura 06: Esquema de martillo de Schmidt
Antonio Lozano GEOENGINEERING SERVICES & CONSULTING E.I.R.L

2.8. Método de Elementos Finitos

El método de elementos finitos (**MEF**) es un método numérico utilizado para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales, según la Revista Iberoamericana de Educación Matemática el método se basa en la división del dominio, cuerpo o estructura en elementos pequeños (elementos finitos) en donde se define la variable a calcular y sobre los que se aplica la aproximación (Martínez - Pañeda, 2016). El MEF considera a una estructura como un encaje de partículas de tamaño finito llamadas **elementos finitos**, mientras mayor número de elementos finitos, mayor aproximación a la realidad se obtendrá de cualquier modelo.

El proceso conlleva una caracterización y representación del comportamiento de cada elemento por separado para posteriormente ensamblar los mismos elementos consiguiendo como resultado el comportamiento global del sistema discretizado, estos elementos se interconectan unos entre otros en diversos puntos denominados nodos (Oñate, 1995). El proceso de conversión de la estructura en elementos finitos se denomina discretización o modelaje (figura 07).



Figura 07: Proceso de discretización.
Flores, Andrade, 2021

El método se desarrolló en la de cada de los 60 cuyo objetivo principal era el análisis de estructuras, y a lo largo de los años se ha transformado en la herramienta más utilizada para temas de ingeniería y ciencia (Martínez - Pañeda, 2016). El MEF es necesario que vaya ligado a un software o programa informático para obtener el máximo rendimiento del método; **MATLAB** es uno de ellos, cuyo programa se orienta en matrices con un lenguaje de programación propio (lenguaje M*) teniendo como habilidades la capacidad para manipular matrices y resolver ecuaciones matriciales, esto hace de MATLAB un programa idóneo para desarrollar un código de elementos finitos.

Un elemento finito es el subdominio de un gran dominio, el cual al conectarse entre sí forman un continuo o también denominado dominio físico. La representación de un dominio físico se denomina malla y esta malla es considerado por el MEF como una estructura formando por un conjunto de elementos, los cuales cuyos comportamientos se determinan a través de programas informáticos (MATLAB, SAP 2000, etc.) (Hutton, David, 1982).

La malla está conformada por elementos finitos que se interconectan por medio de puntos llamados nodos. **"Un nodo es la ubicación en el espacio donde se definen los grados de libertad los cuales representan los movimientos posibles de este punto debido a la carga de la estructura"** (Cortez, Sotomayor, 2007).

***Lenguaje M:** Idioma de programación creado por el editor de consultas Microsoft Power Query.

2.9. Análisis Modal

Se define al análisis modal como el proceso involucrado en someter a pruebas estructuras o componentes para determinar una descripción matemática de su dinámica y comportamiento ante vibraciones (Morocho Israel, Sarmiento Elisa, 2021). En sí este análisis es una técnica analítica de la dinámica de las estructuras, cuyo objetivo es estimar propiedades mecánicas como frecuencias, modos naturales, amortiguamientos, etc. En el ámbito ingenieril este análisis puede ser **teórico** o **experimental**, el primero se basa en métodos analíticos o simulaciones, el experimental en cambio se basa en ensayos y dispone de cuatro pasos: Excitación de la estructura, medición mediante acelerómetros, tratamiento digital y análisis de las señales y aplicación de modelos (CATEC, 2019).

A través del análisis modal se determinan modos de vibración, los cuales son indicadores de la respuesta estructural de cualquier tipo de edificación, estos indican la forma como va a responder la estructura durante un sismo, el primer modo de referencia por lo general hace referencia al buen o mal comportamiento sísmico. En las estructuras los modos de vibración dependen netamente de su masa y rigidez, y están gobernadas por las dimensiones de sus elementos (Aguar R., 2012) (Cevallos C., 2017).

Un **modo** es adimensional y representa la forma natural de vibración de la estructura, a cada modo le pertenece una frecuencia o un período diferente (Cevallos C., 2017).



Figura 08: Representación del análisis modal
Flores J. & Andrade R., 2021

2.9.1. Periodo de vibración

El periodo de vibración es el tiempo que transcurre dentro de un movimiento armónico ondulatorio, o vibratorio, para que el sistema vibratorio vuelva a su posición original considerada luego de un ciclo de oscilación (NEC, 2015). También existe el periodo de vibración fundamental que es el mayor periodo de vibración de la estructura en dirección horizontal. La edificación debe estar diseñada para que no entre en **resonancia** y así evitar el colapso de la misma, entendiéndose como resonancia cuando el periodo de vibración de las ondas sísmicas igualan en valores con el propio periodo de vibración de la edificación.

2.10. Análisis Espectral

Varias fuentes definen al análisis espectral como un examen de un rango de frecuencias o cantidades relacionadas, como la energía. Este análisis espectral se utiliza para determinar valores máximos en los desplazamientos y aceleraciones en cada modo de vibración por medio del espectro de diseño, este espectro representa el promedio de espectros de respuesta para diversos sismos, considerando condiciones o parámetros específicos a los códigos de cada región o país. El objetivo principal de este análisis es simular la conducta de una estructura sometida a fuerzas externas como los sismos.

2.10.1. Espectro de Diseño

“Un espectro para el diseño sísmico, es un valor utilizado en los cálculos de la ingeniería sísmica que mide la reacción de una estructura ante la vibración del suelo que la soporta (Castro & Pérez, 2016)”. Este al mismo tiempo debe satisfacer ciertos requisitos, ya que está considerado para diseñar nuevas estructuras o para evaluar la seguridad sísmica de las construcciones ya existentes, con la finalidad de que puedan resistir a sismos futuros (Chopra, 2014).

2.11. Derivas

La deriva o también conocida como distorsión de entrepiso es el desplazamiento horizontal relativo entre dos puntos colocados en la misma línea vertical, en dos niveles consecutivos de una estructura. La deriva de piso consiste **evaluar** los desplazamientos horizontales de un edificio sometido a cargas sísmicas. El SINAPRED (Sistema Nacional para la Prevención, Mitigación y Atención de Desastres) define a la deriva como “el cociente entre la diferencia de desplazamientos laterales de dos niveles consecutivos de la estructura entre la altura de dicho entrepiso”.

Roberto Rochel Awad en su libro titulado “Análisis y diseño sísmico de edificios” toma como punto muy importante este tema de la deriva, comentando que los límites de la deriva garantizan que frente a un evento telúrico leve la estructura se desplace tan poco que los elementos no estructurales como muros, divisiones, fachadas, etc. no sufran riesgo, y así garantizar la vida del ocupante de la edificación y ahorro en costos de reparación del mismo.

La NEC que define a la deriva como el “Desplazamiento lateral relativo de un piso - en particular por la acción de una fuerza horizontal - con respecto al piso consecutivo, medido en dos puntos ubicados en la misma línea vertical de la estructura. Se calcula restando del desplazamiento del extremo superior el desplazamiento del extremo inferior del piso”, exige que la deriva máxima para cualquier piso, no sea mayor al 2% si se trata de estructuras como Hormigón armado, estructuras metálicas y de madera, y no sea mayor al 1% si es una estructura de mampostería. (Ver tabla 8, “Valores de ΔM máximos, expresados como fracción de la altura de piso” de la NEC 2015).

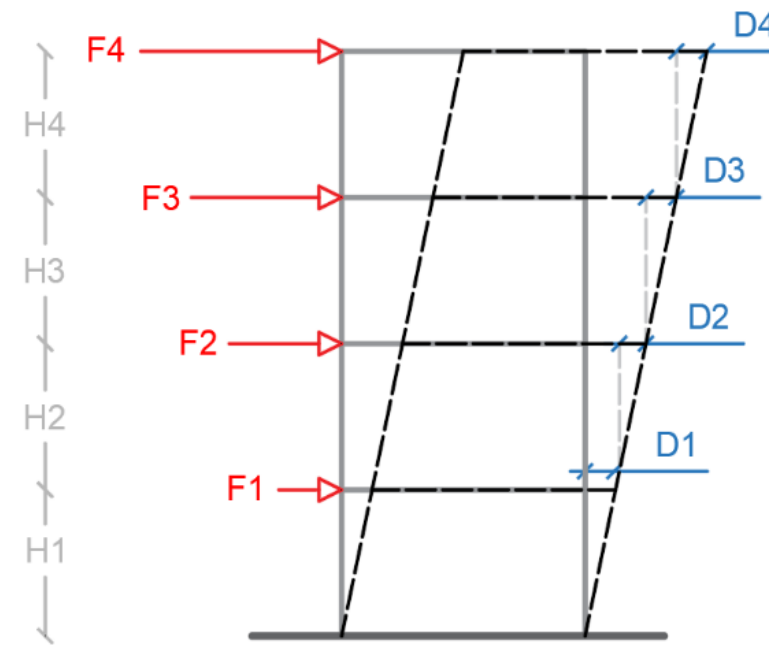


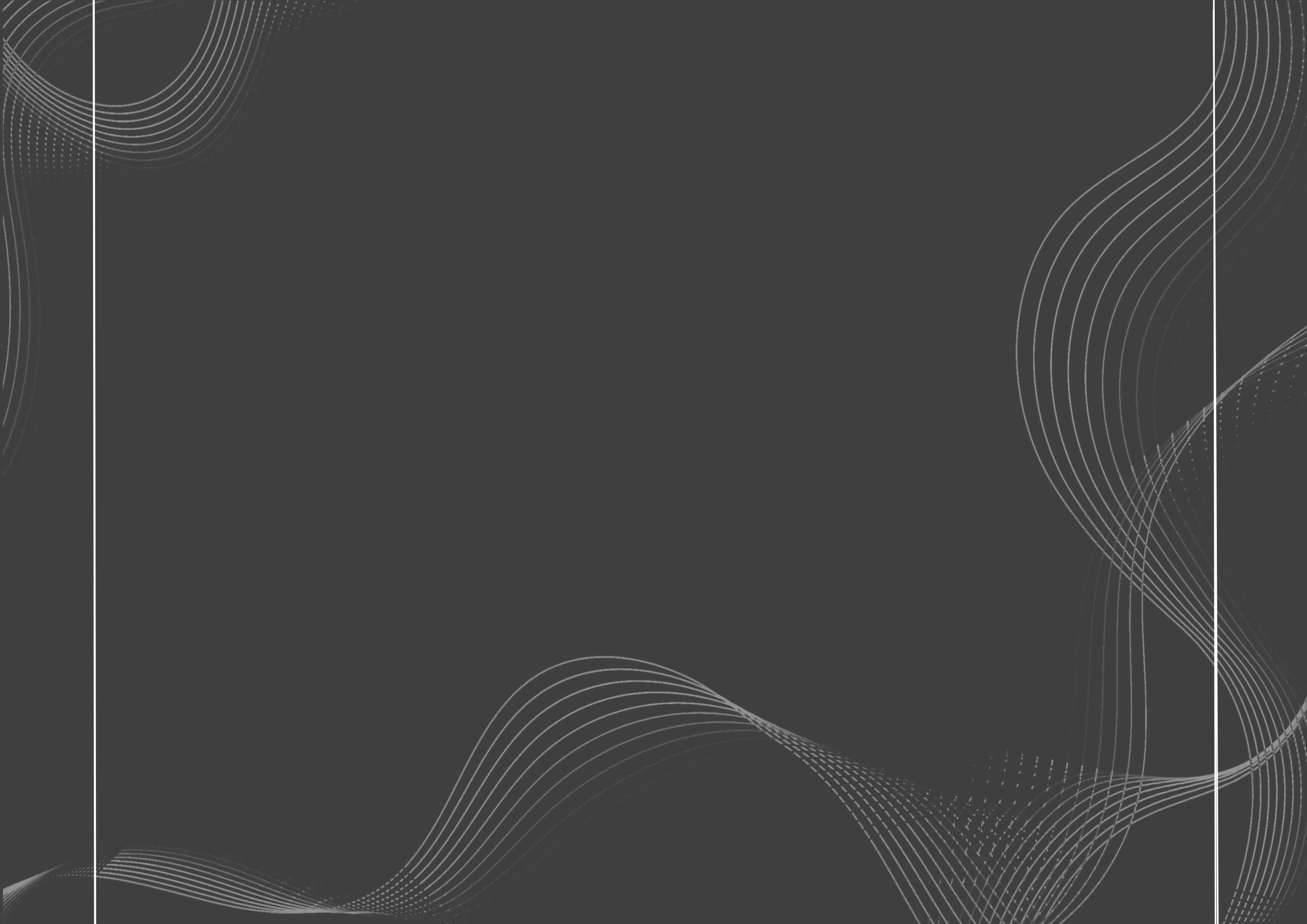
Figura 09: Representación de derivas
Flores J. & Andrade R., 2021

2.12. MEF Y Software MATLAB

Para el manejo del MEF, es imprescindible el uso de ordenadores o programas informáticos que aporten a un mejor análisis del mismo en la estructura de la edificación. La comunidad académica se ha inclinado a varios de estos softwares a lo largo de estos años, programas como ANSYS, ALGOR, COSMOS, Pro/MECHANICA, Maple, MATLAB, Sap2000, etc. y así un abanico extenso de propuestas llegan cada día para el uso del método (Martínez-Pañeda E., 2016).

Según Pañeda, Matlab, es la herramienta más apropiada para la práctica del MEF, este software es un programa de cálculo numérico con capacidad de manipular matrices y resolver ecuaciones matriciales. MATLAB se emplea en más de 5000 universidades alrededor del mundo (estadística analizada hasta el 2016), su versatilidad, su fácil uso y su fácil lenguaje de programación hace que vaya creciendo en popularidad en el área estudiantil y docente.

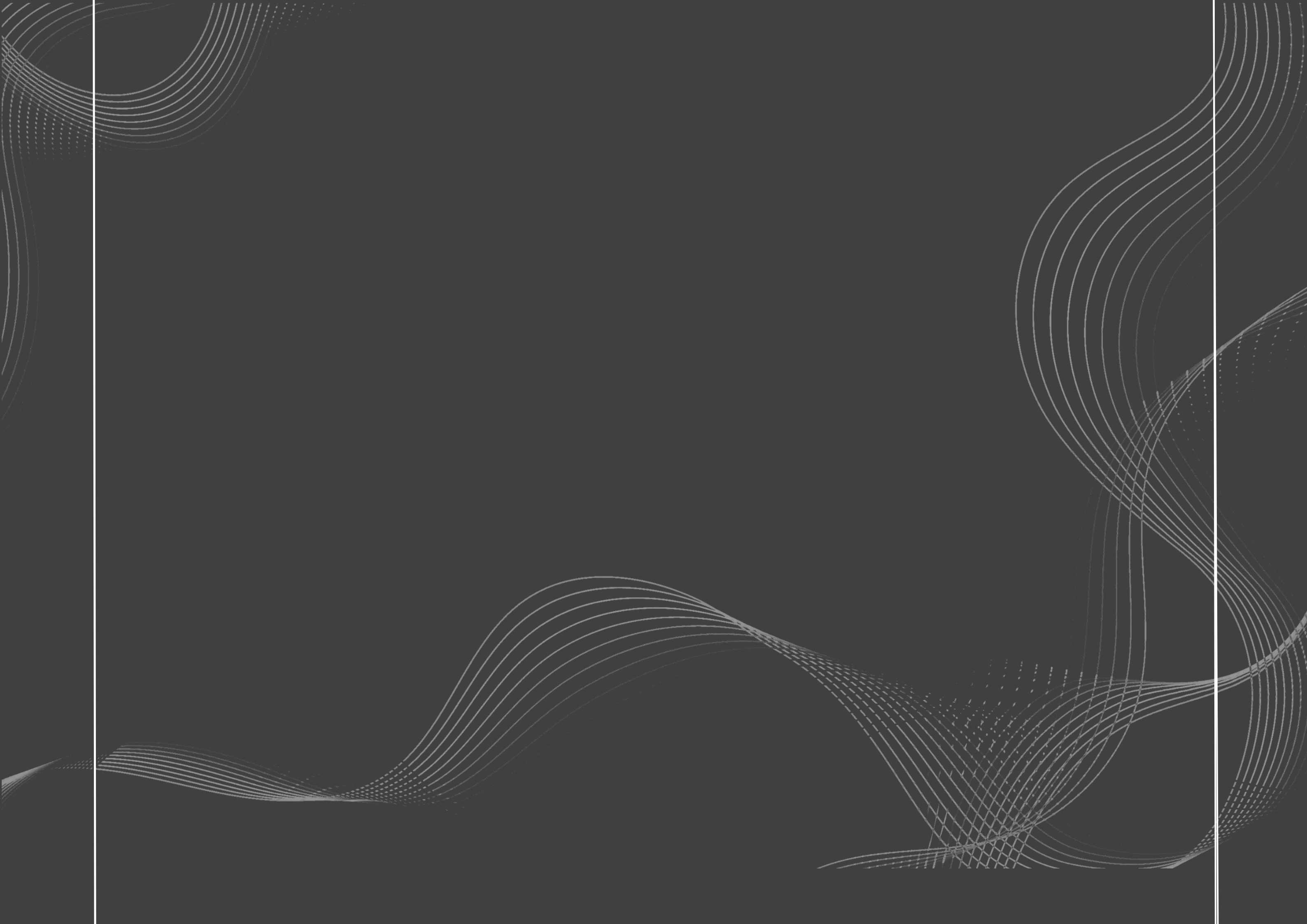
En el presente estudio realizado en la facultad de Psicología, el código de elementos finitos desarrollado se emplea para resolver el tema estructural en la misma edificación y poder responder a la hipótesis planteada “¿Puede un modelo numérico tridimensional proporcionar la información suficiente para determinar las áreas de menor riesgo de una edificación ante un sismo y de esta manera localizar zonas seguras que salven la vida de las personas?”. La versión utilizada del programa es R2017b y para facilitar una mejor comprensión y reutilización del programa, se muestran íntegramente en los anexos los códigos realizados correspondientes a cada enfoque.



CAPÍTULO 03

Metodología y Aplicación

03



3.1. METODOLOGÍA

Para la consecución de los objetivos del presente estudio se estableció un proceso sistemático conformado principalmente por tres etapas, las cuales nos ayudará a **demostrar la hipótesis planteada**:

1. Etapa 1 / RECOLECCIÓN DE DATOS

Esta etapa comprende las actividades preliminares como la recabación de datos e información necesarios para la elaboración del modelo estructural y su posterior análisis, dentro de estas actividades se encuentran:

El **levantamiento arquitectónico y estructural**, entendiendo por levantamiento a un conjunto de acciones dedicadas a determinar las características más notables de una edificación como la forma de los elementos, sus dimensiones, materialidad, etc. Para su posterior evaluación e investigación con el objetivo de generar un modelo tridimensional que permita analizar la obra (Almagro, 2004).

El levantamiento es una herramienta que permite obtener un conocimiento profundo del caso de estudio en el que se reúnen todos sus valores como geométricos, dimensionales, figurativos, estructurales, etc., por lo tanto, es un proceso de investigación en el que se integran además otros tipos de documentación como fotografías, planos y archivos (Almagro, 2004).

Así mismo, es importante extender el levantamiento arquitectónico a otras disciplinas como el tema estructural que tiene dos objetivos: definir y documentar cómo se configura el modelo estructural y además documentar las características materiales de los elementos estructurales las cuales permiten

realizar una evaluación y verificación de los cálculos establecidos en el diseño (Almagro, 2004).

La **realización de un ensayo no destructivo** aplicado a los elementos estructurales que permita medir la capacidad de resistencia del material como el hormigón, para verificar el estado actual de la edificación y así compararlo con lo planificado en el diseño.

Los ensayos no destructivos se han utilizado hace ya mucho tiempo y en varias ramas de la ingeniería, en el caso de la construcción se han utilizado mayoritariamente en estructuras de hormigón por afectar mínimamente su funcionamiento razón por la que se ha dado un uso relevante a este tipo de ensayos (Ortega y Ripani, 2007).

La realización de estos ensayos se divide en dos grupos de acuerdo al objetivo del estudio:

- El primer grupo de ensayos se realiza para establecer las propiedades de la materia, en este grupo se incluyen los ensayos de ultrasonido, esclerométricos, de resistividad del hormigón o potenciales electroquímicos de corrosión (Ortega y Ripani, 2007).
- El segundo grupo de ensayos sirven para determinar el comportamiento mecánico de las piezas, para esto se hace la extensometría para la medición de flechas o de las frecuencias naturales de vibración (Ortega y Ripani, 2007).

En el presente caso de estudio se realizará un ensayo no destructivo que pertenece al primer grupo y el instrumento utilizado será un esclerómetro con el fin de determinar la resistencia del hormigón.

2. Etapa 2 / REALIZACIÓN DEL MODELO TRIDIMENSIONAL

En la actualidad hay métodos numéricos que permiten analizar el comportamiento estructural de las edificaciones como el método de los elementos discretos o el de los elementos finitos, para lo cual con el pasar del tiempo se han implementado nuevas herramientas como programas de computadora que facilitan el procesamiento de la información, no obstante, por la gran cantidad de información el post proceso sigue siendo complejo (Muñoz, Peña, & Meza, 2012).

En esta etapa de proceso se realizará un análisis con todos los datos obtenidos en el preproceso mediante un programa de computadora (Matlab) que tiene la capacidad de hacer análisis estructurales estáticos, dinámicos, lineales, etc., así mismo estos programas pueden ejecutar el pre y post proceso incluyendo herramientas que permiten visualizar el modelo de manera dinámica y generar un modelo 3D haciendo que el usuario obtenga información física o digital como imágenes o figuras en varios formatos como jpg, tiff, etc. (Muñoz, Peña, & Meza, 2012).

3. Etapa 3 / OBTENCIÓN E INTERPRETACIÓN DE DATOS

Una vez que los datos hayan sido ingresados al software, se procede a realizar la última etapa en la que se obtienen e interpretan los datos de acuerdo a los objetivos e hipótesis planteados.

El post proceso sirve para examinar los resultados de manera dinámica obteniendo gráficos de tensiones, movimiento y deformaciones por cada proceso de simulación que se necesite (Bellés, P. M., & Legazpi, P. V. 2000).

Un caso particular que se relaciona con el proceso metodológico de la Facultad de Psicología mencionado en los párrafos anteriores se dio en Colombia, en donde el grupo de investigación *ESTRUCTURAS Y CONSTRUCCIÓN* realizó un análisis estructural con enfoque sísmico en viviendas piloto, con el objetivo de realizar una comparación de **vulnerabilidad sísmica** entre dos tipos de viviendas, (con cubiertas verdes y sin cubiertas verdes) en cuyo proyecto se realizó un estudio de dinámica estructural con **acelerómetros sísmicos** y modelaciones de elementos finitos (Oyala Luisa, et al., 2014).

La investigación fue realizada en la localidad de Soacha y relaciona varias de sus etapas con el análisis sísmico en la facultad de Psicología, presentando una metodología configurada por un **análisis técnico** previo al **análisis modal**. Este análisis técnico se describe a continuación como:

1. “Visitas técnicas de inspección para evaluar: sistema constructivo, dimensiones de la edificación, características de los materiales, verificación en campo de los pesos de las cubiertas verdes” (Oyala Luisa, et al., 2014).

Este punto tiene como finalidad la recabación de datos descriptivos (recolección de información básica) para un posterior análisis técnico de la edificación. Esta etapa es muy importante para el caso de estudio a continuación y también se aplicará en la facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca, siendo parte fundamental de la metodología para poder cumplir con los objetivos previstos.

En este caso de estudio se optó por una vivienda con un sistema constructivo prefabricado, que se conforma en paneles modulares de concreto encajados en perfiles de lámina de acero galvanizado, tiene 25,39 m2 de área construida y entre sus

componentes estructurales están: paneles modulares de concreto, perfiles de láminas de acero galvanizado doblado con calibre 22, soporte de cubierta en madera y tejas de fibrocemento, ver figura 08. (Oyala Luisa, et al., 2014).

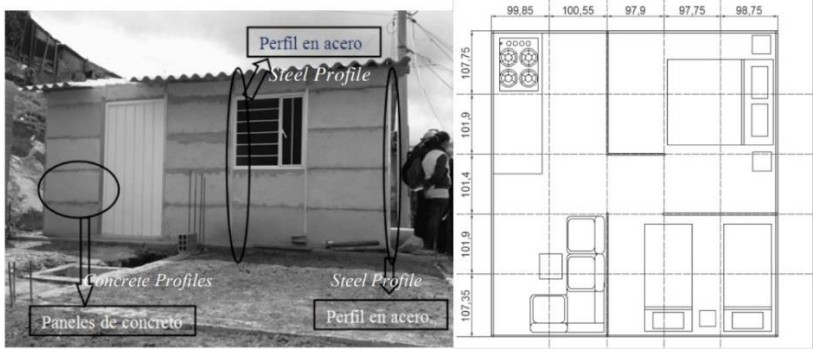


Figura 10: Imagen de vivienda tipo y Plano arquitectónico de la vivienda en centímetros
Revista de Ingeniería de Construcción (RIC), 2019

Haciendo una comparación con el edificio de Psicología de la Universidad de Cuenca, se ha observado que el aulario también tiene componentes estructurales como: losas de hormigón, diafragmas, sistema compuesto (columna y diafragma), laminas de madera y paneles modulares de concreto que se pueden observar en la siguiente figura:



Figura 11: Facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca, componentes estructurales
Flores J. & Andrade R., 2021

Parte de esta etapa conforman las características geométricas de la vivienda y la distribución de los perfiles de acero galvanizado (Ver figura 12 y 13) (Oyala Luisa, et al., 2014).

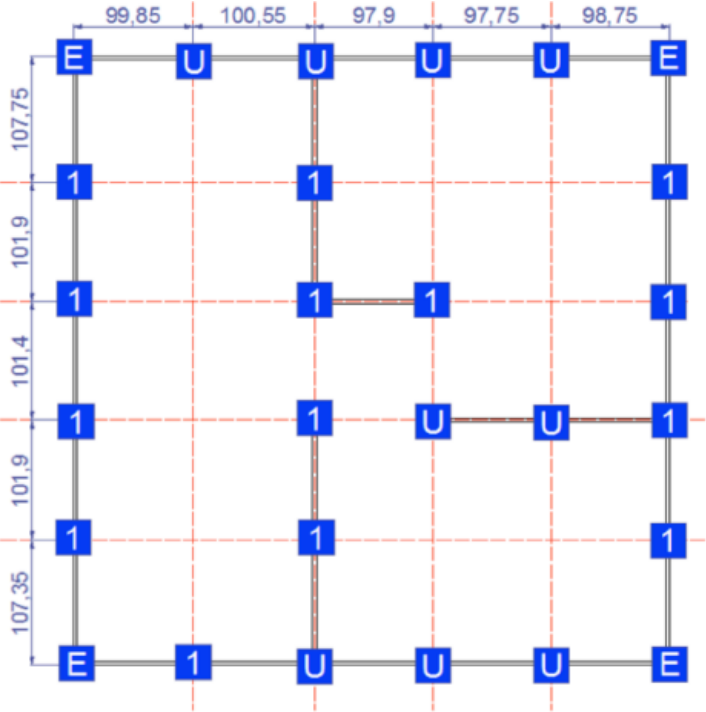


Figura 12: Distribución de los perfiles de acero galvanizado
Figura de revista ingeniería de construcción (RIC)

E: Perfil tipo esquinero
U: Perfil tipo unión simple
1: Perfil Tipo 1

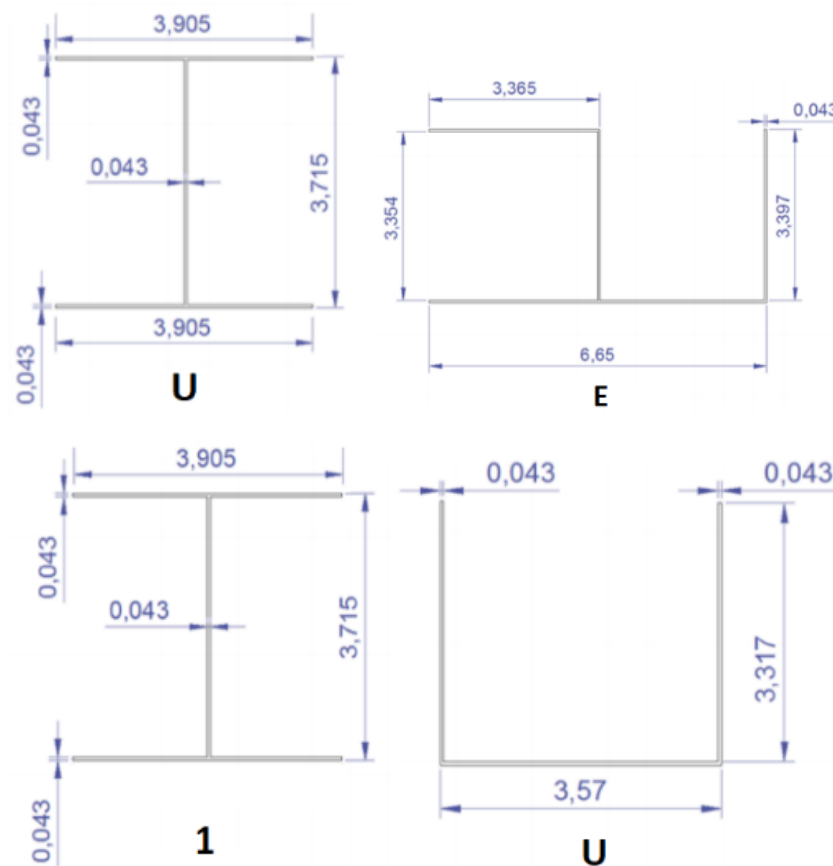


Figura 13: Características geométricas de los perfiles galvanizados
Revista ingeniería de construcción (RIC)

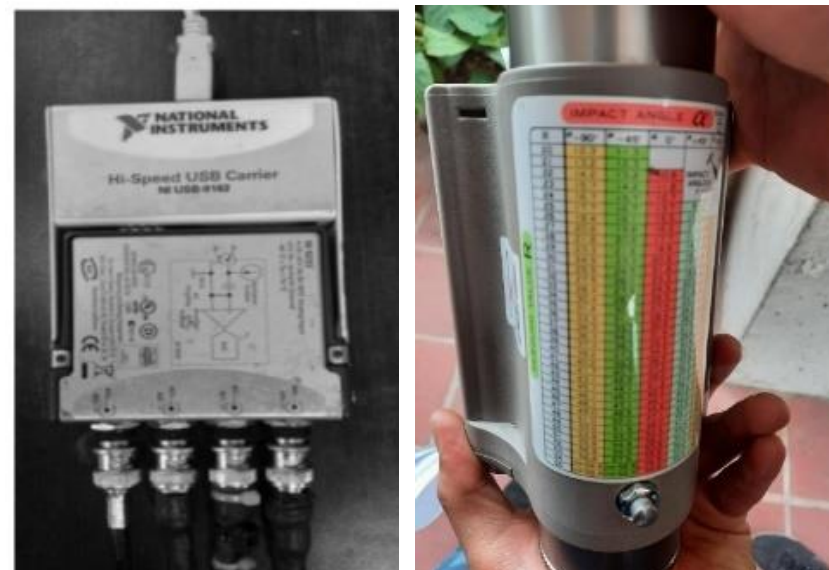
Las figuras anteriores y datos correspondientes a las mismas son de utilidad para la siguiente etapa en la metodología; la cual es el buscar información técnica (en base a instrumentos de medición) y más profunda para un mejor análisis y llegar a una mejor conclusión, en donde Oyala lo describe de la siguiente manera:

2. "Instrumentación de la vivienda con acelerómetros sísmicos para medición de vibraciones ambientales con y sin techos verdes (determinación de los periodos fundamentales de vibración)".

Este proceso es fundamental para conocer las características mecánicas de cualquier edificación, donde es necesario la recolección de datos con instrumentos de medición que ayudarán a una conclusión determinada respecto a la vulnerabilidad sísmica de la edificación.

Las mediciones para esta vivienda bajo estudio se llevaron a cabo tomando como base un sistema eléctrico, con instrumentos de alta sensibilidad como: **acelerómetros** sísmicos uniaxiales, **amplificadores** y filtros para los acelerómetros, sistema de adquisición de datos, computador portátil y soportes para instalación de los acelerómetros.

Todos los instrumentos de medición sirven con el objetivo principal de determinar los periodos fundamentales en la edificación a través del análisis de vibraciones, ya sea para el presente caso de estudio o en la facultad de Psicología.



Fotografía 03: Instrumento usado para el caso de estudio (Izquierda),
Esclerómetro usado para la facultad de Psicología (Derecha)
Revista de Ingeniería de Construcción (RIC), 2019 / Flores J. & Andrade R., 2021

PROCESO O ANÁLISIS

Esta etapa ya comprende un análisis profundo con los datos previamente adquiridos en los pasos anteriores, por lo general se dispone de un programa digital como Sap 2000, **Matlab**, u otros, estos nos aportarán con la capacidad de obtener resultados estructurales para poder llegar a una conclusión más profunda y técnica. Para el caso de estudio llevado en Colombia se ha descrito a este proceso de la siguiente manera:

3. "Modelación numérica de la edificación por el método de los elementos finitos y comparación de periodos estimados con el modelo vs. periodos medidos en campo".

Se realizó el proceso con la ayuda del programa **SAP2000**, en donde se destaca los siguientes aspectos durante el proceso de modelación de la vivienda (Oyala Luisa, et al., 2014). Estos **aspectos también se desarrollarán** en la investigación en la Facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca:

- **Creación de materiales** como concreto, acero y madera.
- **Determinación de pesos unitarios** de los materiales ya mencionados; concreto (22 kN/m³), acero (78 kN/m³) y madera (9 kN/m³).
- **Determinación del módulo de elasticidad** de los distintos materiales como; concreto (17872 MPa), acero (200.000 MPa) y madera (49000 MPa).
- **Cálculo de peso y masa** del sistema estructural, determinado por el modelo numérico de elementos finitos.
- **Carga sísmica**, considerada en combinación direccional sobre la vivienda al 100% del sismo en dirección Este-Oeste y 30% Norte-Sur. Los espectros de respuesta sísmica analizados se observan en la figura 15.

- **1.2D + E y 1.4D**, como combinación de carga para los esfuerzos en los elementos estructurales. (D=Carga muerta y E=los efectos de la carga sísmica).
- **Periodo** de la vivienda sin techo verde (0.087 segundos) y con techo verde (0.155 segundos).

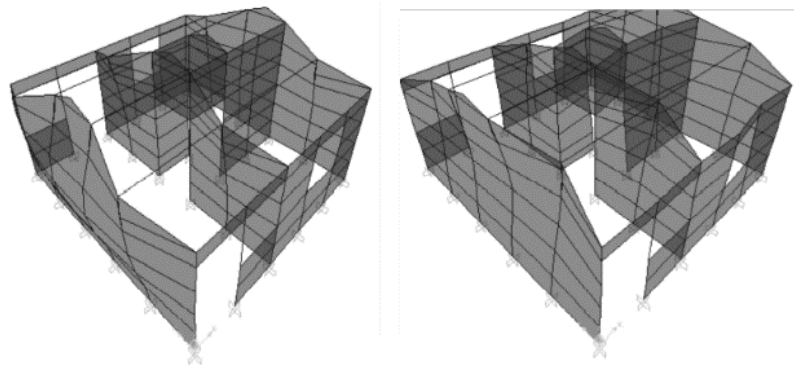


Figura 14: Modos de vibración sin techo verde y con techo verde respectivamente en Sap 2000
Revista de Ingeniería de Construcción (RIC), 2019

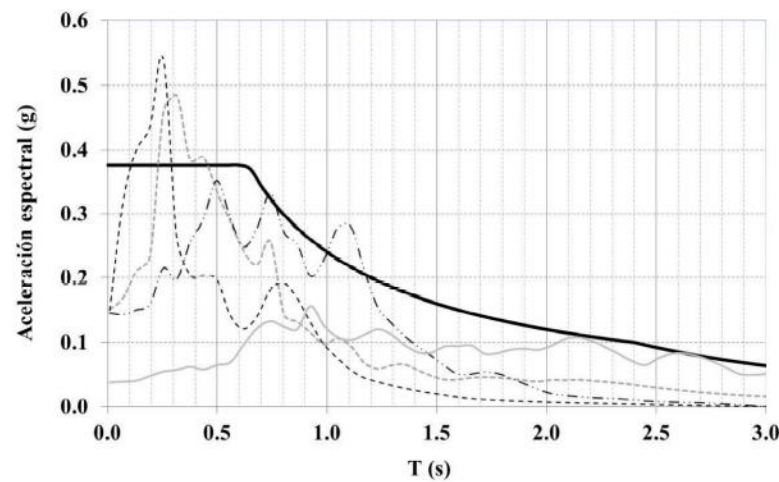


Figura 15: Espectro elástico de diseño para un coeficiente con respecto al crítico del 5%
Revista de Ingeniería de Construcción (RIC), 2019

- **Obtención de desplazamientos máximos** en nudos de la cubierta.

POSTPROCESO

4. “Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de la edificación con y sin techos verdes mediante: 1. índices de flexibilidad y 2. esfuerzos máximos inducidos por los movimientos sísmicos del terreno”.

Para esta etapa es necesario el uso suficientes imágenes que solventen las evaluaciones determinadas por los análisis previamente realizados, en esta etapa se llega observar temas como derivas, momentos, esfuerzos máximos, etc.

Se anexan imágenes relacionadas para este caso de estudio.

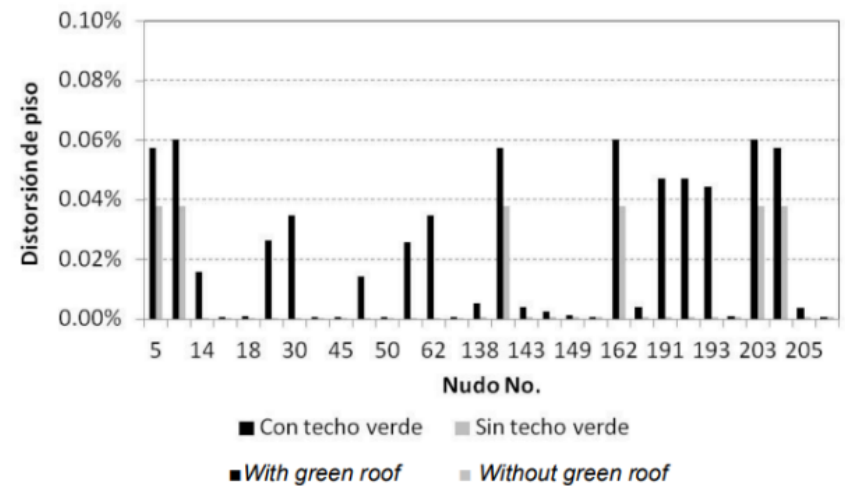


Figura 16: Comparación de la distorsión de piso (DERIVA) para la vivienda con y sin techo verde
Revista de Ingeniería de Construcción (RIC), 2019

A continuación, se muestran los gráficos correspondientes al modelo en SAP 2000 generados con los datos en las anteriores líneas.

Se concluyó con esta imagen que hay un aumento significativo de los desplazamientos cuando está el techo verde. Y se ha llegado a la conclusión que en ninguno de los dos casos (con techo verde y sin techo verde) de carga implican riesgo en la estabilidad y funcionalidad de la edificación analizada, teniendo en cuenta que no se supera el 1% de **deriva** (distorsión de entrepiso) establecida como valor límite en la NSR-10*. (Oyala Luisa, et al., 2014).

* **NSR-10_ Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente.**

Este caso de estudio fue llevado en la localidad de Soacha en Colombia y ha sido presentado con el propósito de fundamentar el presente trabajo de titulación, tanto en el proceso metodológico como en temas importantes como la vulnerabilidad sísmica, distorsión de piso o derivas, modos de vibración, esfuerzos, etc.

METODOLOGÍA

ETAPAS



1

Recolección de datos



2

Realización del modelo tridimensional



3

Obtención e interpretación de datos



Determinación de zonas vulnerables del edificio



Figura 17: Metodología aplicada para el presente caso de estudio
Flores J. & Andrade R., 2021

3.2. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

3.2.1. ETAPA 1 / RECOLECCIÓN DE DATOS

CARACTERÍSTICAS DEL EDIFICIO DE LA FACULTAD DE PSICOLOGÍA DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA

Características generales

El aulario de la Facultad de Psicología se ubica en Ecuador en la ciudad de Cuenca en el campus Central de la Universidad de Cuenca, es una obra arquitectónica diseñada por el arquitecto Javier Durán en el año 2011 y tiene 3450 m² de construcción.

El proyecto se emplaza en un terreno rectangular que se divide en tres partes, la primera y la tercera se destinaron para espacios de uso público, permitiendo tener amplias visuales del edificio. Su sistema estructural se compone por diafragmas y losas de hormigón armado, las crujeas están acopladas a un módulo adecuado en espacio y forma para usarlo como aula, misma dimensión que modula los demás espacios. Las columnas se encuentran retranqueadas con respecto a su cerramiento, es notoria también la horizontalidad del edificio, esto gracias a las losas y lamas de madera (Durán, 2012).

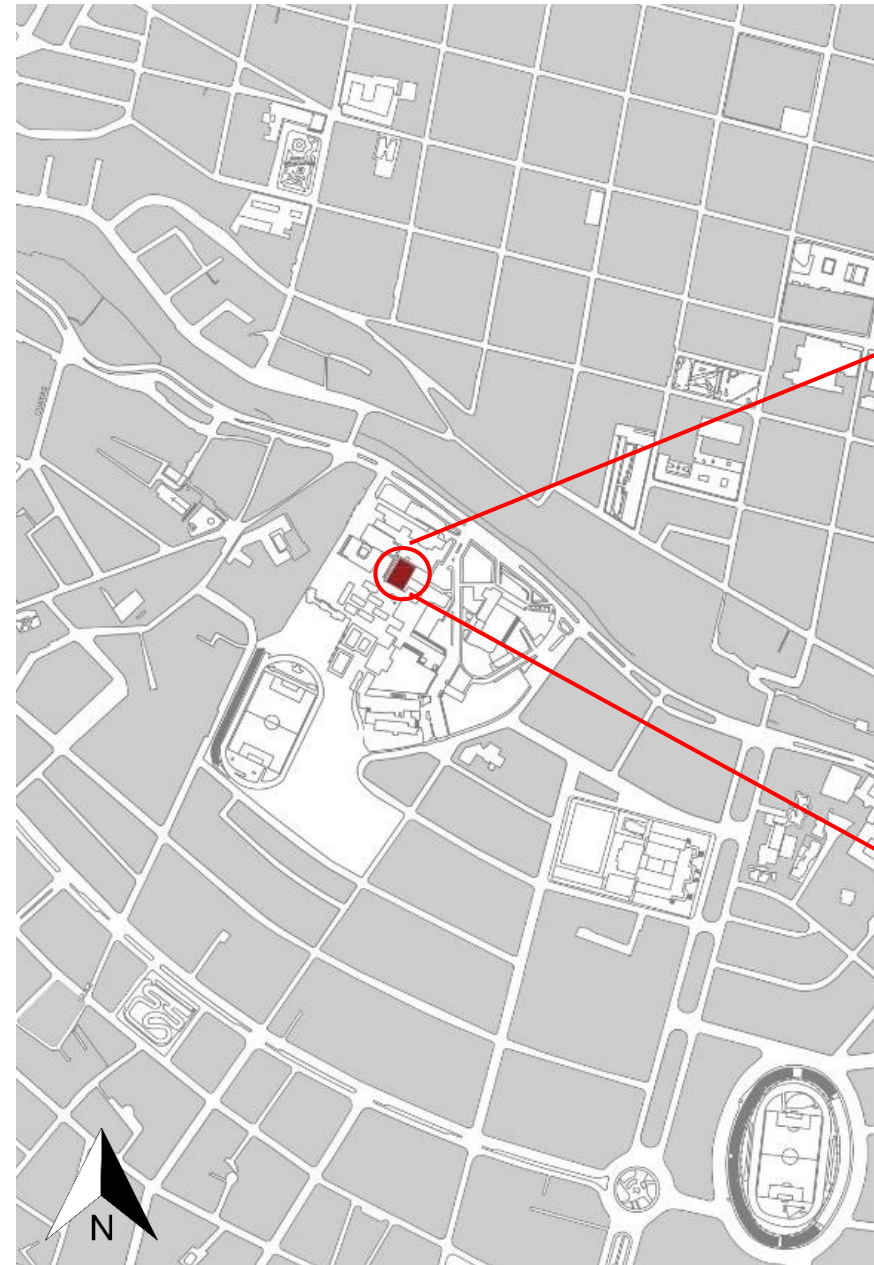


Figura 18: Ubicación, facultad de Psicología
Flores J. & Andrade R., 2021

Un espacio que caracteriza a este proyecto es el vestíbulo ubicado en planta baja que se encuentra abierto al acceso público y donde se encuentra la circulación vertical, así mismo se destaca que las aulas tienen una luz controlada gracias a las lamas de madera (Durán, 2012).

Características geométricas

El edificio de la Facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca tiene 40.50 metros de largo por 21.30 metros de ancho asentándose sobre un terreno de aproximadamente 865 metros cuadrados.



Fotografía 04: Facultad de Psicología
Sebastián Crespo, 2011



Fotografía 05: Facultad de Psicología
Sebastián Crespo, 2011

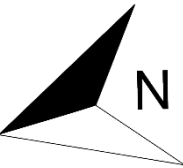
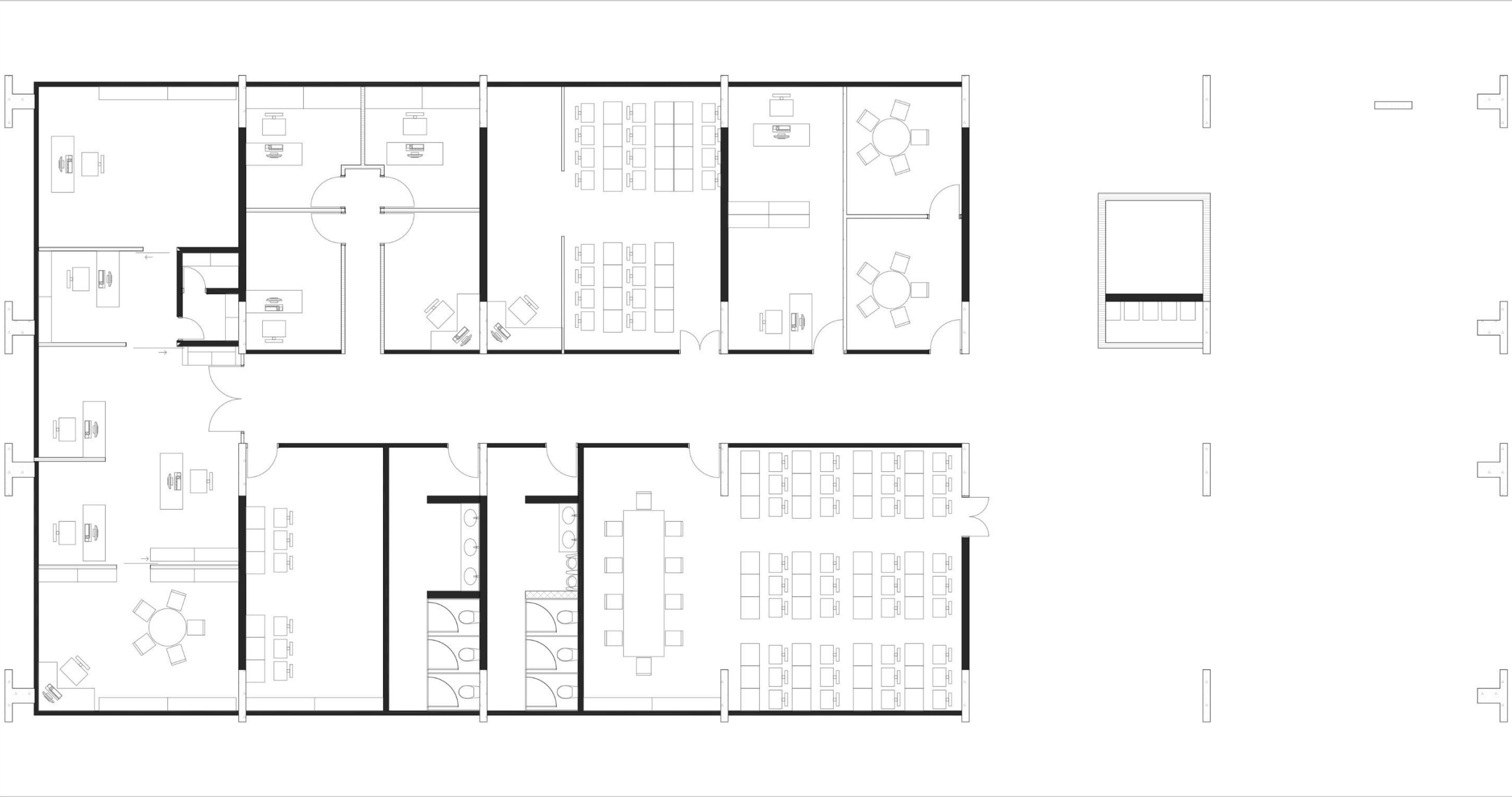


Figura 19: Planta Baja, Facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca
Flores J. & Andrade R., 2021

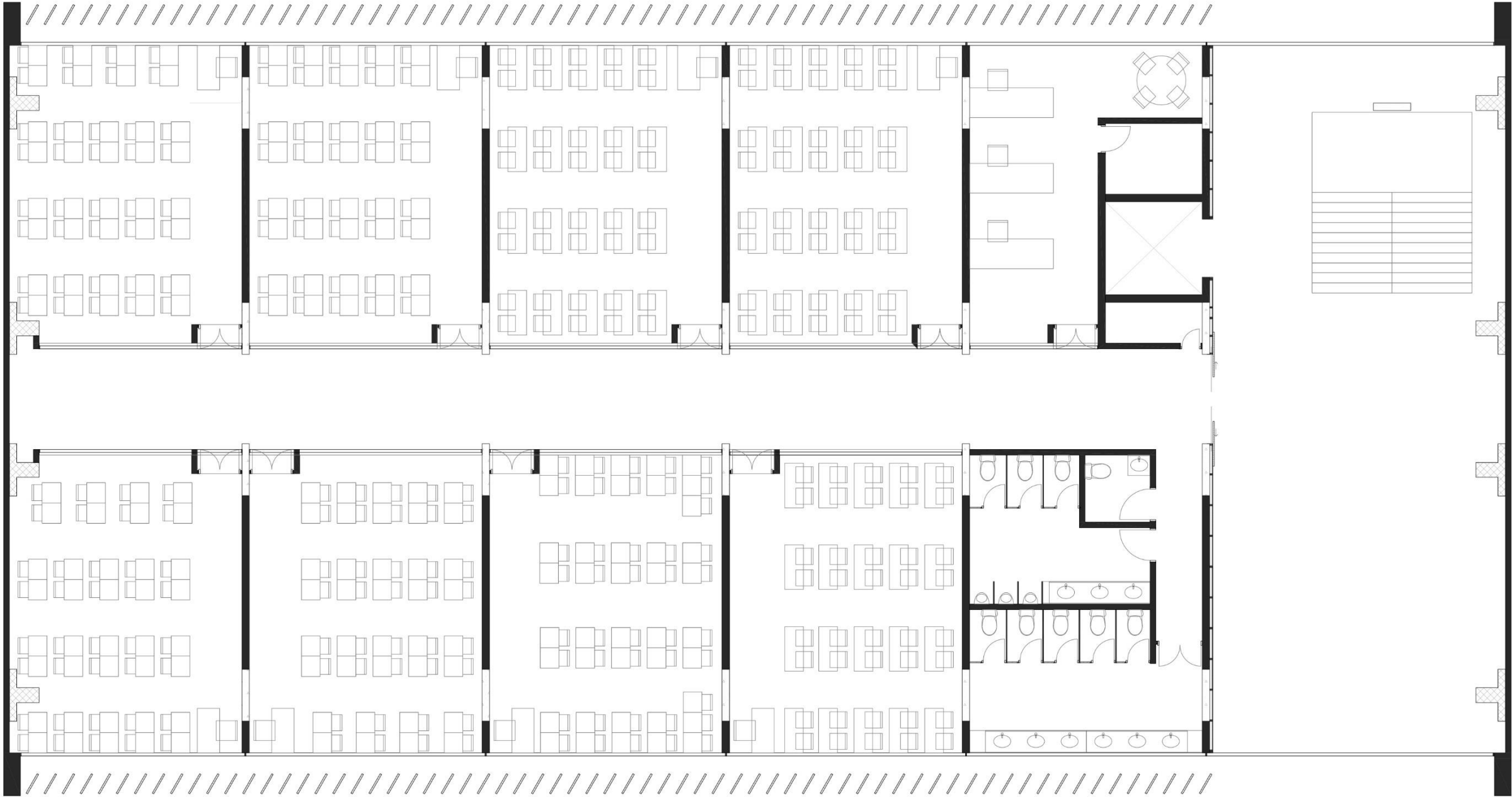


Figura 20: Plano de planta tipo, Facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca
Flores J. & Andrade R., 2021

La edificación está conformada por una planta baja y tres plantas altas con 3.74 metros de altura cada una y un remate en la cubierta de 0.45 metros sumando una altura total de 15.41 metros.



Figura 21: Elevación frontal, Facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca
Flores J. & Andrade R., 2021

Características estructurales

El edificio está conformado por 28 elementos estructurales verticales de los cuales 20 son diafragmas y 8 elementos compuestos por un diafragma y columna juntos, su materialidad es de hormigón armado y sus dimensiones se presentan a continuación:

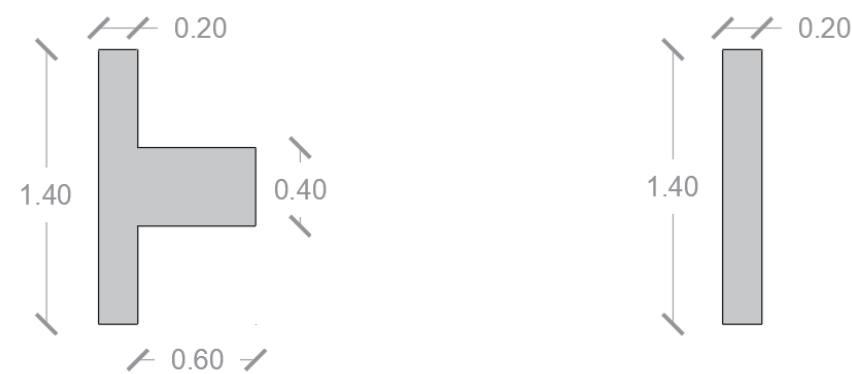


Figura 22: Elemento compuesto por diafragma -columna y diafragma.
Flores J. & Andrade R., 2021

Los elementos compuestos están ubicados en los extremos de la edificación mientras que los diafragmas están distribuidos a lo largo de la planta.

ENSAYO NO DESTRUCTIVO

Como se mencionó en la metodología a aplicarse en este estudio, es necesario realizar un ensayo no destructivo sobre la estructura de hormigón de la edificación para obtener datos fundamentales que permitan evaluar su estado actual como la resistencia del material (hormigón).

Este ensayo pertenece a un primer grupo de ensayos que sirven para establecer las propiedades de los materiales como: de ultrasonido, esclerométricos, de resistividad del hormigón o potenciales electroquímicos de corrosión (Ortega y Ripani, 2007).

Al ser la edificación de hormigón armado y para el fin de este estudio es necesario conocer la resistencia del material, por lo que para realizar el ensayo se utilizará el instrumento denominado esclerómetro.

El método esclerométrico sirve para medir la dureza superficial del hormigón, este instrumento tiene un mecanismo que consiste en golpear y rebotar sobre la superficie del material con cierta energía la misma que se recupera al rebotar y arroja un índice de dureza superficial el que se cuantifica con el "Índice Esclerométrico" que tiene un rango entre 20 y 50 (Ortega y Ripani, 2007).

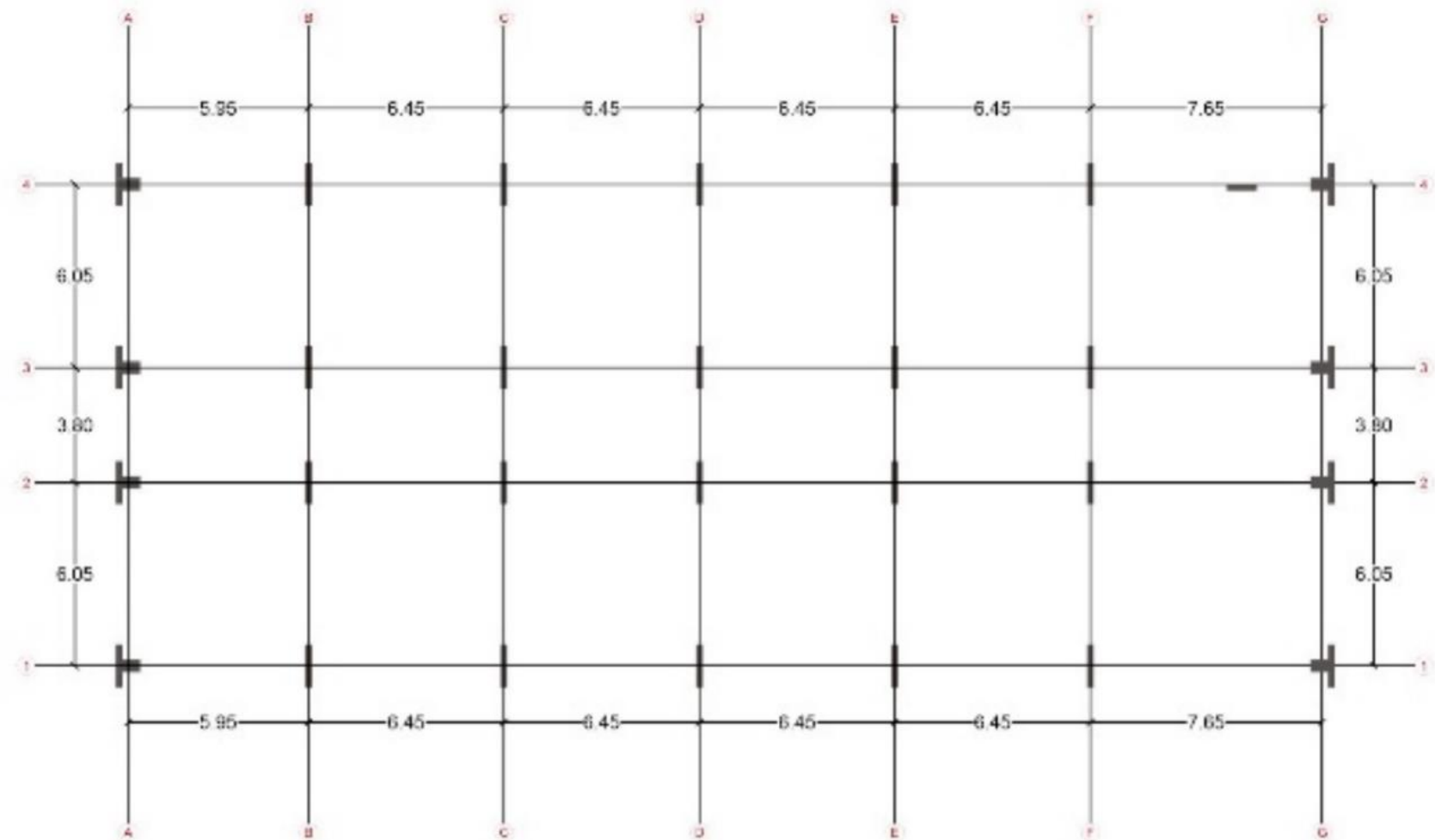


Figura 23: Plano de ejes y columnas
Flores J. & Andrade R., 2021



Figura 24: Sección longitudinal a través del martillo mostrando sus componentes
Lozano, 2014

Para realizar el ensayo se debe posicionar el martillo perpendicularmente a la superficie, se dispara el vástago o punzón de impacto empujando el martillo hacia la superficie de ensayo, finalmente leer el resultado que arroja y anotar el valor de rebote (Lozano, 2014).

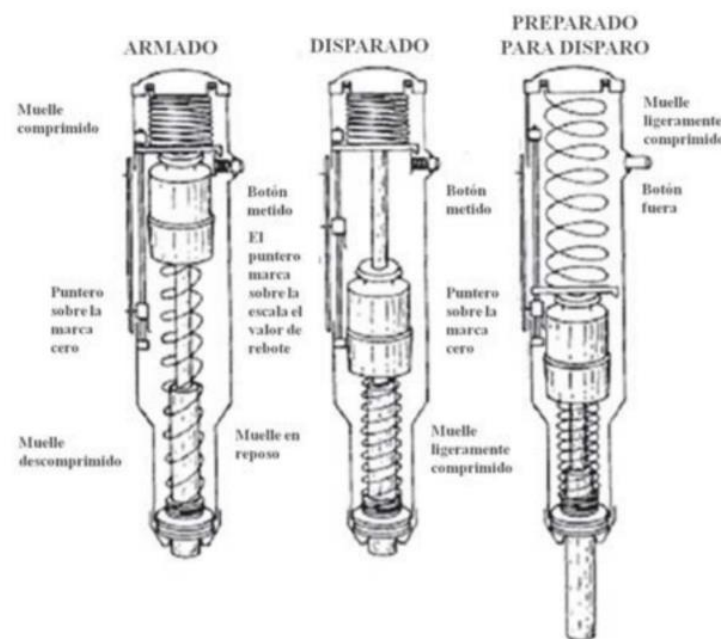


Figura 25: Principio de funcionamiento del martillo
Lozano 2014

Para la realización del ensayo es necesario encontrar una superficie lisa, sin poros y humedad que afecten los resultados, caso contrario deben ser alisadas usando una piedra abrasiva, así mismo el espesor mínimo del elemento sometido al ensayo debe tener un espesor mínimo de 10 cm (González y Alloza, 2013).

Una vez que el esclerómetro haya sido probado y calibrado se procede a realizar los disparos, para esto se sujeta el instrumento de manera firme y perpendicular a la superficie de ensayo, se deben realizar al menos 9 disparos para lo cual se dibuja una especie de cuadrícula sobre la superficie con una separación entre disparo y disparo no menor a 2.5 cm ni a 2.5 cm del borde del elemento estructural (González y Alloza, 2013).

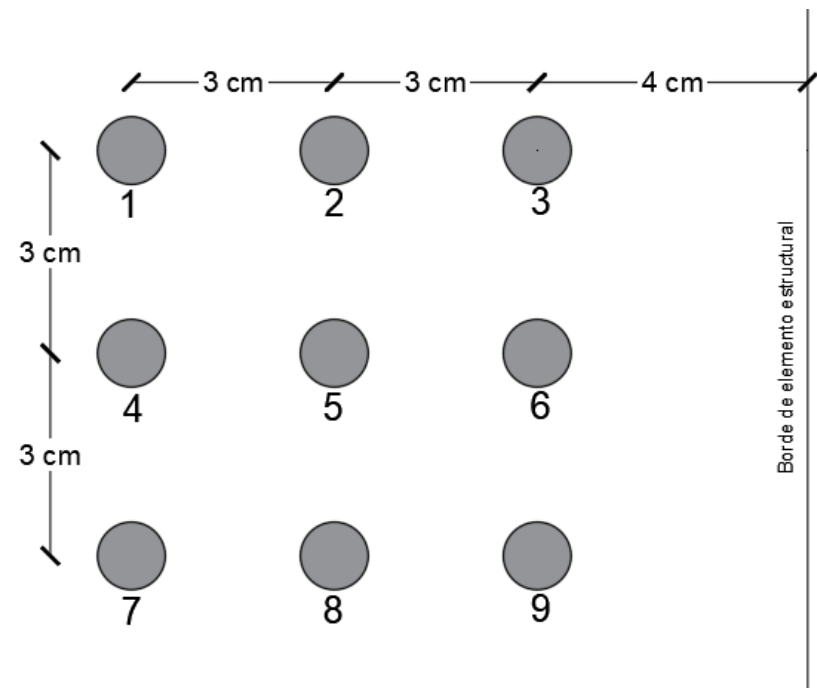


Figura 26: Puntos de muestra para ensayo esclerométrico
Flores J. & Andrade R., 2021

Cuando se haya obtenido los resultados de todas las muestras se obtiene la mediana de todas las lecturas, se toma en cuenta la posición del esclerómetro, en este caso horizontal, para seguir las instrucciones del fabricante. De todos estos datos, si más del 20% de resultados difieren con la mediana en más de seis unidades el ensayo debe realizarse nuevamente (González y Alloza, 2013).



Fotografía 06: Principio de funcionamiento del martillo
Flores J. & Andrade R., 2021

En este estudio se realizó la medición de los 28 elementos estructurales del edificio de la Facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca en dos de los cuatro pisos obteniendo los siguientes resultados:

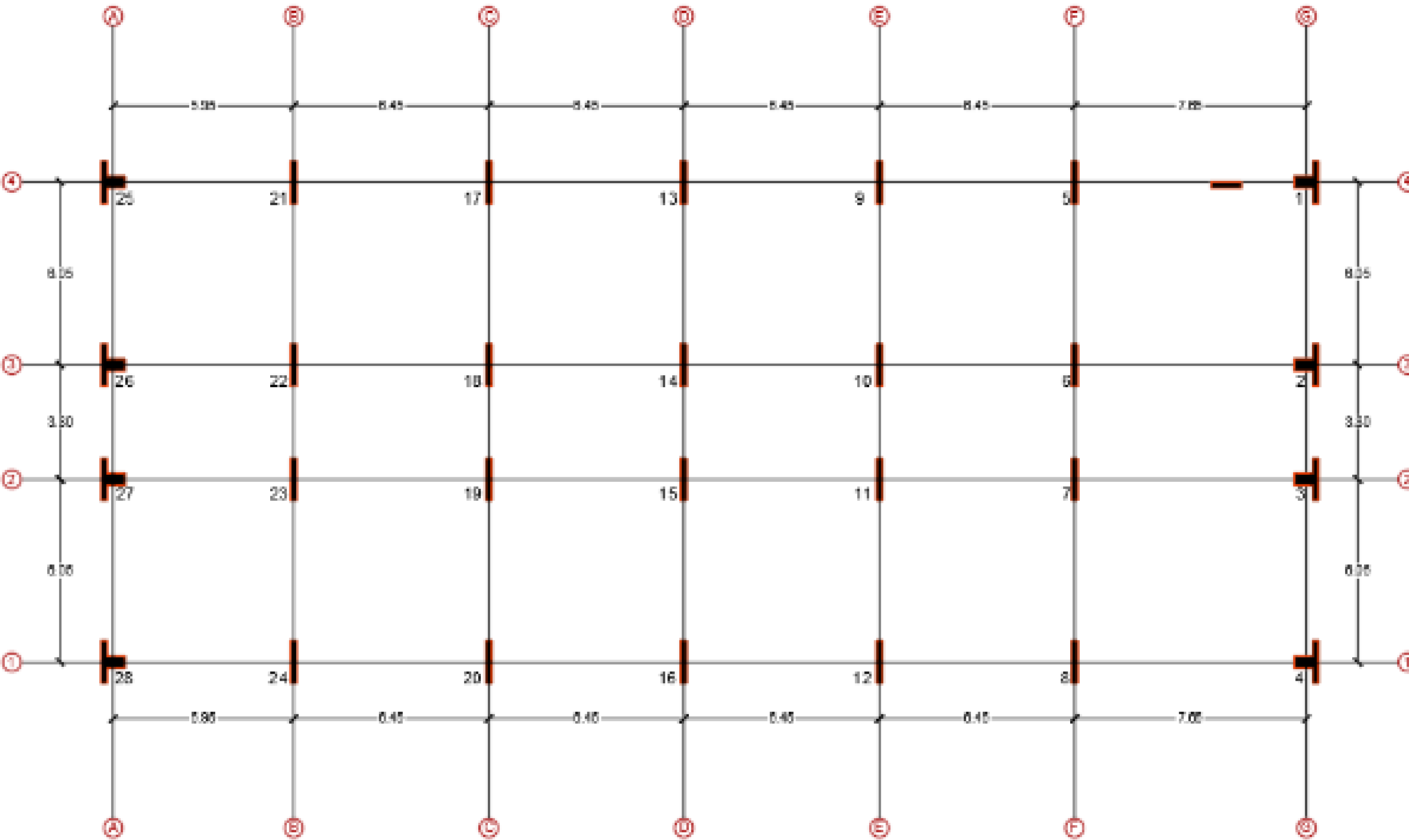


Figura 27: Numeración de columnas
Flores J. & Andrade R., 2021

Planta Baja

N° de columna	Valor menor y mayor (rebotes)	Media	Cumple con diferencia menor a 6 unidades
01	35 - 38	36.90	SI
02	36 - 39	37.70	SI
03	36 - 40	38.40	SI
04	37 - 40	38.10	SI
05	37 - 41	38.90	SI
06	37 - 40	38.30	SI
07	38 - 40	38.90	SI
08	37 - 41	38.80	SI
09	37 - 40	38.30	SI
10	37 - 41	39.10	SI
11	Sin acceso	-----	----
12	35 - 40	37.70	SI
13	37 - 41	38.60	SI
14	38 - 41	39.40	SI
15	37 - 41	39.10	SI
16	37 - 41	39.1	SI
17	37 - 41	39.10	SI
18	37 - 41	39.00	SI
19	37 - 41	38.70	SI
20	37 - 41	38.75	SI
21	38 - 41	39.40	SI
22	37 - 41	38.70	SI
23	37 - 40	38.40	SI
24	38 - 42	39.60	SI
25	37 - 41	39.00	SI
26	37 - 41	38.90	SI
27	37 - 41	38.60	SI
28	37 - 41	38.80	SI

Tabla 01: Rebotes en planta baja
Flores J. & Andrade R., 2021

Primera planta alta

N° de columna	Valor menor y mayor (rebotes)	Media	Cumple con diferencia menor a 6 unidades
01	35 - 40	38.00	SI
02	37 - 41	38.30	SI
03	Sin acceso	-----	----
04	38 - 41	39.30	SI
05	Sin acceso	-----	----
06	36 - 40	37.90	SI
07	37 - 41	38.70	SI
08	Sin acceso	-----	----
09	37 - 40	38.10	SI
10	36 - 39	37.40	SI
11	36 - 41	38.20	SI
12	34 - 40	38.20	SI
13	38 - 41	38.80	SI
14	37 - 41	38.60	SI
15	36 - 41	38.30	SI
16	37 - 40	38.20	SI
17	37 - 41	38.50	SI
18	38 - 40	39.70	SI
19	38 - 40	39.00	SI
20	37 - 40	38.40	SI
21	37 - 41	38.30	SI
22	37 - 41	38.30	SI
23	37 - 39	37.80	SI
24	37 - 40	38.20	SI
25	35 - 41	38.00	SI
26	37 - 40	38.20	SI
27	37 - 40	38.10	SI
28	36 - 40	38.00	SI

Tabla 02: Rebotes en primera planta alta
Flores J. & Andrade R., 2021

Una vez que se realizaron los promedios de planta baja y planta alta se obtuvo un valor de resistencia del hormigón $f'c = 33 \text{ MPa}$ que se utilizará como dato importante en el análisis estructural de la edificación.

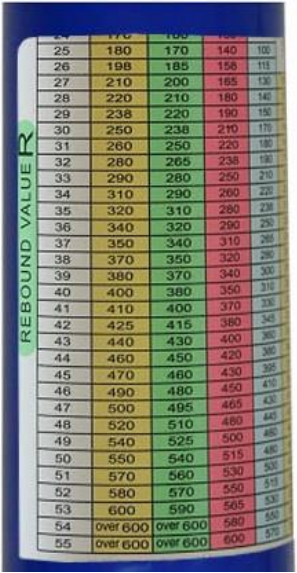


Figura 28: Tabla de equivalencias de rebotes y resistencias
Flores J. & Andrade R., 2021

3.2.2. ETAPA 2

ANÁLISIS SÍSMICO
MODELO E INGRESO DE DATOS A MATLAB

MATLAB se basa en matrices que expresan matemáticas computacionales, el programa facilita la visualización de los datos y obtención de información a partir de gráficos integrados. Se basa en toolboxes preinstaladas para trabajar con algoritmos esenciales para un mejor dominio.

Una vez realizado el preproceso con la recolección de las características geométricas, estructurales, materiales, etc., y llevado a cabo el ensayo no destructivo para conseguir la resistencia del hormigón, se procede a realizar el análisis sísmico con la información recaudada al software Matlab que nos permitirá simular el comportamiento sísmico del edificio de la facultad de psicología.

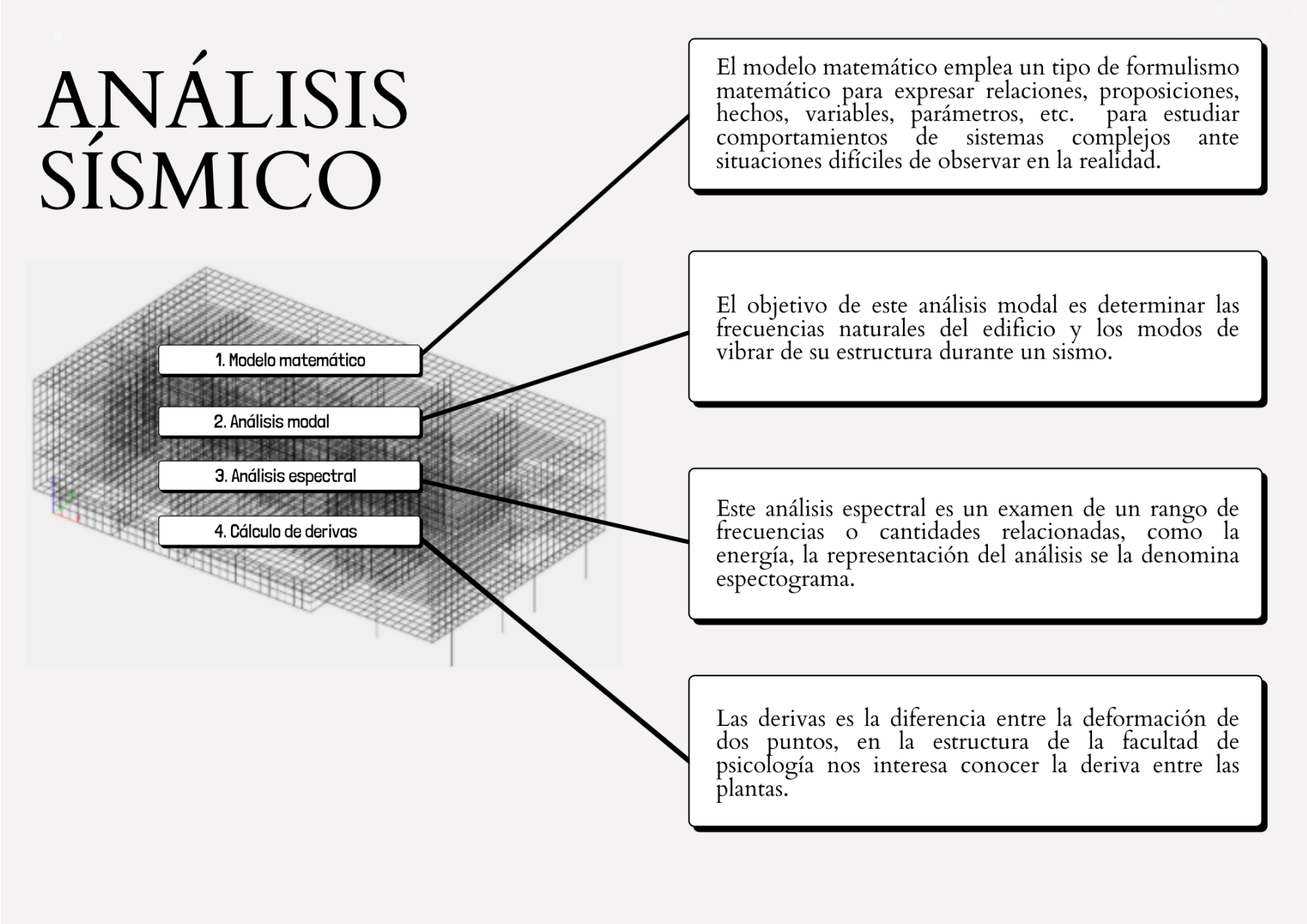


Figura 29: Etapas del análisis sísmico.
Flores J. & Andrade R., 2021

MODELO MATEMÁTICO

Con la información técnica recogida en campo, más los planos del edificio, se procedió a dibujar la edificación creando una capa denominada “Frames” con líneas para los elementos estructurales como vigas columnas y con planos los elementos superficiales como losas y muros en una capa llamada “Shell” en el programa AutoCAD, vale indicar que para el dibujo de líneas se utilizó la herramienta “Línea” y para las superficies la herramienta 3DFace.

Según Cornejo y Zúñiga, la creación del modelo matemático necesita de un proceso que conlleva 4 fases:

Idealización del modelo

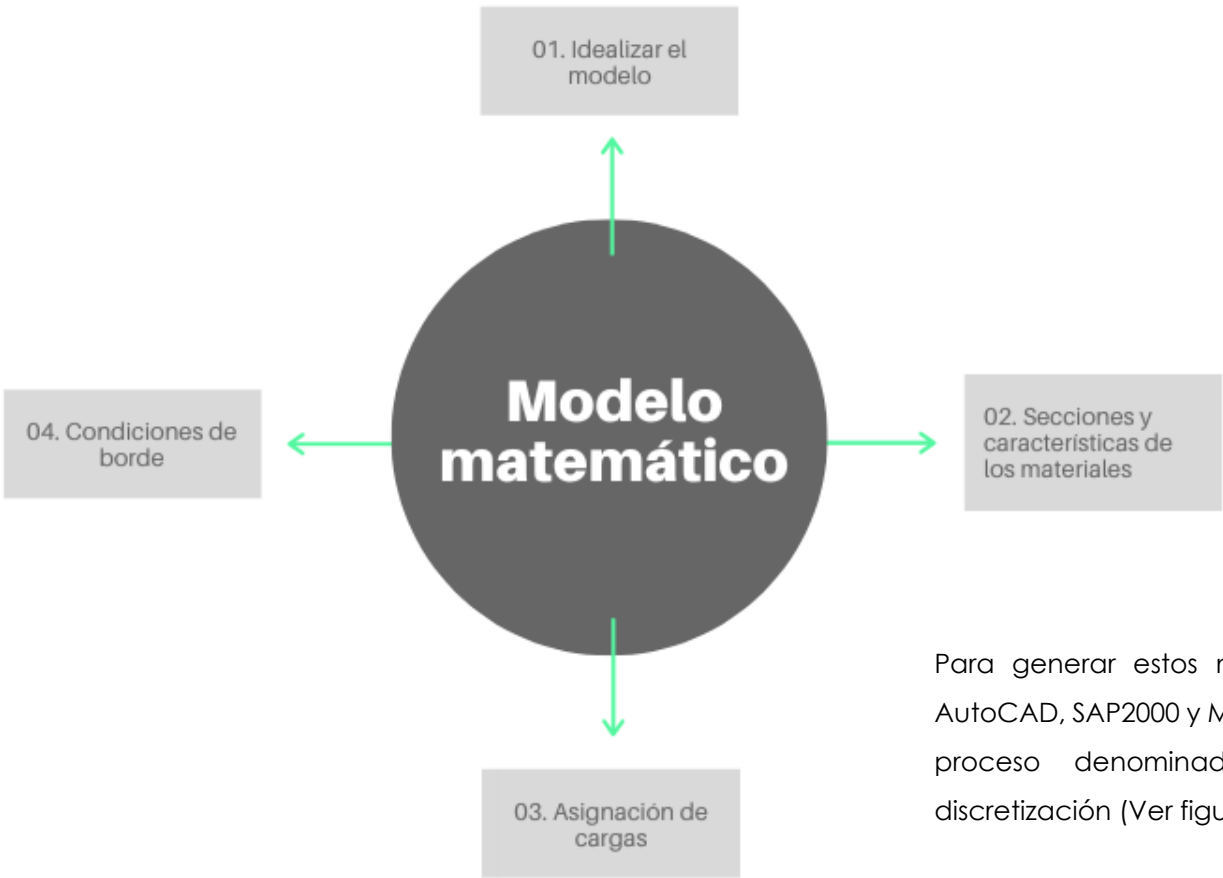
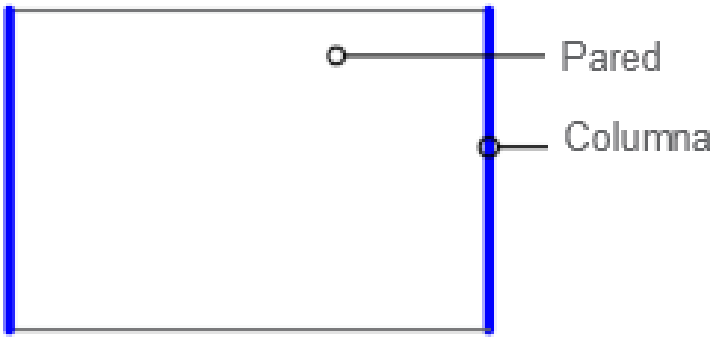


Figura 30: Fases del modelo matemático
Flores J. & Andrade R., 2021

Para esta fase es importante recalcar el uso del método de elementos finitos (MEF), en el cual se simplifican las formas de la estructura de la edificación guardando los rasgos característicos y las propiedades de la configuración arquitectónica. El MEF es definido por Frías en 2001 como “la división de una estructura en un número finito de elementos, los cuales se interconectan por medio de nodos”.

El uso de softwares es muy importante para este análisis sísmico a realizarse, debido a que ellos son el puente para poder generar la simulación del comportamiento de cualquier edificación.

Para generar estos modelos se han usado las herramientas AutoCAD, SAP2000 y Matlab. En el programa SAP2000 se realizó el proceso denominado por Cortez & Sotomayor como discretización (Ver figura 35).



Elemento bidimensional

1	2	3	4
•	•	•	•
5	6	7	8
•	•	•	•
9	10	11	12
•	•	•	•

Gráfica de nodos

1	2	3
4	5	6

Gráfico de elementos

Figura 31: Proceso de discretización
Flores J. & Andrade R., 2021

Una vez que se han establecido las capas tanto para columnas y vigas, como para muros y losas, se establece el tamaño de un módulo en el que todas las líneas y planos pueden dividirse en segmentos del mismo tamaño y sus intersecciones sean en el mismo punto creando Nodos y Elementos. Para este estudio se estableció un módulo de 0.80m x 0.80 m para todos los elementos.

Con la edificación ya dibujada, separada en capas y con el módulo definido, se exporta el dibujo en formato DXF para poder importarlo en el programa Sap2000 en el que se realizará la división de los elementos estructurales y no estructurales con la medida de 0.80m. Tomando en cuenta que la edificación se conforma por distintos elementos que tienen características geométricas, mecánicas, materiales diferentes y propiedades distintas, en el programa Sap2000 se procede a generar grupos que son los siguientes:

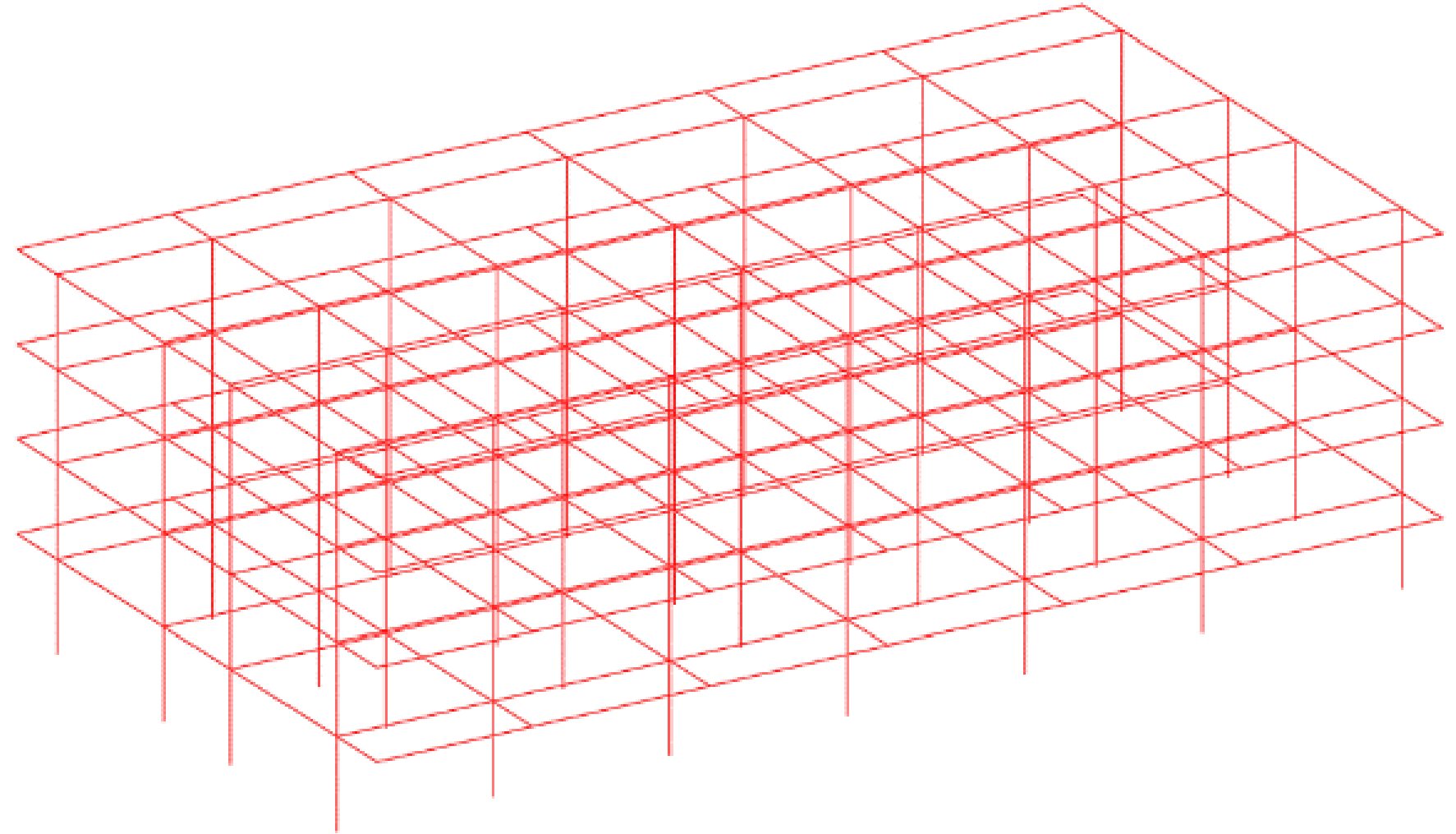


Figura 32: Modelado en AutoCAD
Flores J. & Andrade R., 2021

Columnas exteriores: Grupo de elementos estructurales (verticales) compuestos por un diafragma y una columna que se ubican en los extremos de la edificación.

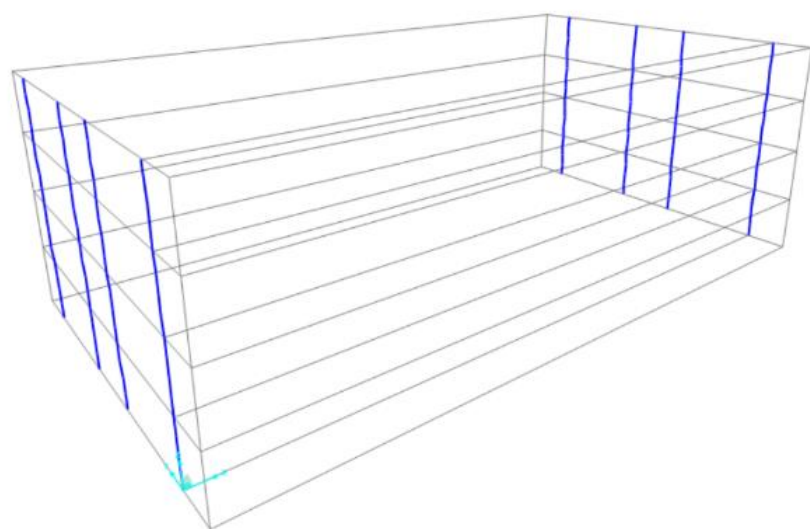


Figura 33: Columnas exteriores, Sap2000
Flores J. & Andrade R., 2021

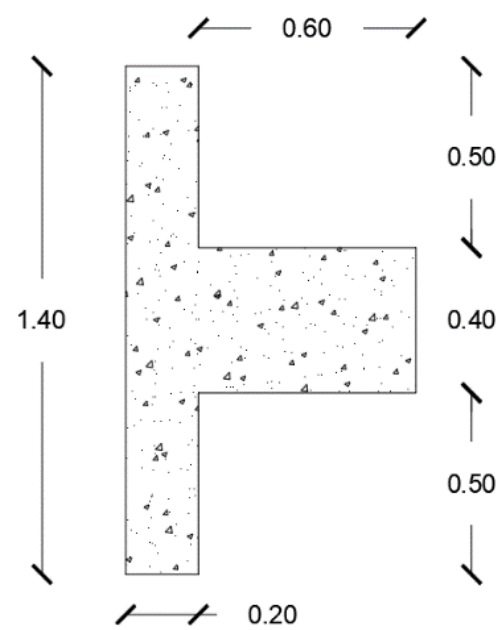


Figura 34: Estructura vertical compuesta (diafragma y columna)
Flores J. & Andrade R., 2021

- **Columnas interiores:** Grupo de diafragmas o elementos lineales en dirección vertical ubicados al interior de la edificación

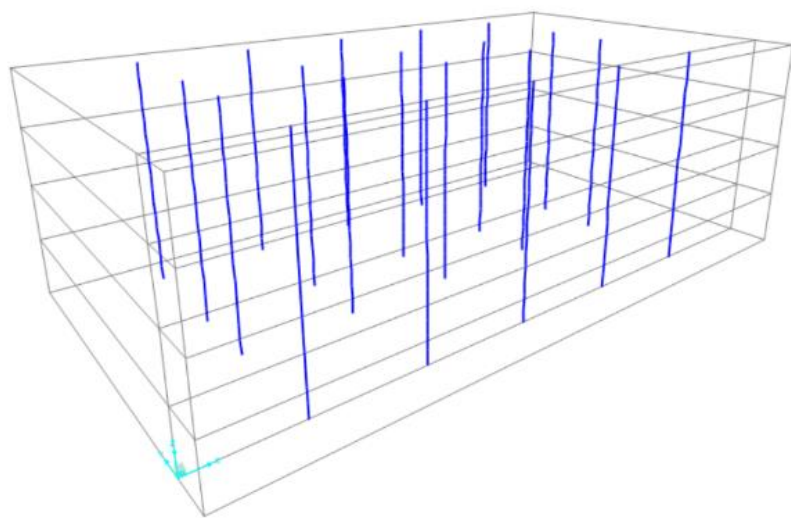


Figura 35: Columnas interiores, Sap2000
Flores J. & Andrade R., 2021

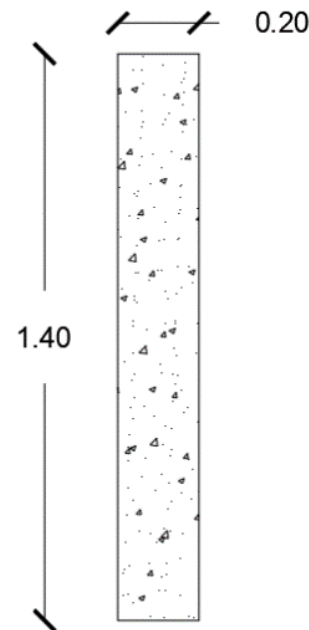


Figura 36: Estructura vertical (diafragma)
Flores J. & Andrade R., 2021

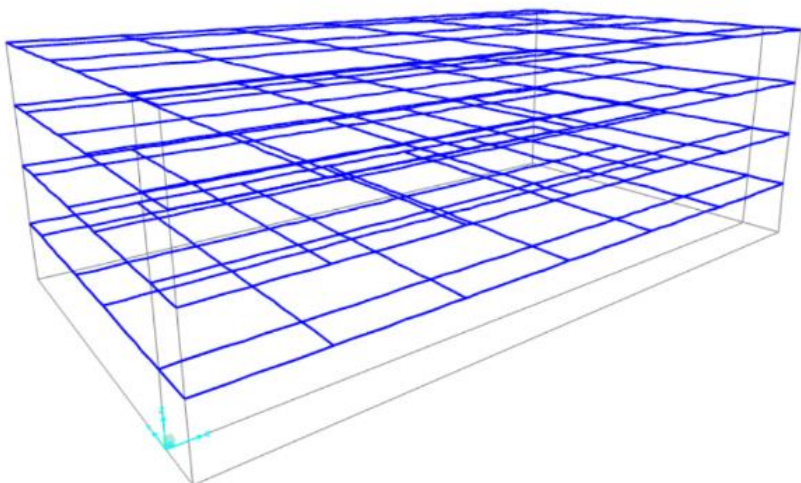


Figura 37: Vigas, Sap2000
Flores J. & Andrade R., 2021

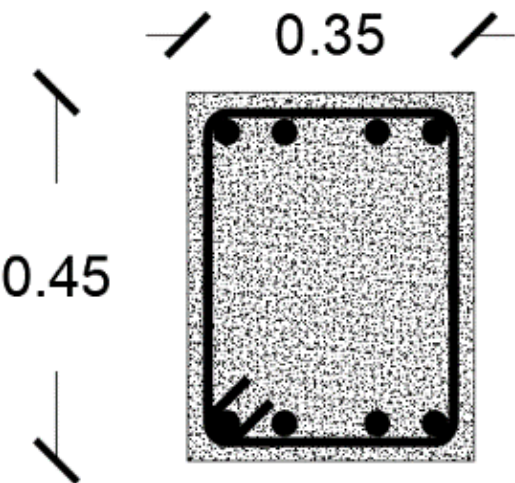


Figura 38: Estructura horizontal (viga)
Flores J. & Andrade R., 2021

- **Vigas:** Grupo conformado por todos los elementos lineales en dirección horizontal.

Muros: Grupo formado por todos los elementos superficiales en dirección vertical.

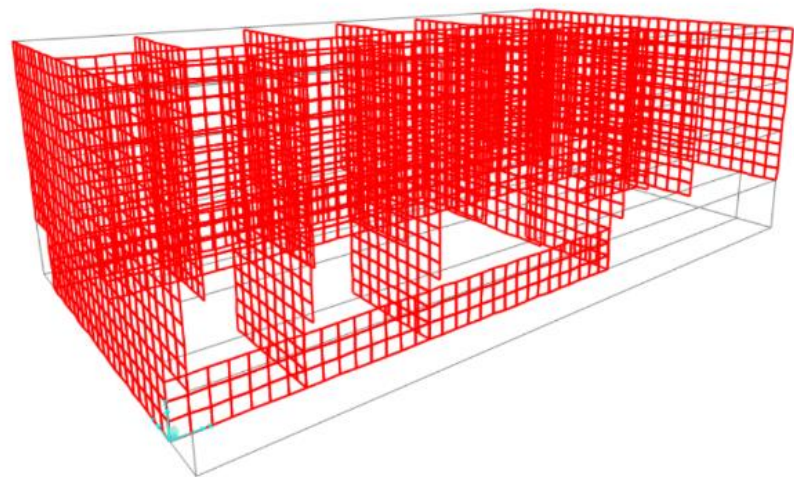


Figura 39: Muros, Sap2000
Flores J. & Andrade R., 2021

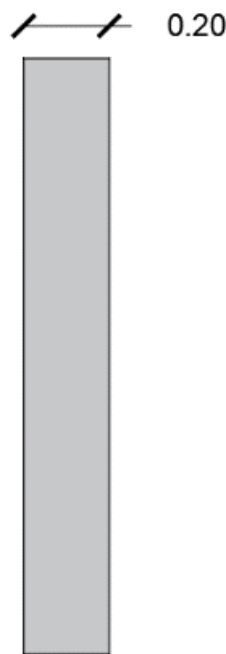


Figura 40: Estructura superficial en sentido vertical (muro)
Flores J. & Andrade R., 2021

- **Losas:** Grupo formado por todos los elementos superficiales en dirección horizontal.

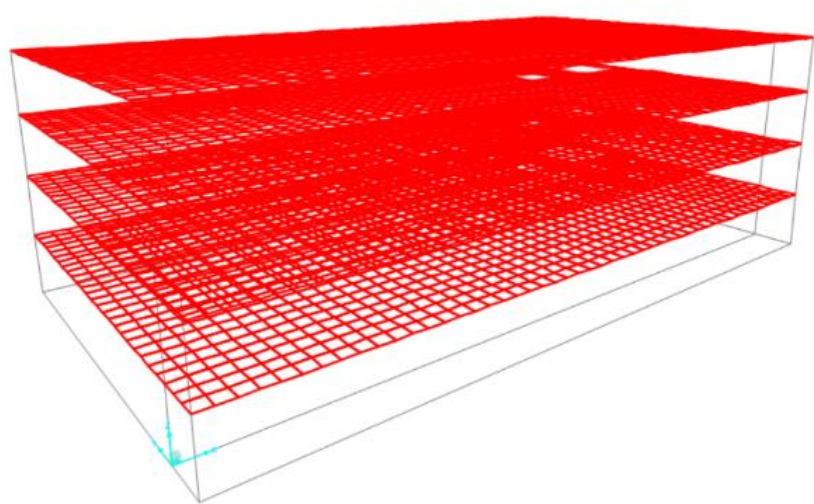


Figura 41: Losas, Sap2000
Flores J. & Andrade R., 2021

Flores J. & Andrade R., 2021

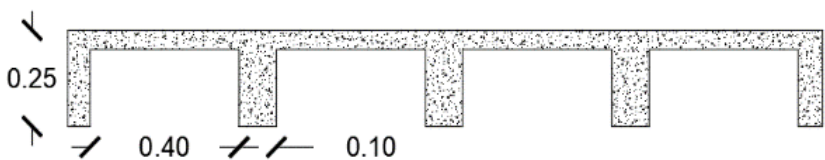


Figura 42: Estructura superficial en dirección horizontal (losa)
Flores J. & Andrade R., 2021

Con estos grupos definidos, se dividen los elementos con la medida del módulo (0.80m x 0.80m) para determinar el número de nodos y elementos de la estructura y obtener los datos numéricos para procesarlos en el programa Matlab.

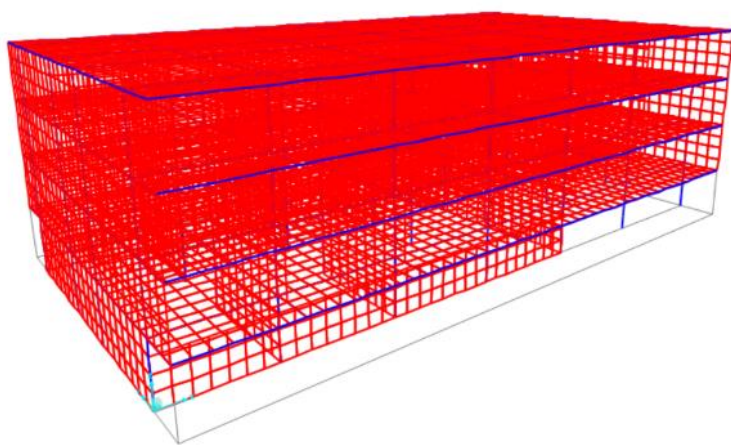


Figura 43: Modelo completo en SAP2000
Flores J. & Andrade R., 2021

Este estudio utiliza Stabil que se incorpora a Matlab como apoyo de modelos matemáticos, en donde concluido ya el modelado, éste importa datos de Matlab con la información de nodos y elementos.

Secciones y características de los materiales

Ya divididos los elementos, a través del software se han obtenido 8109 nodos cuyos datos numéricos se conforman por 4 campos y vienen representados de la siguiente manera en el siguiente ejemplo:

Nº de Nodo	Coordenada en X	Coordenada en Y	Coordenada en Z
1	X1	Y1	Z1
2	X2	Y2	Z2
3	X3	Y3	Z3

Tabla 03: Representación de la matriz de nodos
Flores J. & Andrade R., 2021

Para la **matriz de nodos (Figura 04)**, se coloca primero el número del nodo y su posición dentro de la representación tridimensional por medio de coordenadas en los tres ejes X, Y y Z, el programa Sap2000 ofrece la opción de obtener estos datos para exportarlos a Excel y su posterior vinculación con el programa Matlab.

MATRIZ DE NODOS / FACULTAD DE PSICOLOGÍA			
G	H	I	J
Nº de nodo	X	Y	Z
1	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	3.20
3	0.00	6.40	0.00
4	0.00	6.40	3.20
5	0.00	10.40	0.00
6	0.00	10.40	3.20
7	0.00	16.80	0.00
8	0.00	16.80	3.20
9	5.60	0.00	0.00
10	5.60	0.00	3.20

Tabla 04: Extracto de la matriz de nodos exportada de Excel
Flores J. & Andrade R., 2021

Los nodos son puntos que sirven de conexión para los elementos del modelado, se crean automáticamente en los extremos de cada elemento *Frame* y en los vértices de cada área del elemento *Shell*. En los nodos es donde actúan las deformaciones y/o desplazamientos que en el modelado se le conoce como grados de libertad, estos dependen del tipo de elemento que conforman los nodos.

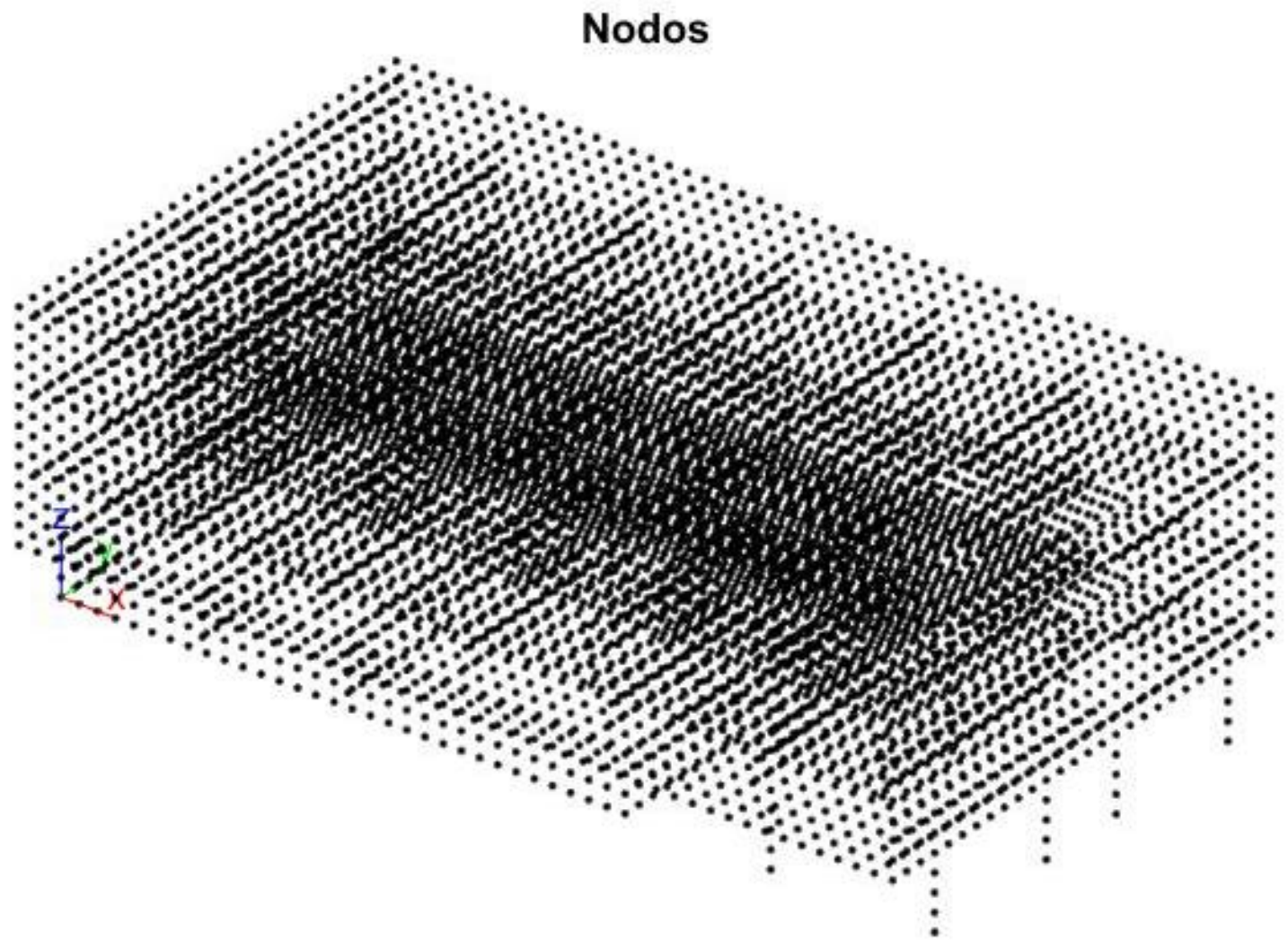


Figura 44: Modelación de nodos
Flores J. & Andrade R., 2021

Los elementos se dividen en dos grandes grupos; **elementos lineales** (tipo *Frame*) y **elementos superficiales** (tipo *Shell*), a continuación, se muestra las definiciones y diferencias de estos grupos:

Elementos tipo *Shell*

Estos elementos tipo *Shell* son un tipo de elementos bidimensionales que sirven para representar estructuras planas como losas, muros, etc. Son elementos que resultan de la subdivisión de cada pared, configurados por 4 nodos, y poseen 24 grados de libertad que figuran el comportamiento de cada pared, losa o membrana (Cornejo E., Zúñiga J., 2020).

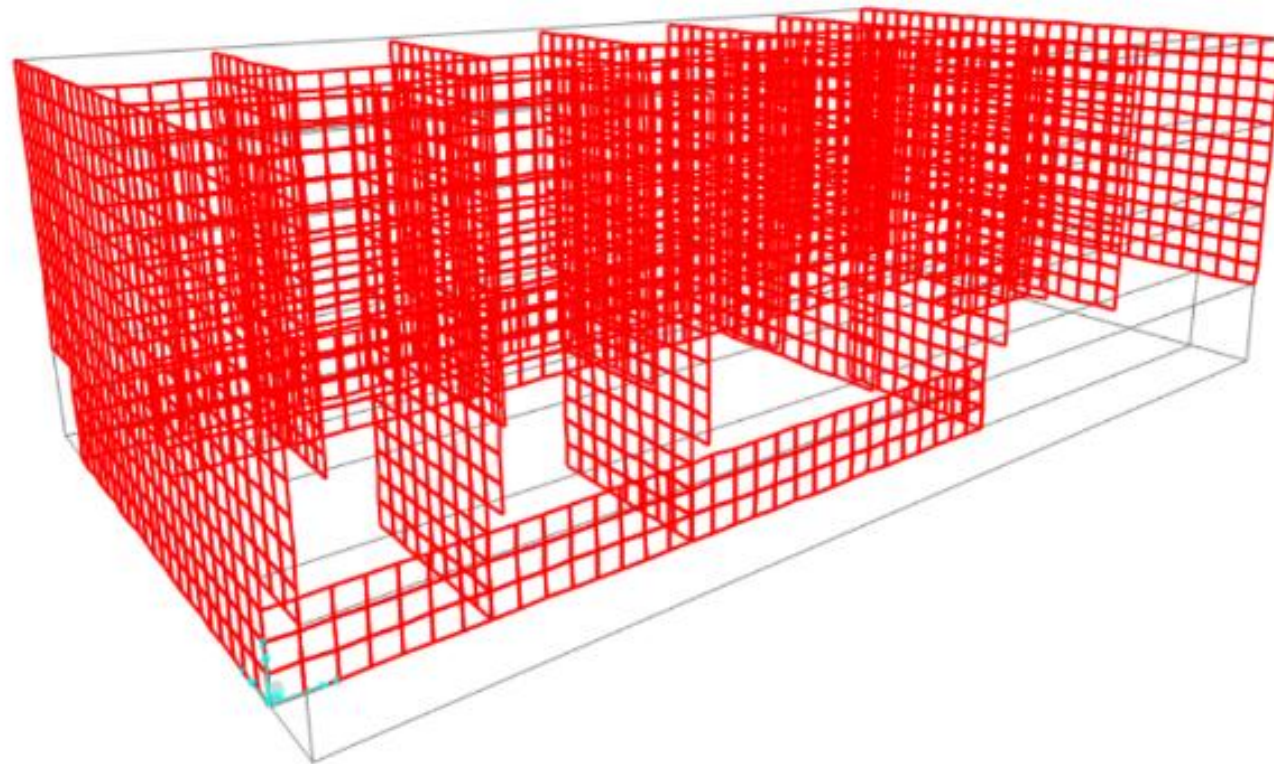


Figura 45: Modelación de elementos tipo *Shell*
Flores J. & Andrade R., 2021

Elementos tipo *Frame*

Estos elementos tipo *Frame* son ocupados para representar elementos lineales como vigas y columnas; elementos con líneas rectas configurados entre dos nodos seleccionados. Cada elemento *Frame* posee 12 grados de libertad, y cada nodo propio en el modelado tiene la capacidad de tener diferentes propiedades de selección, materialidad y cargas que determinará su comportamiento (Morocho, 2018).

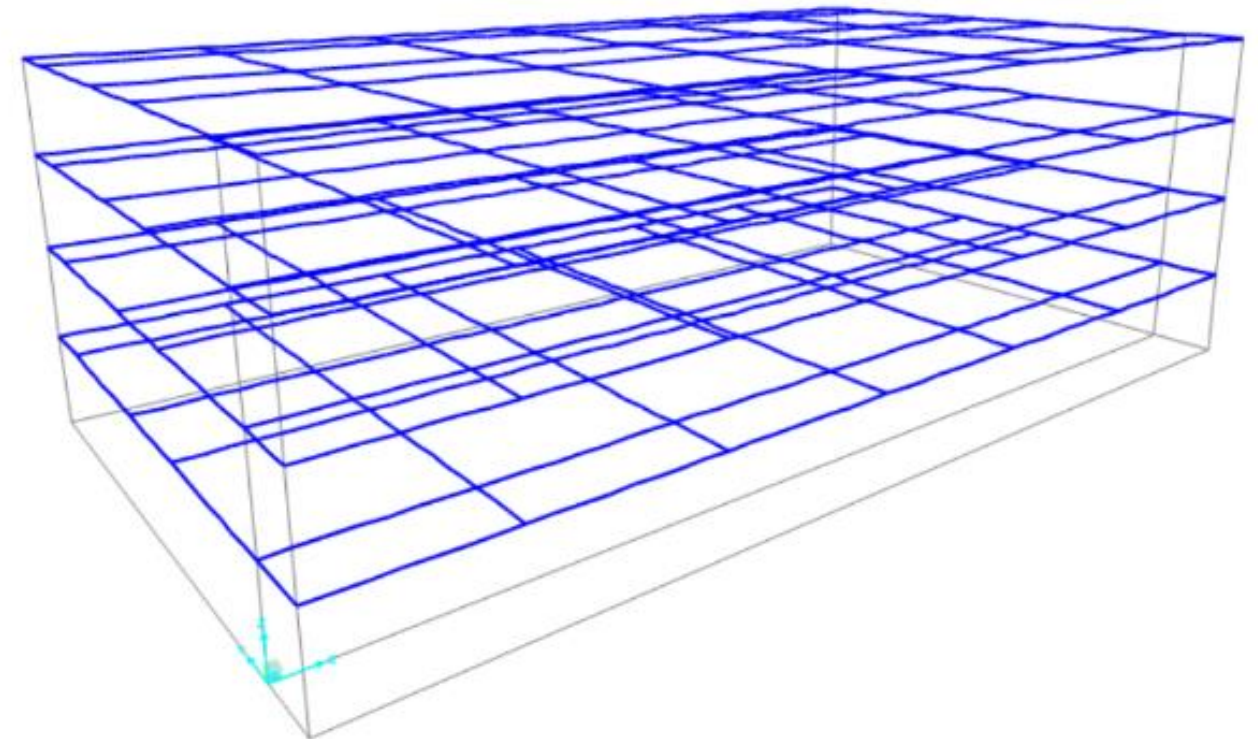


Figura 46: Modelación de elementos tipo *Frame*
Flores J. & Andrade R., 2021

En cuanto a la **matriz de elementos** se necesita llenar 8 campos que se representa en la siguiente tabla:

N° de Elemento	Tipo	Sección	Material	Nodo 1	Nodo 2	Nodo Referencial	NaN
1	1	3	2	1	255	4	0
2							
3							

Tabla 05: Representación de matriz de elementos (lineales)
Flores J. & Andrade R., 2021

- **Número del elemento:** Sirve para identificar a cada elemento, va en orden secuencial y el número en este campo es irrepetible.
- **Tipo:** Es el tipo de elemento estructural o no estructural que se asigna a las columnas, vigas, losas y muros.
- **Sección:** Este campo comprende el área y la *inercia* en X y Y de cada elemento.
- **Material:** Aquí se relaciona el *módulo de elasticidad*, la *densidad* y el *coeficiente de Poisson* de cada elemento.
- **Nodo 1 y 2:** Este campo se llena con puntos de conexión que forman a los elementos del modelado. (Ver gráfico 452)

- **Nodo referencial:** Este nodo tiene la función de generar al elemento una posición en el espacio.
- **NaN:** Es un campo que se llena con la palabra “NaN” para completar el octavo campo de los elementos lineales.

MATRIZ DE ELEMENTOS / FACULTAD DE PSICOLOGÍA							
N° de Elemento	Tipo	Sección	Material	Nodo 1	Nodo 2	Nodo Referencial	NaN
1	1	3	2	1	255	4	0
2	1	3	2	255	257	4	0
3	1	3	2	257	259	4	0
4	1	3	2	259	2	4	0
5	1	3	2	3	588	6	0
6	1	3	2	588	589	6	0
7	1	3	2	589	590	6	0
8	1	3	2	590	4	6	0
9	1	3	2	5	593	8	0
10	1	3	2	593	595	8	0

Tabla 06: Elementos lineales exportados de Sap2000 a Excel
Flores J. & Andrade R., 2021

Al igual que el grupo de **elementos lineales**, para el grupo de los **elementos superficiales** se llenan 8 campos, sin embargo, los nodos que forman este tipo de elementos ya no son sólo dos, pueden ser 3 formando triángulos o en este caso 4 formando cuadrados de 0,80m x 0,80m, completando los 8 campos con el número del elemento, el tipo, la sección, el material y los cuatro nodos.

MATRIZ DE ELEMENTOS SUPERFICIALES / FACULTAD DE PSICOLOGÍA							
N° de Elemento	Tipo	Sección	Material	Nodo 1	Nodo 2	Nodo 3	Nodo 4
2357	2	5	2	10	114	3693	285
2358	2	5	2	285	3693	3694	280
2359	2	5	2	280	3694	3695	275
2360	2	5	2	275	3695	3696	270
2361	2	5	2	270	3696	3697	265
2362	2	5	2	265	3697	3698	260
2363	2	5	2	260	3698	1006	2
2364	2	5	2	114	3699	3700	3693
2365	2	5	2	3693	3700	3701	3694
2366	2	5	2	3694	3701	3702	3695

Tabla 07: Elementos superficiales exportados de Sap2000 a Excel
Flores J. & Andrade R., 2021

La **matriz de secciones (Tabla 09)** en su estructura está configurada por la siguiente información: Inercias y áreas de paredes, espesor de columnas, vigas, losas, datos que se pueden apreciar en la tabla 09.

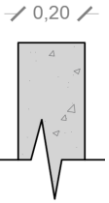
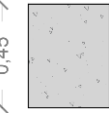
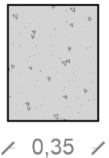
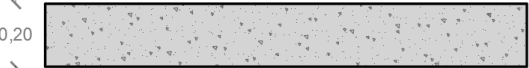
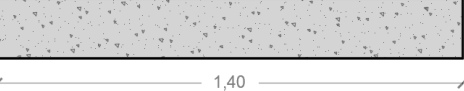
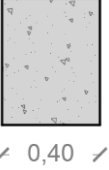
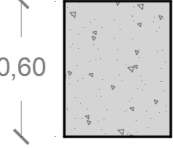
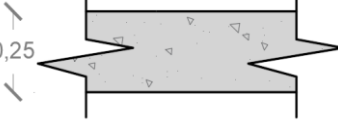
FACULTAD DE PSICOLOGÍA		
Elemento	Medida (m)	Gráfico
Espesor de pared	0,20	
Peralte de la viga	0,45	
Base de la viga	0,35	
Largo de la columna tipo I (Diafragma)	1,40	
Ancho de la columna tipo I (Diafragma)	0,20	
Ancho de la columna tipo II	0,40	
Largo de la columna tipo II	0,60	
Espesor de losa	0,25	

Tabla 08: Información de las secciones para la facultad de Psicología
Flores J. & Andrade R., 2021

Como último punto de la fase está la **sección de materiales**, que presenta información de las características mecánicas de cada material como:

- **Módulo de elasticidad (EC)**
- **Coefficiente de Poisson**
- **Densidades**

En el ensayo esclerométrico se determinó que la resistencia del hormigón es de 33 MPa, por tanto, el $f'c$ es igual a 33 MPa valor que permite conocer el módulo de elasticidad con la siguiente fórmula:

$E=4700*\sqrt{f'c}$

Lo que arroja como resultado un módulo de elasticidad (EC) de los elementos contruidos con hormigón armado igual a 26999 MPa. Para el módulo de elasticidad de la mampostería se utilizó el valor de 2000 MPa

MÓDULO DE ELASTICIDAD	
Material	EC (MPa)
Mampostería de ladrillo	2000
Hormigón	26999

Tabla 09: Módulo de elasticidad (Facultad de psicología)
Flores J. & Andrade R., 2021

El coeficiente de Poisson del concreto de 0.20 y de la mampostería de 0.22.

COEFICIENTE DE POISSON	
Material	Coeficiente de poisson
Mampostería de ladrillo	0.22
Hormigón	0.20

Tabla 10: Coeficiente de Poisson (Facultad de psicología)
Flores J. & Andrade R., 2021

Para las densidades (ρ), en unos casos se obtuvieron datos de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC), mientras que en otros se calcularon para que el estudio se apegue lo mejor posible al estado actual de la edificación.

DENSIDADES	
Material	Densidades (Kg/m3)
Mampostería de ladrillo	1700
Hormigón (columnas y vigas)	2447.32
Hormigón (losa entrepiso)	3733.60
Hormigón (losa cubierta)	3176.78

Tabla 11: Densidades de los materiales (Facultad de psicología)
Flores J. & Andrade R., 2021

Asignación de cargas

Para el cálculo de densidades se determina en primer lugar la carga última de cada nivel en la edificación, por lo que, para el análisis modal se utiliza esta combinación se establece por la siguiente relación dada por la *Norma Ecuatoriana de la Construcción*:

$Cu= 1.2(Cm) + 1.6 (0.3*Cv)$

Cu=Carga última

Cv= Carga viva

Cm= Carga muerta

Esta fórmula implica un factor de seguridad para la carga viva (1.6) y un factor de seguridad para la carga muerta (1.2), también aplica un factor de reducción (0.3) de la carga viva debido al *análisis modal* que se está realizando (NEC, 2015).

A continuación, se muestra el proceso para la determinación de las cargas últimas y las densidades correspondientes al entrepiso y cubierta no transitable del edificio de psicología.

DENSIDAD / MAMPOSTERÍA DE LADRILLO	
Material	Peso Kg/ m3
Ladrillo	1700

Tabla 12: Densidad de la mampostería, NEC 2015
Flores J. & Andrade R., 2021

DENSIDAD / HORMIGÓN	
Material	Peso Kg/ m3
Hormigón	2447.32

Tabla 13: Densidad del hormigón, NEC 2015
Flores J. & Andrade R., 2021

Para el cálculo de la carga muerta de la losa de entrepiso se determinan los pesos que están actuando sobre la losa como de instalaciones sanitarias y eléctricas, el cielo raso, la cerámica, el material pegante de la cerámica, las lamas que tiene el edificio y la losa como tal, adicionalmente se aplica la fórmula para obtener la carga última con la carga de uso que en este caso es educativo y finalmente se obtiene la densidad de la losa.

CÁLCULO DE CARGA MUERTA PARA ENTREPISO	
Elemento	Peso Kgf/ m2
Instalaciones	10
Cielo raso	20
Cerámica	18
Mono componente	20
Lamas	18
Losa de hormigón	611.83
Carga muerta total por m2	697.83

Tabla 14: Cálculo de carga muerta para entepiso
Flores J. & Andrade R., 2021

CARGA ÚLTIMA Y DENSIDAD PARA ENTREPISO DE HORMIGÓN	
Material	Peso Kgf/ m2
Carga viva	200
Carga muerta	697.83
Carga Última	933.40
DENSIDAD TOTAL (Kg/m3)	3733.60 Kg/m3

Tabla 15: Densidad entepiso de hormigón, NEC 2015
Flores J. & Andrade R., 2021

De igual forma se sigue el mismo procedimiento de cálculo para la losa de cubierta, atendiendo sus respectivas características y para obtener su densidad.

CÁLCULO DE CARGA MUERTA PARA CUBIERTA NO TRANSITABLE	
Elemento	Peso Kgf/ m2
Instalaciones	10
Losa de hormigón	611.83
Carga muerta total por m2	621.83 Kgf/m2

Tabla 16: Cálculo de carga muerta para cubierta no transitable
Flores J. & Andrade R., 2021

CARGA ÚLTIMA Y DENSIDAD PARA CUBIERTA NO TRANSITABLE	
Material	Peso Kgf/ m2
Carga viva	100
Carga muerta	621.83
Carga Última	794.20
DENSIDAD TOTAL (Kg/m3)	3176.80 Kg/m3

Tabla 17: Densidad cubierta no transitable de hormigón, NEC 2015
Flores J. & Andrade R., 2021

Condiciones de borde

En el MEF es necesario dividir los elementos como columnas, vigas, muros y losas en pequeñas partes con el fin de tener una mayor precisión en el cálculo estructural. Al ser divididos en la mayor cantidad de elementos, estos a su vez están unidos por nodos, los cuales poseen grados de libertad que definen sus movimientos en la edificación (Pardo, 2019).

En el área de las estructuras el movimiento es dependiente al tipo de apoyo como:

- 1. Articulación de primer orden (rodillo)
- 2. Apoyo de segundo orden (apoyo fijo)
- 3. Empotramiento
- 4. Junta rígida
- 5. Empotramiento móvil

En la facultad de psicología de la Universidad de Cuenca se considera que los nodos a nivel del suelo presentan empotramiento, en el cual hay restricción de rotación y traslación en los ejes **x**, **y** y **z**. En los demás nodos se estableció que no existe ningún tipo de restricción en sus grados de libertad.

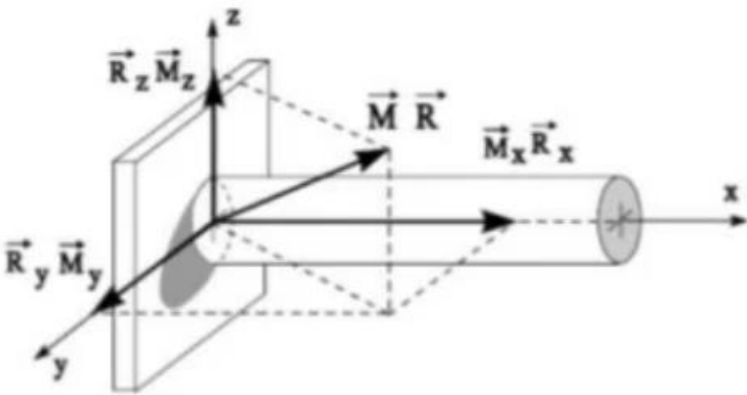


Figura 47: Empotramiento, restricción en todos los grados de libertad
López Carlos, 2012

Para realizar el análisis y cálculo estructural es necesario aplicar restricciones a los grados de libertad, sin embargo, estas restricciones se aplican de acuerdo al objetivo que se busca en el estudio o por el tipo de estructura que se quiere analizar, existen estructuras en las que se estudia su comportamiento con un sólo grado de libertad, por ejemplo para estudiar la compresión de los elementos por peso propio, en otros casos se usan sólo dos grados de libertad, en otros tres y así sucesivamente de acuerdo a las necesidades de la investigación (Pardo, 2019).

En Matlab, los desplazamientos y rotaciones se representan de la siguiente manera:

GRADOS DE LIBERTAD	
Desplazamiento	Representación (Matlab)
X	0.01
Y	0.02
Z	0.03

Tabla 18: Representación de grados de libertad (desplazamiento)
Flores J. & Andrade R., 2021

GRADOS DE LIBERTAD	
Rotación	Representación (Matlab)
X	0.04
Y	0.05
Z	0.06

Tabla 19: Representación de grados de libertad (rotación)
Flores J. & Andrade R., 2021

En los siguientes gráficos se observa los **modelos matemáticos** determinados gracias al software MATLAB de la facultad de psicología ubicada en la Universidad de Cuenca.

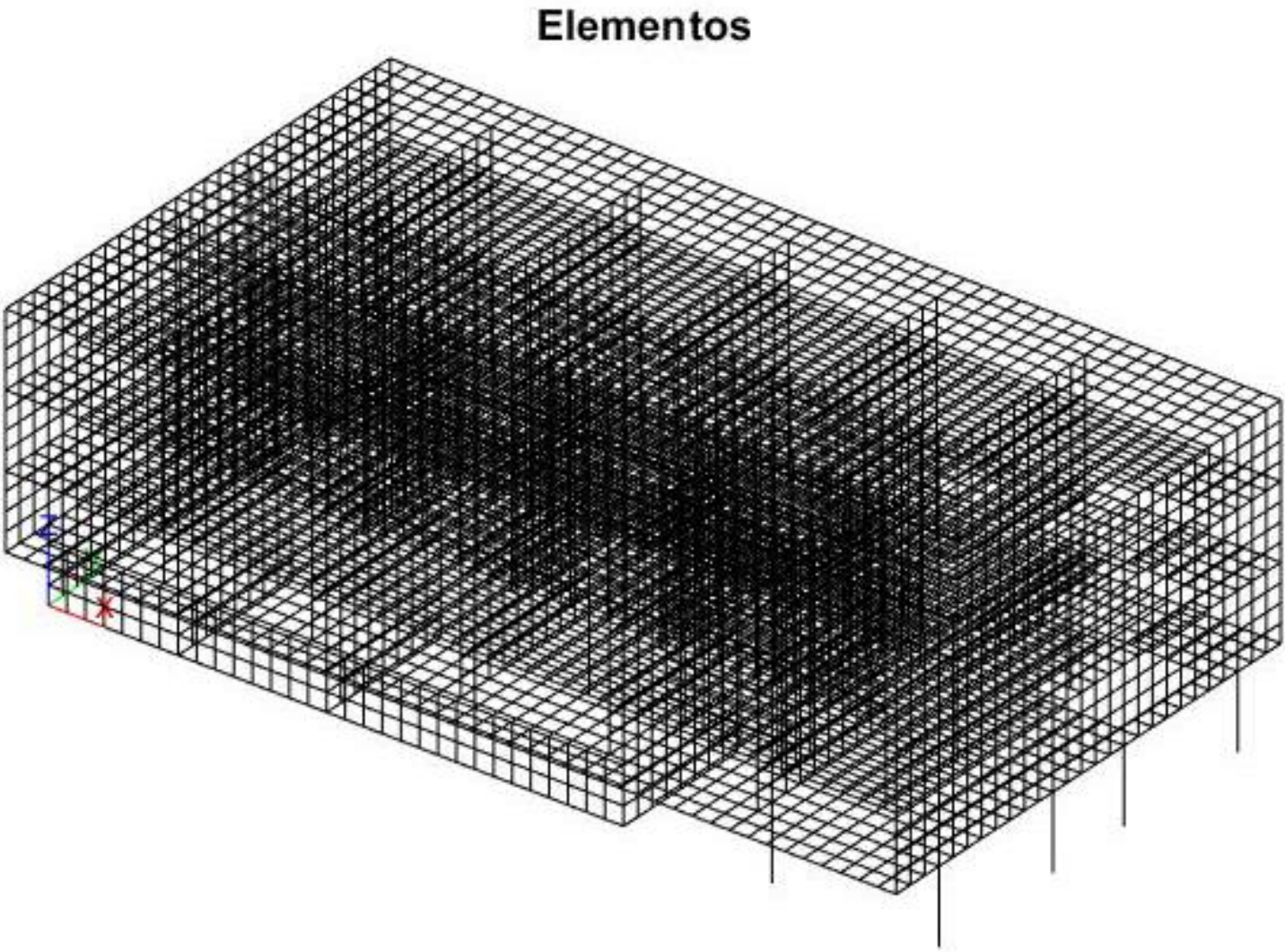


Figura 48: Gráfico de nodos y elementos de la facultad de psicología
Flores J. & Andrade R., 2021

ANÁLISIS MODAL

El principal objetivo del análisis modal, es la obtención de los periodos y modos de vibración en cualquier estructura durante vibración libre (García Hernán, 2017).

Período de vibración

De acuerdo a la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) en el capítulo de Peligro sísmico: diseño sismo resistente, se define al período de vibración como “el tiempo que transcurre en un movimiento armónico ondulatorio o vibratorio para que el sistema vibratorio vuelva a su posición original considerada luego en un ciclo de oscilación”, sin embargo, Guzmán lo define como el tiempo que transcurre para que la estructura vuelva su posición original durante un movimiento vibratorio.

Modos de vibración

Entre las propiedades que tiene una estructura se encuentran los modos de vibración que dependen de la masa de la edificación. Una estructura tendrá un número de modos de vibrar acorde a sus grados de libertad. Los modos de vibración permiten visualizar las varias maneras de cómo una estructura se mueve, para este estudio se examinó la estructura en los primeros 10 modos de vibración presentados a continuación y de los cuales se analiza el periodo máximo y periodo mínimo de vibración.

PRIMER MODO DE VIBRAR

La edificación tiene una masa total de 457 191.80 Kg.

El primer modo de vibrar se da en 0.432 segundos, en este modo se mueve una masa de 438327.05 Kg en el eje X representando el 95.87% de la masa total de la edificación mientras que en el eje Y se mueve 0.0825 Kg que representa menos del 1% de la masa.

El primer modo de vibrar es en el que más masa se mueve en el eje X.

FACULTAD DE PSICOLOGÍA				
Primer modo de vibrar				
#		Período (s)	Masa(Kg)	Porcentaje
1	X	0.432	438327.05	95.87%
	Y		0.0825	0.00001%

Tabla 20: Primer modo de vibrar
Flores J. & Andrade R., 2021

Se puede apreciar en las figuras que la edificación se desplaza claramente en el eje X lo que muestra el 95.87% de masa que se mueve en este modo de vibrar.

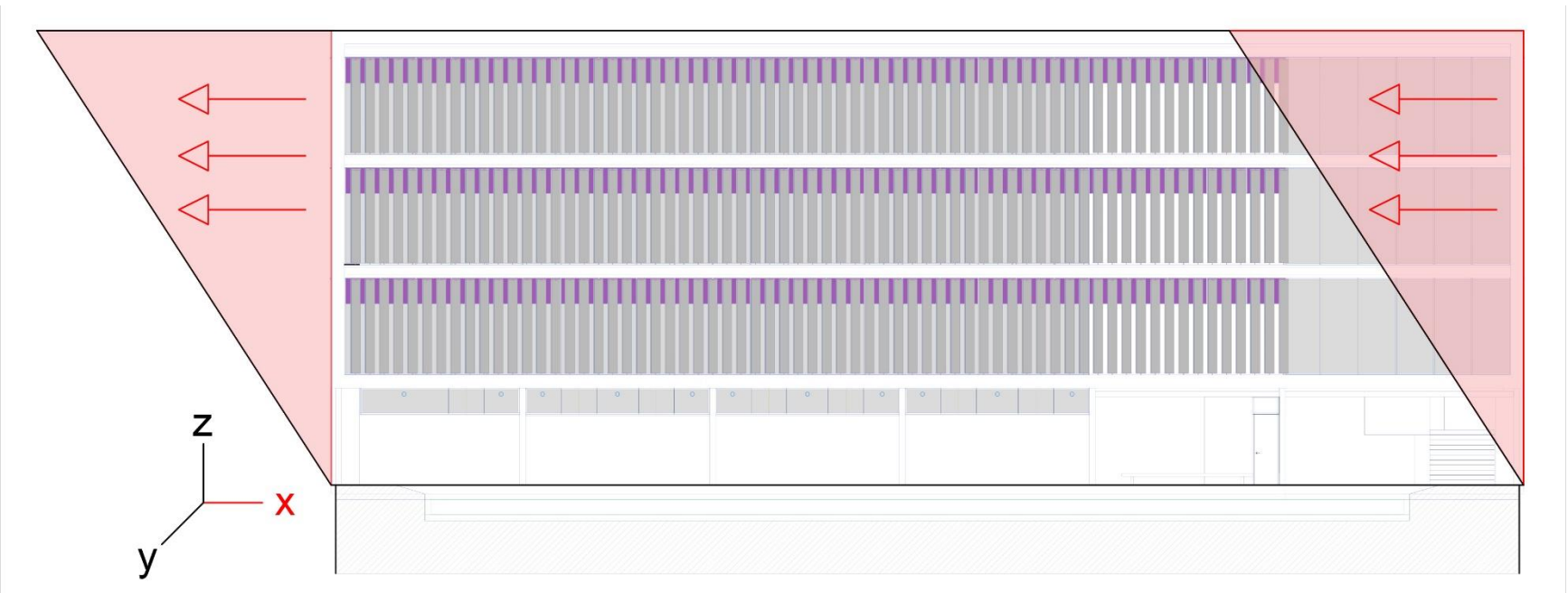


Figura 49: Desplazamiento de la edificación modo de vibrar 01
Flores J. & Andrade R., 2021

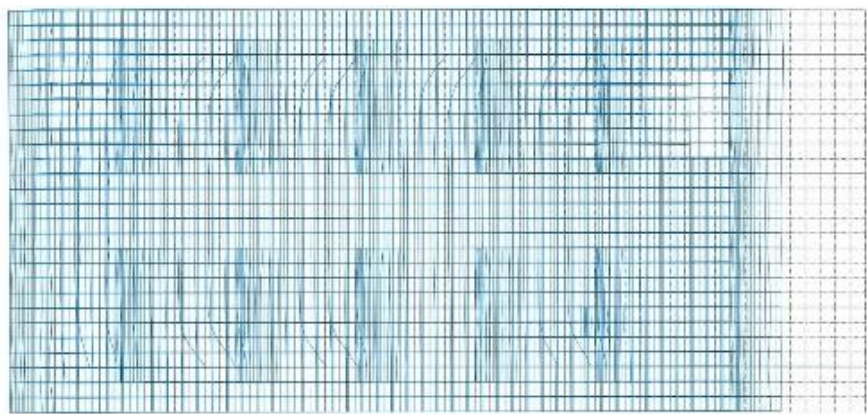


Figura 50: Primer modo de vibrar (planta)
Flores J. & Andrade R., 2021

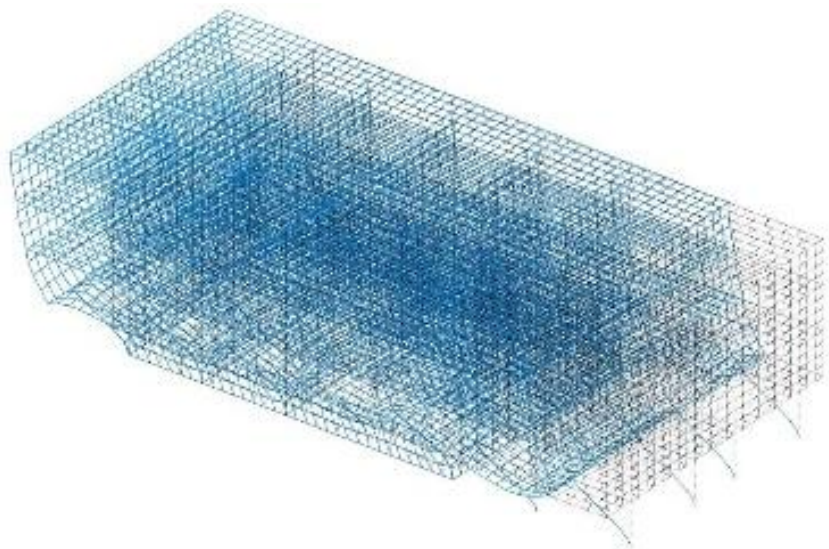


Figura 51: Primer modo de vibrar (3D)
Flores J. & Andrade R., 2021

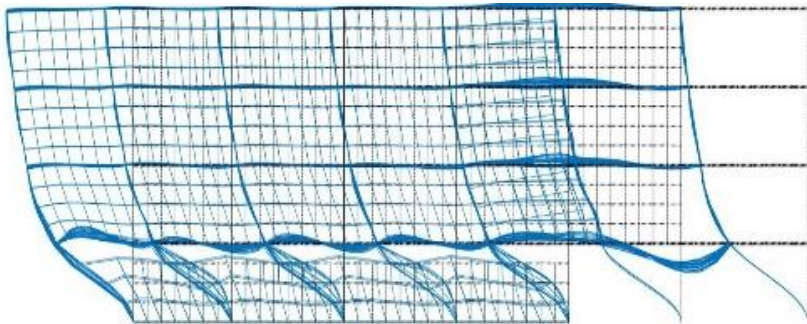


Figura 52: Primer modo de vibrar (alzado)
Flores J. & Andrade R., 2021

SEGUNDO MODO DE VIBRAR

En el segundo modo de vibrar se aprecia que el período es de 0.258 segundos y que en el eje X se mueve una masa de 2.12 Kg que es un valor prácticamente insignificante de la masa total mientras que en el eje Y en este modo de vibrar se mueve 266 255.04 Kg que representa el 58.23% de la masa total y es en el que se mueve más masa en este eje

FACULTAD DE PSICOLOGÍA				
Segundo modo de vibrar				
#		Período(s)	Masa (Kg)	Porcentaje
2	X	0.258	2.12	0.000463%
	Y		266255.04	58.23%

Tabla 21: Primer modo de vibrar
Flores J. & Andrade R., 2021

Las figuras evidencian que a diferencia del primer modo de vibrar, en este modo de vibrar existe un movimiento de la edificación en el eje Y muy pronunciado debido a que se mueve un 58.23% de la masa total.

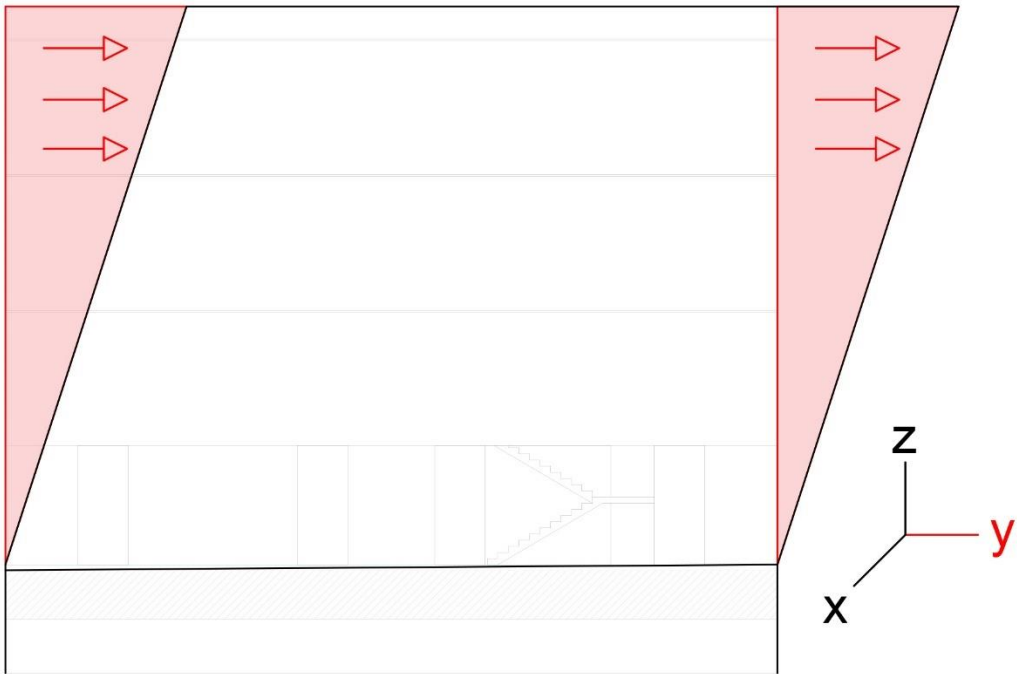


Figura 53: Desplazamiento de la edificación / modo de vibrar 03
Flores J. & Andrade R., 2021

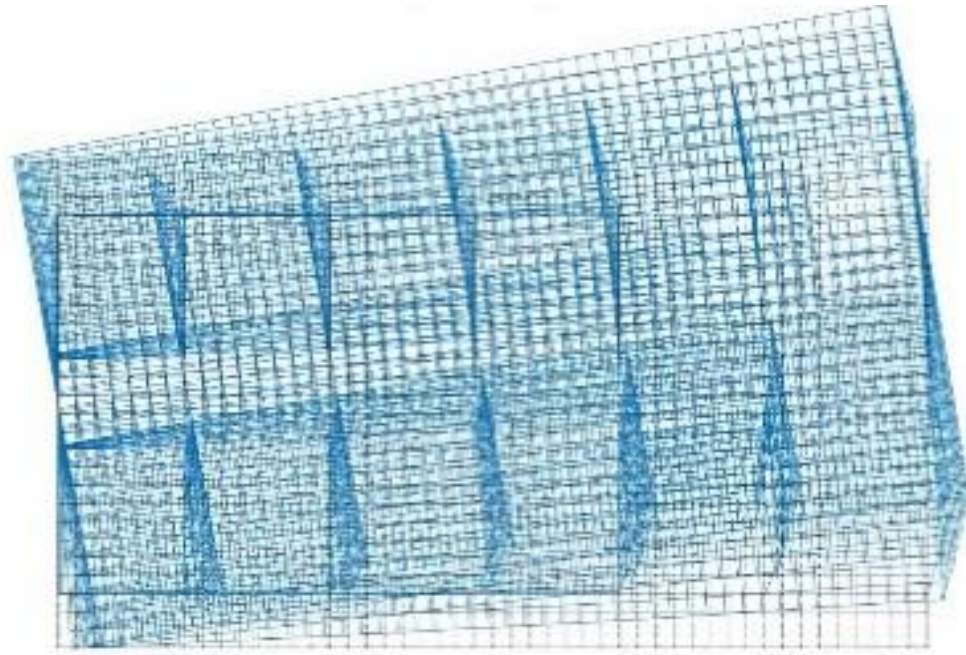


Figura 54: Segundo modo de vibrar (planta)
Flores J. & Andrade R., 2021

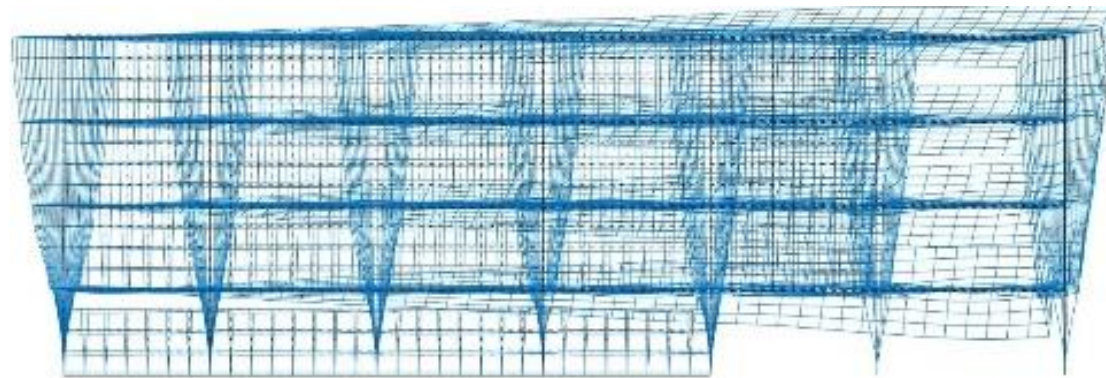


Figura 55: Segundo modo de vibrar (alzado)
Flores J. & Andrade R., 2021

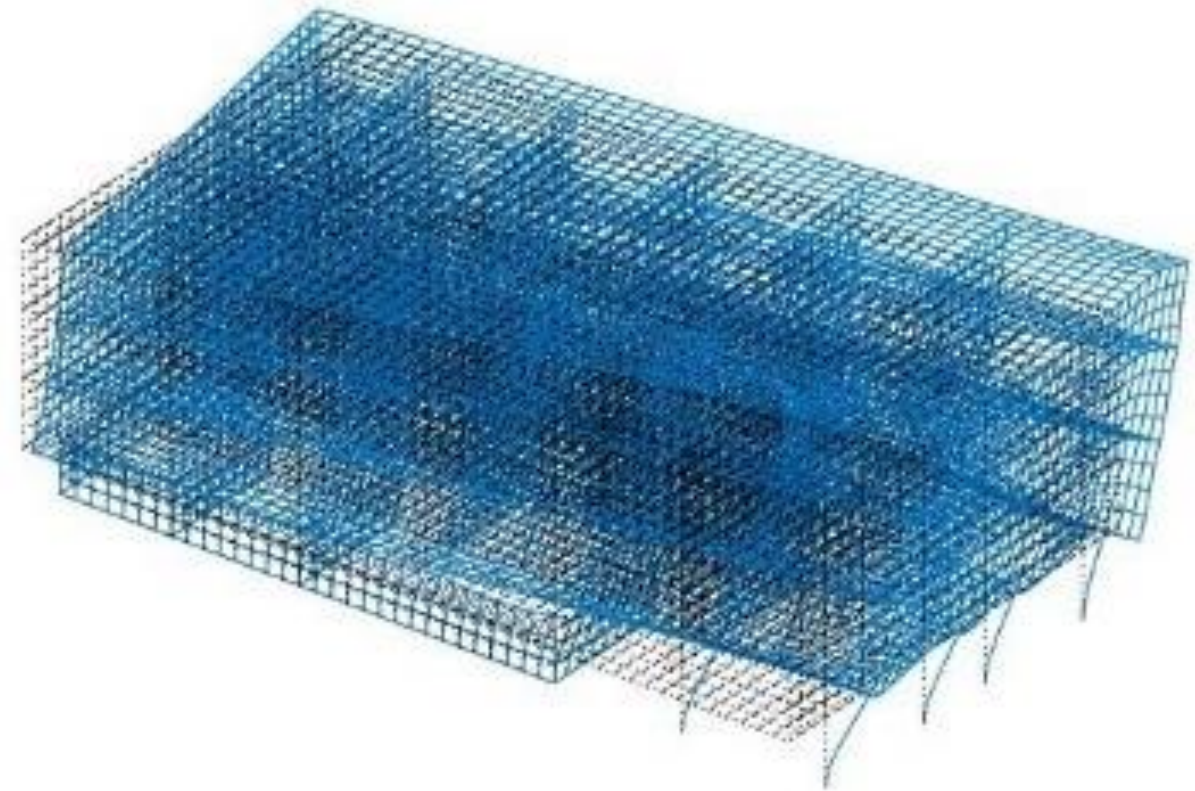


Figura 56: Segundo modo de vibrar (3D)
Flores J. & Andrade R., 2021

TERCER MODO DE VIBRAR

El tercer modo de vibrar se produce en un período de 0.232 segundos, cabe destacar que en el eje Y se mueve una masa de 106 951.92 Kg que representa el 23.39% de la masa total siendo el segundo modo en el que se mueve más masa en este eje, mientras que en el eje X la masa que se desplaza es insignificante.

El modo de vibrar número 2 y 3 producen un desplazamiento de masa bastante parecido, sin embargo, se produce en la fachada opuesta con una masa desplazada que se reduce en un 34.84% en el eje Y. A partir de este modo de vibrar la masa empieza a desplazarse en menor medida en ambos ejes por tanto en los siguientes modos de vibrar los desplazamientos son muy inferiores a los primeros 3 modos de vibrar.

FACULTAD DE PSICOLOGÍA				
Tercer modo de vibrar				
#		Período(s)	Masa(Kg)	Porcentaje
3	X	0.232	10.48	0.00229%
	Y		106951.92	23.39%

Tabla 22: Tercer modo de vibrar
Flores J. & Andrade R., 2021

En las figuras se aprecia que igual que el segundo modo de vibrar existe un desplazamiento de la masa predominante en el eje Y que representa un 23.39% de la masa total.

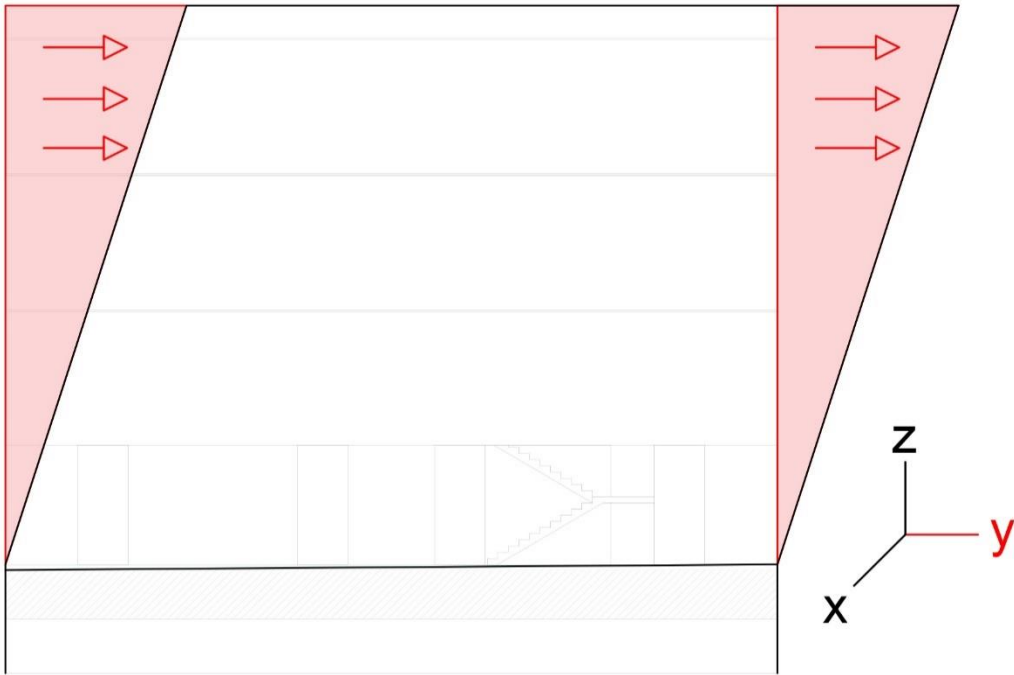


Figura 57: Desplazamiento de la edificación / modo de vibrar 03
Flores J. & Andrade R., 2021

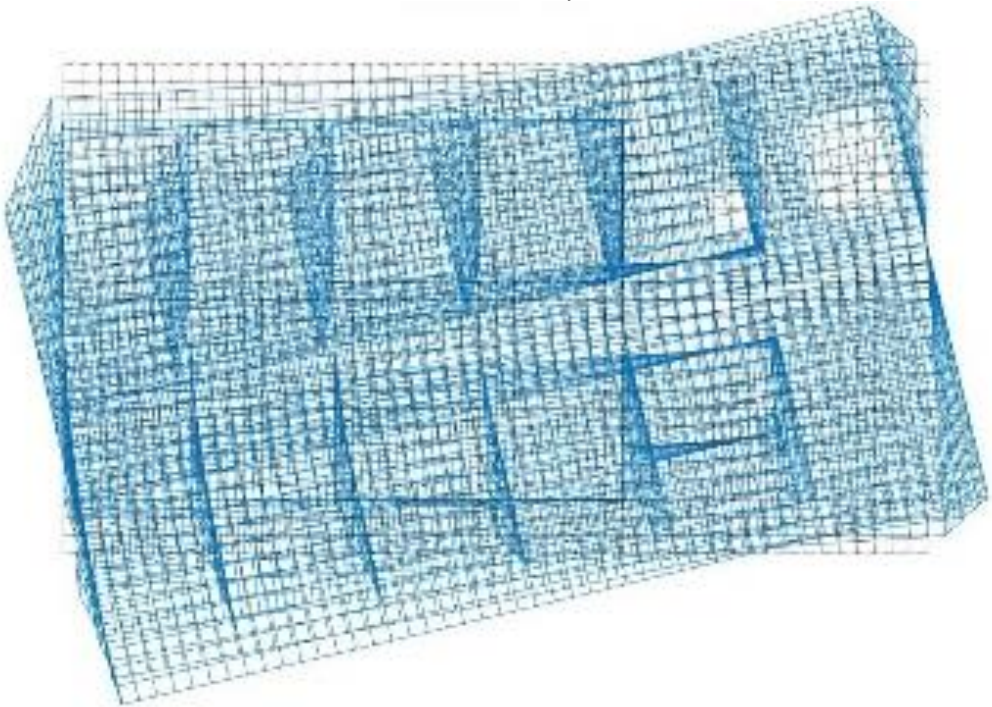


Figura 58: Tercer modo de vibrar (planta)
Flores J. & Andrade R., 2021

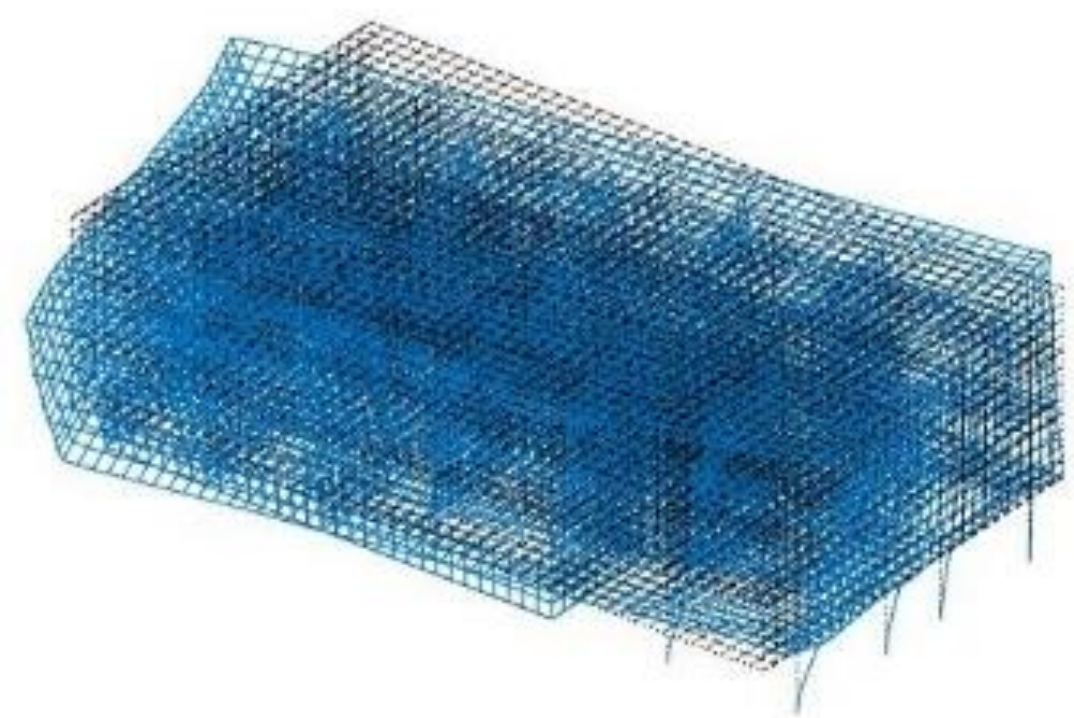


Figura 59: Tercer modo de vibrar (3D)
Flores J. & Andrade R., 2021

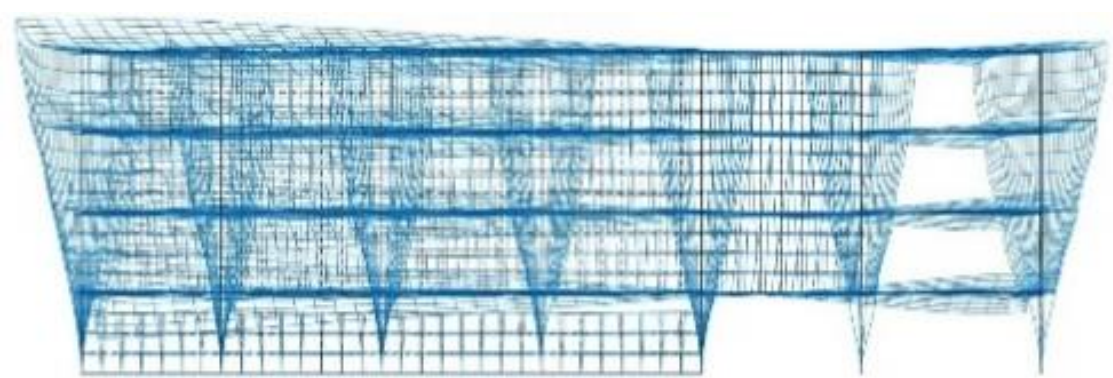


Figura 60: Tercer modo de vibrar (alzado)
Flores J. & Andrade R., 2021

CUARTO MODO DE VIBRAR

El cuarto modo de vibrar se produce en un período de 0.119 segundos, se mueve una masa de 10300.46 Kg en el eje X y representa un 2.25% de la masa total, mientras que en el eje Y se desplazan 3.91 Kg que representan al 0.000855% siendo prácticamente nula la masa desplazada en este eje.

En este modo de vibrar se aprecian desplazamientos menores a los anteriores, desde este punto los siguientes modos de vibrar tienen desplazamientos similares.

FACULTAD DE PSICOLOGÍA			
Cuarto modo de vibrar			
#	Período(s)	Masa(Kg)	Porcentaje
4	0.119	X	10300.46
		Y	3.91
			2.25%
			0.000855%

Tabla 23: Cuarto modo de vibrar
Flores J. & Andrade R., 2021

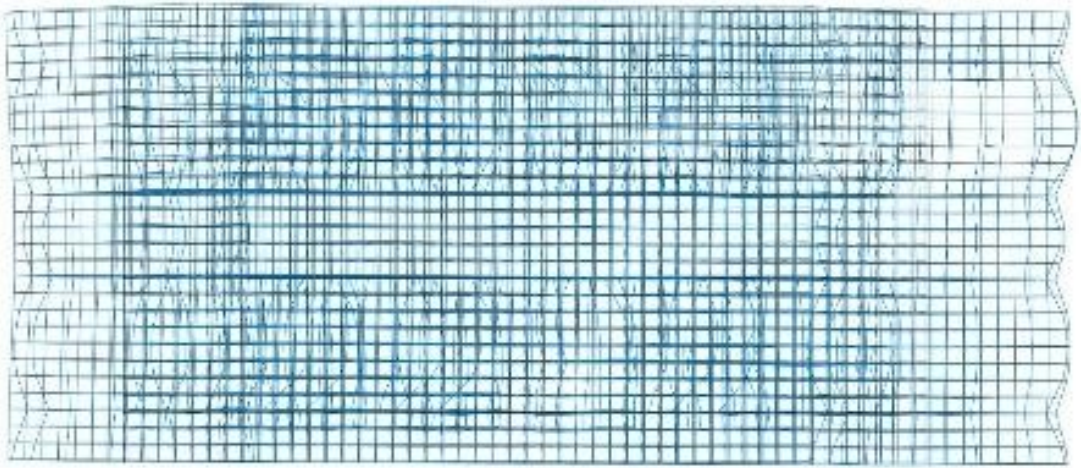


Figura 61: Cuarto modo de vibrar (planta)
Flores J. & Andrade R., 2021

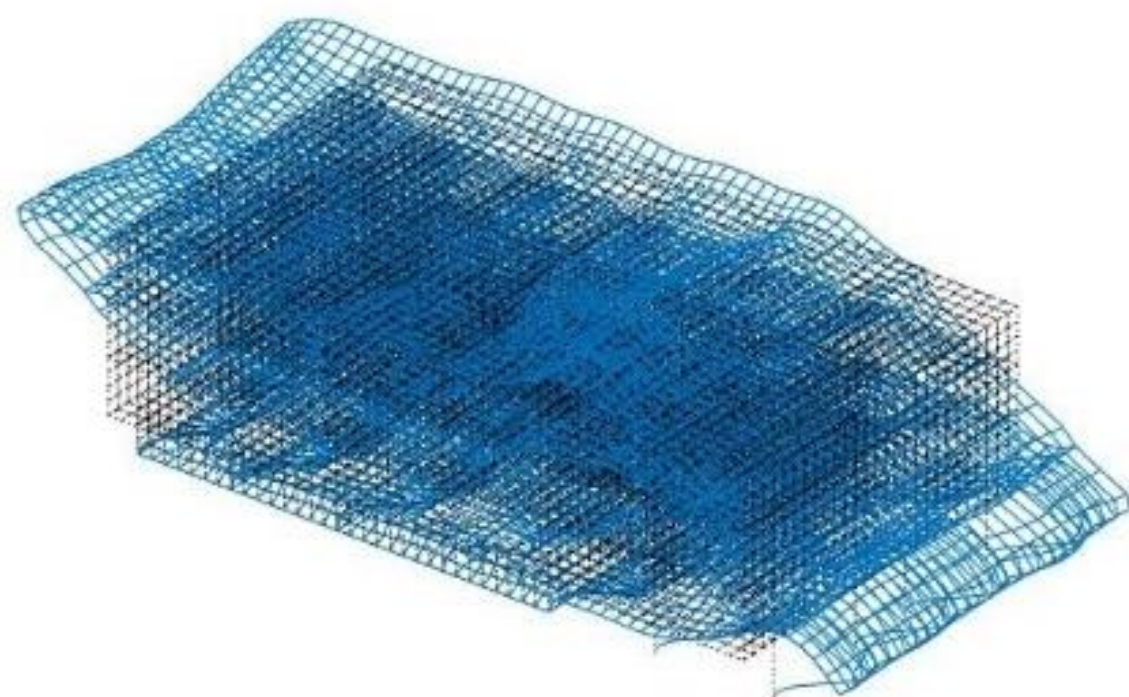


Figura 62: Cuarto modo de vibrar (3D)
Flores J. & Andrade R., 2021

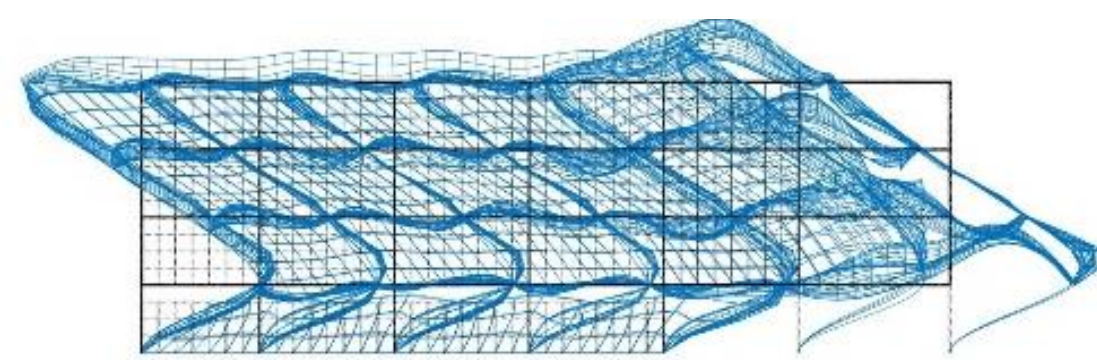


Figura 63: Cuarto modo de vibrar (alzado)
Flores J. & Andrade R., 2021

QUINTO MODO DE VIBRAR

El quinto modo de vibrar se produce en 0.101 segundos, en el eje X se mueve una masa de 17547.28 que es el 3.83% de la masa total y en el eje Y se mueve una masa prácticamente igual a la del modo de vibrar número 4.

En este modo de vibrar se aprecia una reacción en la edificación que vale la pena estudiar, pues el desplazamiento que se da en este modo de vibrar se concentra en muros específicos de planta baja indicando que en un posible caso de sismo, estos muros se verían afectados.

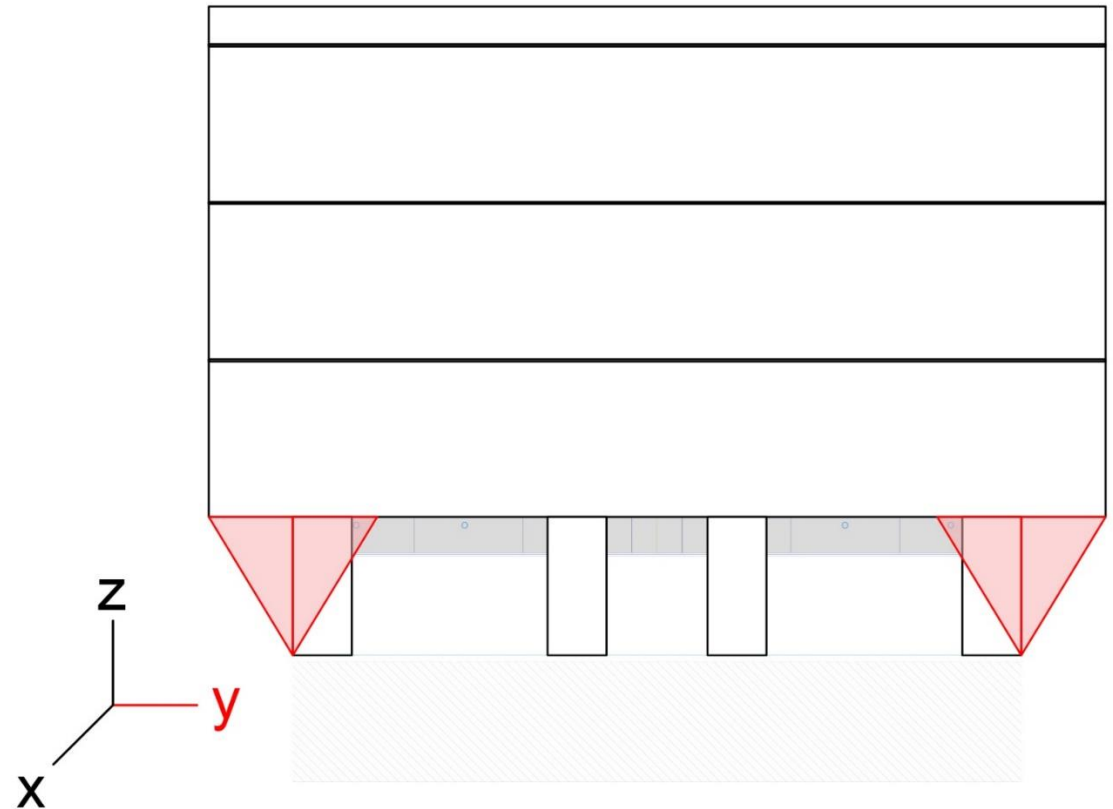


Figura 64: Desplazamiento de la edificación modo de vibrar 05
Flores J. & Andrade R., 2021

Este efecto se reproduce en todos los modos de vibrar siguientes donde los principales desplazamientos de masa se dan en los muros de planta baja del edificio de la Facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca, la causa que produce esta oscilación es que estos muros no están conectados con un elemento estructural en su parte superior puesto que existe una ventana.

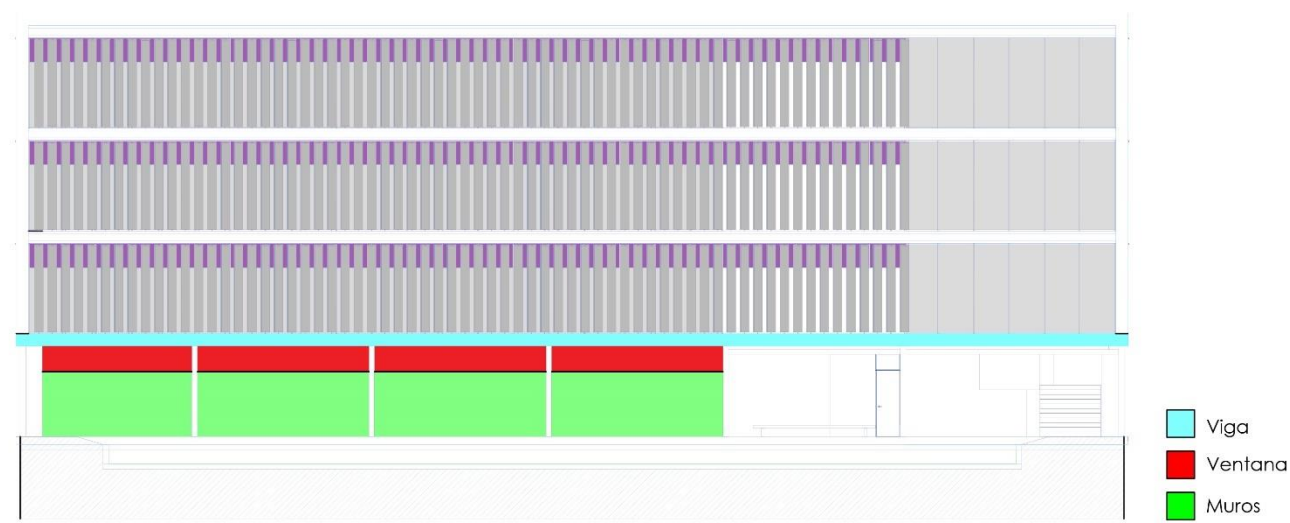


Figura 65: Esquema de muros, ventanas y viga.
Flores J. & Andrade R., 2021

Como se observa en la figura anterior, los muros se encuentran separados por una ventana del elemento estructural, lo que refleja el efecto que se produce en las siguientes figuras obtenidas del software.

FACULTAD DE PSICOLOGÍA				
Quinto modo de vibrar				
#		Período(s)	Masa(Kg)	Porcentaje
5	X	0.101	17547.28	3.83%
	Y		3.72	0.000813%

Tabla 24: Quinto modo de vibrar
Flores J. & Andrade R., 2021

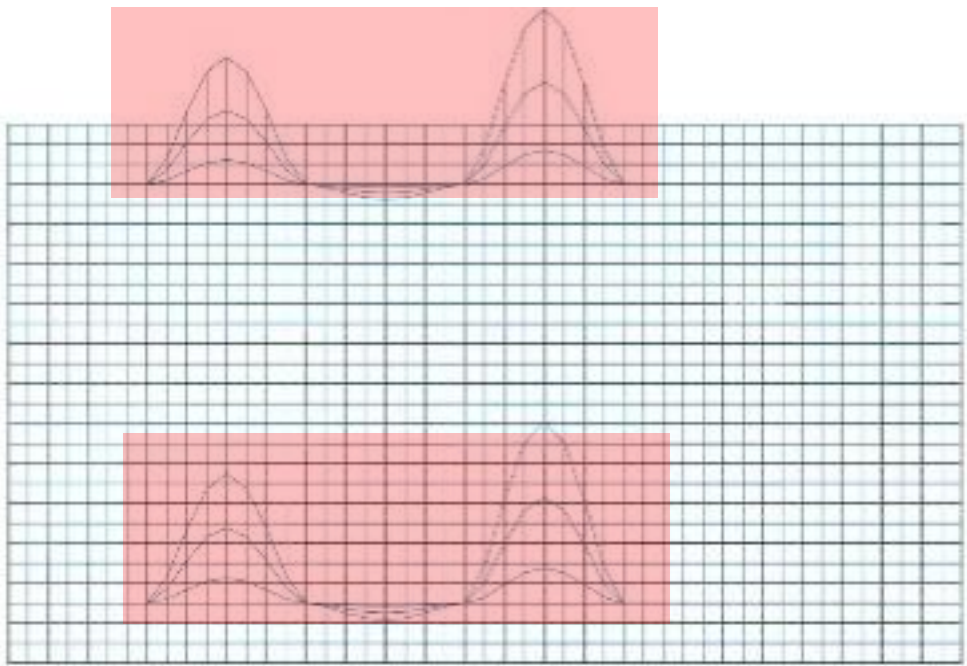


Figura 66: Quinto modo de vibrar (planta)
Flores J. & Andrade R., 2021

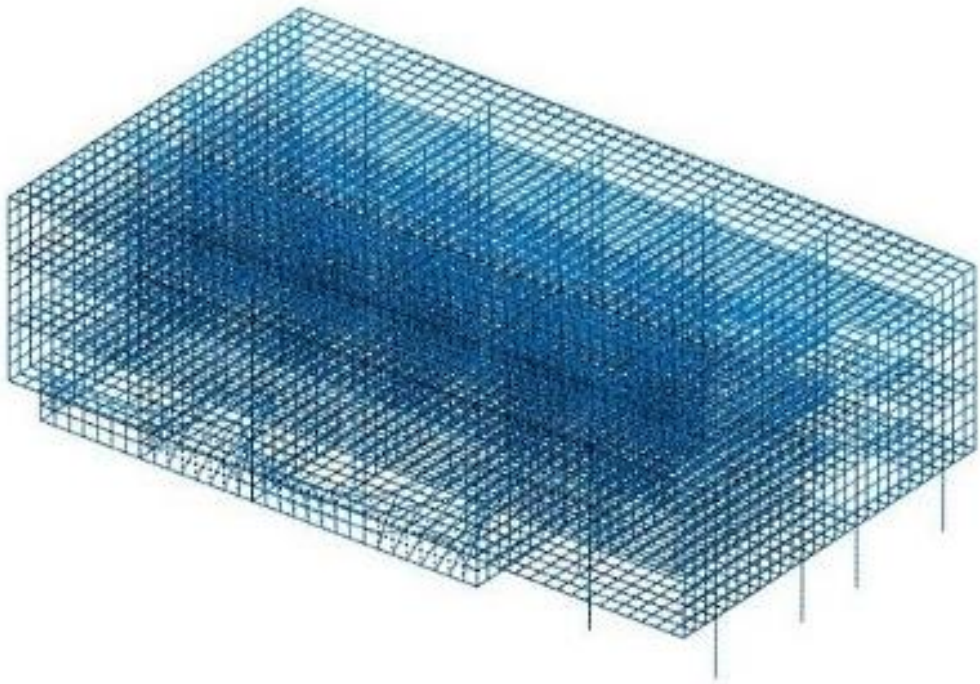


Figura 67: Quinto modo de vibrar (3D)
Flores J. & Andrade R., 2021

SEXTO MODO DE VIBRAR

Como se indicó anteriormente, desde el quinto modo de vibrar el desplazamiento de masa predominante se produce en los muros de planta baja representando valores minúsculos que se encuentran por debajo del 1% en ambos ejes. El modo de vibrar número 6 se produce en un período de 0.0974 segundos.

FACULTAD DE PSICOLOGÍA				
Sexto modo de vibrar				
#		Período(s)	Masa(Kg)	Porcentaje
6	X	0.0974	70.35	0.015%
	Y		2459.96	0.53%

Tabla 25: Sexto modo de vibrar
Flores J. & Andrade R., 2021

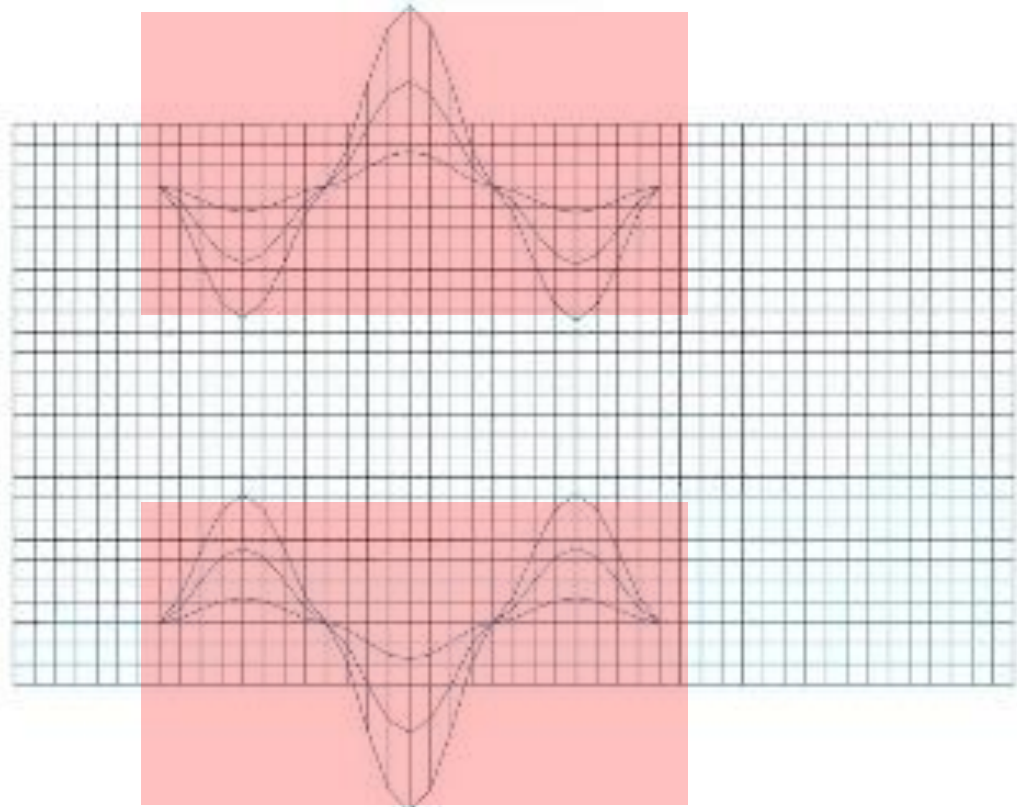


Figura 68: Sexto modo de vibrar (planta)
Flores J. & Andrade R., 2021

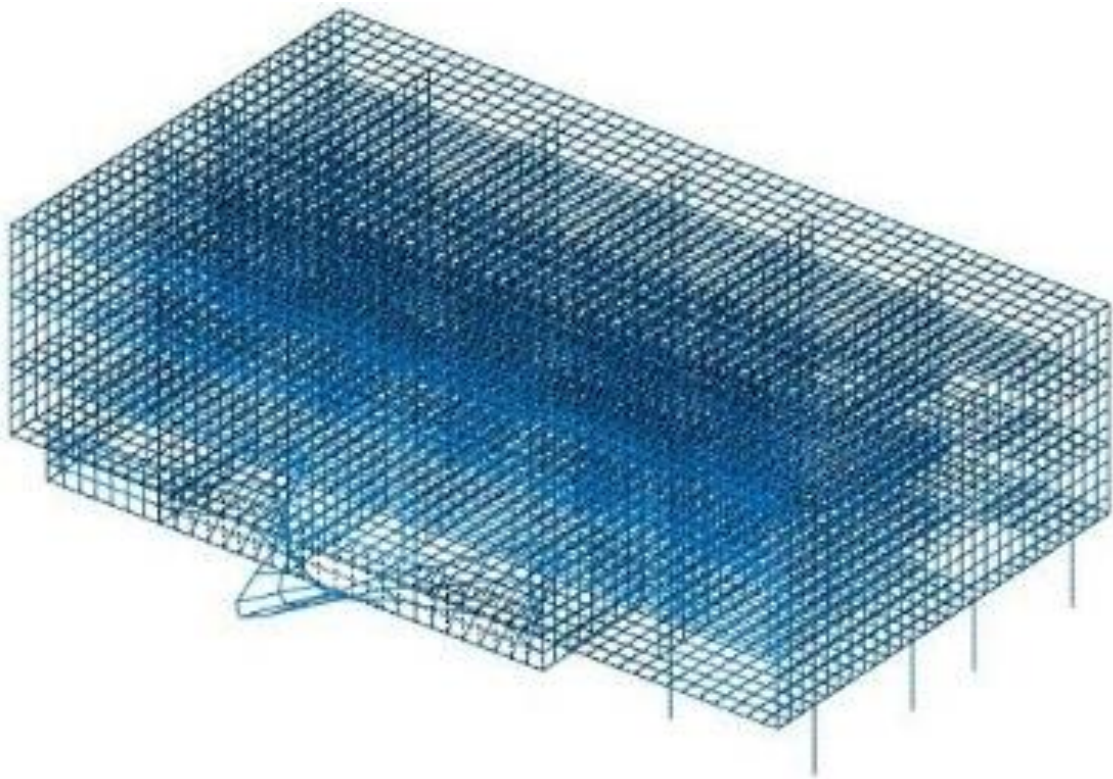


Figura 69: Sexto modo de vibrar (3D)
Flores J. & Andrade R., 2021

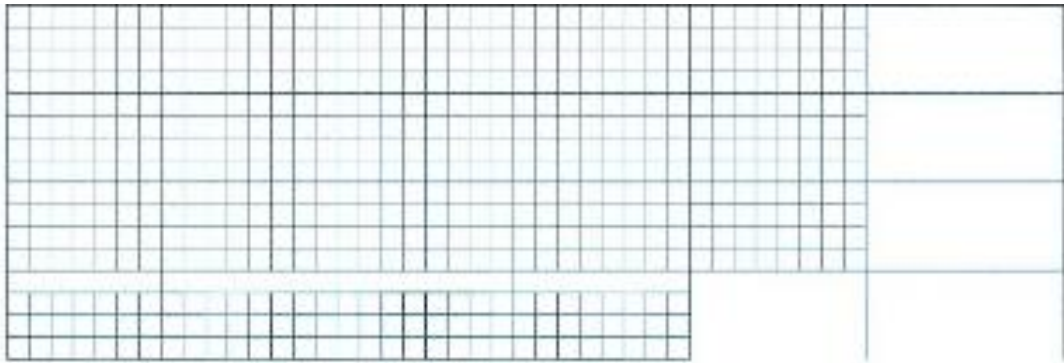


Figura 70: Sexto modo de vibrar (alzado)
Flores J. & Andrade R., 2021

SÉPTIMO MODO DE VIBRAR

FACULTAD DE PSICOLOGÍA				
Séptimo modo de vibrar				
#		Período(s)	Masa(Kg)	Porcentaje
7	X	0.0966	0.0089	0.0000019%
	Y		11.60	0.00253%

Tabla 26: Séptimo modo de vibrar
Flores J. & Andrade R., 2021

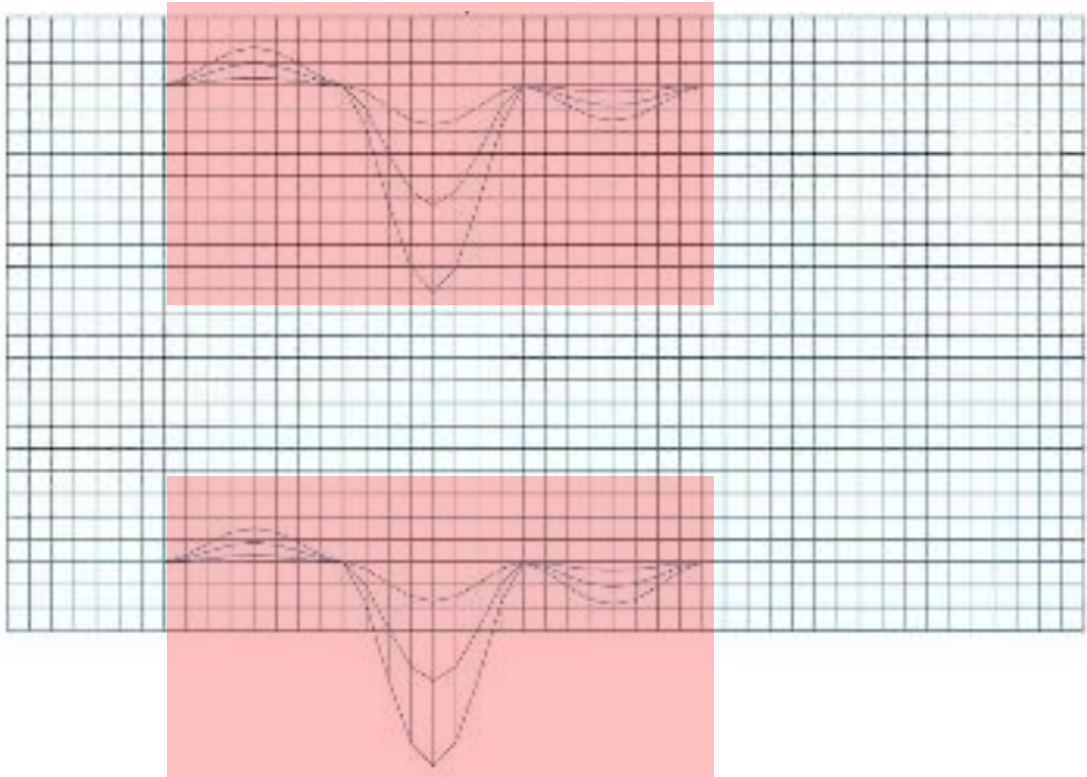


Figura 71: Séptimo modo de vibrar (planta)
Flores J. & Andrade R., 2021

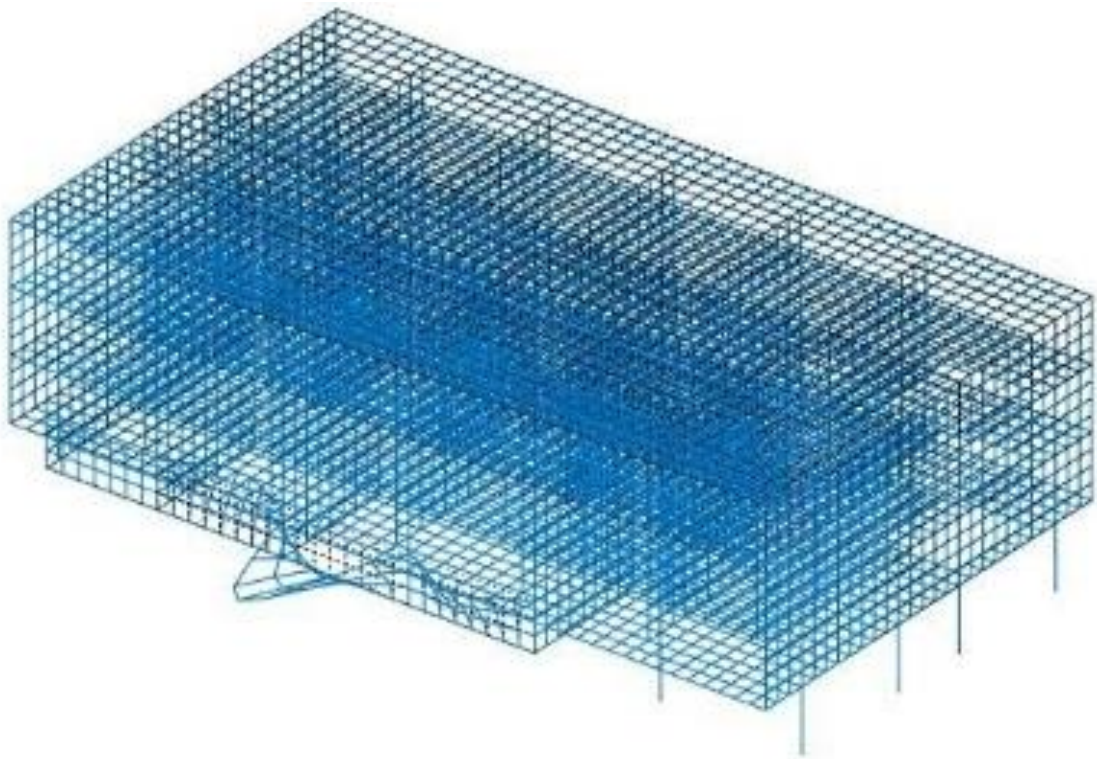


Figura 72: Séptimo modo de vibrar (3D)
Flores J. & Andrade R., 2021

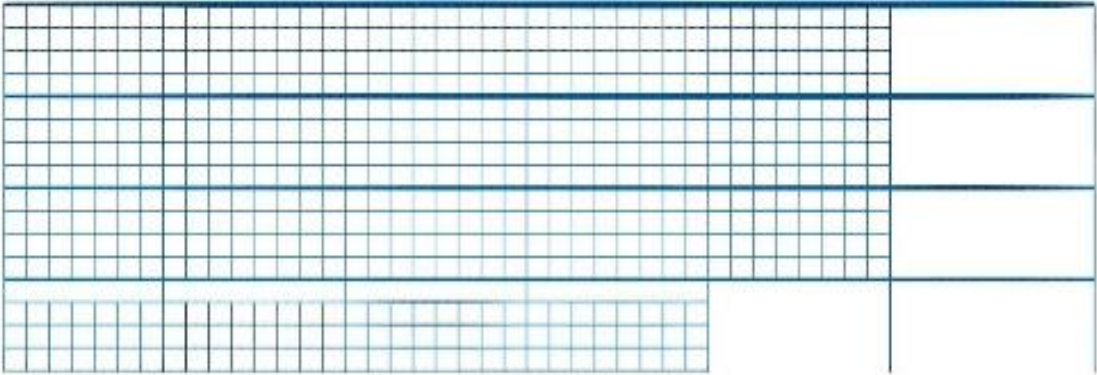


Figura 73: Séptimo modo de vibrar (alzado)
Flores J. & Andrade R., 2021

OCTAVO MODO DE VIBRAR

FACULTAD DE PSICOLOGÍA				
Octavo modo de vibrar				
#		Período(s)	Masa(Kg)	Porcentaje
8	X	0.0966	0.0127	0.00000277%
	Y		9.08	0.00198%

Tabla 27: Octavo modo de vibrar
Flores J. & Andrade R., 2021

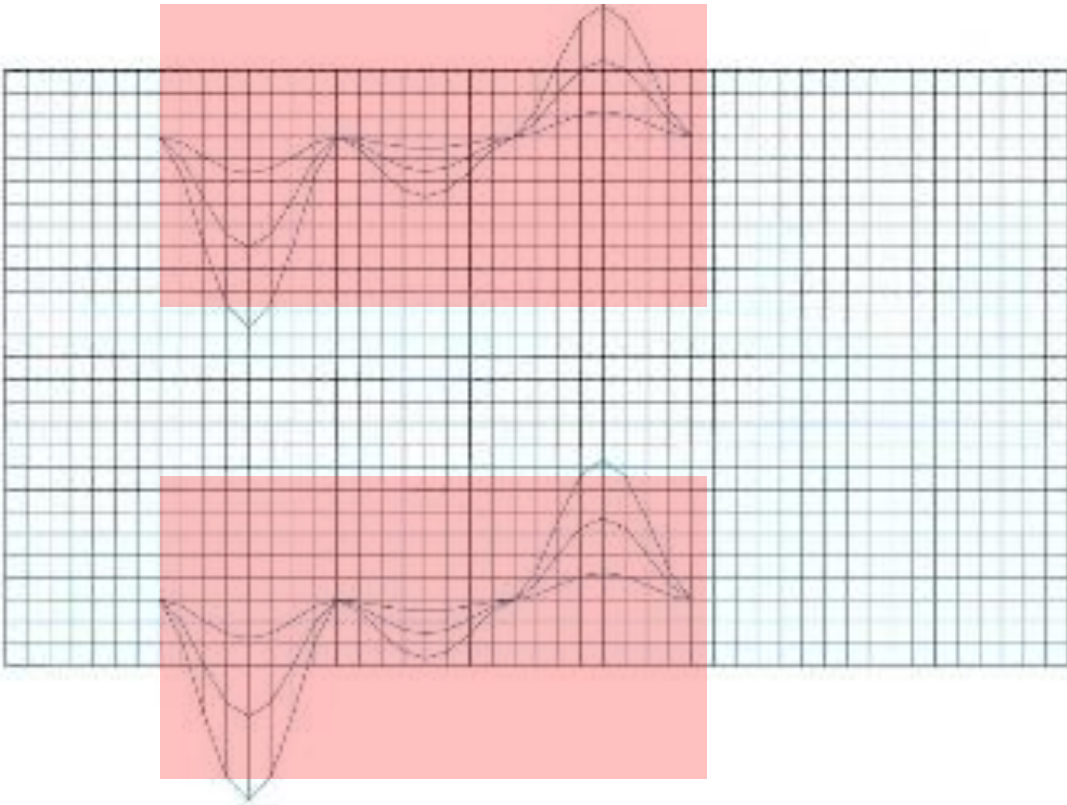


Figura 74: Octavo modo de vibrar (planta)
Flores J. & Andrade R., 2021

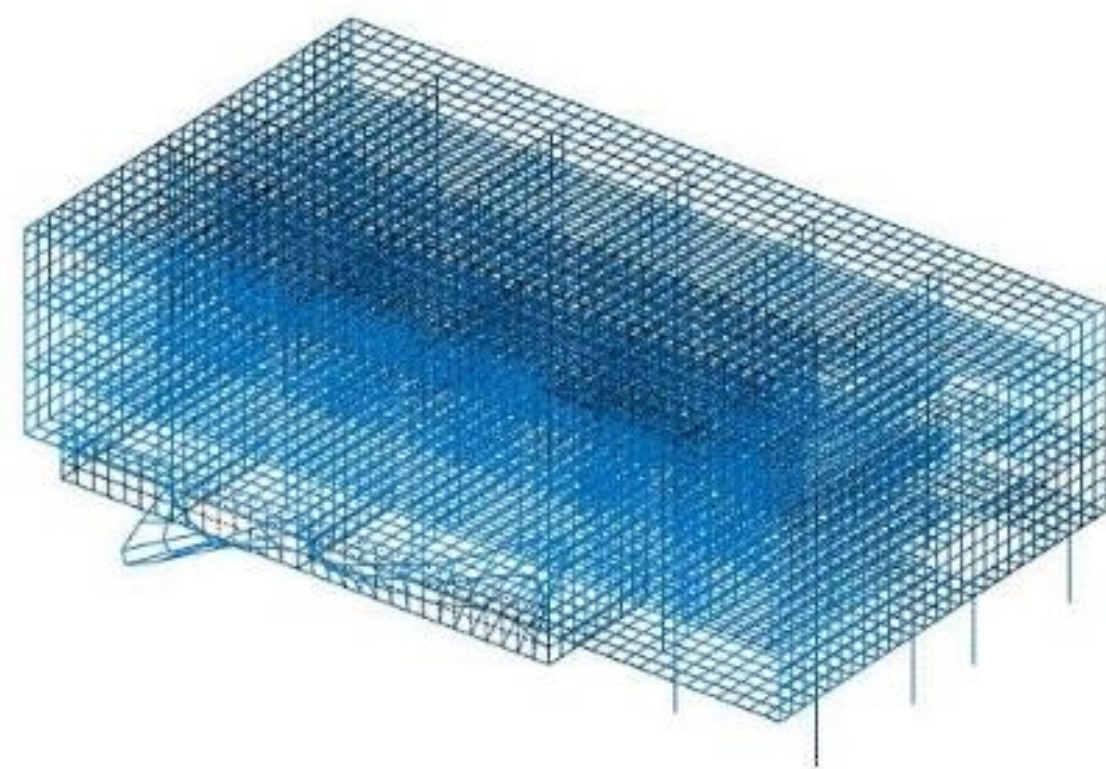


Figura 75: Octavo modo de vibrar (3D)
Flores J. & Andrade R., 2021

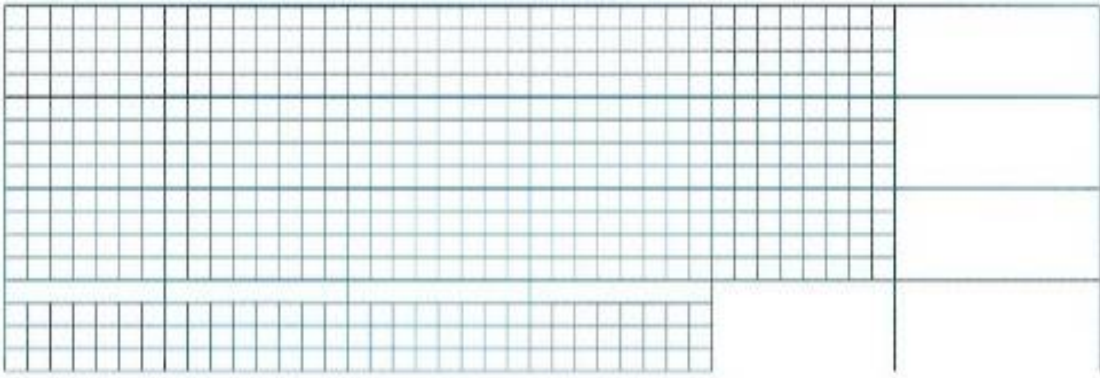


Figura 76: Octavo modo de vibrar (alzado)
Flores J. & Andrade R., 2021

NOVENO MODO DE VIBRAR

FACULTAD DE PSICOLOGÍA				
Noveno modo de vibrar				
#		Período (s)	Masa(Kg)	Porcentaje
9	X	0.0965	0.213	0.0000465
	Y		30.77	0.00673

Tabla 28: Noveno modo de vibrar
Flores J. & Andrade R., 2021

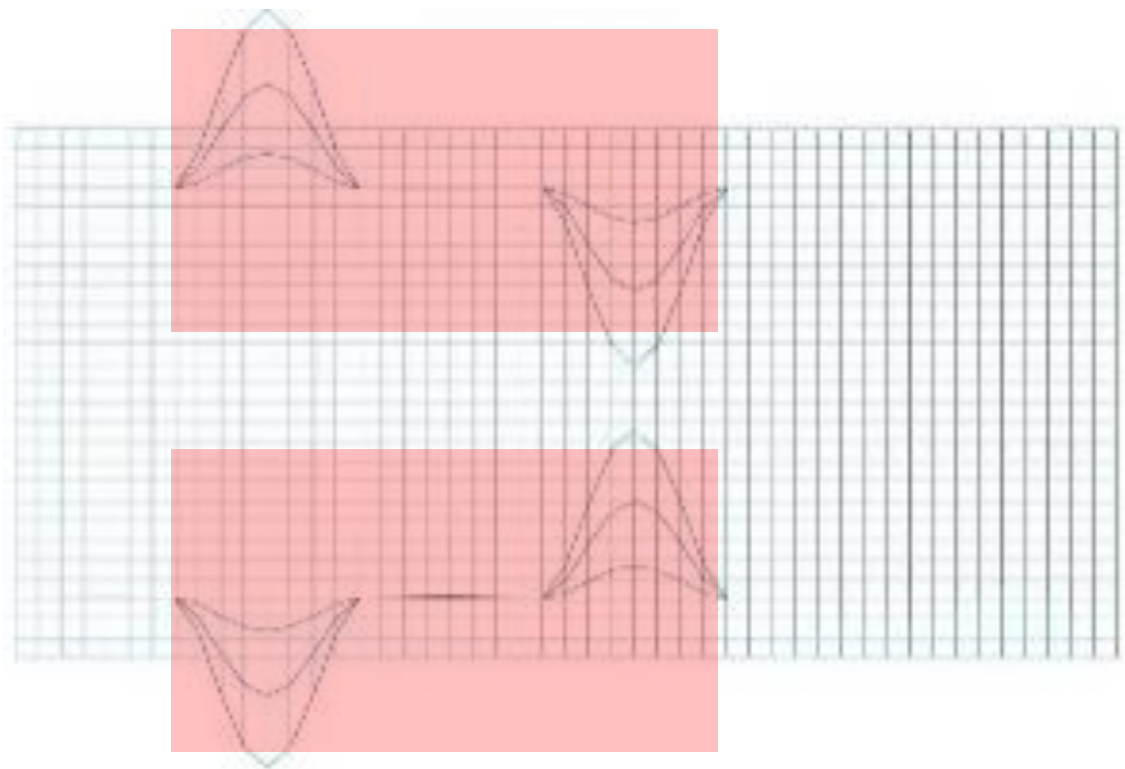


Figura 77: Noveno modo de vibrar (planta)
Flores J. & Andrade R., 2021

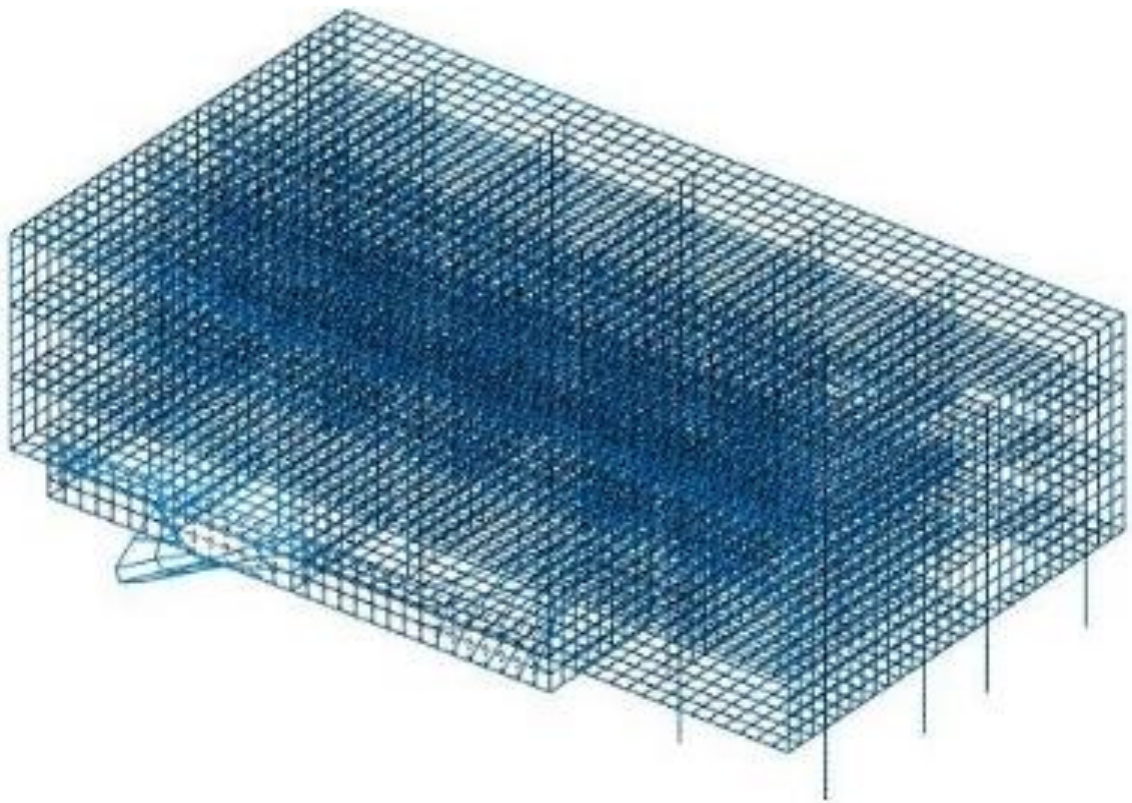


Figura 78: Noveno modo de vibrar (3D)
Flores J. & Andrade R., 2021

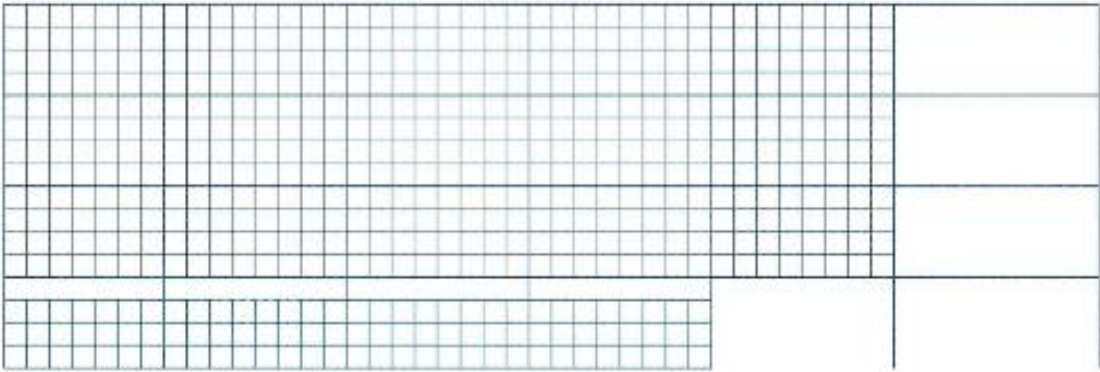


Figura 79: Noveno modo de vibrar (alzado)
Flores J. & Andrade R., 2021

DÉCIMO MODO DE VIBRAR

FACULTAD DE PSICOLOGÍA				
Décimo modo de vibrar				
#		Período(s)	Masa(Kg)	Porcentaje
10	X	0.0965	0.00000068	1.48*E-10%
	Y		0.199	0.000957%

Tabla 29: Décimo modo de vibrar
Flores J. & Andrade R., 2021

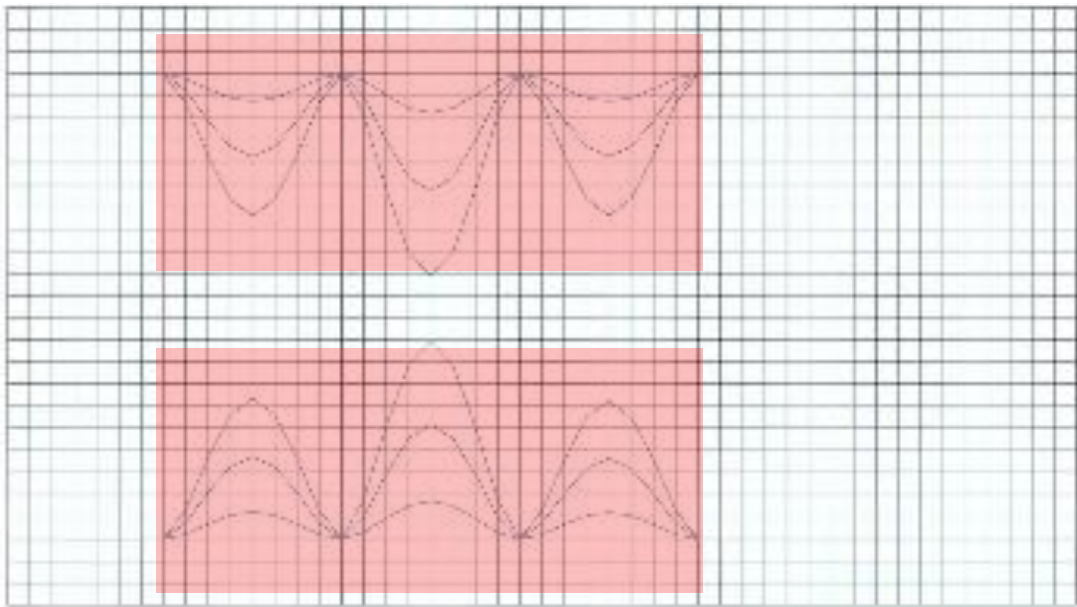


Figura 80: Décimo modo de vibrar (planta)
Flores J. & Andrade R., 2021

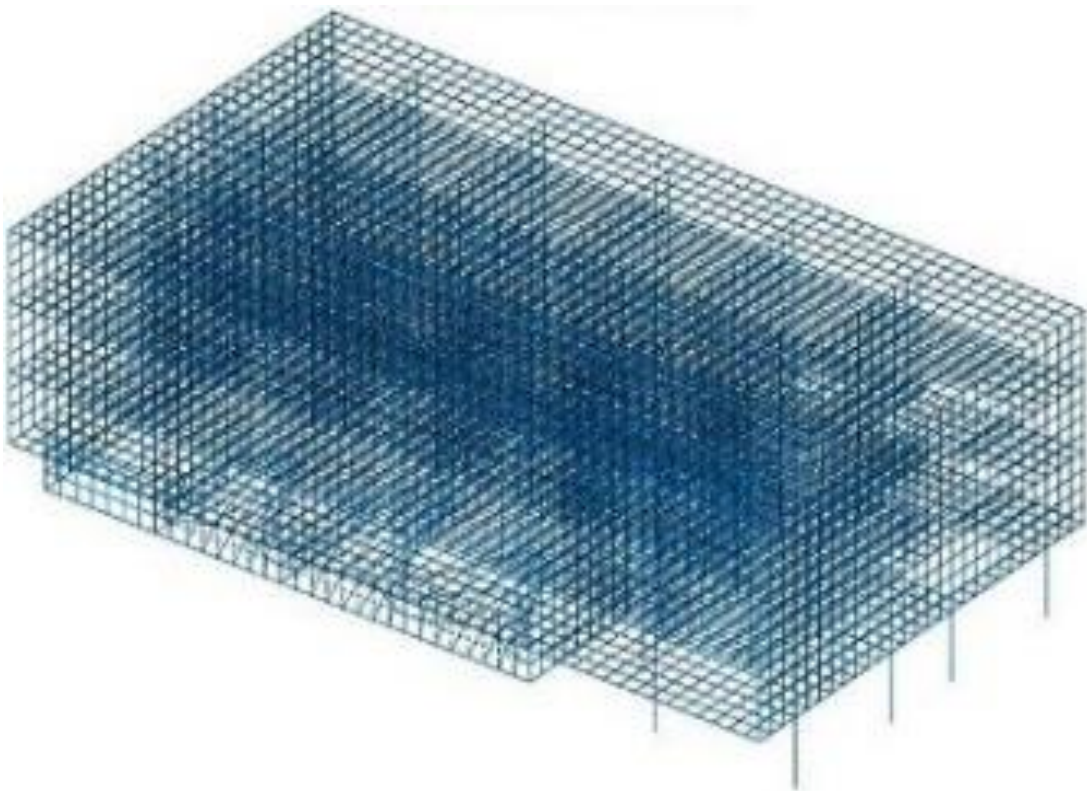


Figura 81: Décimo modo de vibrar (3D)
Flores J. & Andrade R., 2021



Figura 82: Décimo modo de vibrar (alzado)
Flores J. & Andrade R., 2021

De estos diez modos de vibrar se aprecia que en los primeros tres se concentran los mayores desplazamientos de masa mientras que en los siete siguientes se marcó una clara tendencia de disminución de estos porcentajes.

ANÁLISIS ESPECTRAL

El objetivo del análisis espectral es poder simular la conducta o comportamiento que tiene una estructura en específica sometida a fuerzas externas (Álvarez, J. & Morocho, J.,2020).

Espectro de diseño

Para conocer el espectro de diseño, la Norma Ecuatoriana de la Construcción facilita un mapa de zonificación sísmica que incluye valores desde 0.15g hasta 0.50 g de aceleración sísmica, clasificando 6 rangos de intensidad que son los siguientes (NEC, 2015).

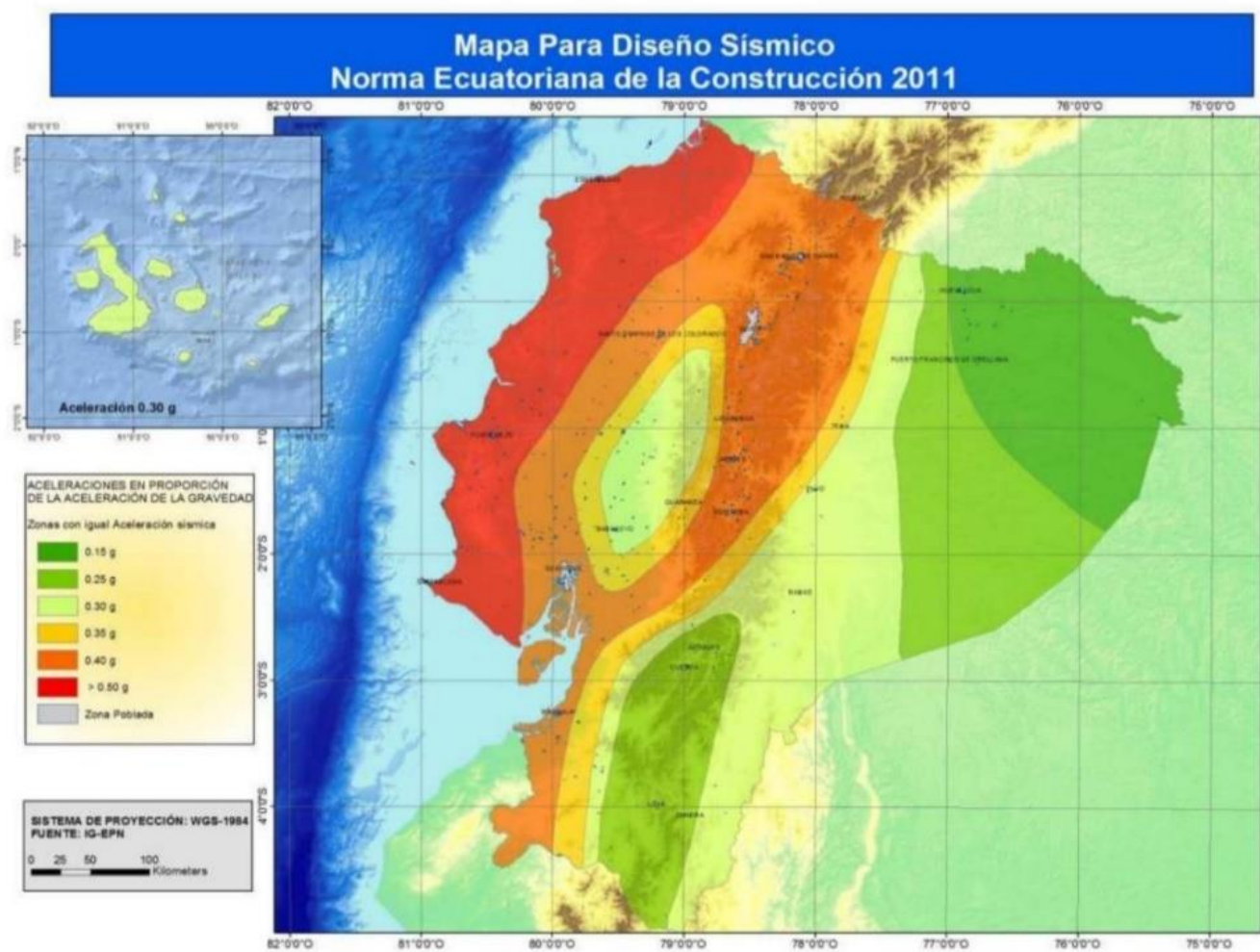


Figura 83: Zonas sísmicas para propósitos de diseño y valor del factor de zona Z
NEC, 2015

Fa: Coeficiente de amplificación de suelo en la zona de período corto, cuyos datos se observan en la tabla 32 (NEC, 2015).

Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Valor factor Z	0.0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.50
Caracterización del peligro sísmico	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy alta

Tabla 30: Valores del factor Z en función de la zona adoptada, NEC 2015
Flores J. & Andrade R., 2021

Se determina que todo el territorio ecuatoriano se encuentra con una peligrosidad sísmica alta con excepción de la zona nororiental que tiene una amenaza sísmica intermedia y la zona de la costa que tiene una amenaza sísmica muy alta (NEC, 2015).

Así mismo, para determinar el espectro de diseño se establecen tipos de perfiles de suelos para el diseño sísmico para lo cual se han definido 6 tipos de perfil de suelo:

- A:** Perfil de roca competente.
- B:** Perfil de roca de rigidez media.
- C:** Suelos muy densos o roca blanda.
- D:** Suelos rígidos que cumplan con $360 \text{ m/s} > V_s \geq 180 \text{ m/s}$ o $50 > N \geq 15.0$ o $100 \text{ kPa} > S_u \geq 50 \text{ kPa}$.
- E:** Suelos que cumplan con $V_s < 180 \text{ m/s}$ o que contengan un espesor total H mayor a 3m de arcillas blandas.
- F:** Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista (NEC, 2015).

Para estos perfiles de suelo se definen coeficientes Fa, Fd y Fs donde:

Tipo de perfil del subsuelo	ZONA SÍSMICA Y VALOR Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.50
A	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
B	1	1	1	1	1	1
C	1.40	1.30	1.25	1.23	1.20	1.18
D	1.60	1.40	1.30	1.25	1.2	1.12
E	1.80	1.40	1.25	1.10	1.0	0.85
F	Evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista.					

Tabla 31: Tipo de suelo y factores de sitio Fa
Flores J. & Andrade R., 2021

Fd: Amplificación de las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos para diseño en roca (NEC, 2015).

Tipo de perfil del subsuelo	ZONA SÍSMICA Y VALOR Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.50
A	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
B	1	1	1	1	1	1
C	1.36	1.28	1.19	1.15	1.11	1.06
D	1.62	1.45	1.36	1.28	1.19	1.11
E	2.10	1.75	1.70	1.65	1.60	1.50
F	Evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista.					

Tabla 32: Tipo de suelo y factores de sitio Fd
Flores J. & Andrade R., 2021

Fs: Comportamiento no lineal del suelo (NEC, 2015).

Tipo de perfil del subsuelo	ZONA SÍSMICA Y VALOR Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.50
A	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
B	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
C	0.85	0.94	1.02	1.06	1.11	1.23
D	1.02	1.06	1.11	1.19	1.28	1.40
E	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00
F	Evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista.					

Tabla 33: Tipo de suelo y factores de sitio Fs
Flores J. & Andrade R., 2021

η (eta): Razón entre la aceleración espectral S_a ($T = 0.1$ s) y el PGA para el período de retorno seleccionado. Los valores de eta se definen de acuerdo a la zona o región del Ecuador y son los siguientes:

Región	Costa	Sierra	Oriente
Valor de eta	1.80	2.48	2.60

Tabla 34: Valores η (eta), en las tres regiones principales del Ecuador.
Flores J. & Andrade R., 2021

r: Factor en base a la ubicación geográfica.

Para los tipos de suelo A, B y C, el valor r , es igual a 1 mientras que para los tipos de suelo D o E, el valor r , es igual a 1.5 (NEC, 2015).

De acuerdo a la Norma Ecuatoriana de la Construcción, la ciudad de Cuenca tiene una aceleración máxima en el terreno (Z) de 0.25 y su suelo es de tipo C, por tanto, los valores de los coeficientes son los siguientes:

r: Factor en base a la ubicación geográfica.

Para los tipos de suelo A, B y C, el valor *r*, es igual a 1 mientras que para los tipos de suelo D o E, el valor *r*, es igual a 1.5 (NEC, 2015).

De acuerdo a la Norma Ecuatoriana de la Construcción, la ciudad de Cuenca tiene una aceleración máxima en el terreno (*Z*) de 0.25 y su suelo es de tipo C, por tanto, los valores de los coeficientes son los siguientes:

Coeficientes del tipo de suelo de Cuenca	
Tipo de suelo	C
Z	0.25
Fa	1.30
Fd	1.28
Fs	0.94
eta	2.48
r	1

Tabla 35: Coeficientes del tipo de suelo en Cuenca
Flores J. & Andrade R., 2021

Con estos datos definidos e ingresados al programa Matlab se obtiene el espectro de la ciudad de Cuenca, necesario para realizar el análisis de la estructura de esta investigación.

Este espectro de diseño se basa en las condiciones geológicas, tectónicas, sismológicas y en el tipo de suelo donde se encuentra emplazada la Facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca, obteniendo la relación entre la aceleración del suelo y el tiempo en segundos, definiendo los modos de vibrar de la estructura.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.431733	0.258163	0.232456	0.11866	0.101108	0.097405	0.096555	0.096554	0.096526	0.965516

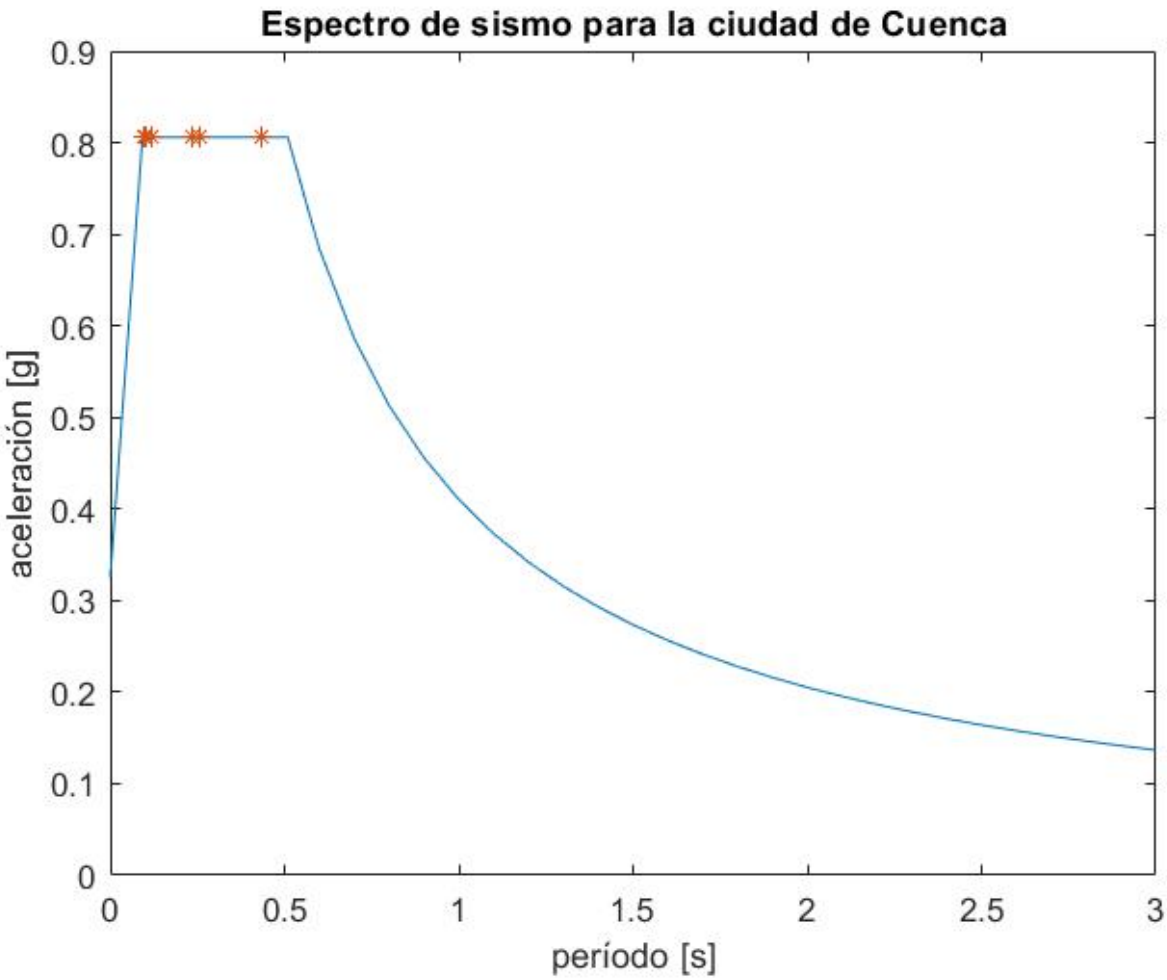


Figura 84: Espectro de diseño
Flores J. & Andrade R., 2021

CÁLCULO DE DERIVAS

De acuerdo a la Norma Ecuatoriana de la Construcción una deriva de piso es un desplazamiento lateral relativo de un piso con respecto al piso consecutivo, medido en dos puntos ubicados en la misma línea vertical de la estructura.

La función de las derivas en esta investigación es conocer el riesgo de afectación de la estructura de la facultad de Psicología, en los materiales como el hormigón y la mampostería.

Los límites permisibles de las derivas de los pisos definen que la deriva máxima para cualquier piso no debe excederse de los límites de deriva inelástica (NEC, 2015) y son los siguientes:

TIPO DE ESTRUCTURA	DERIVA MÁXIMA
Hormigón armado, estructuras metálicas y madera	0.02
De mampostería	0.01

Tabla 36: Derivas máximas para el hormigón y la mampostería, NEC 2015
Flores J. & Andrade R., 2021

En este proyecto de investigación, para el cálculo de derivas se procedió a dividir la planta de la Facultad de Psicología en 6 cuadrantes para posteriormente identificar cuáles son las zonas más y menos vulnerables de la edificación, esta división quedó determinada de la siguiente manera:

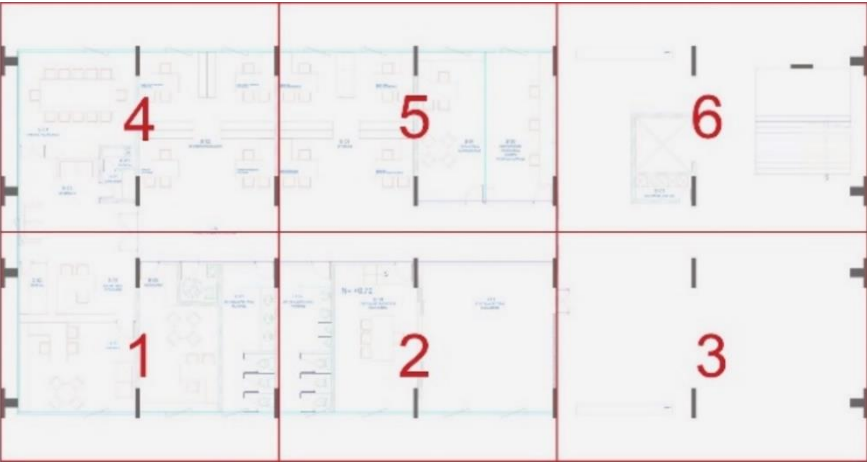


Figura 85: División de zonas para el cálculo de derivas
Flores J. & Andrade R., 2021

En este caso la altura de entrepiso es de 3.20 metros por lo que el valor de las derivas máximas son los siguientes:

Estructuras de:	Deriva máxima	Altura de piso	Deriva máxima admisible
Hormigón armado, estructuras metálicas y madera	0.02	3.20 m	0.064
De mampostería	0.01		0.032

Tabla 37: Cálculo de derivas máximas de la edificación
Flores J. & Andrade R., 2021

Una vez definidas las zonas y los valores máximos admisibles, se procedió a obtener los cálculos de derivadas en cada zona y por cada planta de la edificación en Matlab

PLANTA BAJA (PB)

Deriva de piso del nivel 0 a 3.20 metros en dirección X

De los 6 cuadrantes en los que se dividió la losa se constató que a nivel de muros y entrepiso en el eje X se produce una mayor deriva en el cuadrante 2, sin embargo, son valores muy por debajo de la deriva máxima admisible por lo que si cumplen con la normativa y existe un menor riesgo de colapso de la edificación.

Deriva máxima admisible de muro	0.032	Deriva máxima admisible entrepiso	0.064	
Cuadrante	Deriva de muro	Cumple/ No cumple	Deriva de entrepiso	Cumple/ No cumple
1	0.0072669	Si cumple	0.0087711	Si cumple
2	0.0073243	Si cumple	0.0088223	Si cumple
3	0.0073243	Si cumple	0.0088139	Si cumple
4	0.0072570	Si cumple	0.0087676	Si cumple
5	0.0072898	Si cumple	0.0088066	Si cumple
6	0.0072903	Si cumple	0.0088042	Si cumple
Promedio	0.0072921	Si cumple	0.008797617	Si cumple

Tabla 38: Derivas de planta baja por cuadrantes en dirección X
Flores J. & Andrade R., 2021

Nodos de piso en el nivel 3.20 m

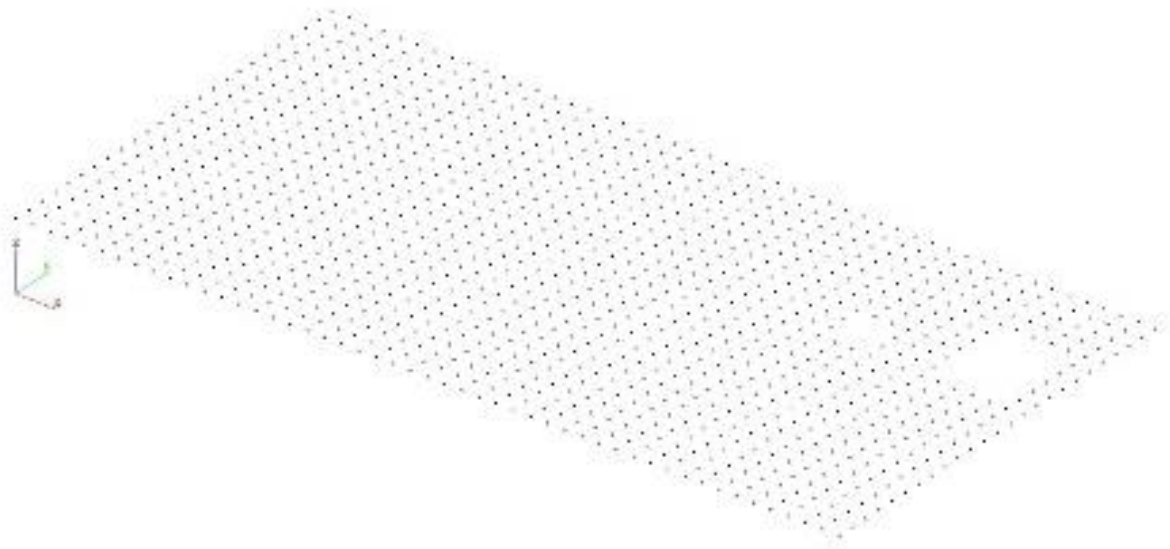


Figura 86: Nodos de planta baja, MATLAB
Flores J. & Andrade R., 2021

Deriva de planta baja, en dirección X

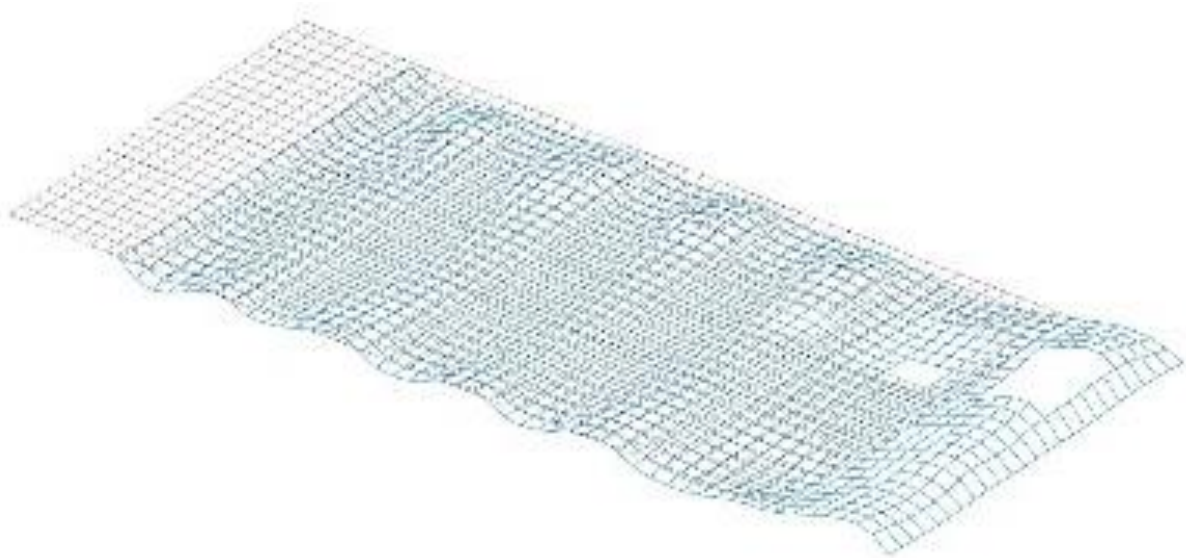


Figura 87: Deriva de planta baja en X,
Flores J. & Andrade R., 2021

PLANTA BAJA (PB)

Deriva de piso del nivel 0 a 3.20 metros en dirección Y

En el eje Y la deriva de muros es mayor en el cuadrante 4 mientras que en el entrepiso la deriva mayor se da en el cuadrante 3 con valores que si cumplen con la norma.

Deriva máxima admisible de muro	0.032	Deriva máxima admisible entrepiso	0.064	
Cuadrante	Deriva de muro	Cumple/ No cumple	Deriva de entrepiso	Cumple/ No cumple
1	0.00121791	Si cumple	0.0011461	Si cumple
2	0.00102050	Si cumple	0.0014105	Si cumple
3	0.00122360	Si cumple	0.0018291	Si cumple
4	0.00123770	Si cumple	0.0011404	Si cumple
5	0.00101490	Si cumple	0.0014038	Si cumple
6	0.00122080	Si cumple	0.0018265	Si cumple
Promedio	0.0011559	Si cumple	0.0014594	Si cumple

Tabla 39: Derivas de planta baja por cuadrantes en dirección Y
Flores J. & Andrade R., 2021

Nodos de piso en el nivel 3.20 m

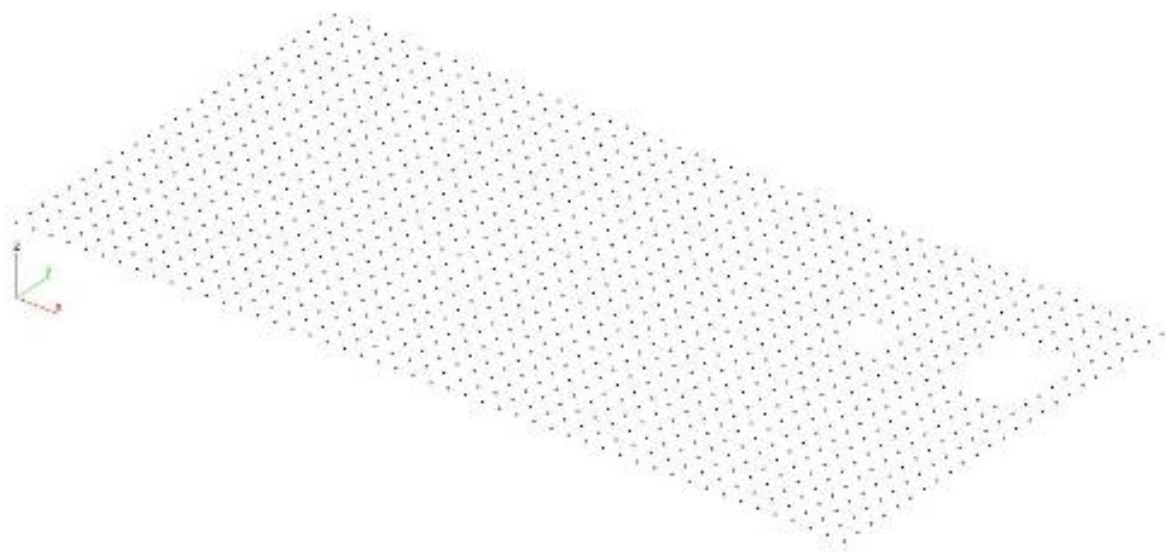


Figura 88: Nodos de planta baja, MATLAB
Flores J. & Andrade R., 2021

Deriva de planta baja, en dirección Y

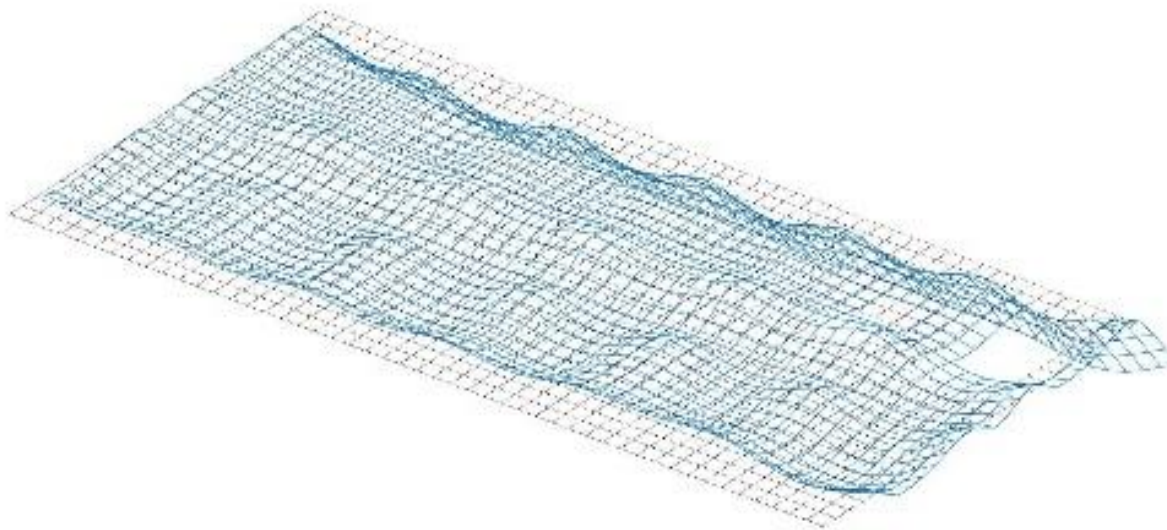


Figura 89: Deriva de planta baja en Y, MATLAB
Flores J. & Andrade R., 2021

PRIMERA PLANTA ALTA (1PA)

Deriva de piso del nivel 3.20 a 6.40 metros en dirección X

En la primera planta alta en el eje X la mayor deriva de muro se da en el cuadrante al igual que en el entrepiso. Estos valores si cumplen con la norma.

Deriva máxima admisible de muro	0.032	Deriva máxima admisible entrepiso	0.064	
Cuadrante	Deriva de muro	Cumple/ No cumple	Deriva de entrepiso	Cumple/ No cumple
1	0.0038790	Si cumple	0.0026719	Si cumple
2	0.0037508	Si cumple	0.0025829	Si cumple
3	0.0039656	Si cumple	0.0026569	Si cumple
4	0.0039136	Si cumple	0.0027059	Si cumple
5	0.0038540	Si cumple	0.0026774	Si cumple
6	0.0040640	Si cumple	0.0027664	Si cumple
Promedio	0.0039045	Si cumple	0.0026769	Si cumple

Tabla 40: Derivas de primera planta alta por cuadrantes en dirección X
Flores J. & Andrade R., 2021

Nodos de piso en el nivel 6.40 m

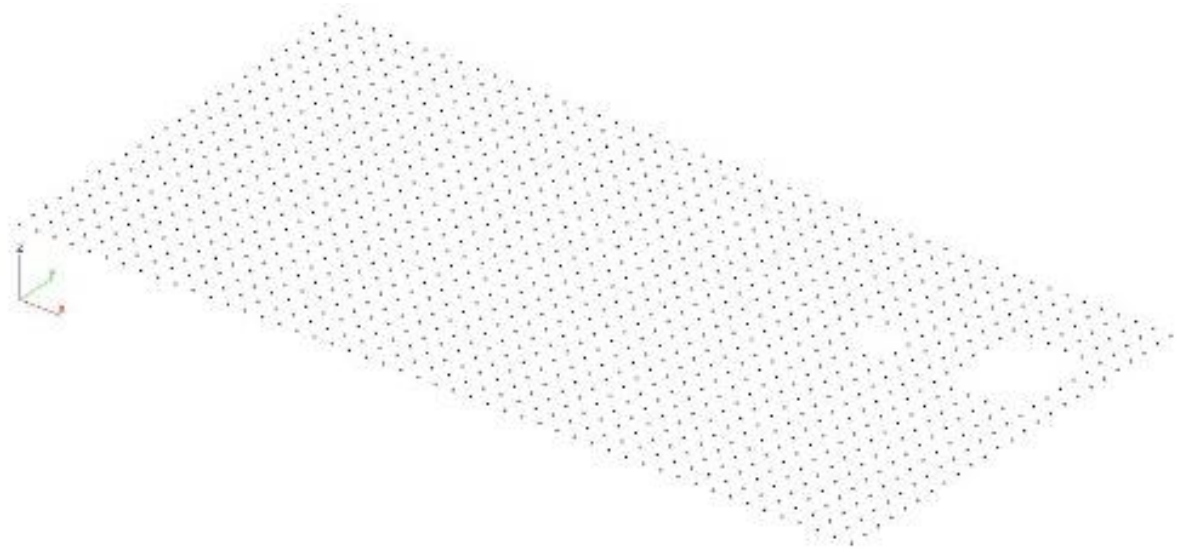


Figura 90: Nodos de primera planta alta, MATLAB
Flores J. & Andrade R., 2021

Deriva de piso del nivel 3.20 a 6.40 metros en dirección X

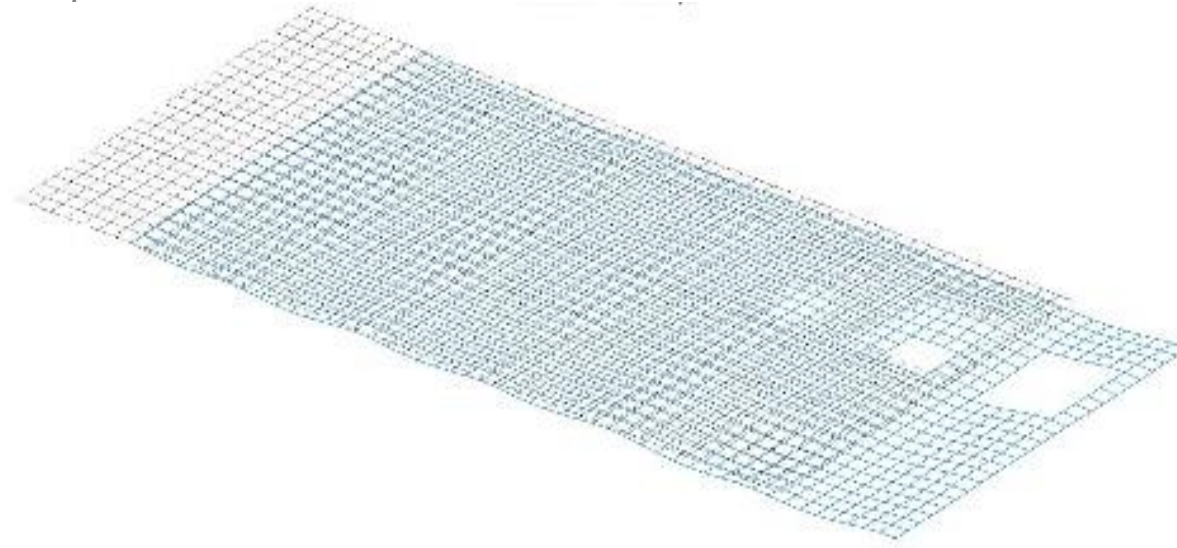


Figura 91: Deriva de primera Pa en X, MATLAB
Flores J. & Andrade R., 2021

PRIMERA PLANTA ALTA (1PA)

Deriva de piso del nivel 3.20 a 6.40 metros en dirección Y

En el eje Y la mayor deriva se encuentra en el cuadrante 3 y en el entrepiso en el cuadrante 5.

Deriva máxima admisible de muro	0.032	Deriva máxima admisible entrepiso	0.064	
Cuadrante	Deriva de muro	Cumple/ No cumple	Deriva de entrepiso	Cumple/ No cumple
1	0.0012227	Si cumple	0.0015620	Si cumple
2	0.0018141	Si cumple	0.0016989	Si cumple
3	0.0019073	Si cumple	0.0016700	Si cumple
4	0.0011867	Si cumple	0.0015694	Si cumple
5	0.0011867	Si cumple	0.0017092	Si cumple
6	0.0019034	Si cumple	0.0016623	Si cumple
Promedio	0.00153682	Si cumple	0.0016453	Si cumple

Tabla 41: Derivas de primera planta alta por cuadrantes en dirección Y
Flores J. & Andrade R., 2021

Nodos de piso en el nivel 6.40 m

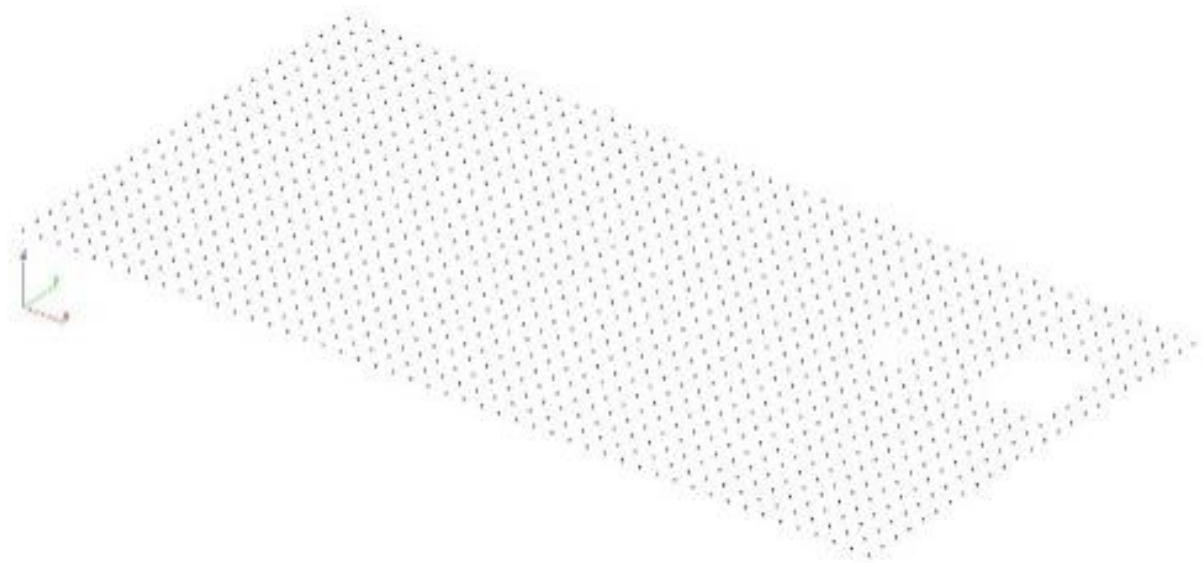


Figura 92: Nodos de primera planta alta, MATLAB
Flores J. & Andrade R., 2021

Deriva de piso del nivel 3.20 a 6.40 metros en dirección Y

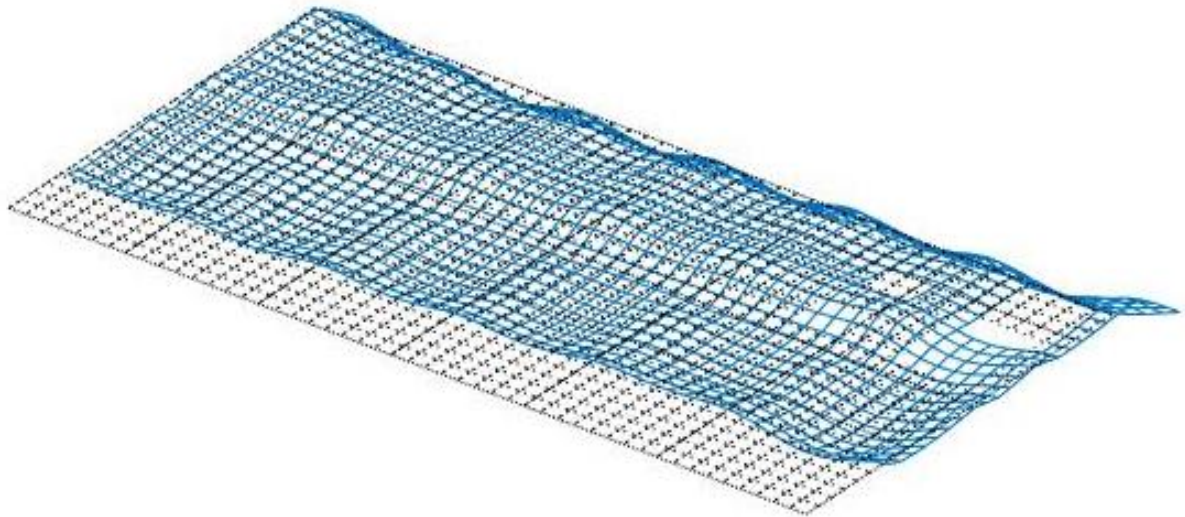


Figura 93: Deriva de primera Pa en Y, MATLAB
Flores J. & Andrade R., 2021

SEGUNDA PLANTA ALTA (2PA)

Deriva de piso del nivel 6.40 a 9.60 metros en dirección X

En l a segunda planta alta en el eje X la mayor deriva de muro se da en el cuadrante 2 al igual que en el entrepiso y con valores por debajo de la deriva máxima admisible.

Deriva máxima admisible de muro	0.032	Deriva máxima admisible entrepiso	0.064	
Cuadrante	Deriva de muro	Cumple/ No cumple	Deriva de entrepiso	Cumple/ No cumple
1	0.0013230	Si cumple	0.0011516	Si cumple
2	0.0014027	Si cumple	0.0011941	Si cumple
3	0.0012893	Si cumple	0.0011619	Si cumple
4	0.0013274	Si cumple	0.0011753	Si cumple
5	0.0013653	Si cumple	0.0011729	Si cumple
6	0.0012720	Si cumple	0.0011041	Si cumple
Promedio	0.00132995	Si cumple	0.00115998	Si cumple

Tabla 42: Derivas de segunda planta alta por cuadrantes en dirección X
Flores J. & Andrade R., 2021

Nodos de piso en el nivel 9.60 m

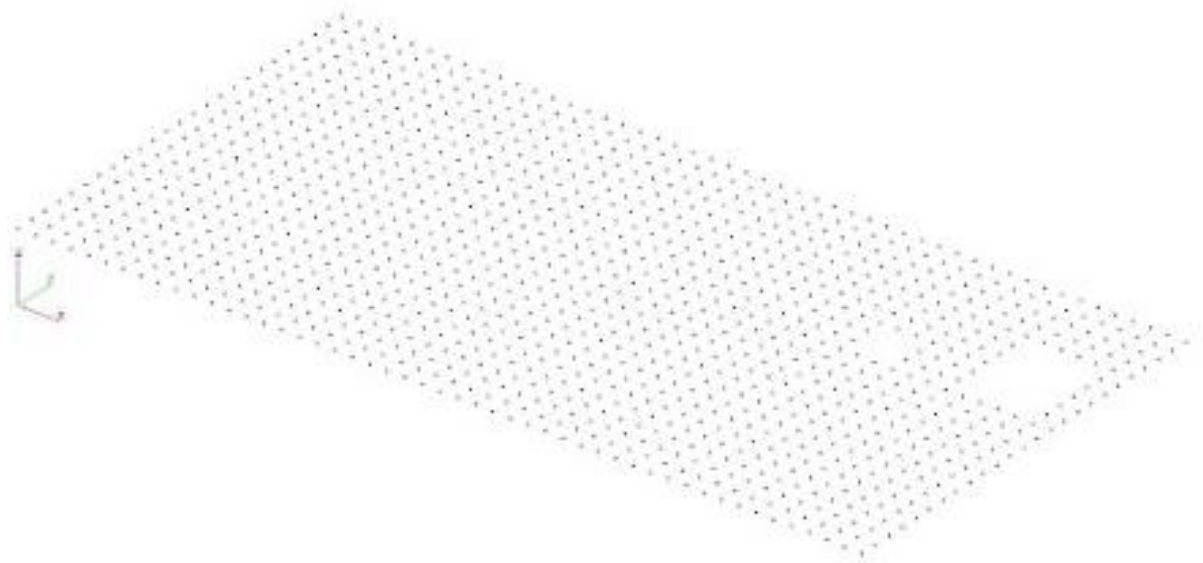


Figura 94: Nodos de segunda planta alta, MATLAB
Flores J. & Andrade R., 2021

Deriva de piso del nivel 6.40 a 9.60 metros en dirección X

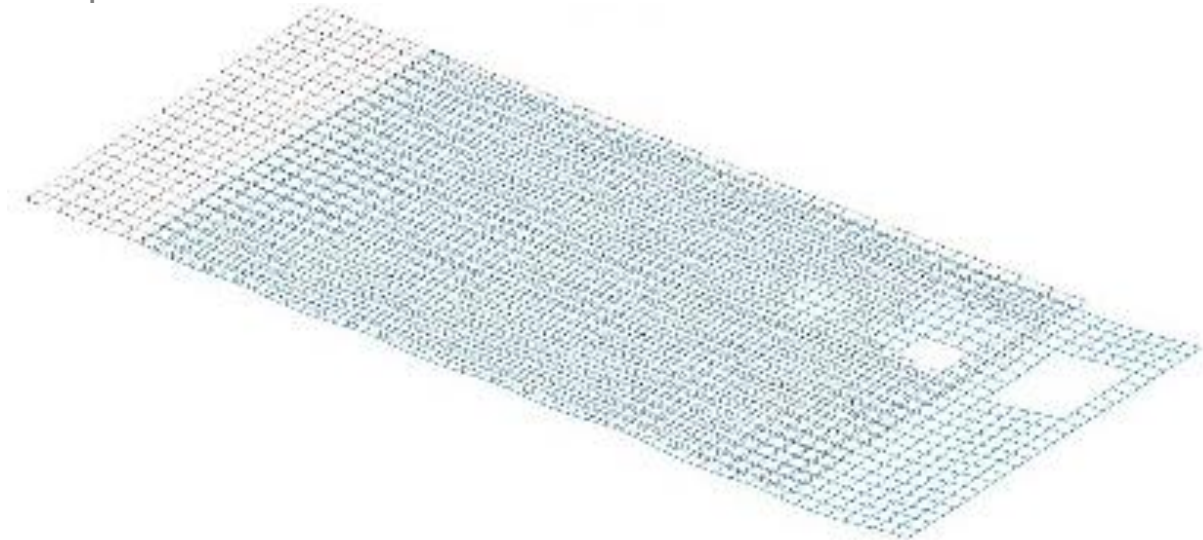


Figura 95: Deriva de segunda Pa en X, MATLAB
Flores J. & Andrade R., 2021

SEGUNDA PLANTA ALTA (2PA)

Deriva de piso del nivel 6.40 a 9.60 metros en dirección Y

En el eje Y la mayor deriva de muro se da en el cuadrante 5 mientras que la mayor deriva de entrepiso se da en el cuadrante 1.

Deriva máxima admisible de muro	0.032	Deriva máxima admisible entrepiso	0.064	
Cuadrante	Deriva de muro	Cumple/ No cumple	Deriva de entrepiso	Cumple/ No cumple
1	0.0014333	Si cumple	0.0013536	Si cumple
2	0.0014498	Si cumple	0.0013446	Si cumple
3	0.0013529	Si cumple	0.0012394	Si cumple
4	0.0014300	Si cumple	0.0013518	Si cumple
5	0.0024272	Si cumple	0.0013405	Si cumple
6	0.0013451	Si cumple	0.0012319	Si cumple
Promedio	0.00157305	Si cumple	0.0013103	Si cumple

Tabla 43: Derivas de segunda planta alta por cuadrantes en dirección Y
Flores J. & Andrade R., 2021

Nodos de piso en el nivel 9.60 m

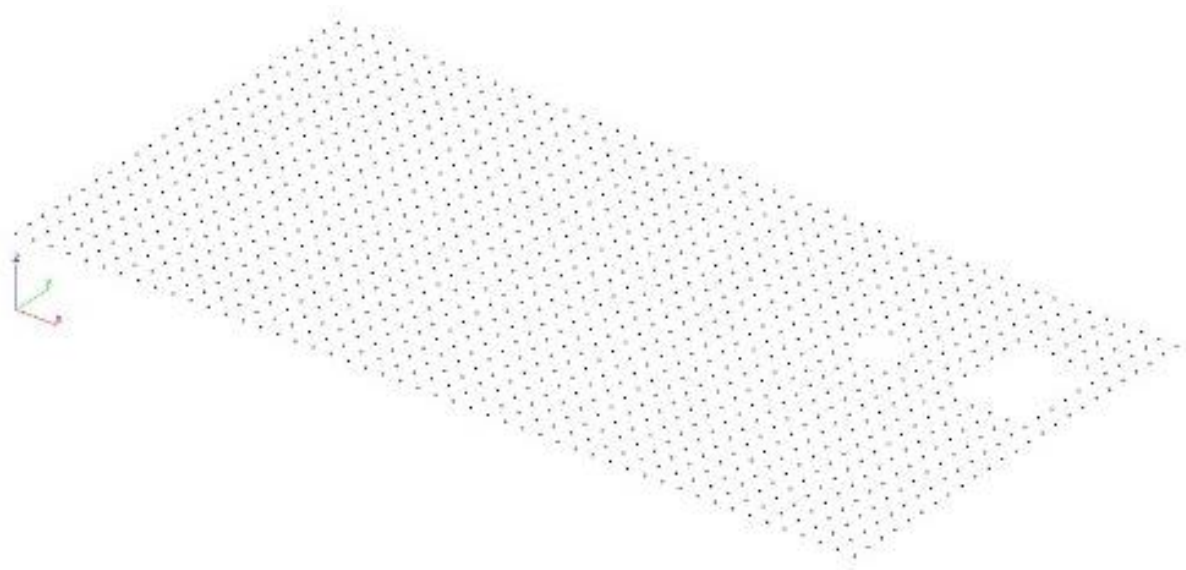


Figura 96: Nodos de segunda planta alta, MATLAB Flores J. & Andrade R., 2021

Deriva de piso del nivel 6.40 a 9.60 metros en dirección Y

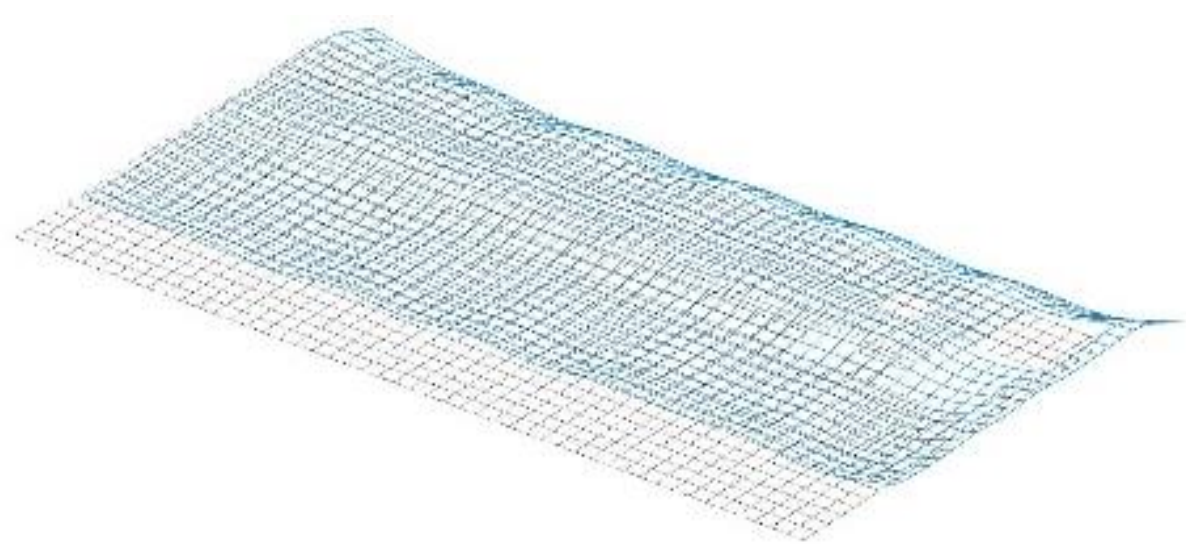


Figura 97: Deriva de segunda Pa en Y, MATLAB
Flores J. & Andrade R., 2021

TERCERA PLANTA ALTA (3PA)

Deriva de piso del nivel 9.60 a 12.80 metros en dirección X

En la tercera y última planta la mayor deriva de muro se da en el cuadrante 4 al igual que la deriva de entrepiso con valores que si cumplen la norma.

Deriva máxima admisible de muro	0.032	Deriva máxima admisible entrepiso	0.064	
Cuadrante	Deriva de muro	Cumple/ No cumple	Deriva de entrepiso	Cumple/ No cumple
1	0.00079264	Si cumple	0.00070958	Si cumple
2	0.00078381	Si cumple	0.00069061	Si cumple
3	0.00079202	Si cumple	0.00069684	Si cumple
4	0.00081619	Si cumple	0.00072919	Si cumple
5	0.00068791	Si cumple	0.00071173	Si cumple
6	0.00018143	Si cumple	0.00069809	Si cumple
Promedio	0.000675667	Si cumple	0.00070601	Si cumple

Tabla 44: Derivas de tercera planta alta por cuadrantes en dirección X
Flores J. & Andrade R., 2021

Nodos de piso en el nivel 12.80 m

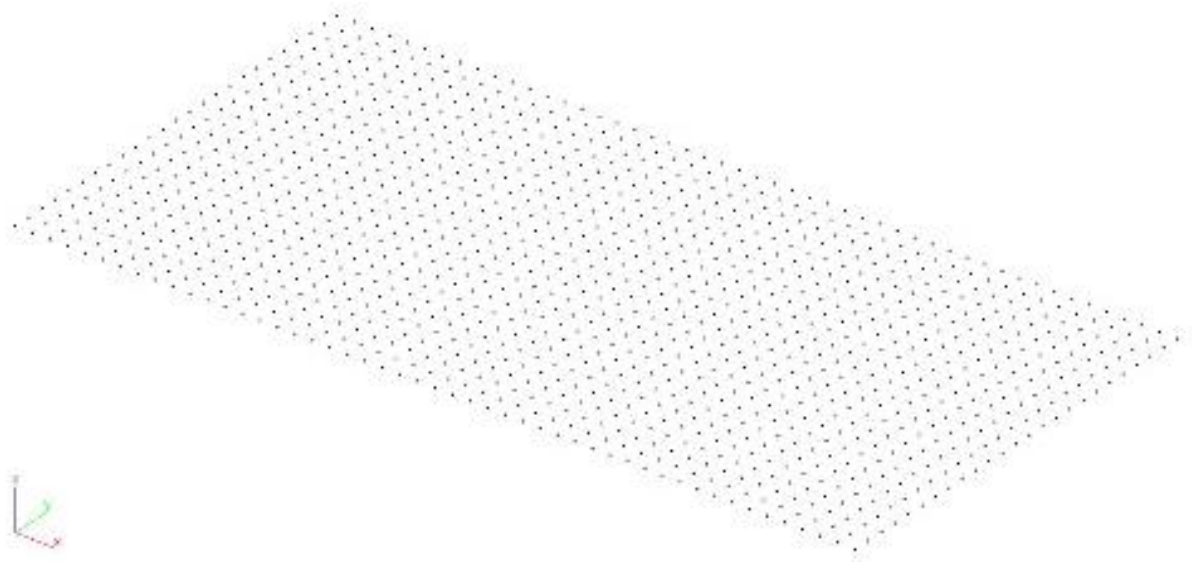


Figura 98: Nodos de tercera planta alta, MATLAB
Flores J. & Andrade R., 2021

Deriva de piso del nivel 9.60 a 12.80 metros en dirección X

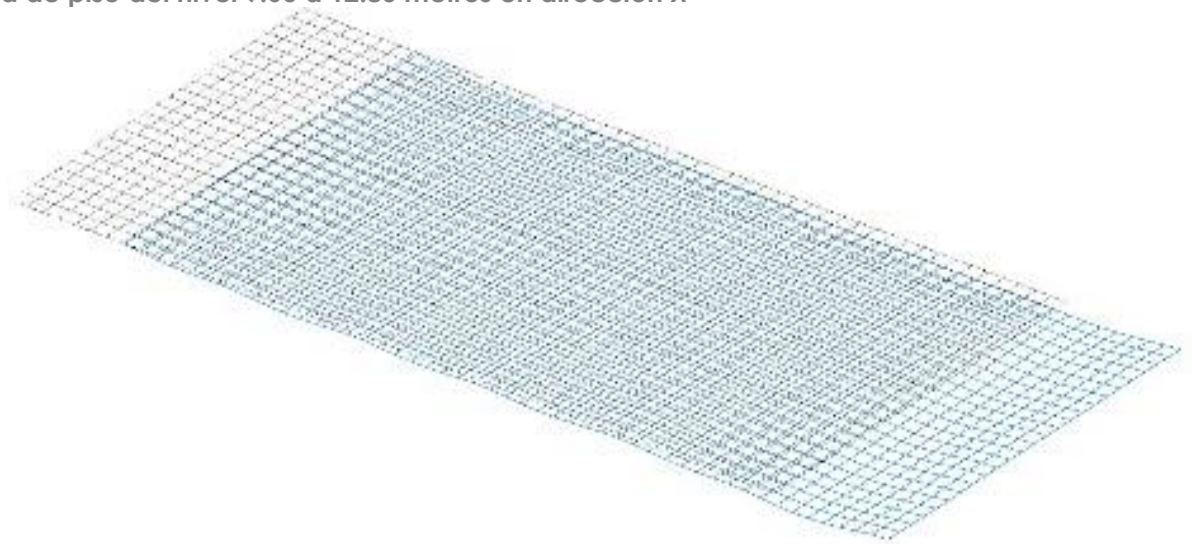


Figura 99: Deriva de tercera Pa en X, MATLAB
Flores J. & Andrade R., 2021

TERCERA PLANTA ALTA (3PA)

Deriva de piso del nivel 0 a 3.20 metros en dirección Y

En el eje Y la deriva máxima se da en el cuadrante 2 mientras que en el entrepiso se da en el cuadrante 6.

Deriva máxima admisible de muro	0.032	Deriva máxima admisible entrepiso	0.064	
Cuadrante	Deriva de muro	Cumple/ No cumple	Deriva de entrepiso	Cumple/ No cumple
1	0.00084773	Si cumple	0.00073701	Si cumple
2	0.00085130	Si cumple	0.00073513	Si cumple
3	0.00084413	Si cumple	0.00073513	Si cumple
4	0.00043486	Si cumple	0.00074254	Si cumple
5	0.00065720	Si cumple	0.00073853	Si cumple
6	0.00059750	Si cumple	0.00076686	Si cumple
Promedio	0.00070545	Si cumple	0.00074253	Si cumple

Tabla 45: Derivas de tercera planta alta por cuadrantes en dirección Y
Flores J. & Andrade R., 2021

Nodos de piso en el nivel 12.80 m

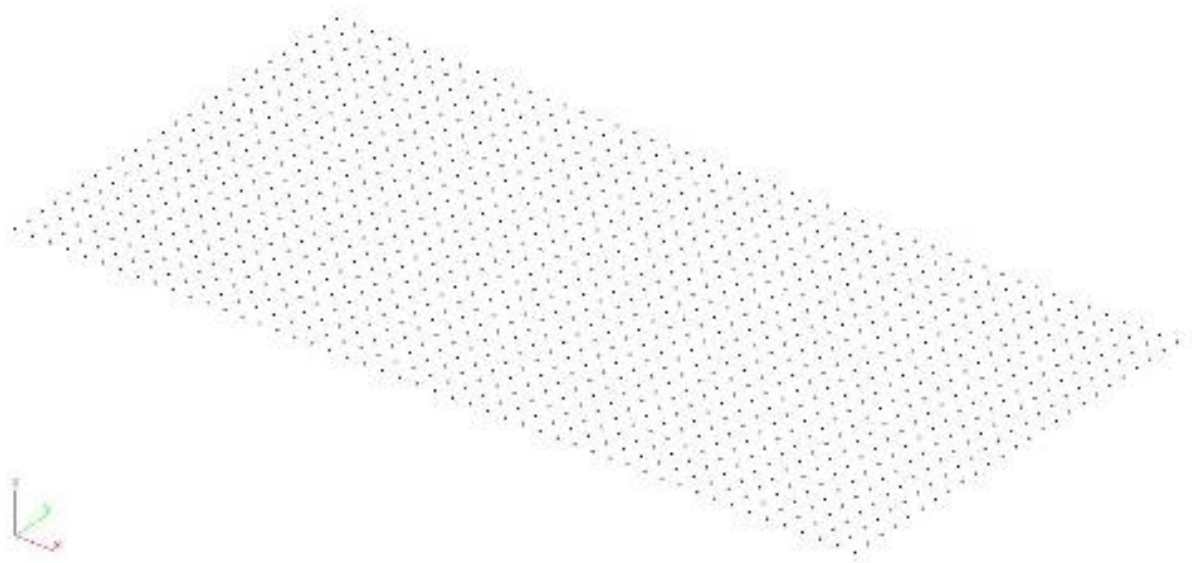


Figura 100: Nodos de tercera planta alta, MATLAB
Flores J. & Andrade R., 2021

Deriva de piso del nivel 9.60 a 12.80 metros en dirección Y

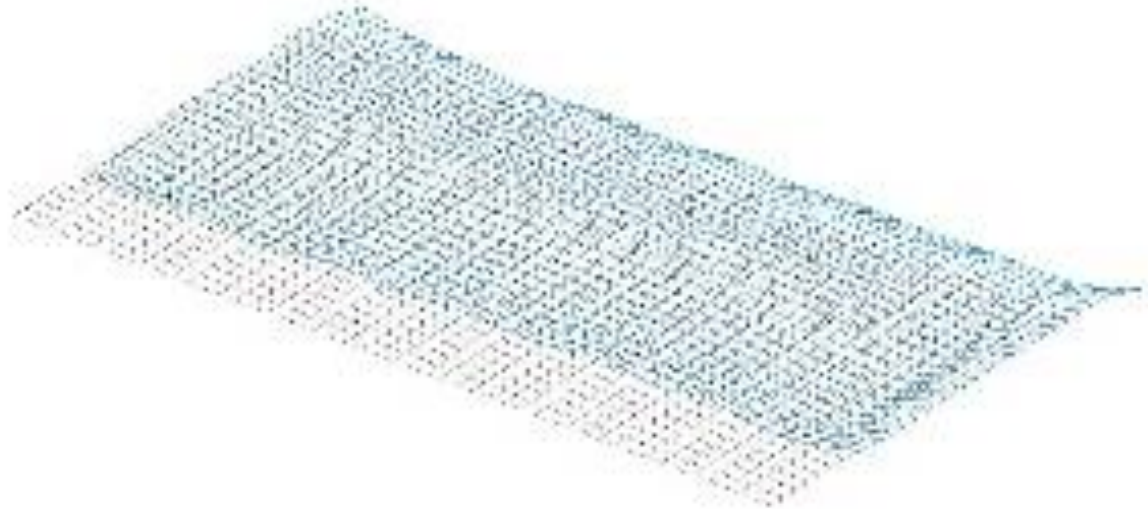


Figura 101: Deriva de tercera Pa en Y, MATLAB
Flores J. & Andrade R., 2021

3.3.3. ETAPA 3

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Análisis Modal

La masa total de la edificación de la Facultad de Psicología es de 457 191.804 Kgf lo que representa el 100% de la masa.

En dirección X en los primeros 10 modos de vibración se desplaza el 98.12% de la masa total de la edificación.

En el análisis modal se observa que en dirección del eje X la mayor cantidad de masa de la edificación se desplaza en el primer modo de vibrar que es de 0.432s, esta masa representa el 95.85% de la masa total y es de 438 225.082 kilogramos.

MODOS DE VIBRAR EN X			
#	Período	Cantidad de masa desplazada en el sismo (Kg)	Porcentaje de masa desplazada en el sismo (%)
1	0.432	438225.082	95.85 %
2	0.258	2.122	0.0004643 %
3	0.232	10.476	0.00022914 %
4	0.119	10300.459	2.2529843 %
5	0.101	3.71992475	0.0008136 %
6	0.0974	70.3255241	0.0153886 %
7	0.0966	0.00897618	0.0000020 %
8	0.0966	0.01270485	0.0000028 %
9	0.0965	0.2135765	0.0000467 %
10	0.0965	0.00000068	0.000000002 %
Total		448 612.451	98.12 %

Tabla 46: Modos de vibrar en el eje X
Flores J. & Andrade R., 2021

Por otro lado, la mayor cantidad de masa que se desplaza en el eje Y se da en el segundo modo de vibrar que es de 0.258s y en el tercer modo de vibrar que es de 0.232s desplazándose 266 255.041 Kg lo que representa el 58.23% y 106 951.815 Kg que es el 23.39%.

MODOS DE VIBRAR EN Y			
#	Período	Cantidad de masa desplazada en el sismo (Kg)	Porcentaje de masa desplazada en el sismo
1	0.432	0.08257947	0.0000180623 %
2	0.258	266255.041	58.2370548141 %
3	0.232	106951.915	23.3932267504 %
4	0.119	3.91492508	0.0008562982 %
5	0.101	17547.2766	3.8380558133 %
6	0.0974	2459.96339	0.5380593819 %
7	0.0966	11.5994759	0.0025381137 %
8	0.0966	9.08203107	0.0019864816 %
9	0.0965	30.7716702	0.0067305822 %
10	0.0965	0.19909143	0.0000435466 %
Total		393 269.846	86.02 %

Tabla 47: Modos de vibrar en el eje Y
Flores J. & Andrade R., 2021

Deformación estática

La deformación máxima cuando la edificación soporta las cargas por peso propio y de uso es de **4 mm**.

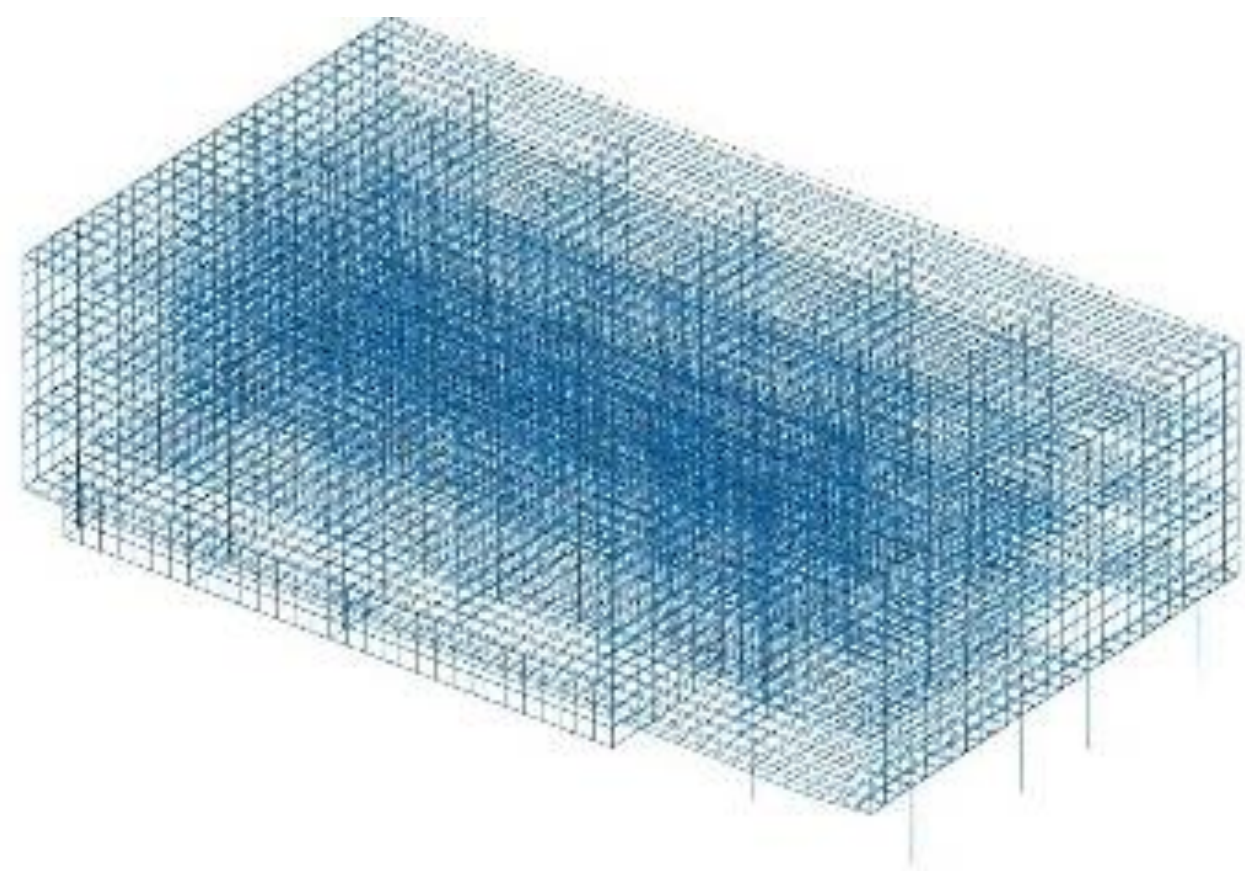


Figura 102: Deformación estática en la edificación
Flores J. & Andrade R., 2021

Deformación por efecto de sismo en, Eje X

Así mismo, la deformación máxima cuando la edificación soporta las cargas por peso propio, de uso y por efecto de sismo en el eje X es de **4.3 cm**.

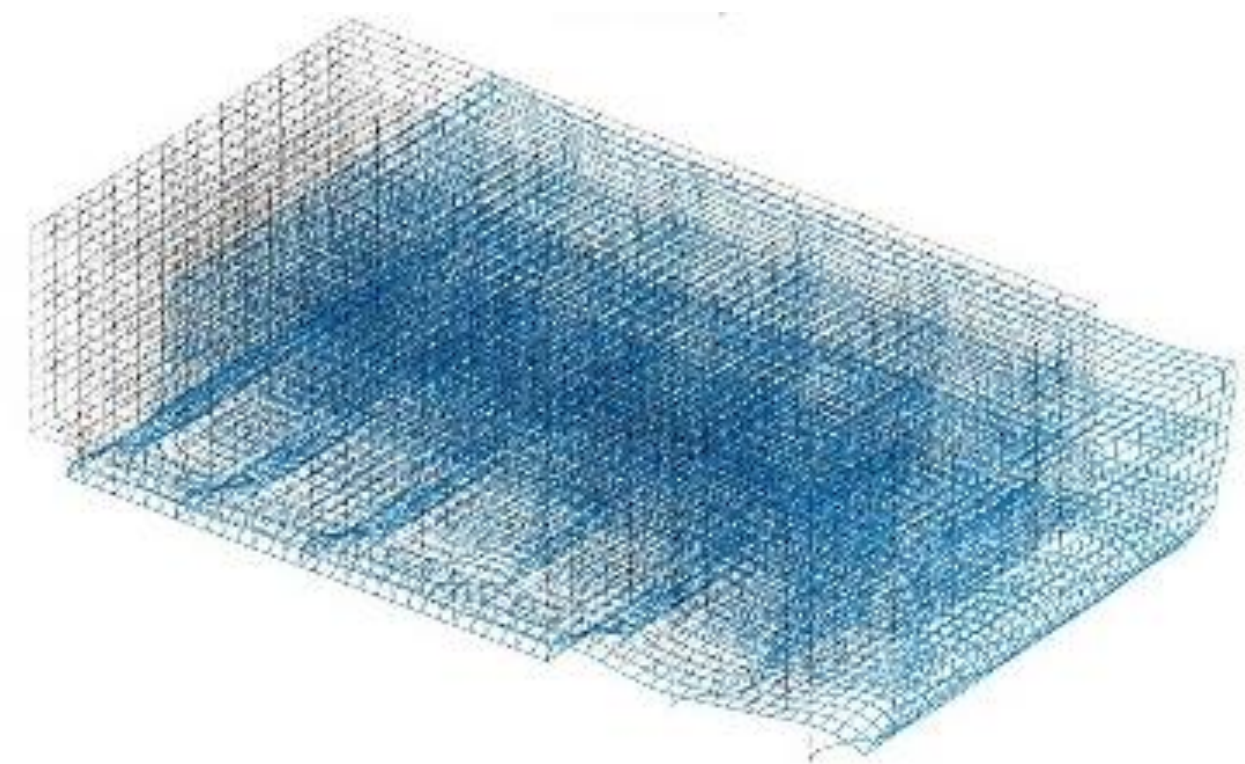


Figura 103: Deformación sísmica en el eje X
Flores J. & Andrade R., 2021

Deformación por efecto de sismo, Eje Y

Mientras que la deformación máxima en el eje Y es de **1.8 cm**.

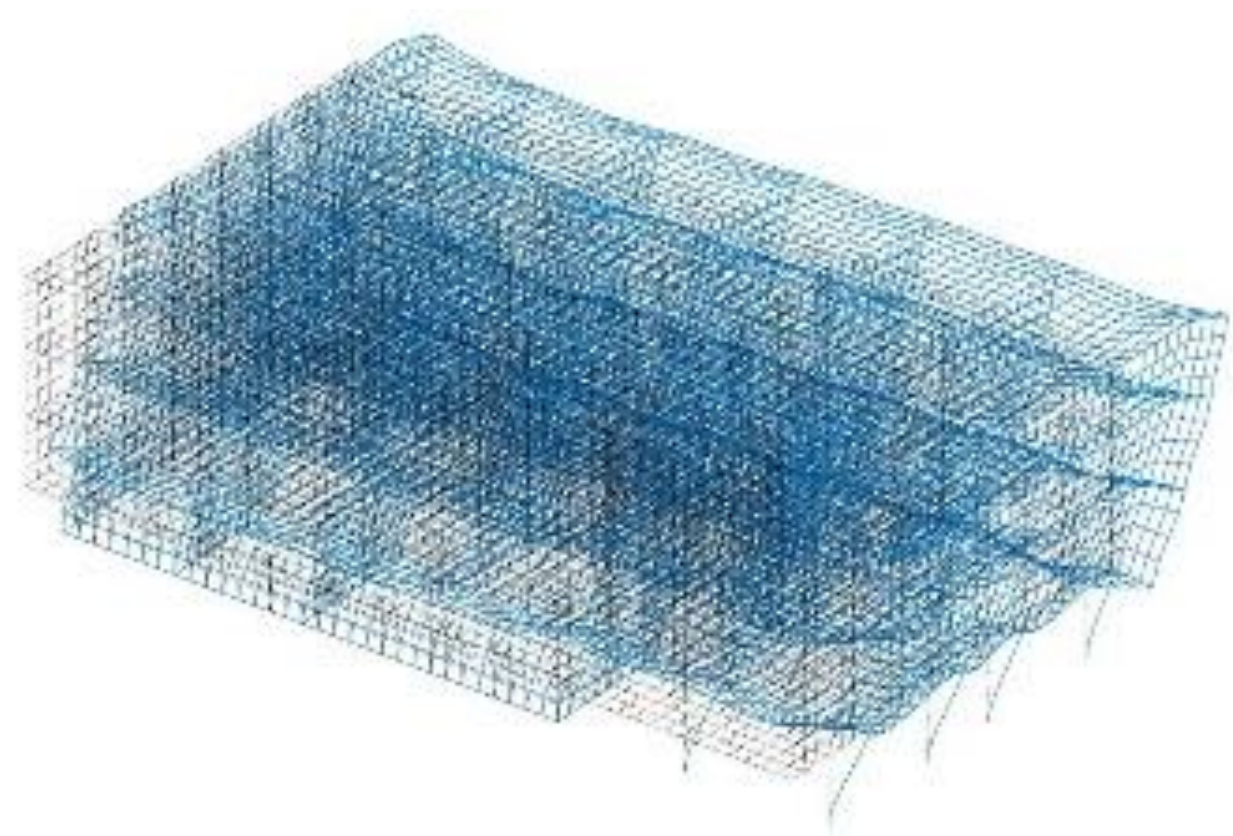


Figura 104: Deformación sísmica en el eje Y
Flores J. & Andrade R., 2021

En este gráfico de barras se resumen las deformaciones que sufre la estructura, se aprecia que la deformación estática (Ust) ocasionada por el peso propio y el peso de uso de la edificación es de 4mm.

En cuanto a las deformaciones que se dan en la estructura cuando la edificación sufre un movimiento sísmico se incrementan, en el eje Y la estructura se deforma 1.8cm mientras que en el eje X se deforma 4.3cm, sin embargo, estas deformaciones se encuentran por debajo de lo que la estructura puede soportar.

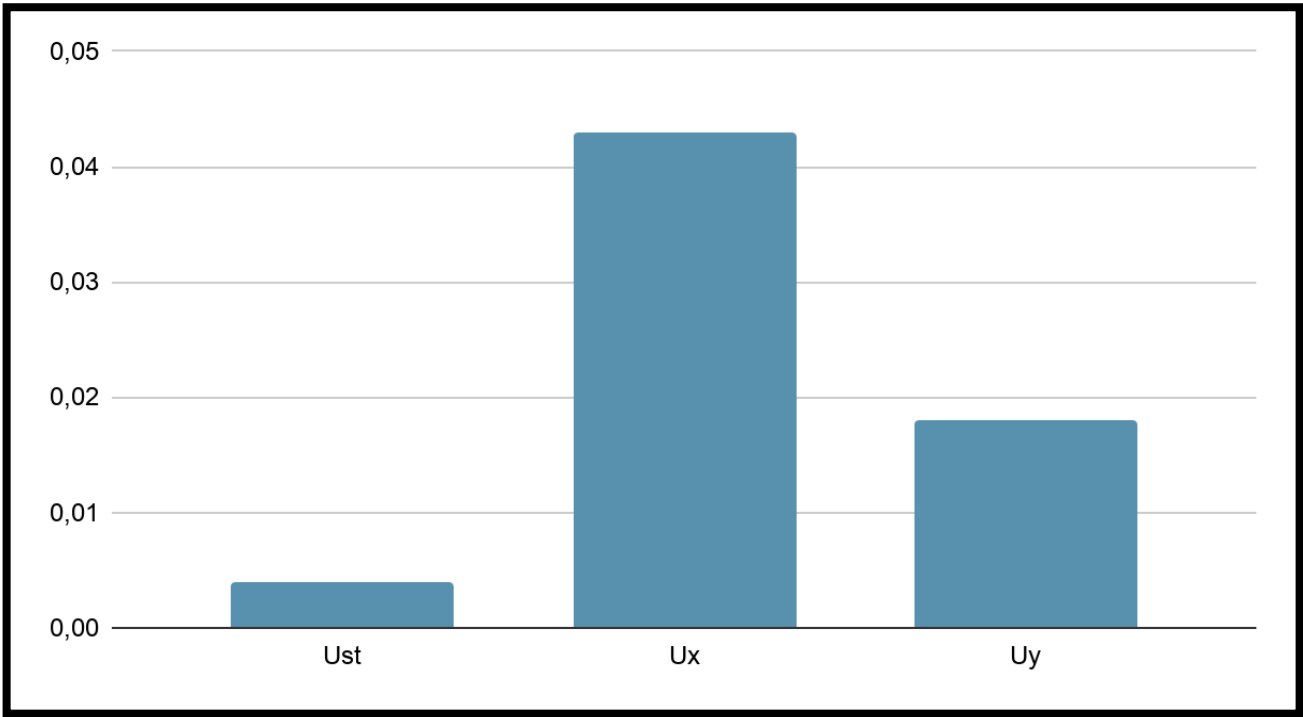


Figura 105: Comparación de deformaciones (estática y sísmica X, Y) en metros
Flores J. & Andrade R., 2021

Cálculo de Derivas

En el cálculo de derivas se pudo comprobar que todos los cuadrantes en los que se dividió la planta de la edificación, tanto en derivas de muro, como derivas de entrepiso los resultados se encuentran por debajo de la deriva máxima admisible por lo que todos los 6 cuadrantes cumplen.

Sin embargo, se establecieron las plantas con más y menos deriva de muro y entrepiso para tener como referencia y así obtener las zonas más seguras de la edificación, estas derivas las podemos ver a continuación en las siguientes tablas.

PLANTA BAJA					
Elemento	Eje X	Eje Y	Promedio	DMA	Cumple/ No cumple
Muros	0.0072921	0.0011559	0.004224	0.032	Cumple
Losas	0.0087976	0.0014594	0.005129	0.064	Cumple
PROMEDIO PLANTA BAJA			0.0046765		

Tabla 48: Derivas en muros y losas, planta baja
Flores J. & Andrade R., 2021

PRIMERA PLANTA ALTA					
Elemento	Eje X	Eje Y	Promedio	DMA	Cumple/ No cumple
Muros	0.0039045	0.00153682	0.00272066	0.032	Cumple
Losas	0.0026769	0.0016453	0.0021611	0.064	Cumple
PROMEDIO PRIMERA PLANTA ALTA			0.00244088		

Tabla 49: Derivas en muros y losas, primera planta alta
Flores J. & Andrade R., 2021

SEGUNDA PLANTA ALTA					
Elemento	Eje X	Eje Y	Promedio	DMA	Cumple/ No cumple
Muros	0.00132995	0.00157305	0.0014515	0.032	Cumple
Losas	0.00115998	0.0013103	0.00123514	0.064	Cumple
PROMEDIO SEGUNDA PLANTA ALTA			0.00134332		

Tabla 50: Derivas en muros y losas, segunda planta alta
Flores J. & Andrade R., 2021

TERCERA PLANTA ALTA					
Elemento	Eje X	Eje Y	Promedio	DMA	Cumple/ No cumple
Muros	0.00067567	0.00070545	0.00069056	0.032	Cumple
Losas	0.00070601	0.000742533	0.00072427	0.064	Cumple
PROMEDIO TERCERA PLANTA ALTA			0.00070742		

Tabla 51: Derivas en muros y losas, tercera planta alta
Flores J. & Andrade R., 2021

ZONAS MÁS VULNERABLES Y ZONAS SEGURAS

Una vez obtenidos los resultados de derivas de piso y de muro de la edificación, se procede a condensar los resultados para localizar las zonas más vulnerables y seguras.

De acuerdo a los resultados de derivas, se observa que ninguna zona del edificio se encuentra en riesgo de falla o colapso, sin embargo, se ha realizado una clasificación de los espacios con mayor y menor deriva.

En este contexto se reconoció que la zona con más deriva de muro y de piso es la planta baja con un desplazamiento de 0.0046 m, deriva que disminuye progresivamente en pisos superiores, pues, en la primera planta alta es de 0.0024 m, en la segunda planta alta es de 0.0013 m y en la tercera planta alta es de 0.0007 m.

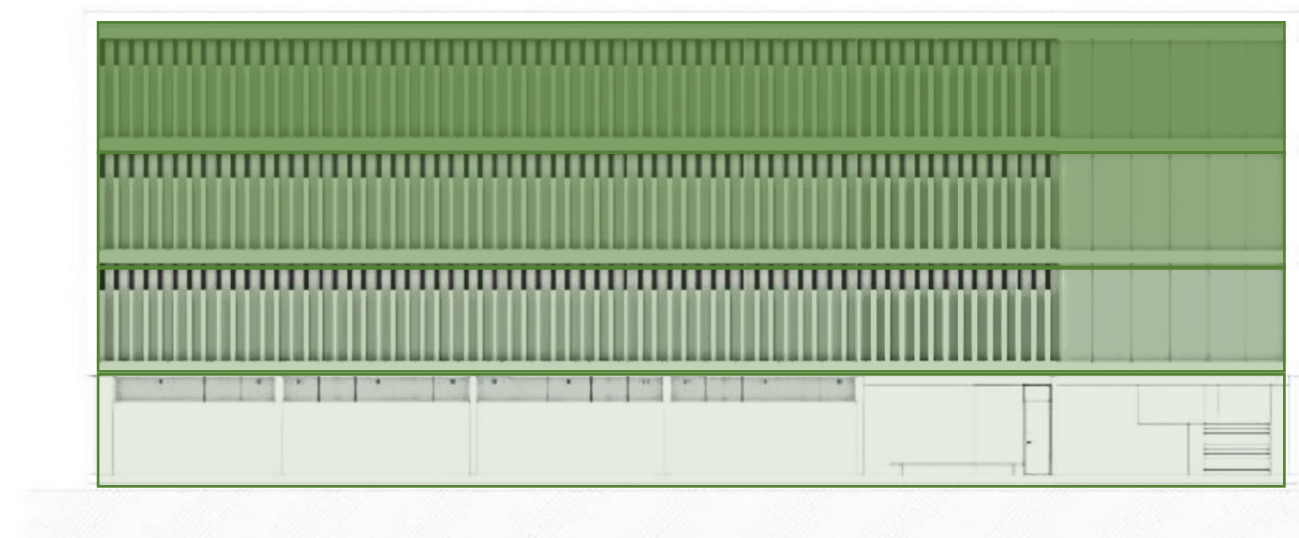


Figura 106: Nivel de riesgo de falla o colapso por piso en el edificio de Psicología
Flores J. & Andrade R., 2021

Zona menos segura 
Zona más segura 

Así mismo se localizaron la zona más segura y menos segura por planta:

Planta baja

En planta baja la mayor deriva se encuentra en el cuadrante 3 con un desplazamiento de 0.004797 m y la deriva más baja se encuentra en el cuadrante 1 con un desplazamiento de 0.0046005.

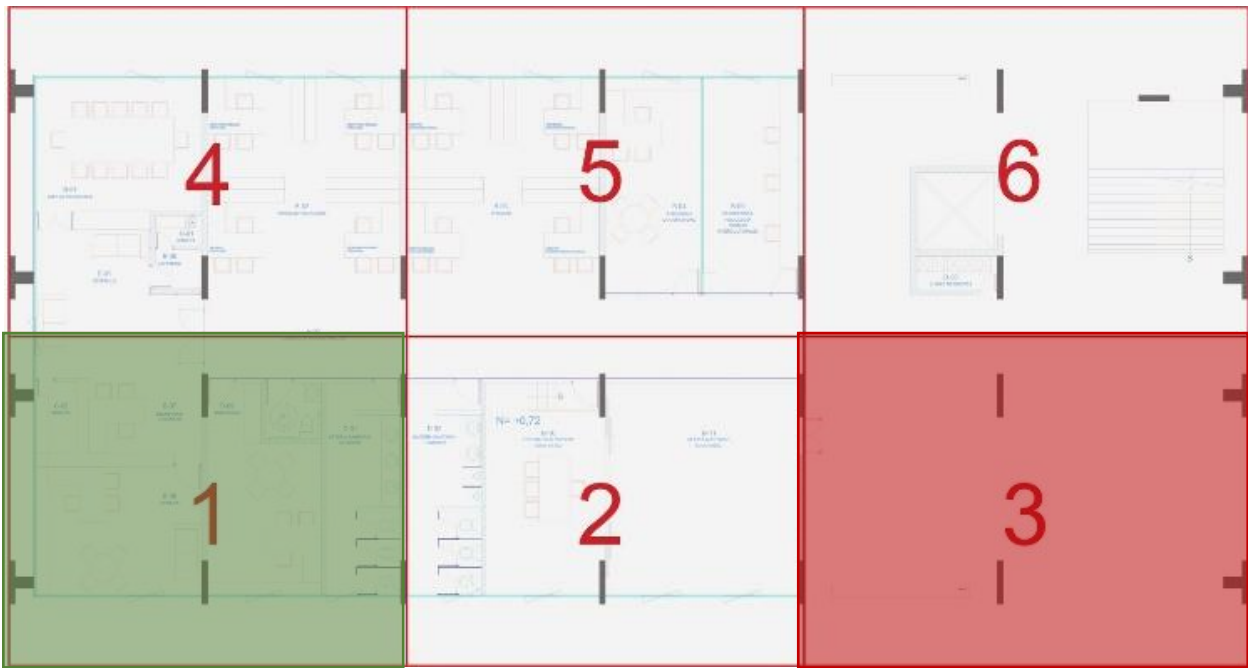


Figura 107: Ubicación de la zona con mayor y menor deriva, planta baja
Flores J. & Andrade R., 2021

 Zona menos segura
 Zona más segura

Primera Planta Alta

En la primera planta alta la mayor deriva se encuentra en el cuadrante 6 con un desplazamiento de 0.002599 m y la menor deriva se encuentra en el cuadrante 1 con un desplazamiento de 0.002333 m.



Figura 108: Ubicación de la zona con mayor y menor deriva, primera planta alta
Flores J. & Andrade R., 2021

- Zona menos segura
- Zona más segura

Segunda Planta Alta

En la segunda planta alta la mayor deriva se encuentra en el cuadrante 5 con un desplazamiento de 0.00157648 m y la menor deriva se encuentra en el cuadrante 6 con un desplazamiento de 0.00123828 m.



Figura 109: Ubicación de la zona con mayor y menor deriva, segunda planta alta
Flores J. & Andrade R., 2021

- Zona menos segura
- Zona más segura

Tercera Planta Alta

En la tercera planta alta la mayor deriva se encuentra en el cuadrante 1 con un desplazamiento de 0.00077174 m y la menor deriva se encuentra en el cuadrante 6 con un desplazamiento de 0.00056097 m.



Figura 110: Ubicación de la zona con mayor y menor deriva, tercera planta alta
Flores J. & Andrade R., 2021

- Zona menos segura
- Zona más segura

De esta manera las zonas más y menos seguras quedan definidas, información que será de gran utilidad para señalar de manera adecuada los espacios en caso de que ocurra un sismo en la ciudad de Cuenca y proteger la vida de los ocupantes de la Facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca.

Discusión

Se pudo evidenciar, de acuerdo al análisis de resultados, que el edificio de la Facultad de Psicología tiene una vulnerabilidad baja ante un sismo, los desplazamientos, deformaciones y derivas en todos los casos tuvieron valores por debajo de los máximos, comprobando que la estructura construida cumple con lo que establecen las normas actualmente vigentes.

Si bien la edificación cumple con los estándares de resistencia ante sismos, cabe recalcar que eso se pudo verificar sólo mediante una evaluación de vulnerabilidad sísmica y es ahí donde radica la importancia de este tipo de estudios. También es valioso destacar que esta evaluación de vulnerabilidad se la llevó a cabo por medio de conocimientos adquiridos desde la academia, pues, la interrelación de este estudio con el manejo de herramientas como MATLAB, Sap2000, AutoCAD y demás programas y conocimientos hacen que los resultados sean más fructíferos.

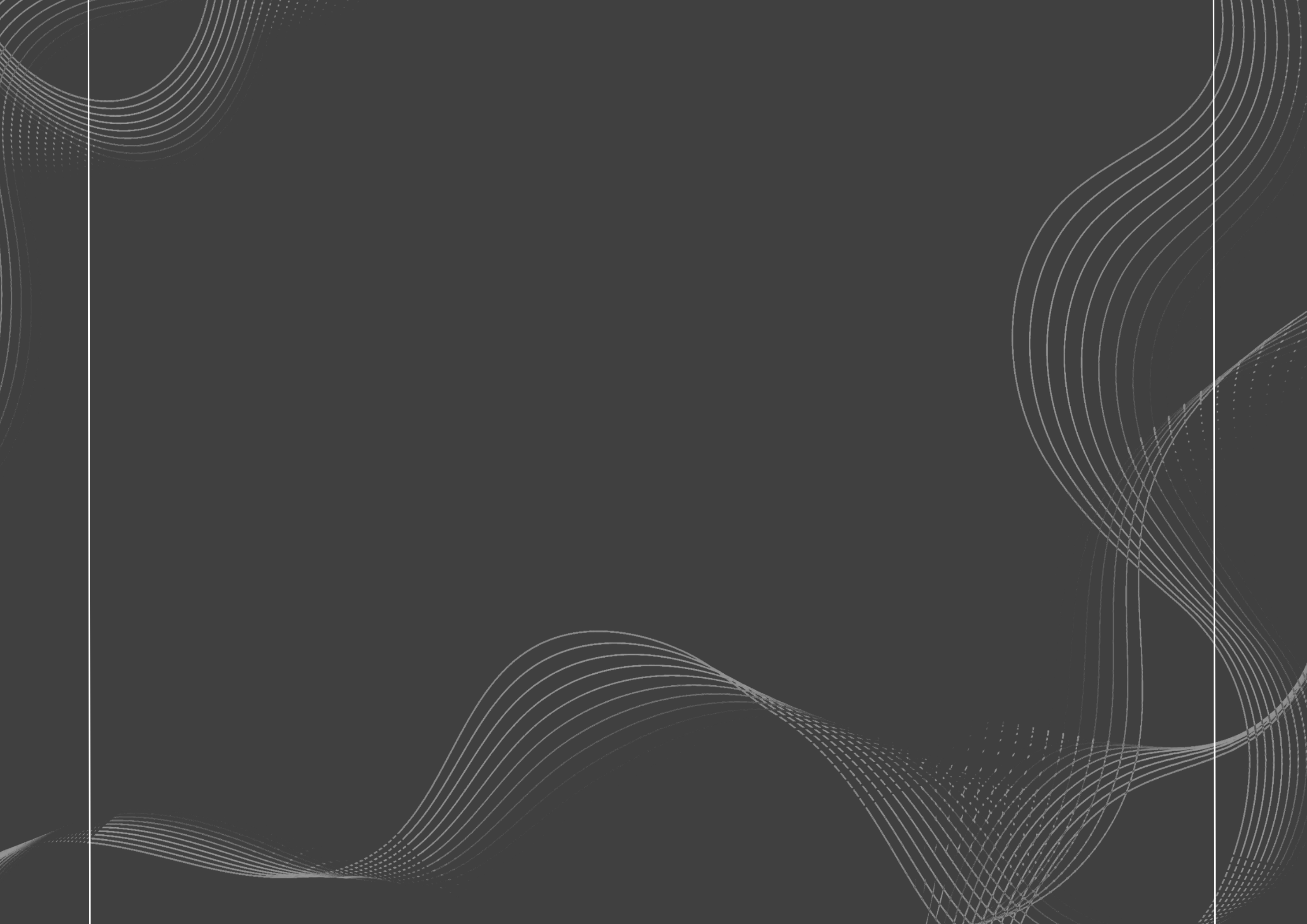
Al conocer el comportamiento de la edificación, además de entender y plantear formas de mitigar un posible desastre, se puede responder de forma satisfactoria y positiva la pregunta de investigación y comprobar que la línea metodológica puede

ayudarnos a obtener resultados más apegados al estado actual del edificio.

Los resultados obtenidos en este estudio permitieron conocer la importancia de realizar evaluaciones de vulnerabilidad sísmica de las edificaciones que albergan actividades vitales como educación, salud, comercio, etc., sobre todo en contextos geográficos y geológicos como el de Ecuador, con el fin de crear planes de mitigación de desastres que contribuyan a preservar la vida de las personas y las edificaciones como tal.

Los métodos para evaluar la vulnerabilidad de una edificación son diversos y valiosos, no obstante, una buena planificación antes, durante y después de ejecutar una construcción tomando en cuenta todos los factores que pueden alterar el comportamiento de la edificación debe ser la primera alternativa para mitigar daños ante posibles desastres al emprender un proyecto constructivo.

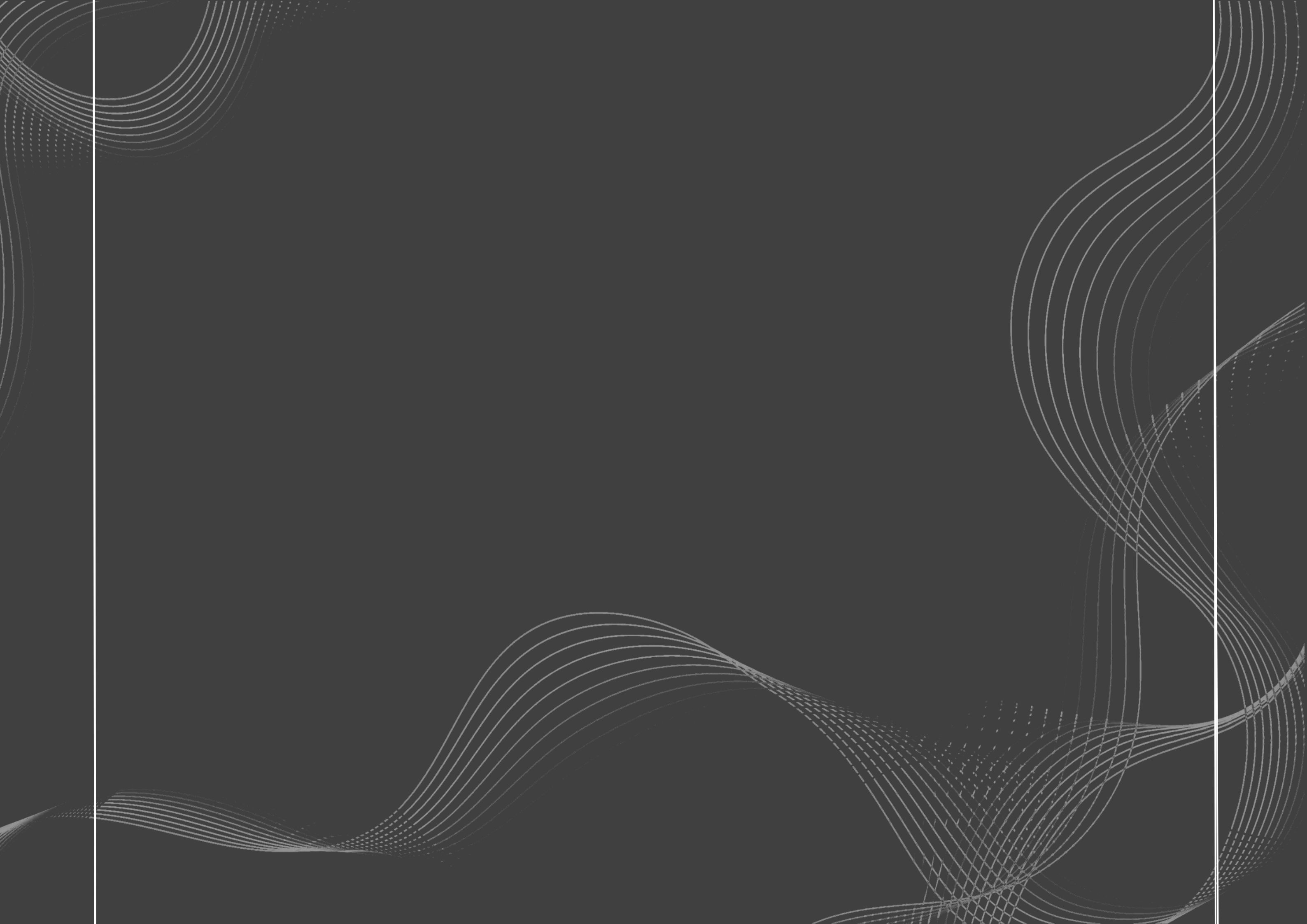
Esta investigación por medio de su metodología representa un paso importante para posteriores investigaciones que evalúen la vulnerabilidad de las edificaciones, sin embargo, aún queda mucho camino por recorrer con respecto al análisis de vulnerabilidad y la mitigación de daños ante desastres.



CAPÍTULO 04

Conclusiones y Recomendaciones

04



CONCLUSIONES

Ecuador es un país ubicado en el Cinturón de Fuego del Pacífico y está atravesado por la Cordillera de los Andes, contexto que hace que el territorio ecuatoriano tenga un alto riesgo sísmico. Así mismo, en la ciudad de Cuenca se han realizado varios estudios de evaluación sísmica en los que se ha comprobado que presenta un riesgo sísmico alto principalmente por la falla de Girón que atraviesa la ciudad indicando que existe un riesgo de colapso de gran parte del Centro Histórico.

A pesar que Cuenca tiene un riesgo sísmico alto, en los últimos años la ciudad no ha sufrido daños relevantes por sismo lo que ha permitido que el diseño de edificaciones se lo realice de manera poco rigurosa e inobservando las normas establecidas principalmente para el diseño estructural, aumentando así, la vulnerabilidad y riesgo de colapso de las edificaciones.

En este contexto, el presente trabajo utilizó como caso de estudio la Facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca, para estudiar su comportamiento ante un evento sísmico utilizando el método de elementos finitos con el objetivo de localizar las zonas de mayor y menor riesgo dentro del edificio usando una metodología compuesta por tres etapas.

Como primer paso se realizó un trabajo de recolección de datos referidos a sus características físicas, mecánicas y geométricas por medio de la revisión de planos arquitectónicos y estructurales y un levantamiento arquitectónico donde se tomaron las dimensiones de los espacios y elementos que conforman la estructura para estudiar el estado actual de la edificación. De igual forma con la ayuda de instrumentos de medición como el esclerómetro se pudo obtener la resistencia del hormigón, dato fundamental para el análisis.

Entre los principales datos obtenidos en el levantamiento de información se pudieron constatar las dimensiones de los elementos estructurales, las alturas de entrepiso, la resistencia del hormigón, las cargas que actúan sobre la estructura y los pesos propios de los elementos.

Posteriormente, con el apoyo de programas de computadora como SAP2000, AutoCAD, Excel y Matlab se procedió a procesar la información obtenida con el fin de realizar un modelo tridimensional apegado a las características reales y actuales de la edificación incluyendo las condiciones físicas externas como el espectro de la ciudad, la aceleración del suelo, entre otros.

Finalmente, con la información procesada se obtuvieron resultados principalmente numéricos representados en gráficas donde se analizaron las deformaciones de los elementos estructurales, las derivas de piso, la oscilación de la estructura en diez modos de vibrar, etc., concluyendo que el edificio de la Facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca, tiene una vulnerabilidad sísmica baja por cuanto los valores relacionados a deformaciones y derivas de piso se encuentran muy por debajo de lo que dicta la normativa vigente en el Ecuador.

De igual forma, dado que la edificación en sus cuatro plantas tiene una vulnerabilidad y un riesgo de colapso bajos, se establecieron zonas de mayor y menor riesgo, siendo la tercera planta alta la zona más segura y la planta baja la menos segura, así mismo se realizó una zonificación dividida en seis cuadrantes en cada planta donde se determinó qué lugar tenía más y menos riesgo, sin embargo, los valores variaron de forma escasa por lo que se considera que toda la edificación es segura.

Con respecto a la línea que siguió este trabajo basada en comprobar la pregunta de investigación "¿Puede un modelo numérico tridimensional proporcionar la información suficiente para determinar la vulnerabilidad de una edificación ante un sismo y de esta manera localizar zonas seguras que salven la vida

de las personas?" se puede concluir que sí, un modelo numérico tridimensional sí permite obtener la información necesaria para determinar la vulnerabilidad de una edificación, no obstante, se debe profundizar en la investigación con la realización de más estudios a nivel del Ecuador y de Cuenca.

RECOMENDACIONES

Es importante actualizar los estudios de vulnerabilidad, peligro y riesgo sísmico en el Ecuador y la ciudad de Cuenca por lo que existe mucho trabajo por hacer mediante el análisis del comportamiento de las edificaciones principalmente las que tienen un uso educativo, de salud, etc.

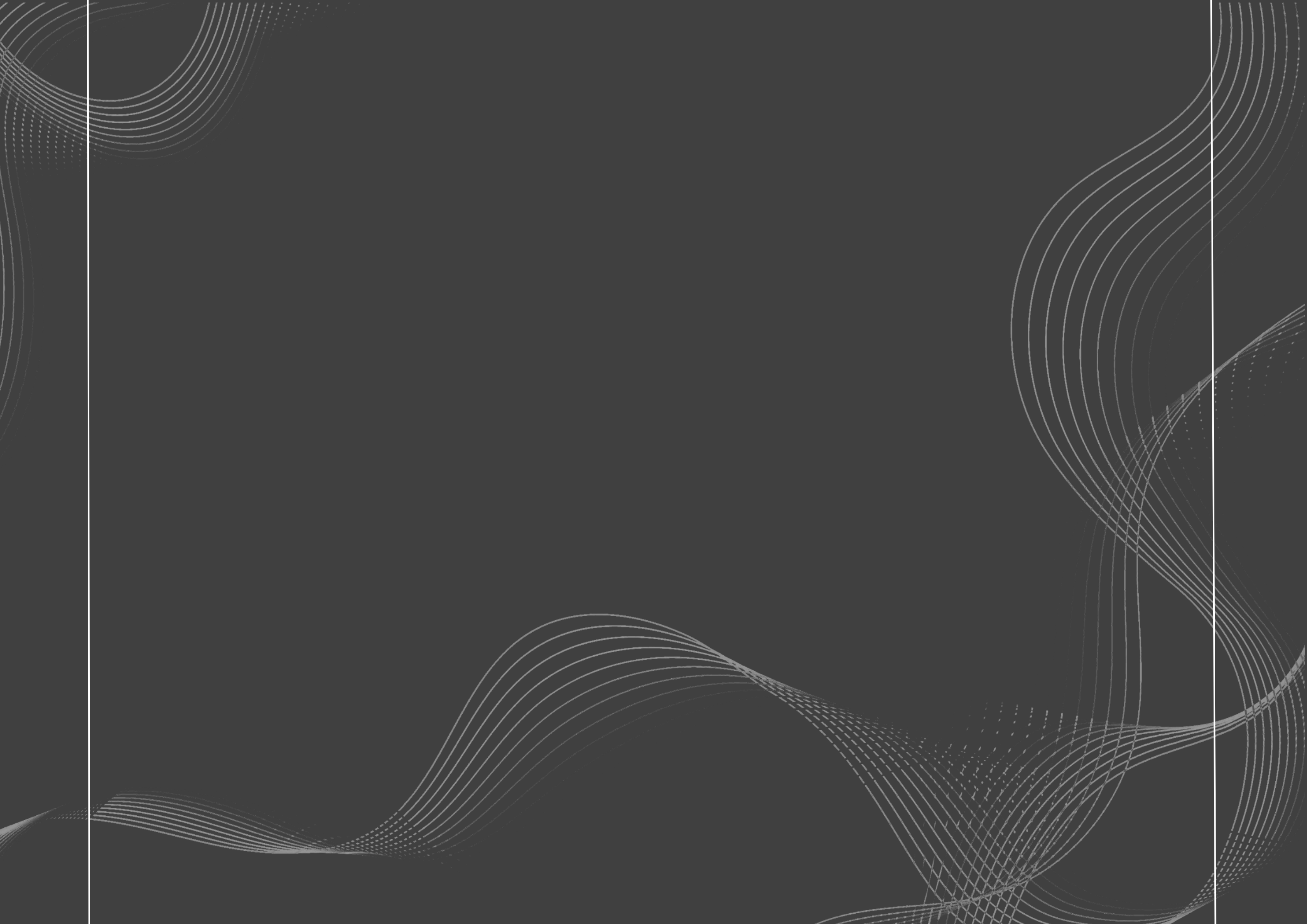
Se recomienda que para futuros proyectos de investigación que estudien la vulnerabilidad de las edificaciones, se recopilen la mayor cantidad de datos por medio de ensayos no destructivos que ayuden a tener una mayor exactitud del estado real del edificio como la instalación de acelerómetros, uso de esclerómetro y ultrasonido.

Se recomienda tener gran rigurosidad y minuciosidad con la recopilación e ingreso de datos en los programas de computadora para facilitar la obtención de datos y el análisis de resultados, de la misma forma con la realización del modelo 3D.

Es recomendable que para la realización de un análisis de comportamiento estructural de una edificación se establezca una metodología sistemática con etapas y pasos a seguir bien definidos que faciliten la consecución de los objetivos.



Bibliografía



A

Aguiar Falconi (2008), Quito-Ecuador: Escuela Politécnica Del Ejercito, Análisis Dinámico De Estructuras.

Almagro, A., & Almagro, A. (2004). *Levantamiento arquitectónico*. Universidad de Granada.

Arteaga, P. (2016). Estudio de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y evaluación del índice de daño de una edificación perteneciente al patrimonio central edificado en la ciudad de Cuenca-Ecuador (Tesis de Pregrado). Universidad de Cuenca, Cuenca.

B

Barbat Barbat, H. A., Oller Martínez, S. H., & Vielma, J. C. (2005). *Cálculo y diseño sismorresistente de edificios: aplicación de la norma NCSE-02*. Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE).

Bellés, P. M., & Legazpi, P. V. (2000). Simulación de Eventos con MEF en Problemas Sísmicos. *Mecánica Computacional*, 19(7), 257-262.

C

Caicedo, C. [et al.]. "Vulnerabilidad sísmica de edificios". Barcelona: Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE), 1994. ISBN 84-87867-43-X

Castro Osorno, A. K., & Pérez Pérez, J. M. (2016). Espectro de diseño y zonificación sísmica basada en periodos fundamentales de vibración de los suelos, en el área urbana de la ciudad de Mateare

CATEC, (2019), Análisis modal.

Cevallos C., (2017). Análisis de la relación de la frecuencia fundamental de una estructura con la deriva inelástica de piso en una estructura irregular de 5 pisos.

Chopra, A. K. (2014). *Dinámica de estructuras* (Cuarta). Pearson Education, Inc

Cornejo, E. & Zúñiga, J. (2020). Caracterización del patrimonio edificado irregular de baja altura del Centro Histórico de Cuenca, orientado a estudios de vulnerabilidad sísmica. Universidad de Cuenca. Repositorio Digital

Cortez, O. & Sotomayor, M. (2007). Aplicación del método de elementos finitos y programas computacionales en el diseño estructural de un galpón para el taller de la empresa PROCOPET S.A. (Tesis de Pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito.

D

Durán, J."Aulario Universidad de Cuenca" 22 jun 2012. Plataforma Arquitectura. Accedido el 8 May 2021. <<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-165678/aulario-universidad-de-cuenca-javier-duran>> ISSN 0719-8914

F

Fernández, I., Elena, V. B., Martín, P., Corona, Y., & Hernández, I. A. (2018). Análisis dinámico de una torre autosoportada sujeta a cargas de viento y sismo. *Obras y proyectos*, (23), 78-86.

Figuerola Esquinca, Carla Ángela, Jara Guerrero, José Manuel, & Pacheco Martínez, Miguel Ángel. (2019). La aproximación de una evaluación analítica a un efecto sísmico real: el caso del templo de Santa Lucia, San Cristóbal de las Casas, Chiapas, México. *Intervención* (México DF), 10(20), 37-46. Epub 09 de

octubre

de

2020.<https://doi.org/10.30763/intervencion.2019.20.218>

G

García, H., & Degrande, G. (2017). Seismic vulnerability analysis of a two-story family dwelling in confined masonry in Cuenca, Ecuador. *Maskana*, 8(2), 99–114. <https://doi.org/10.18537/mskn.08.02.08>

González, E., & Alloza, A. (2013). Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 2: Ensayos no destructivos. Determinación del índice de rebote. *AENOR Asociación Española de Normalización y Certificación*, 101–104.

H

Hernández, J. D. B., & Castro, S. A. L. (2011). Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones de hormigón armado existente. *Ciencia y sociedad*, 36(2), 256-275.

J

Jiménez Pacheco, J. C. (2002). Vulnerabilidad sísmica de las edificaciones de la ciudad de cuenca mediante técnicas de simulación.

Jiménez Pacheco, J. C. (2016). *Evaluación sísmica de edificios de mampostería no reforzada típicos de Barcelona: modelización y revisión de la aplicación del Método del Espectro de Capacidad*. 332.

Jiménez Pacheco, J., Cabrera Cajamarca, J., Sánchez Beltrán, J., & Avilés Tenorio, F. (2018). Vulnerabilidad sísmica del patrimonio edificado del Centro Histórico de la Ciudad de Cuenca: Lineamientos generales y avances del proyecto. *MASKANA*, 9(1), 59–78. <https://doi.org/10.18537/mskn.09.01.07>

L

Lozano, A. (2014). Martillo Schmidt (Esclerómetro). *Geoengineering Services & Consulting EIRL*.

M

Martínez-Pañeda, (2016) *MATLAB: Una herramienta para la didáctica del Método de los Elementos Finitos*.

Mogollón M. (2012), Ensayos de laboratorio de paneles prefabricados de concreto para viviendas prefabricadas. Proyecto Social Universitario. Pontificia Universidad Javeriana.

Morocho, L. (2018). Aplicación de métodos simplificados para la predicción de daño sísmico en estructuras de baja altura (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador

Muñoz, F., Peña, F., & Meza, M. (2012). Desarrollo De Modelos Virtuales Con Fines De Evaluación Estructural. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural*, 55, 1–9.

N

Norma Ecuatoriana de la Construcción. Peligro Sísmico, Diseño Sismo Resistente. (2014). Recuperado el 08 de mayo del 2021 de: <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2015/0202/NEC-SE-DS-Peligro-S%C3%ADsmico-parte-1.pdf>

Nikolaou, S., & Vera, X. (2016). *GEER-ATC EARTHQUAKE RECONNAISSANCE April 16 2016, Muisne, Ecuador*.

O

Olaya, Luisa, Rubio, Diego, Ruiz, Daniel, & Torres, Andrés. (2014). Evaluación del comportamiento sísmico de viviendas de estratos marginales con cubiertas verdes: estudio de caso del municipio

de Soacha, Colombia. *Revista ingeniería de construcción*, 29(1), 98-114. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732014000100007>

Oñate, E. (1995). Cálculo de estructuras por el método de elementos finitos. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, UPC.

Orostegui Melendrez, N. B. (2020). Análisis de las ventajas y desventajas del método FEMA-154 empleando en la evaluación de edificaciones con posible riesgo sísmico.

Ortega, N. F., & Ripani, M. (2007). Experiencias en el empleo de ensayos no destructivos, en el análisis de estructuras de hormigón afectadas por diferentes situaciones patológicas. *Buenos Aires, Argentina*.

Ortiz Panchi, Ó. C. (2013). Sismotectónica y peligrosidad sísmica en Ecuador. *Madrid, Curso 2012-2013*, 1, 46. <http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/bitstream/28000/1221/1/T-SENESCYT-000352.pdf>

Ortiz, P. (2019). Plan de contingencia para minimizar los riesgos naturales en la ciudad de Manta. In *Utmach*.

P

Pardo, M. (2019). *Grados de libertad – Concepto y ejemplos*. Marcelo Pardo Ingeniería. Recuperado de: <https://marcelopardo.com/grados-de-libertad-concepto-y-ejemplos/>

Q

Quiroz, G. (18 de abril de 2016). "Ecuador no afrontaba un terremoto desde hace 18 años". *El Comercio*. Recuperado de: <https://www.elcomercio.com/datos/terremotos-ecuador-sismos-data-emergencias.html>

R

Red Sísmica del Austro, (2002). Informe Final a FUNDACYT-Proyecto P-BID 400: Amenaza Sísmica en el Austro, Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico en la Ciudad de Cuenca.

Rivadeneira, F., Segovia, M., Alvarado, A., Egred, J., Troncoso, L., Vaca, S., & Yepes, H. (2007). *Breves_Fundamentos_Terremotos_Ecuador.pdf* (p. 101).

Romero, E. (30 de enero de 2018). *Russia Today. El Cinturón de Fuego del Pacífico: Lo que hace a Ecuador un país volcánico*. Recuperado de: <https://actualidad.rt.com/actualidad/261428-ecuador-tercer-pais-mas-volcanes-mundo#:~:text=Portada%20Actualidad-,El%20Cintur%C3%B3n%20de%20Fuego%20del%20Pac%C3%ADfico%20Lo%20que,a%20Ecuador%20un%20pa%C3%ADs%20volc%C3%A1nico&text=En%20el%20pa%C3%ADs%20hay%2031,que%20podr%C3%ADan%20entrar%20en%20erupci%C3%B3n.&text=Cuando%20un%20volc%C3%A1n%20entra%20en,extenderse%20varios%20kil%C3%B3metros%20de%20distancia.>

S

Sánchez, F. V. (1994). Los terremotos y sus causas. In *El estudio de los terremotos en Almería* (pp. 17-38). Instituto de Estudios Almerienses.

Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos. (2010). Guía comunitaria de Gestión de Riesgos (pp. 7–8). Quito.

T

Tar buck, E. J., Lutgens, F. K., Tasa, D., & Tasa, D. (2005). *Earth: an introduction to physical geology* (p. 744). Upper Saddle River: Pearson/Prentice Hall.

Toulkeridis, T., Chunga, K., Rentería, W., Rodriguez, F., Mato, F., Nikolaou, S., D'Howitt, M. C., Besenzon, D., Ruiz, H., Parra, H., & Vera-Grunauer, X. (2017). The 7.8 mw earthquake and tsunami of 16th April 2016 in Ecuador: Seismic evaluation, geological field survey and economic implications. *Science of Tsunami Hazards*, 36(4), 197–242.

Trenkamp, R., Kellogg, J. N., Freymueller, J. T., & Mora, H. P. (2002). Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations. *Journal of South American Earth Sciences*, 15(2), 157-17

