



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**SIMULADOR DE SISMOS CON  
REALIDAD VIRTUAL**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero en Computación**

**P R E S E N T A N**

Luis Tonatiuh Pinto López

Miguel Ángel Vargas Espinosa

**DIRECTORA DE TESIS**

M.I. Tanya Arteaga Ricci



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019**



---

*A la Facultad de Ingeniería y a la Universidad, por la formación que me ha brindado.  
A todas las instituciones y dependencias que nos han apoyado a lo largo de este trayecto.  
A nuestra directora de tesis por su arduo esfuerzo durante estos meses de trabajo y todas las puertas que nos ha abierto para dar a conocer el proyecto.  
Este logro en mi carrera está dedicado a todas aquellas personas, que mediante pequeñas o grandes acciones a lo largo de la vida me han llevado a lograr este sueño hecho realidad, en especial a mi familia, a mis abuelas, padres, hermanos y amigos de la infancia. Nada de esto sería posible sin ustedes. Siéntanse orgullosos de ser parte de esta victoria que ayudará a muchas personas e incluso salvará vidas. A mi hermano Sebastián para que siempre siga sus sueños.  
-Miguel Ángel Vargas Espinosa.*

*Quiero agradecer a mi padre, a mi madre, y a toda mi familia por todo el apoyo, trabajo, esfuerzo, valores, sacrificio y amor que he recibido siempre, gracias ellos he podido llegar a ser lo que hoy soy.  
Agradezco de manera especial a Tanya Ricci por toda su ayuda en la elaboración de la tesis.  
A mis amigos, con los cuales compartí buenos momentos dentro y fuera de clases, y en especial a Miguel Ángel.  
A la Universidad Nacional Autónoma de México por darme la mejor formación, las mejores oportunidades de estudio y enriquecerme con su conocimiento.  
A todas las personas que nos ayudaron para la realización de la tesis, muchas gracias.  
-Luis Tonatiuh Pinto López.*



# Índice general

---

Índice de figuras	v
Índice de tablas	ix
<b>1. Antecedentes y problemática</b>	<b>19</b>
1.1. México ante los sismos . . . . .	19
1.2. Antigua ley de edificación en el Distrito Federal . . . . .	24
1.2.1. Diferencias con otros países . . . . .	26
1.3. Zona sísmica de la Ciudad de México . . . . .	27
1.4. La tecnología como herramienta de aprendizaje . . . . .	30
1.4.1. Pros . . . . .	30
1.4.2. Contras . . . . .	31
1.4.3. Hipótesis . . . . .	31
1.5. Beneficios de una sociedad con conciencia cívica ante desastres naturales	32
<b>2. Marco teórico</b>	<b>35</b>
2.1. ¿Qué es una <i>App</i> ? . . . . .	35
2.1.1. Aplicaciones de realidad virtual . . . . .	36
2.1.2. Beneficios de una aplicación móvil con realidad virtual . . . . .	40
2.2. Lenguajes de programación a implementar . . . . .	42
2.3. Sismos . . . . .	43
2.3.1. ¿Qué es un sismo? . . . . .	43
2.3.2. Diferencia entre intensidad y magnitud . . . . .	49
2.3.3. Brecha de Guerrero . . . . .	51
2.4. Recomendaciones de Protección Civil . . . . .	51
2.4.1. Nueva Ley de Edificación en la CDMX . . . . .	54
2.4.2. Mochila de emergencia . . . . .	55
2.4.3. Identificación de zonas de mayor o menor riesgo . . . . .	57
2.5. Diseño estructural de un edificio ante un sismo . . . . .	59
2.5.1. Daños generales . . . . .	60
2.6. Caso de estudio: Rancho San Lorenzo 32 . . . . .	62

<b>3. Diseño del proyecto</b>	<b>69</b>
3.1. Metodología de trabajo	69
3.2. SDK Google CardBoard	70
3.3. <i>Front-End</i>	71
3.3.1. Cámara	71
3.3.2. Luz	72
3.3.3. Sonido	78
3.4. <i>Back-End</i>	79
3.4.1. C#	79
3.4.2. Sistema de base de datos acelerográficos de la red sísmica mexicana	80
3.4.3. Sistema de físicas y modelado de ondas sísmicas	80
3.5. Guión gráfico - Diagramas de escenas	82
<b>4. Implementación del proyecto</b>	<b>85</b>
4.1. Herramientas	94
4.1.1. Unity	94
4.1.2. 3Ds Max	95
4.2. Modelado 3D	97
4.2.1. Edificio	98
4.2.2. Interiores	101
4.2.3. Grietas y daños	103
4.3. Lentes de realidad virtual	105
4.3.1. VR BOX <i>HEADSET</i>	105
4.3.2. Control <i>Bluetooth</i>	107
4.4. Requerimientos	108
4.4.1. Sistema Operativo	108
4.4.2. <i>Hardware</i> del sistema	109
<b>5. Pruebas y verificación de la aplicación.</b>	<b>111</b>
5.1. Pruebas unitarias y de Integración	113
5.2. Experimentación y obtención de estadísticas	116
5.3. Verificación de la hipótesis	123
<b>6. Conclusiones</b>	<b>125</b>
<b>A. Código/Manuales/Publicaciones</b>	<b>127</b>
A.1. Escala Mercalli	128
A.2. Geología de la Ciudad de México	129
A.3. Código Voronoi F.R.A.C.T.U.R.E.	130
A.4. Fragmento del código que calcula el porcentaje de seguridad	139
<b>Bibliografía</b>	<b>141</b>

# Índice de figuras

---

1.1. Anillo de fuego que rodea el océano Pacífico. . . . .	20
1.2. Distrito Federal en ruinas, Cuartoscuro (1985) . . . . .	21
1.3. Epicentro del sismo del 19 de septiembre de 2017, Servicio Sismológico Nacional. . . . .	23
1.4. Sismos más importantes en los últimos años, Servicio Sismológico Nacional. . . . .	24
1.5. Central nuclear laguna verde, Veracruz. . . . .	27
1.6. Zona del lago de Texcoco en el Valle de México, <i>Google Maps</i> ® . . . . .	28
1.7. Zonas de profundidad con suelo firme, Meli Piralla. . . . .	29
1.8. Esquema representativo de las zonas sísmicas del valle de México. . . . .	29
2.1. Tienda de aplicaciones móviles con realidad virtual para Android [27]. . . . .	36
2.2. Tienda de aplicaciones móviles para iOS [28]. . . . .	37
2.3. Coordenadas cartesianas de un dispositivo móvil . . . . .	38
2.4. Video QR con la presentación del iPhone4 . . . . .	40
2.5. Diferentes GameObjects en Unity. . . . .	43
2.6. Muestra al dios Namazu aplacando a la bestia con la enorme piedra. . . . .	44
2.7. Capas internas del planeta tierra. . . . .	45
2.8. Porcentajes de capas terrestres. . . . .	46
2.9. Sobre estos inmensos pilares reposa la estructura que ha perforado el agujero más profundo en la tierra registrado por la humanidad hasta la fecha. . . . .	47
2.10. Placas tectónicas, de las cuales México se rodea por cinco: Placa de Norteamérica, del Pacífico, de Cocos, del Caribe y la de Rivera . . . . .	48
2.11. Principales ondas sísmicas. . . . .	50
2.12. Ejemplo de la gráfica de un sismógrafo, el cual registra la velocidad de un temblor. . . . .	50
2.13. Brecha de guerrero. . . . .	52
2.14. Señalización utilizada para indicar una zona segura. . . . .	58
2.15. Fachada principal del edificio, Fotos por: Miguel Ángel Vargas Espinosa. . . . .	62
2.16. Imagen creada gracias a la plataforma del ERN [14]. . . . .	63
2.17. Daño en nervadura principal del sistema de piso. . . . .	63
2.18. Daño en muro de mampostería, fisura diagonal por fuerza cortante. . . . .	64
2.19. Daño grado II [25] en ciertas columnas de planta baja del edificio. . . . .	65

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

2.20. Azulejo desprendido por fisura diagonal por fuerza cortante en el baño del departamento. . . . .	66
2.21. Desprendimiento de yeso, pintura y recubrimiento de los muros. . . . .	67
2.22. Tubería dañada. . . . .	68
3.1. Captura de pantalla del diagrama de <i>Gantt</i> implementado en esta tesis. . . . .	70
3.2. Visores de Google <i>CardBoard</i> . . . . .	71
3.3. Dirección de los rayos de la luz direccional. . . . .	72
3.4. Luz direccional con ángulo de $30^\circ$ (en el eje X). . . . .	73
3.5. Luz direccional con ángulo de $70^\circ$ (eje X) y un ángulo de $-50^\circ$ (eje Y). . . . .	73
3.6. <i>Point light</i> entre dos cubos. . . . .	74
3.7. Luz tipo <i>Spotlight</i> . . . . .	75
3.8. Luz de área entre cuatro cubos. . . . .	76
3.9. <i>Precomputed Realtime GI</i> . . . . .	77
3.10. Iluminación precalculada. . . . .	78
3.11. Datos de la aceleración (cm/s <sup>2</sup> ) generados en la aplicación para un sismo con una magnitud de 7.1 y con una duración de 60 segundos. Las gráficas corresponden a los ejes X, Y y Z respectivamente. . . . .	81
3.12. Diagrama de escena uno . . . . .	82
3.13. Diagrama de escena dos . . . . .	82
3.14. Diagrama de escena tres . . . . .	82
4.1. Botiquín de primeros auxilios y botella de agua (El botiquín se muestra en pantalla y la botella se encuentra a un costado de ella). . . . .	86
4.2. Papel higiénico. . . . .	86
4.3. Silbato. . . . .	86
4.4. Lámpara de mano y comida enlatada. . . . .	87
4.5. Muda de ropa. . . . .	87
4.6. Documentos importantes (En esta imagen se muestra un ejemplo cuando el punto no está fijo sobre el objeto a recolectar pues no cambia su contorno de color.) . . . . .	88
4.7. Cronómetro de evacuación. . . . .	89
4.8. Fuga de gas en la cocina. . . . .	90
4.10. Resultados de la simulación. . . . .	93
4.9. Resultados del algoritmo “acciones de protección civil” . . . . .	93
4.11. Uso de Tepeyollotl en la versión de escritorio. . . . .	94
4.12. Planos del edificio Rancho San Lorenzo num 32. . . . .	96
4.13. Levantamiento de un piso modelado en 3Ds Max . . . . .	96
4.14. Parámetros del <i>Script</i> con algoritmo <i>Voronoi</i> (F.R.A.C.T.U.R.E.) . . . . .	97
4.15. Vista de un material en Unity con <i>Shader</i> tipo <i>Standard</i> . . . . .	98
4.16. Fachada del edificio. . . . .	101
4.17. Muro de recámara principal. . . . .	101
4.18. Objetos que componen la sala. . . . .	102

4.19. (De arriba hacia abajo) pared de la sala antes del sismo, durante y después del sismo. . . . .	104
4.20. Movimientos de lentillas para ajustar a la visión del usuario. . . . .	106
4.21. Compatibilidad de dispositivos con <i>VR BOX</i> . . . . .	106
4.22. Componentes internos del gamepad. . . . .	107
4.23. <i>Gamepad</i> y botones asignados. . . . .	108
4.24. S.O. Android 8.1.0. . . . .	109
5.1. El costo de los defectos. . . . .	112
5.2. Imagen de transición entre escenas. . . . .	114
5.3. Estudiantes de primeros semestres probando la aplicación "Tepeyollotl".	115
5.4. Sesión de demostración en la entrada de la Facultad de Ingeniería. . . .	116
5.5. Uso de lentes y control <i>bluetooth</i> . . . . .	117
5.6. Tendencia de aprendizaje sujeto 1. . . . .	120
5.7. Tendencia de aprendizaje sujeto 2. . . . .	120
5.8. Tendencia de aprendizaje sujeto 3. . . . .	121
5.9. Tendencia de aprendizaje sujeto 4. . . . .	121
5.10. Tendencia de aprendizaje sujeto 5. . . . .	122
5.11. Tendencia de aprendizaje sujeto 6. . . . .	122



# Índice de tablas

---

2.1. Comparativa entre gamas y compatibilidad con el sistema de giroscopio. . . . .	38
2.2. Calificación en zonas de mayor y menor riesgo. . . . .	59
2.3. Elementos estructurales y sus principales daños ante sismos. . . . .	61
3.1. Tabla comparativa de tipos de luz. . . . .	78
4.1. Texturas utilizadas en Unity. . . . .	100
4.2. Páginas web utilizadas a lo largo del proyecto. . . . .	102
5.1. Sujetos de prueba. . . . .	118
5.2. Resultados sujeto 1. . . . .	118
5.3. Resultados sujeto 2. . . . .	118
5.4. Resultados sujeto 3. . . . .	119
5.5. Resultados sujeto 4. . . . .	119
5.6. Resultados sujeto 5. . . . .	119
5.7. Resultados sujeto 6. . . . .	119
5.8. Tiempo promedio para las tres rondas . . . . .	123



# Abstract

---

Earthquakes are global phenomena that happen all the time, some with more impact than others. The Mexican territory is located on highly seismic plates, for this reason this project aims to boost the resilience of Mexicans, especially the inhabitants of the capital, because, due to the type of ground, an earthquake can become lethal and claim hundreds of lives if the population does not have a proper civil protection education. Technology is allied to promote new ways of learning as it is with virtual reality, an innovation that has gained strength in recent years and is now available to everyone thanks to a smartphone in combination with virtual reality lenses. In this way the idea of generating a virtual, safe and controlled environment (based on a real case) emerged, where a person can learn the main civil protection measures and provide feedback at the end of it, all this in order to refine learning and making note of their mistakes or successes after the simulation of an earthquake. This study contains tests that were done to people of different ages with satisfactory results, since the theory that this tool improves the level of learning every time it is used was proven. The purpose of this thesis project is to reach the entire Mexican population, to provide a new economic and reliable option that can teach children, youth and adults how to preserve life in case of an emergency.

Keywords: earthquakes, virtual reality, simulator, education, training, civil protection.



# Resumen

---

Los sismos son fenómenos globales que acontecen todo el tiempo, unos con más impacto que otros. El territorio mexicano yace sobre placas altamente sísmicas, por tal motivo este proyecto pretende impulsar la resiliencia de los mexicanos, en especial a los habitantes de la capital, ya que, debido al tipo de suelo, un sismo puede llegar a ser letal y cobrar cientos de vidas si no se cuenta con una correcta educación en protección civil. La tecnología es aliada para impulsar nuevas maneras de aprender como lo es con la realidad virtual, una innovación que ha cobrado fuerza en los últimos años y que hoy día está al alcance de todos gracias a un teléfono inteligente en combinación con lentes de realidad virtual. De esta manera surgió la idea de generar un ambiente virtual, seguro y controlado (basado en un caso real), donde una persona pueda aprender las medidas principales de protección civil y brindarle una retroalimentación al finalizar la misma, todo esto con el fin de refinar el aprendizaje y hacer notar sus errores o aciertos posterior a la simulación de un sismo. Este estudio contiene pruebas que se realizaron a personas de diferentes edades con resultados satisfactorios, ya que se comprobó la teoría de que esta herramienta mejora el nivel de aprendizaje cada vez que se utiliza. El propósito de este proyecto de tesis es llegar a toda la población mexicana, para brindar una nueva opción económica y confiable que pueda enseñar a niños, jóvenes y adultos a cómo preservar la vida en caso de una emergencia.

Palabras clave: sismos, realidad virtual, simulador, educación, capacitación, protección civil.



# Justificación

---

México se encuentra como el onceavo país en América Latina más propenso ante desastres naturales (según la Universidad de las Naciones Unidas<sup>1</sup>), siendo los sismos una de las principales catástrofes naturales que pueden afectar en cualquier momento a la nación. La posición geográfica del territorio mexicano sobre la placa de Norteamérica junto a la placa de Cocos, incrementan el índice de probabilidad de desastre a números rojos, por lo cual se debe actuar en pro de una cultura educativa de protección civil, para así preservar la vida ante estos desastres impredecibles.

El qué hacer antes, durante y después de un sismo es vital para resguardar vidas, cada vez que ocurre un movimiento telúrico importante se refuerza la idea de instruir a las personas con diferentes acciones que van desde prevención, hasta mitigación de riesgos. Con esto se pretende evitar el mayor número de pérdidas humanas y materiales gracias a una correcta educación de protección civil. El famoso: “No corro, no grito, no empujo” ha quedado en el pasado, hoy se puede utilizar la tecnología para entrar en un entorno virtual y seguro para poder interactuar con objetos, comprender, probar, conocer y cometer errores, de tal manera que permita aprender, para así preservar la vida en caso de un sismo real.

Lamentablemente los cursos de prevención ante desastres naturales son escasos en el país, de hecho, no existe actualmente una empresa o institución a la cual acudir para solicitar cursos presenciales. El CENAPRED suele dar este tipo de capacitaciones en línea de manera gratuita con el apoyo del ENAPROC (Escuela Nacional de Protección Civil), incluso de la misma manera la UNAM ha hecho aporte a este tipo de cursos en línea<sup>2</sup>.

Existen varios pros y contras de tomar cursos en línea, pero la principal razón por la cual se ha planteado desarrollar esta aplicación, es porque la cultura de protección civil debe subir de nivel, no basta con solo aprenderlo teóricamente, sino hay que llevarlo a la práctica para saber cómo actuar. Un símil dentro de la industria de cursos y capacitaciones es la de “primeros auxilios”, donde si bien, hay que conocer la parte teórica en cómo dar respiración de boca a boca, también hay que llevarlo a la práctica con los maniqués de RCP.

---

<sup>1</sup>WorldRiskReport, the WorldRiskIndex, creado por United Nations University Institute for Environment and Human Security, 2017.

<sup>2</sup>COURSERA (2018). *Evaluación de peligros y riesgos por fenómenos naturales*. <https://es.coursera.org/learn/riesgos-fenomenos-naturales>. [En línea; accesado el 30-Abril-2018].

La aplicación está ideada no sólo para enseñar a los interesados en cómo preservar su vida ante un sismo, sino también para recabar información durante la simulación, datos que sean de utilidad, como: Tiempo en el que el usuario permaneció en una zona de mayor o menor riesgo, si cerró la llave de paso de gas y luz o no, si evacuó el edificio y en cuánto tiempo lo hizo y finalmente si tomó la mochila de emergencia o no. Para llevar la parte práctica a cabo, se le brindará a cada persona unos visores de realidad virtual (también conocidos como lentes de realidad virtual) y un smartphome con la aplicación cargada y lista para usarse, las instrucciones primeramente serán verbales y se reforzarán con una serie de mensajes antes de iniciar la aplicación ya con los lentes colocados.

# Introducción

---

Un temblor jamás se puede predecir, por tal motivo se debe estar capacitado e informado acerca de cómo actuar ante este tipo de desastres naturales. El hecho es que existe muy poca educación de protección civil en México, a pesar de que vivimos una nación azotada diariamente por sismos de diferentes magnitudes. Por tal motivo, y ante la urgencia de capacitar a la población en cómo actuar ante un terremoto, se ha decidido desarrollar una herramienta interactiva y amigable que permita aprender, de manera segura, a cómo enfrentar un sismo de escala destructiva.

Esta aplicación llamada “Tepeyollotl” funciona con realidad virtual, una tecnología que se ha popularizado mucho en los últimos años y que ahora está al alcance de todos, gracias a los smartphones en combinación con el uso de los lentes de realidad virtual. El objetivo principal es que el usuario aprenda dos simples cosas: ¿Qué elementos conforman una “mochila de emergencia”? y ¿Qué zonas son las más seguras durante un sismo?

Este estudio está basado en un caso real y el escenario de realidad virtual es una réplica exacta de los edificios ubicados en Rancho San Lorenzo num. 32, Col. Las Bombas, Coyoacán CDMX, antes, durante y después del sismo del pasado 19 de septiembre de 2017 con magnitud 7.1 grados. Dichos edificios se han reportado como inhabitables debido a los fuertes daños estructurales que presentan. El usuario podrá moverse (mediante un control bluetooth) a través de este edificio durante la simulación, lo cual le brinda completa libertad de toma de decisión para preservar su vida.

Para que el usuario recorra todo el escenario y sea consciente de su alrededor, se le pedirá recolectar elementos que conforman la “mochila de emergencia”, posteriormente seguirá una ruta de evacuación, para finalmente aprender a sobrellevar una situación de emergencia durante la simulación de un terremoto. Esto arroja datos importantes acerca del ejercicio, tales como: en cuánto tiempo la persona se ha puesto a salvo, de qué manera lo hizo, si cerró el paso de gas, si se quedó o no dentro del departamento, etc.

Este simulador se podrá ocupar las veces que sean necesarias para que una persona aprenda las diferentes formas de protegerse y estar a salvo en caso de un terremoto. Con esto, se pretende enseñar a la gente las medidas básicas de protección civil en caso de sismos mediante tecnología inmersiva, para así poder salvar vidas reales gracias a la educación.

El primer capítulo explica de manera histórica los antecedentes de nuestro país con los sismos, la problemática y las consecuencias que estos conllevan; profundizando en temas relacionados a las leyes que promueven la seguridad civil dentro de las edificaciones y de los beneficios que tiene el utilizar la tecnología como herramienta de aprendizaje.

El marco teórico, que abarca el capítulo dos de esta tesis es muy amplio, pues aborda temas puntuales que no atañen a la Ingeniería en Computación directamente, pero son importantes explicarlos en una primera instancia para poder profundizar a lo largo de la tesis en ellos, tal es el caso de cómo se producen los sismos y las causas que lo vuelven destructivo en la zona metropolitana, las recomendaciones de protección civil, el diseño sísmo resistente con el que deben contar los edificios y una breve descripción del caso de estudio con fotografías reales del inmueble y los principales daños dentro de este.

La descripción técnica y completa del diseño del proyecto se relata en el tercer capítulo, tomando en cuenta que no son necesarios ciertos conocimientos profundos de programación para poder comprender la forma en que se está desarrollando el proyecto, pues los diagramas que contienen este apartado son breves y explicativos para facilitar la lectura del mismo.

Capítulo cuarto aborda cuestiones técnicas de la implementación del proyecto, describe las herramientas utilizadas, versiones y sistemas operativos compatibles tanto con las herramientas de programación como con la aplicación final. El objetivo de este apartado es explicar a detalle cómo funciona y que se necesitó para programar una app de este estilo.

El método cuantitativo dentro de la metodología y el análisis de datos del capítulo cinco, permite conocer, mediante una serie de experimentos con diferentes personas, que tan efectivo se vuelve el uso de la realidad virtual, demostrando la hipótesis de que el uso de este tipo de tecnologías incrementa o mejora la forma de aprendizaje.

Finalmente, el sexto apartado no solamente conjunta las conclusiones y opiniones finales de los autores de esta tesis, sino trasciende a las aplicaciones futuras que este mismo proyecto puede tener, así como los enfoques y diversas áreas en las que puede profundizar la tesis sin que sean precisamente enfocadas a la ingeniería.

# Antecedentes y problemática

---

Los sismos siempre han ocurrido, desde el momento de la creación de la Tierra hasta la actualidad. Sobra aclarar que seguirán ocurriendo el mismo tiempo que el planeta exista. Hoy más que nunca es importante aprender todo acerca de este fenómeno natural imponente, entenderlos, estudiarlos y estar preparados para disminuir sus consecuencias. Han cobrado millones de vidas a lo largo de la historia, no sólo vidas humanas, sino también especies animales, que curiosamente tienen un comportamiento inusual ante estos fenómenos naturales, los caballos que se vuelven impacientes en los establos, los perros ladran inexplicablemente e incluso los peces saltan fuera de los estanques, todos estos animales reaccionan con un comportamiento nervioso, incluso antes de que ocurra un terremoto. El recuento de los sismos más grandes de la historia documentados, suman alrededor de 822,500 víctimas, distribuidas en países como Chile, China, Estados Unidos, Japón, etc. Curiosamente todos estos países están alrededor del llamado “Cinturón de Fuego”, una región del planeta que rodea al océano Pacífico (ver Figura 1.1), donde se concentra la gran mayoría de movimientos telúricos y volcanes activos. México también se suma a esta lista de países o territorios que se encuentran al filo de esta zona mortal, por tal motivo en el siguiente apartado se hablará acerca de cómo México actúa ante los sismos y algunos de los eventos telúricos más importantes registrados.

## 1.1. México ante los sismos

Los primeros aparatos de medición sísmica que pisaron territorio mexicano tuvieron la fortuna de registrar importantes movimientos telúricos desde el comienzo de la era instrumentada, es decir, desde principios del siglo XX. De acuerdo con el libro de Cruz Atienza [6], como festejo por el centenario de la independencia de México, el 5 de septiembre de 1910, se inauguró el primer observatorio sismológico en México, ubicado en la Estación Sismológica de Tacubaya (hoy museo de Geofísica).

Algunos sismos registrados en esa época fueron realmente importantes, como el de Acambay, Estado de México, que en 1912 registró el sismo superficial de mayor

## 1. ANTECEDENTES Y PROBLEMÁTICA

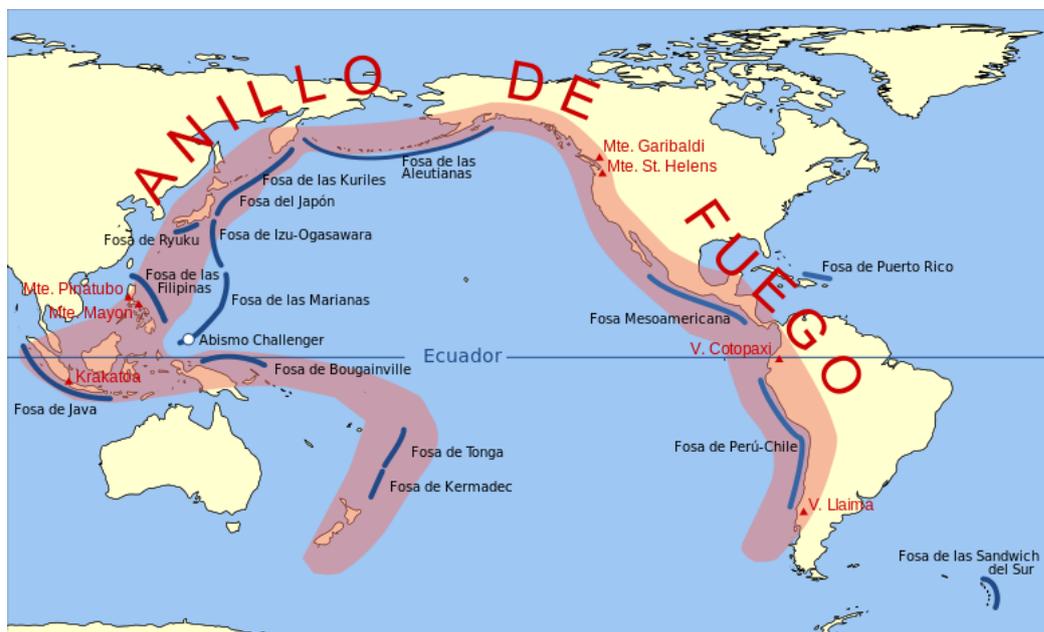


Figura 1.1: Anillo de fuego que rodea el océano Pacífico.

magnitud en México [6]. Otro caso por mencionar fue el sismo de Barra de Navidad, Jalisco en 1932, siendo este último el terremoto más intenso registrado en esa época con sus 8.2 grados en la escala Richter, dejó a su paso cientos de muertos y heridos, se estimaron 400 decesos [56]. En la época actual se igualó esa marca, pues los 8.2 grados se volvieron a registrar el 7 de septiembre de 2017 en costas de Chiapas, afortunadamente con menos víctimas.

Cabe aclarar que no forzosamente los sismos registrados con mayor intensidad son los más mortíferos, o los que dejen mayor desastre a su paso. Más adelante, en el capítulo 2, se hablará acerca de las diferencias entre intensidad y magnitud de los sismos. A continuación se muestra una lista de los terremotos más importantes o representativos que han golpeado a la nación mexicana, ordenados de mayor a menor en escala de víctimas, con el fin de concientizar el impacto que puede tener este fenómeno natural en la sociedad.

- **Sismo de 1985 (10,000 víctimas<sup>1</sup>):**

No hay otro sismo más representativo en la historia mexicana que el que ocurrió la mañana del 19 de septiembre de 1985. Esta tragedia reveló la inmensa trampa en la que viven los ciudadanos diariamente, ya que, sin previo aviso, un sismo puede

---

<sup>1</sup>Datos estimados posteriormente, debido a que la tragedia rebasó rápidamente la capacidad de respuesta del gobierno mexicano para llevar a cabo este conteo, la estimación oficial en ese entonces era de 5,000 muertos [6].

derrumbar la vida de cientos de familias. Datos científicos revelan de que fue un terremoto de tipo inverso de subducción; con epicentro cercano a las costas de Michoacán, rompiendo una falla de 180 kilómetros de longitud llegando hasta la costa de Guerrero [6].



**Figura 1.2:** Distrito Federal en ruinas, Cuartoscuro (1985)

- **El sismo de Xalapa (650 víctimas):**

Este segundo puesto no debe pasar desapercibido, a pesar de no tener las cifras tan altas como el primero, las víctimas están repartidas en diferentes estados como Puebla y Veracruz, las cuales representan una fuerte pérdida ocurrida la noche del 3 de enero de 1920. La magnitud de 6.4 grados bastó para sacudir violentamente esa zona y derrumbar casas, así como edificios importantes. El mayor número de víctimas fue alcanzado por los deslaves en las barrancas del río Huitzilapan [50]. El sismo profundo ocurrió a 50 km de distancia entre la capital veracruzana y la ciudad de Puebla.

- **Sismo de Orizaba (470 víctimas):**

28 de agosto de 1973, nuevamente el estado de Veracruz sucumbe ante un sismo, esta vez con una mayor magnitud, 7.2 grados en la escala Richter provocaron la muerte de más de 450 víctimas. El Sistema de Gestión de Información Sísmica de Veracruz provee datos científicos que deducen que este sismo fue mortífero gracias a que la zona conurbada de Orizaba se encuentra asentada a lo largo de los 18 km de la falla de Zacamboxo, el suelo de esta región se compone principalmente de

roca caliza, arcilla y arena, lo cual provoca una especial inestabilidad estructural de los edificios ante los sismos, los cuales se terminaron desplomando [34].

- **Sismo de Barra de Navidad (400 víctimas):**

La tarde del 3 de junio de 1932 el estado de Jalisco tembló bruscamente ante un sismo de subducción con magnitud 8.2 grados. Como se mencionó desde un principio, los sismos con mayor magnitud no forzosamente deben ser los más mortíferos. A comparación con el segundo puesto de esta lista, el sismo de Barra de Navidad fue aproximadamente 50 veces mayor a los 6.4 del sismo de Veracruz, sin duda es importante recalcar esto, pues generalizando el concepto, el sismo de 8.1 grados de 1985 fue 20 veces menor al sismo más grande registrado en la historia, ocurrido en Valdivia, Chile, de magnitud 9.5 grados [41]. La diferencia de muertos es grande, mientras que en Chile rondaron los 2,000 [6], en México se registraron más de 10,000 decesos.

- **Sismo del 19S (369 víctimas):**

Justo 32 años después del sismo más mortífero registrado en la historia mexicana, el 19 de septiembre de 2017, tuvo lugar un terremoto profundo que se liberó a 57 km debajo del estado de Puebla (ver Figura 1.3), sus 7.1 grados de magnitud y la cercanía de grandes poblados del epicentro causaron ese elevado número de pérdidas humanas. Las cifras oficiales de este sismo fueron de un deceso en Oaxaca, 6 en Guerrero, 15 en el Estado de México, 45 en Puebla, 74 en Morelos, y 228 en la CDMX. Por lo cual, este sismo se coloca como el quinto más mortífero de la lista [46].

Es importante resaltar que el origen de este proyecto nace a partir del sismo denominado **19S**, no a raíz de la tragedia, se compone de una gran área de oportunidad y de aplicación de conocimientos de ingeniería, en particular, de computación en combinación con otras áreas lo que resulta en un proyecto multidisciplinario. Todos los involucrados en esta tesis y miles de personas dentro de las zonas afectadas experimentaron dicho sismo, la respuesta general es de temor ante este tipo de desastres mortales, pues es parte de una respuesta natural e instintiva ante un peligro inminente. Una buena práctica es no dejarse guiar por una mala toma de decisión o quedar paralizado ante la emergencia, este proyecto de tesis pretende atacar esa área de oportunidad con el simulador que se describe dentro del capítulo 3 y 4.

- **El sismo de Tehuantepec (95 víctimas):**

El 7 de septiembre de 2017, solo 12 días antes del 19S, frente a la costa de Chiapas, a unos 133 km al suroeste de Pijijiapan, se desató uno de los sismos de mayor magnitud registrados en México, este sismo de subducción entre la placa de Cocos y la placa de Norte América registró un récord de 8.2 grados [46], los cuales dejaron destrozados en los poblados cercanos, que hasta la fecha aún no se les ha dado la atención necesaria y en muchos casos siguen en ruinas. Cabe destacar que



**Figura 1.3:** Epicentro del sismo del 19 de septiembre de 2017, Servicio Sismológico Nacional.

estos dos últimos sismos no están directamente relacionados entre si, a pesar de ocurrir en una zona relativamente cercana y con poca diferencia de días, no tienen dependencia alguna por pertenecer a diferentes placas y distintas profundidades.

- **Sismo del Ángel (50 víctimas):**

Probablemente el más icónico de todos los anteriores mencionados, siempre será recordado por haber derribado, la madrugada del 28 de julio de 1957, el monumento más representativo de la ciudad, el “Ángel de la independencia”; aquel erigido por el presidente Porfirio Díaz en 1910. A 60 kilómetros del suroeste de Acapulco un sismo de 7.8 grados se desató destruyendo varios edificios y casas a su paso, se estimaron 50 víctimas [38].

- **Los sismos de 1999 (52 víctimas):**

En ese año se registraron dos grandes sismos en el interior de la placa de Cocos sobre fallas directas, cerca de los estados de Puebla y Oaxaca, con 7 y 7.5 grados de magnitud respectivamente. La profundidad de estos movimientos telúricos fue de entre 60 y 50 km debajo de la superficie terrestre, estos sismos se catalogan como los más peligrosos, pues generalmente provocan cuatro veces más destrucción que los sismos de subducción (estos últimos son más típicos en nuestro país [6]). En resumen, 1999 fue un año muy agitado en cuanto a terremotos como el de 2017, solo que con una diferencia de víctimas importante.

## 1. ANTECEDENTES Y PROBLEMÁTICA

### ■ El sismo más grande de México (número de víctimas desconocido):

Este suceso entra en la lista por la magnitud que se estimó en esa época, aproximadamente 8.6 grados sacudieron las costas de Oaxaca, con un epicentro desconocido, levantando olas enormes que inundaron poblados enteros hasta 6 kilómetros tierra adentro debido al tsunami que se generó [6]. Esto aconteció el 28 de marzo de 1787, y debido a la antigüedad del suceso es incalculable el número de víctimas así como de su escala exacta, pues las olas se extendieron a lo largo de los 450 km que tienen las costas de aquel estado y se desconocía el número de pobladores de esas zonas. Más adelante se tratará el tema de los mortíferos que suelen ser los tsunamis, los cuales son provocados por los sismos.

En resumen, México ha tenido numerosos movimientos telúricos, pero a comparación de otros países como Haití o Japón, el número de víctimas y desastres es menor; no se debe tomar como una ventaja para bajar las defensas, por el contrario, se deben tener mejores medidas de protección y concientizar a la gente sobre cómo actuar ante un sismo. A continuación, se muestra una figura donde se resumen los sismos más importantes (por magnitud) que han azotado el territorio mexicano, entre los cuales destacan los nueve sismos más mortíferos ya mencionados (ver Figura 1.4).

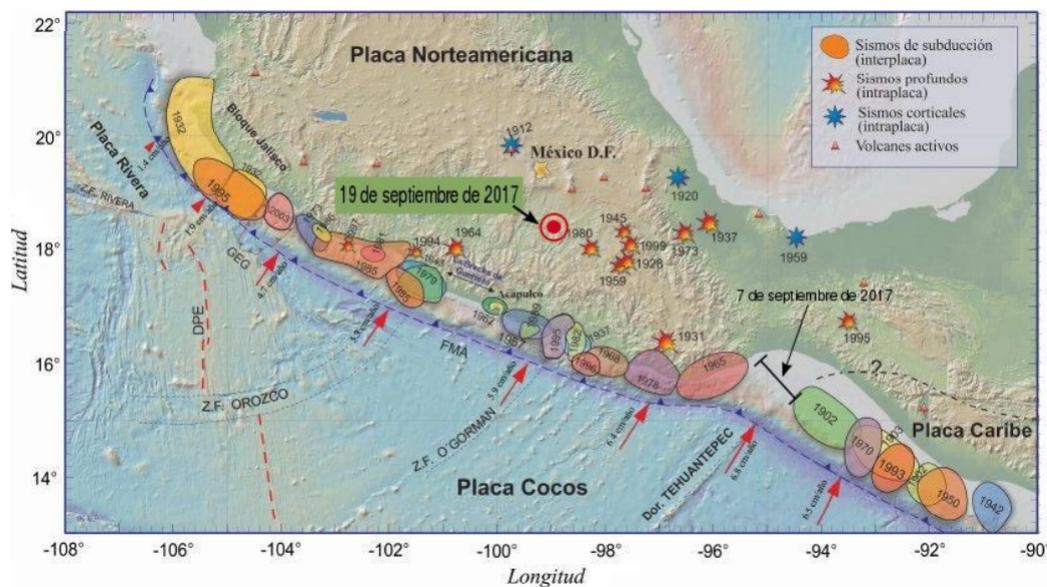


Figura 1.4: Sismos más importantes en los últimos años, Servicio Sismológico Nacional.

## 1.2. Antigua ley de edificación en el Distrito Federal

El acelerado crecimiento de la capital mexicana ha requerido de un enorme esfuerzo en las áreas de ingeniería geológica, geotécnica, geomática, civil y arquitectura, ya que,

debido a la enorme demanda de crecimiento urbano, los especialistas deben tener mayor cuidado de en dónde y cómo construyen una casa, edificio o puente, especialmente porque el Valle de México presenta un tipo de suelo inestable, que tiende a amplificar las ondas sísmicas, más adelante en el siguiente se tratará el tema de la zona sísmica del Valle de México y sus consecuencias en los ciudadanos. La historia de las edificaciones reguladas en la Ciudad de México comienza en 1933, para ese momento se presentaba una propuesta llamada “Ley de Planificación y Zonificación del Distrito Federal”, la cual tenía como objetivo principal el regular, controlar y ordenar el crecimiento urbano de la capital, principalmente porque con el paso de los años el espacio y los recursos en esta zona se volvían más escasos, sobre todo se generó esta propuesta ante una necesidad urgente de planificar el crecimiento de la urbe. A pesar de sus carencias técnicas, esta ley ya establecía tamaños y volúmenes para cada tipo de edificación, sin tomar en cuenta los materiales de construcción. Gracias a esta ley en un periodo de 20 años la ciudad pasó de  $99.5 \text{ km}^2$  a  $175 \text{ km}^2$ , aumentando casi el doble el tamaño la capital, con este paso agigantado era hora de reformar las leyes. Para 1953 se promulgó una nueva ley titulada: “Ley de Planificación del Distrito Federal”, donde ya se tomaba en cuenta importancia al aspecto arquitectónico y geográfico por cada región en el Distrito Federal. Para estas fechas ya se tenían muchas viviendas sin servicios básicos como agua y luz, gracias a la ley anterior de 1933, con esta nueva ley se pretendía abastecer a todos los ciudadanos con recursos suficientes. Esta ley continuó con bastante difusión, pues se sumaron algunos municipios conurbados del Estado de México.

Fue así hasta 1976 donde la “Ley del Desarrollo Urbano del D. F.” llegó a modificar ciertas cosas, en esta ley por primera vez se le da importancia a cada tipo de suelo por edificación, la contaminación ambiental y la regulación de la tenencia de la tierra. Para 1980 llegaron otros instrumentos que se unieron a esta ley, como la Reforma Federal de la Vivienda.

El sismo de 1985 fue un parteaguas en este tema, creó un antes y un después. Como se puede notar en la figura 1.4, en años previos al gran sismo del 85 no se presentó ningún acontecimiento telúrico importante que afectara la capital, referido al número de víctimas en un periodo cercano. El gobierno solo quería expandir la ciudad sin importar nada más, hacerlo de la manera más controlada y acelerada posible, para cobrar impuestos por cada terreno, pues no se podían quedar atrás en comparación con otras ciudades en crecimiento (como Guadalajara o Monterrey), todo esto sin tomar en cuenta el tipo de edificación, estructura, material o el tipo de suelo donde se construían. Las consecuencias fueron terribles, pues cerca de 770 edificios resultaron colapsados o seriamente dañados tras el gran terremoto [6]. La tragedia rebasó la capacidad de respuesta de las autoridades, y los ciudadanos tuvieron que ayudarse entre sí durante estos momentos difíciles.

Era necesario reajustar todas las leyes promulgadas para ese entonces, e incluso integrar medidas preventivas para rescate de víctimas y redefinir las políticas de desarrollo nacional. Varias comisiones nacieron a necesidad de estas nuevas políticas, como la Comisión de Evaluadora del Sismo, el Sistema Nacional de Protección Civil y el Centro Nacional de Prevención y Desastres. Por orden federal, se le exigió al Departamento

## 1. ANTECEDENTES Y PROBLEMÁTICA

---

del Distrito Federal vigilar los nuevos lineamientos de diseño arquitectónico y estructural, mecánica y uso del suelo, sobre todo un control de calidad adecuado para el tipo de material de construcción. Por supuesto había que comenzar con la reconstrucción de la ciudad, la cual según la SHCP estimó en 2,000 millones de dólares, aunque otras instituciones lo elevaron hasta 5,000 millones de dólares [6].

Para este punto, las organizaciones populares que surgieron ante el sismo representaron una presión importante para el gobierno con la reconstrucción de sus viviendas, varios movimientos de descentralización surgieron gracias a ellos. La demanda sobrepasaba la ayuda que podían ofrecer las instituciones públicas y esto generó un conflicto en la política urbana de la Ciudad de México.

Finalmente, el Programa Emergente de Renovación Habitacional promovió la creación de viviendas pequeñas para los afectados, tomando en cuenta el número de integrantes por familia y los metros cuadrados que se tenían disponibles. La venta y expropiación de terrenos fue masiva, muchos vendían sus hogares en las zonas afectadas, mientras que en otros casos los dueños de los terrenos no aparecían. Los tiempos han cambiado y el reglamento de edificación también, de no haber sido forzado a cambiar el reglamento después del terremoto 85' probablemente el número de víctimas en los sismos posteriores hubiera crecido exponencialmente..

### 1.2.1. Diferencias con otros países

*¿Cómo está parado México en materia de protección civil ante otros países?*

Como se planteó en el apartado “México ante los sismos”, no se ha recibido un sismo tan fuerte como los de China o Chile en territorio mexicano, por lo menos que se tenga registro, además las edificaciones han cambiado mucho con el paso de los años. Para poner en contexto este tema, se tomará como referencia a Japón; que en 2011 vivió el sismo más importante de la era actual, con el cual se pueden destacar diferencias importantes, ya que es considerado como el sismo más estudiado de la época actual, gracias a la red más densa y tecnológicamente avanzada de sensores sísmicos de todos los tiempos instalada sobre ese país [4].

Históricamente, según el investigador Tatsuo Murota [36], el primer Código de Construcción Urbana se emitió en el país asiático en el año de 1919, mucho más temprano que en nuestro país, pues en esa época México estaba en plena revolución y no se tenía un control real sobre las construcciones que se edificaban en ese entonces, solamente de monumentos o edificios importantes, como el Palacio de Bellas Artes.

Para cuando nuestro país apenas comenzaba a tener conciencia cívica sobre el crecimiento urbano de la ciudad, en Japón se dedicaron a editar el Lineamiento de Cálculo Estructural, en el Instituto de Arquitectura de Japón en los años 30'. Veinte años más tarde en aquel país, se promulgó la Ley de Normas de Construcción, mediante la cual se exigía que todos los planos de construcción deben ser diseñadas por ingenieros de construcción con licencia vigente, y sobre todo que fuese aprobada por un consejo de funcionarios inspectores de construcción. Las leyes y normas de construcción se fueron refinando con el paso de los años gracias al avance tecnológico de Japón, hasta que

la ley de Estándares de Construcción había logrado construir edificios tan resistentes que durante el sismo de 2011 la mayoría no presentaron daños estructurales importantes durante el siniestro. Otras tantas edificaciones (cerca de las costas principalmente) no tuvieron tanta suerte, la verdadera catástrofe llegó pocos minutos después cuando se generó un tsunami de grandes proporciones, el cual dejó cientos de muertos, casas destruidas, barcos en las calles y miles de desaparecidos. La cifra estimada ante este desastre fue de 23,000 víctimas, una central nuclear destruida y 500 mil millones de dólares en daños [6].

Dichos acontecimientos abren paso a la siguiente serie de preguntas: ¿México está preparado para algo similar?, ¿Existe un plan de evacuación, por parte del gobierno, en caso de alerta de tsunami en las costas?, ¿Qué medidas preventivas tiene la central nuclear mexicana ante sismos (ver Figura 1.5)?, ¿Existen edificaciones mexicanas con la capacidad de soportar un sismo de 9.0 grados?, ¿Las medidas preventivas de protección civil nos garantizan cierto nivel de seguridad? Varias de estas preguntas y sus respuestas serán tratadas en los capítulos subsecuentes.



**Figura 1.5:** Central nuclear laguna verde, Veracruz.

### 1.3. Zona sísmica de la Ciudad de México

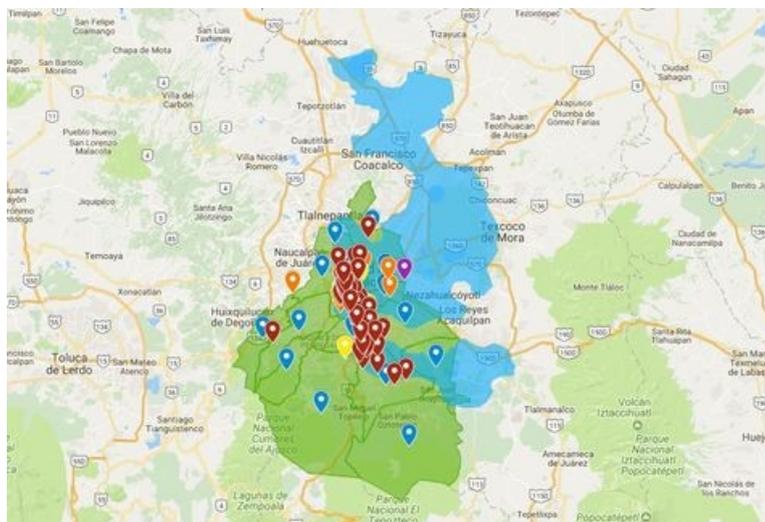
El valle de México es un caso único de estudio para los especialistas, pues una gran parte de este territorio reposa sobre el antiguo lago de Texcoco. Es decir, la mayor parte

## 1. ANTECEDENTES Y PROBLEMÁTICA

---

de la ciudad es una especie de *corcho sobre el agua*, la menor agitación o perturbación se puede llegar a multiplicar hasta 500 veces (dependiendo la zona) [6].

La peligrosidad sísmica del territorio mexicano se encuentra en niveles altos. Según el mapa mundial de riesgo sísmico (propuesto por la ONU en los años 90's), destaca que México se encuentra marcado dentro de las zonas de "Peligro moderado" hasta "Peligro muy alto". Estos son niveles alarmantes para todos los habitantes, especialmente para los 8.9 millones de ciudadanos [29] que viven sobre los tres tipos de suelo que componen la Ciudad de México, los cuales se explicarán a continuación:



**Figura 1.6:** Zona del lago de Texcoco en el Valle de México, *Google Maps*®.

- Zona del lago (zona III): Gustavo A. Madero, Cuauhtémoc, Venustiano Carranza, Iztacalco, Iztapalapa, Coyoacán, Tláhuac, y parte de Azcapotzalco, son aquellos municipios de la ciudad de México que reposan sobre dicho lago, las rocas que lo componen no tienen tanta compresión entre sí, lo cual genera una mayor libertad de movimiento, y por ende un factor que amplifica las ondas sísmicas (ver Figura 1.7).
- Zona de transición (zona II): Amplificación media, esa zona se encuentra alrededor de la zona del lago, el suelo compacto se encuentra entre los 3 y 20 metros de profundidad (ver Figura 1.6).
- Zona de terreno firme (zona I): También conocida como zona de lomas, es una extensa parte de terreno rocoso que cubre la zona poniente y sur de la ciudad de México. Aquí las amplificaciones de las ondas son menos violentas y los estratos rocosos o de suelo compacto se encuentran a menos de 3 metros (ver Figura 1.8).

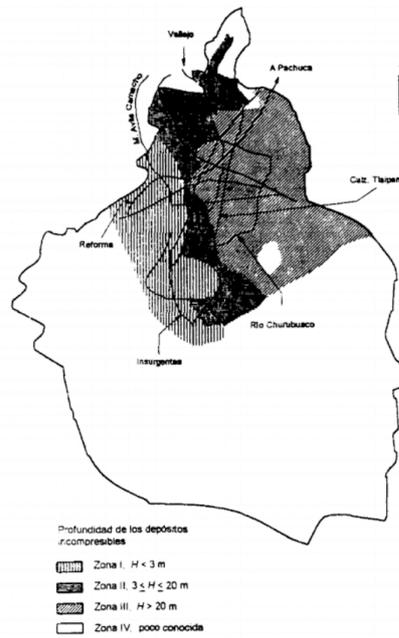


Figura 1.7: Zonas de profundidad con suelo firme, Meli Piralla.

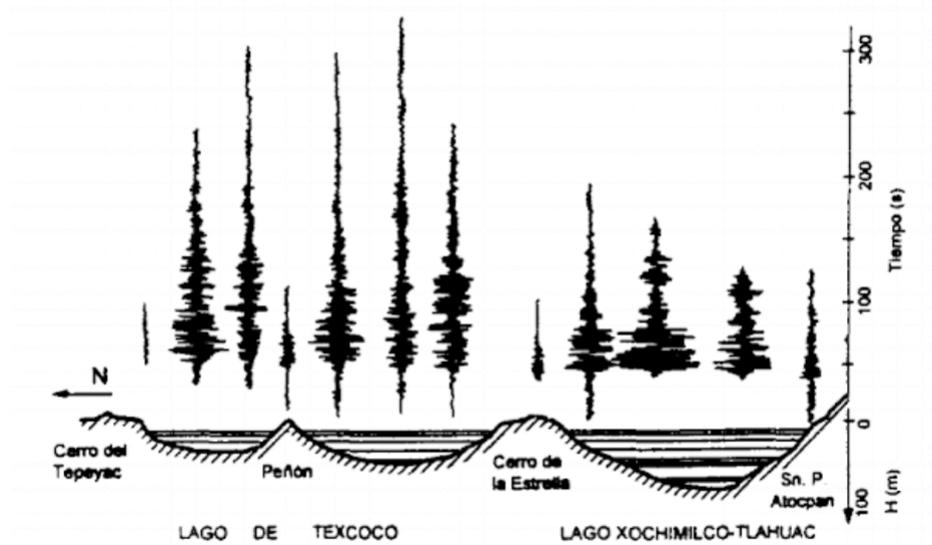


Figura 1.8: Esquema representativo de las zonas sísmicas del valle de México.

### 1.4. La tecnología como herramienta de aprendizaje

La tecnología ha transformado muchas actividades cotidianas de los humanos con el paso de los años, generalmente para bien, pues promueven el realizar más fácil y rápido las tareas. La educación no ha pasado desapercibida para la tecnología, los estudiantes se han apoyado de nuevas tecnologías para aprender de una forma más eficiente y orgánica. Los esquemas educativos cambian cada ciclo escolar para incorporar nuevas tecnologías de las TIC<sup>1</sup> en los salones de clase, para realizar tareas y trabajos, como una alternativa en la forma didáctica de aprendizaje.

Este caso de estudio se centrará en las tecnologías 3D<sup>2</sup> como herramienta de aprendizaje, por tal motivo a continuación se discuten los principales pros y contras de enseñar con este tipo de herramientas, sobre todo del porqué es una buena opción para utilizar la tecnología en el ámbito educativo relacionado a los sismos y protección civil.

#### 1.4.1. Pros

- El estímulo sensorial de esta tecnología entra por medio de dos vías especialmente sensibles del cuerpo humano, estos son, la vista y el oído. El estímulo visual es generado por una pantalla led dentro de unos lentes especiales (llamados visores o cascos de realidad virtual), los cuales se colocan en la cabeza frente a los ojos, mientras que el estímulo auditivo puede añadirse con audífonos o fuentes de audio externas que mejoran la experiencia con audio 3D.
- Los demás sentidos como tacto, olfato y gusto también pueden ser estimulados con dispositivos externos como guantes, controles remotos, trajes especiales o plataformas externas.
- La realidad virtual provee la oportunidad de crear una “realidad alterna” en la que el usuario pueda interactuar de forma segura con objetos y situaciones que difícilmente se pueden tener en la realidad cotidiana.
- Actualmente se tiene la posibilidad de utilizar esta tecnología en dispositivos móviles, pues la mayoría (considerados como gama media – alta) cuentan con acelerómetro, giroscopio, bocinas y pantalla, para hacer que funcione una aplicación de realidad virtual; el costo de estos visores con lentes especiales para colocar el *Smartphone* es económico a comparación de dispositivos como los lentes Oculus Rift®, en el apartado 4.3 se hablará ampliamente sobre la variedad de visores, su historia y los precios actuales en el mercado.
- En la educación se pueden usar un número indefinido de veces para que la persona aprenda, no se tienen restricciones de tiempo para poder utilizarlas.

---

<sup>1</sup>Tecnologías de la Información y Comunicación

<sup>2</sup>Referidas al entorno de realidad virtual

- La realidad virtual es muy intuitiva y fácil de usar, eso se puede apreciar en los niños, jóvenes, y adultos que rápidamente se pueden adaptar a estas tecnologías.
- Además del ámbito educativo, la realidad virtual tiene un sinnúmero de aplicaciones, como videojuegos, turismo, museografía, ocio y entretenimiento.

#### 1.4.2. Contras

- Los estímulos bruscos o demasiado rápidos en el ambiente 3D, pueden llegar a causar mareo, náuseas e incluso dolor de cabeza. El sentido visual es generalmente más sensible a los otros sentidos, por ende, se tiene que tener cuidado con esta parte de la tecnología.
- El nivel de realismo en las aplicaciones de realidad virtual (y en general para cualquier aplicación de cómputo gráfico) consume una gran cantidad de recursos de hardware, por tal motivo es necesario contar con tarjetas gráficas potentes para hacer lo más realista posible una aplicación.
- Generalmente los dispositivos que tienen integrado el visor de realidad virtual con otros dispositivos como acelerómetros y giroscopios suelen tener costos mayores, que actualmente van de los \$200 hasta los \$700 dólares.
- El uso de dispositivos móviles limita la carga de gráficos en aplicaciones de realidad virtual, dependiendo directamente de la capacidad de procesamiento gráfico con la que cuenten.
- Suele existir una gran dificultad de adaptación a estas tecnologías por parte del grupo de personas de la tercera edad, es decir, les cuesta mucho trabajo (e incluso temor) utilizar estos dispositivos.
- El uso de esta tecnología es complicado para personas que usan anteojos o tienen problemas visuales, pues sin sus lentes de armazón es complicado para ellos percibir de manera plena la realidad virtual; este punto también toma en cuenta a las personas con alguna discapacidad motriz que les imposibilite mover la cabeza y/o extremidades.

#### 1.4.3. Hipótesis

La finalidad de este proyecto de tesis es saber que tan efectivo se vuelve el uso de la realidad virtual en la educación, demostrando la hipótesis siguiente: El uso de la tecnología de realidad virtual, ¿incrementa o mejora nuestra forma de aprendizaje? Si bien, es difícil medir estos parámetros por la naturaleza del experimento, se espera un mejor porcentaje de supervivencia con el paso de las simulaciones del sismo, ya que la aplicación contará con una retroalimentación al final de cada simulación, la cual concientiza al usuario para tomar una mejor decisión en la siguiente vez que se utilice.

Esta clasificación ayuda a medir que tan efectiva se vuelve la herramienta con el número de veces que el usuario la utilice y su nivel de aprendizaje obtenido.

### 1.5. Beneficios de una sociedad con conciencia cívica ante desastres naturales

México no se puede quedar atrás en materia de protección civil. Disminuir los índices de vulnerabilidad es necesario para todos los pobladores, no solo para los que habitan el Valle de México, sino también para todo el país. Esto solo se puede lograr con una correcta educación en protección civil. En palabras de Cruz Atienza, escritor del libro “Los sismos, una amenaza cotidiana”,

*...[todas las personas tenemos derechos y obligaciones con respecto a este tema de protección civil; por un lado, es nuestro derecho exigir a las autoridades que se cumplan las normas de seguridad establecidas por los expertos, así mismo como de garantizar nuestra seguridad dentro del inmueble y permitir que las rutas de escape se encuentren en óptimas condiciones y libres de tránsito. Aunque difícilmente podamos tener acceso a documentación especializada como planos estructurales y arquitectónicos, las autoridades deben hacer lo posible porque el lugar donde vivimos o trabajamos sea seguro y conozcamos el nivel de vulnerabilidad que nos rodea]...*

(Cruz Atienza, 2013.)

Ser menos vulnerables ante los sismos es una responsabilidad propia de cada ciudadano, es decir, obtener información es una obligación importante para cada persona, esto implica conocer el fenómeno a fondo y practicar las medidas preventivas que proporciona el SNPC (Sistema Nacional de Protección Civil), así como conocer las recomendaciones del CENAPRED (Centro Nacional de Prevención y Desastres). Toda esa información es gratuita y se puede encontrar fácilmente en los portales de internet y sitios web oficiales de cada dependencia, así como vía telefónica o en su defecto existen cursos que se toman en línea para conocer estos fenómenos naturales impartidos por la UNAM en el portal oficial de la DGAPSU [44].

Según el Dr. David Alberto Novelo Casanova, Investigador del Departamento de Sismología en el Instituto de Geofísica de la UNAM, uno de los principales beneficios de una comunidad con conciencia cívica de protección civil es la prevención y mitigación de riesgos, lo que quiere decir en pocas palabras, que son todas aquellas acciones que puede realizar la ciudadanía para disminuir el riesgo ante el embate de un desastre natural, con el fin de no resultar perjudicados con el poder de la naturaleza. Un sismo no puede evitarse, pero sí se pueden reducir sus daños, con acciones previas al evento, de ahí el término “preventivo”, para evitar que un sismo se convierta en un desastre. Por ejemplo, se puede prevenir no construyendo en zonas con alto índice de riesgo sísmico.

## 1.5 Beneficios de una sociedad con conciencia cívica ante desastres naturales

---

Por otra parte, la mitigación es tomar acción en planes para reducir la vulnerabilidad a ciertos peligros, por ejemplo, la construcción correcta de inmuebles asegura que sean resistentes ante un sismo o tsunami de cierta magnitud. La mayoría de estos planes preventivos y de mitigación deben ser presentados por las autoridades, aunque también se debe actuar de forma autónoma y conocer los riesgos alrededor; una de estas acciones es formar un plan familiar ante contingencias, participar activamente en simulacros sísmicos en forma ordenada, con el propósito de aprender a cómo proceder ante un sismo, conocer rutas de escape y ubicar los puntos de reunión [10].



---

## Capítulo 2

# Marco teórico

---

El capítulo uno ha sido una breve semblanza de los sismos más impactantes en México y la importancia de saber cómo actuar correctamente ante una catástrofe natural para evitar pérdidas humanas. En este segundo capítulo se abordan de manera formal, las definiciones y tecnicismos que se usarán a lo largo de esta tesis, cubriendo cuatro puntos importantes:

1. *Software* del proyecto,
2. Explicación de los sismos,
3. Recomendaciones de Protección Civil,
4. Análisis estructural ante sismos.

Puntos que de manera rigurosa cubren áreas profundamente extensas y completamente diferentes entre sí, por tal motivo serán explicadas de la forma más simple posible e ilustradas con ejemplos gráficos para mejorar la comprensión, ya que, debido a la complejidad que abarca este estudio, no solo basta con hablar sobre las cuestiones técnicas en *Software* y Computación Gráfica que lo comprende, sino también debe ampliarse el marco teórico para comprender el contexto en que se desarrolla esta aplicación.

### 2.1. ¿Qué es una *App*?

El acrónimo “*App*” proviene del anglicismo *application*, cuya traducción directa al español es “aplicación”, dicha palabra puede referirse a diferentes términos en el entorno de la computación, como puede ser: una aplicación de escritorio (*software* para PC/Laptop), una aplicación web, diseñada para acceder a través del navegador, o una aplicación móvil, desarrollada para dispositivos portátiles como *smartphones* o *tablets*. Como se puede intuir, en este proyecto se abordará únicamente el concepto de aplicación móvil, ya que el producto final será implementado en un teléfono inteligente.

## 2. MARCO TEÓRICO

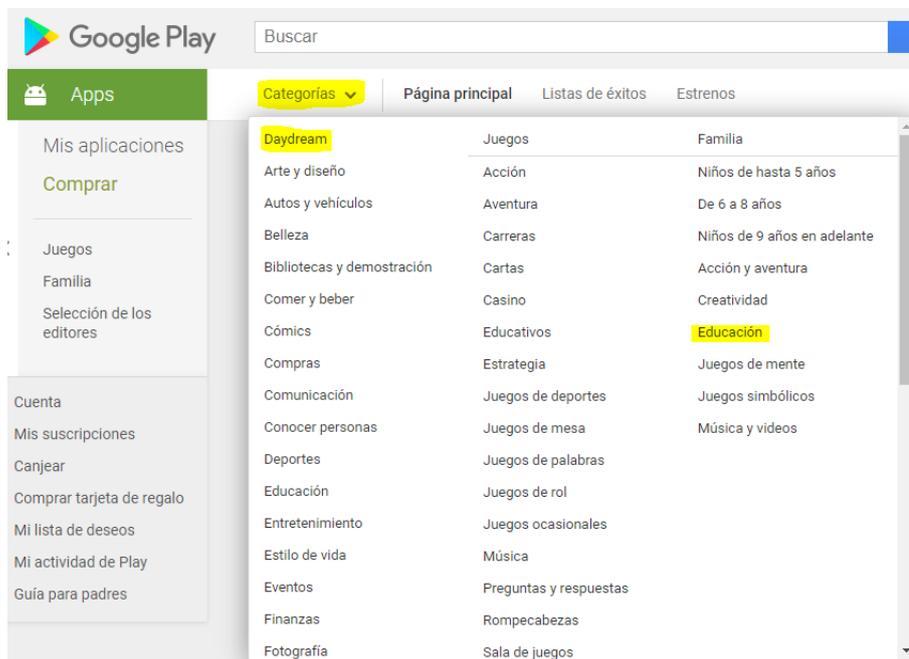
---

Una definición concreta de “aplicación móvil” está acuñada por la ITU<sup>1</sup>, organismo de la ONU encargado de regular las telecomunicaciones a nivel internacional, que explica de la siguiente manera:

*“... Las aplicaciones móviles son un software complementario para dispositivos portátiles, como teléfonos inteligentes y asistentes digitales personales. Entre las aplicaciones más populares se encuentran juegos, redes sociales, mapas, noticias, negocios, clima e información de viajes. Todas estas aplicaciones aprovechan al menos una de las características técnicas del dispositivo: interfaces de comunicaciones (Wi-Fi, WiBro / WiMAX móvil, GSM / EDGE, W-CDMA / UMTS / HSPA y Bluetooth), procesadores de audio y video, pantalla táctil, cámara(s), sensores o el módulo GPS...” [2]*

### 2.1.1. Aplicaciones de realidad virtual

Actualmente, existe un gran abanico de aplicaciones catalogadas según su finalidad en las diferentes tiendas electrónicas de las principales plataformas de dispositivos móviles. Dentro de las cuáles destacan las siguientes:



**Figura 2.1:** Tienda de aplicaciones móviles con realidad virtual para Android [27].

Es importante destacar la categoría de Daydream® (ver Figura 2.1), ya que esta marca registrada hace referencia a una variante moderna de los Google CardBoard®

---

<sup>1</sup>Unión Internacional de Telecomunicaciones

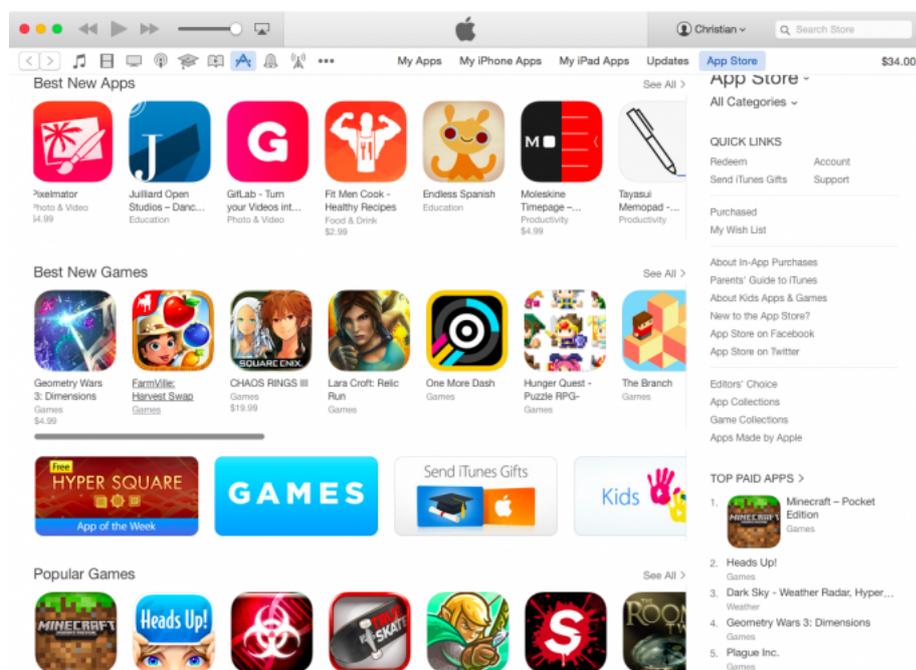
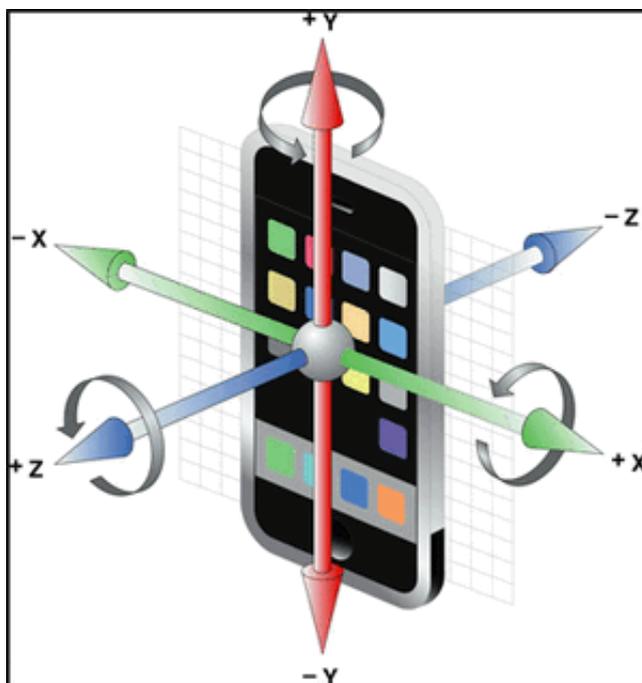


Figura 2.2: Tienda de aplicaciones móviles para iOS [28].

(los cuales se analizarán más adelante), que finalmente abordan las diferentes aplicaciones de realidad virtual que existen en el mercado Android, y que en su mayoría son compatibles con este dispositivo creado por Google®. La posición que ocupan las aplicaciones de realidad virtual en esta lista es importante, pues se encuentran a la cabeza de la misma, lo cual indica una gran área de interés por los usuarios que utilizan android sobre este tipo de aplicaciones, ya que es un nicho muy comercial y que realmente en esta época está reluciendo en el mercado debido a su impacto, nivel de atracción y retención que generalmente muy pocas aplicaciones tienen.

Retomando la definición de la ITU, las aplicaciones de realidad virtual utilizan genuinamente (para cumplir su principal función) una o dos características técnicas de los dispositivos compatibles: el Giroscopio, Acelerómetro y/o Brújula. Cabe destacar que no todos los dispositivos actuales en el mercado son compatibles con estas aplicaciones tan demandantes, principalmente los dispositivos catalogados como gama baja, ya que estos suelen ser considerados en ese nivel debido a los recursos de *hardware* con los que cuentan.

¿Cómo funcionan las Apps de realidad virtual? Una aplicación de realidad virtual utiliza los sensores antes mencionados para conocer la inclinación, orientación e incluso la posición de un usuario en el entorno. Muchas veces se deben calibrar los *smartphones* para que funcionen de manera correcta, lo cual involucra un cierto porcentaje de error en cuanto a orientación o inclinación, pero en general los dispositivos de gama alta no suelen presentar este tipo de problemas.



**Figura 2.3:** Coordenadas cartesianas de un dispositivo móvil

La Figura 2.3 representa las coordenadas cartesianas con sus respectivas direcciones y sentidos en los cuáles un teléfono inteligente se puede orientar gracias a la funcionalidad del giroscopio. Para tener una comparativa entre gamas de teléfonos inteligentes se puede analizar la Tabla 2.1, que revela la compatibilidad de algunos dispositivos móviles con la realidad virtual, entre diferentes marcas en el mercado mexicano actual [3].

Marcas\Gamas	Alta	Media <sup>1</sup>	Baja
<b>Samsung</b>	Compatible	Compatible	No compatible
<b>Otros<sup>2</sup></b>	Compatible	No compatible	No compatible
<b>LG</b>	Compatible	No compatible	No compatible
<b>Apple<sup>3</sup></b>	Compatible	Compatible	-

**Tabla 2.1:** Comparativa entre gamas y compatibilidad con el sistema de giroscopio.

[1] La gama media se disuelve cada vez más con los años, pues los equipos con manufactura asiática se abaratan y tienden a aparentar ser gama alta por sus funcionalidades pero con materiales de gama media o baja. Incluso los más mínimos detalles (como el chasis del mismo *smartphone*) se vuelven plastificados, por lo cual en unos

años se hablará de una sola gama de *smartphone* cuya única diferencia tenderá a cubrir ciertas necesidades.

[2] Esta franja gobierna el segundo puesto del mercado mexicano con marcas variadas que no son tan populares a nivel mundial pero que con los años han crecido por su gran variedad de dispositivos móviles con sistema operativo Android, el cual se ha maximizado con todas las versiones que han surgido y que a su vez no necesitan un *hardware* tan avanzado para ofrecer un buen servicio y una experiencia fluida al usuario. Algunas de estas marcas son: Leago®, Umidigi®, Leeco®, etc.

[3] Apple, empresa líder de tecnología e innovación, que rondando el año de 2010, fue pionera al incluir el sofisticado sistema del giroscopio en su modelo iPhone 4. Este novedoso sensor para los dispositivos móviles de cierta manera comenzó a revolucionar la industria de aplicaciones y abrió una nueva brecha de tecnología en sensores que se comenzaron a integrar al *smartphone* en esa década. En este video se puede apreciar el lanzamiento del *iPhone 4* y la reacción del público ante la presentación del entonces CEO Steve Jobs, ver Figura 2.4.

¿Qué define que un *smartphone* pertenezca a determinada gama? Principalmente esta diferencia yace en el *hardware* con el que cuenta, lo cual repercute directamente en los precios. El sistema operativo con el que cuentan no definirá la gama ni el precio. Aunque normalmente Apple® se haya especializado en ofrecer materiales y tecnología novedosa, se ha dejado opacar por modelos con sistema operativo Android que ofrecen mejores características a un precio mucho menor.

Regresando al tema principal de la realidad virtual, es importante aclarar que el efecto inmersivo no es para todos, desafortunadamente existen ciertas cuestiones fisiológicas para el humano que limitan el uso de esta herramienta en un sector de la población. Estos temas se tratarán de manera específica en el subcapítulo 4.3, que abarca el desarrollo de la tesis y las limitantes que se fueron encontrando en el camino.

Dentro del mundo de las aplicaciones de realidad virtual existe una enorme variedad de tipos de *Apps*, las cuales van desde el entretenimiento, hasta la educación; pasando claramente por las categorías de videojuegos, creatividad, cultura, aprendizaje, eventos, etc. Esto nos demuestra nuevamente el gran poder que tiene esta herramienta y el impacto que genera no solo a un grupo selecto de personas sino a multitudes, con gustos e intereses diferentes.

Esta tesis se enfoca en el desarrollo de una aplicación de realidad virtual orientada a la educación, la cual basa sus principios en las técnicas de mejora y aprovechamiento del aprendizaje. Las mejores técnicas para la educación se basan en un principio característico el cual es la estimulación. Así como un bebé aprende a comer ciertos alimentos debido a que juegan con ellos, los estudiantes de una manera similar pueden aprender ciertas prácticas debido a la experimentación que se lleva a cabo de manera empírica.

Cabe aclarar que el proceso de enseñanza y el proceso de aprendizaje son cuestiones distintas, si bien interseccionan en el punto donde se comparte el conocimiento, existen diferentes maneras en que una persona puede aprender. Para ello el individuo debe hacer

uso de sus habilidades cognitivas que le permiten obtener información del entorno y transformarlo en conocimiento para poder ser procesado y analizado conscientemente [62].

El ser humano tiene cinco vías de estimulación cognitiva, las cuales son [37]:

- Vista,
- Oído,
- Tacto,
- Olfato,
- Gusto.

Las que están relacionadas al aprendizaje mediante realidad virtual son los sentidos de vista y oído, ya que se usan generalmente con Lentes de realidad virtual y audífonos o fuentes de audio externo que generan un efecto inmersivo para el usuario. Cabe destacar, que entre más sentidos se estimulen será más sólido el aprendizaje de cualquier índole. Lamentablemente los avances tecnológicos no han podido crear un dispositivo económico, que esté a la mano de cualquier usuario, con la capacidad de generar una inmersión profunda que abarque todos los sentidos. Un ejemplo en la literatura de ciencia ficción, vislumbra este tipo de tecnologías como cápsulas de tamaño humano con sensores que estimulan directamente el cerebro para recrear sensaciones inexistentes, ligadas directamente a la estimulación cognitiva en un ambiente controlado y seguro [12].



**Figura 2.4:** Video QR con la presentación del iPhone4

### 2.1.2. Beneficios de una aplicación móvil con realidad virtual

A continuación se muestra una lista retomada de diversas fuentes educativas que resaltan las bondades y beneficios de una aplicación móvil con realidad virtual enfocada a la enseñanza [26] [21].

- Inmersión en un escenario controlado
- Razonamiento empírico durante ejecución del programa
- Reproducción de fenómenos reales en un entorno controlado
- Mejora de la comprensión mediante la experimentación
- Mejor comprensión por parte de los alumnos
- Manipular e interactuar objetos que en la realidad son peligrosos
- Entrenamiento y mejora de técnicas
- Estudio y diseño de “modelos virtuales” acercados a la realidad

Ejemplos de áreas en las que se puede aplicar la realidad virtual para la educación [21]:

- Matemáticas
  - Visualizar figuras en 3D.
- Física
  - Observar fenómenos físicos a detalle, por ejemplo la ley de gravitación universal.
- Biología
  - Apoyo visual en experimentación.
- Geografía
  - Desastres naturales
  - Recorridos virtuales
- Historia
  - Museos virtuales
  - Videos interactivos
- Astronomía
  - Visualización del universo conocido.
- Ingeniería
  - Apoyo visual en experimentación dependiendo la rama de estudio.
- Arqueología

- Visualización de zonas arqueológicas.
- Química
  - Apoyo visual en experimentación.
- Arquitectura
  - Modelado de edificios y estructuras.
- Medicina
  - Entrenamiento para cirugías.

La lista puede extenderse en una diversidad amplia de temas que solo la creatividad humana puede limitar, pues no solo la realidad virtual se aplica a la educación, sino también a las artes, el entretenimiento o la capacitación de personal.

Las etapas o edades en las que se puede utilizar esta tecnología para el aprendizaje, no se limitan solo a la infancia o juventud, en sí la realidad virtual puede ser utilizada en cualquier momento de la vida. Es claro notar que el nivel de adaptación que tendrá el grupo juvenil sobre los de etapa adulta o los de la vejez no será el mismo. Como parte de la experimentación en esta tesis se propone un estudio con personas de diferentes edades para medir el nivel de aprendizaje que se consigue con cada ciclo de simulación y tener datos fehacientes que comprueben la hipótesis.

### 2.2. Lenguajes de programación a implementar

En Unity se puede desarrollar con dos lenguajes de programación diferentes, con los cuales la mayoría de los programadores pueden experimentar y desarrollar con una visualización gráfica de los elementos que componen una escena con menos líneas de código y una interfaz completa para desarrollo. Estos lenguajes son:

- C#
- JavaScript

Como dato curioso, en las primeras versiones de Unity se comenzó a implementar Boo, un lenguaje de programación orientado a Objetos, con una sintaxis muy similar a la de Python. Actualmente este lenguaje fue descontinuado desde la versión 5.0 para esta plataforma, es decir, ya no se le brinda soporte al lenguaje. Aunque en su momento comenzó a ser integrado a esta herramienta, no tuvo un buen recibimiento por el público o simplemente no se utilizaba [58].

Lo que se puede programar con un lenguaje orientado a objetos como éstos, son las propiedades o acciones que se le añaden a un *GameObject* y le indican cómo comportarse en la escena. El siguiente paso es hablar sobre estos componentes fundamentales en Unity; un *GameObject* es un tipo de objeto que se encuentra dentro de la Escena, pero

que en principio no puede ser o hacer nada por sí mismo, estos necesitan ser añadidos por ciertas propiedades que les permitan ser un personaje, un efecto especial o parte del ambiente (ver Figura 2.5).



**Figura 2.5:** Diferentes GameObjects en Unity.

En la Figura 2.5 se muestran los diferentes tipos de objetos en Unity, los cuáles pueden ser: personajes, fuentes de luz, fuentes de audio, receptor de audio o un elemento decorativo del ambiente (como lo es un árbol). Otro punto a analizar es la “Escena”, que básicamente es el contenedor del entorno y de los elementos que se encuentren en el programa o proyecto, y a su vez será el lugar donde se coloquen específicamente los GameObjects para que estos puedan interactuar entre sí o directamente con el jugador como lo es con la realidad virtual.

Los *scripts* entran en juego al añadirle ciertas propiedades a los *GameObjects*; ya que es el código y los componentes añadidos lo que le dan la posibilidad de interactuar entre sí y dar ese efecto de “jugabilidad” a las cosas. Ahora bien, Unity está desarrollado específicamente para compilar y ejecutar los *scripts* de programación sin necesidad de que el programador genere el código base para abrir la pantalla de prueba y comenzar a dibujar sobre ella, esta es una ventaja enorme que tiene el *software*, pues ya omite muchas cosas básicas para el desarrollador y promueve que éste se pueda enfocar únicamente a la codificación de los *scripts* [57].

## 2.3. Sismos

*”Los mexicanos tenemos un sismógrafo en el alma, al menos los que sobrevivimos al terremoto de 1985 en el Distrito Federal. Si una lámpara se mueve, nos refugiamos en el quicio de una puerta.”*

**-Juan Villoro, ”8.8: Miedo en el espejo”(2011).**

### 2.3.1. ¿Qué es un sismo?

La definición griega de *seismós*, que literalmente significa “sacudida” o “conmoción”, remonta a épocas antiguas del hombre en las que se tenían creencias (por parte

## 2. MARCO TEÓRICO

---

de los pobladores de ciertas zonas sísmicas) sobre criaturas colosales que vivían bajo tierra, las cuales provocaban terremotos cuando se sacudían o se desplazaban debajo del suelo. Si bien nunca han sido fenómenos frecuentes los de gran magnitud, para aquella antigua época se consideraba todo un castigo divino o una señal de sus deidades que pronosticaba malos tiempos para la región. Tal es el caso del mito Japonés *namazu-kashima* [43]; no debe sorprender que dentro del folclore nipón se encuentre una leyenda de este estilo, pues ellos tenían la creencia que debajo de la tierra se desplazaba un pez gato de tamaño colosal, comparado con las mismas montañas, con una fuerza descomunal y una antigüedad milenaria llamado “Kashima”, al ver que su paso por debajo de la tierra causaba destrucción y muerte con su poderosa cola, el dios “Namazu” decidió aplacarlo con una inmensa piedra y evitar que se moviera lo más posible, aunque a veces la fuerza de este pez era tan incontrolable que lograba escabullirse de la enorme piedra y generar terremotos.



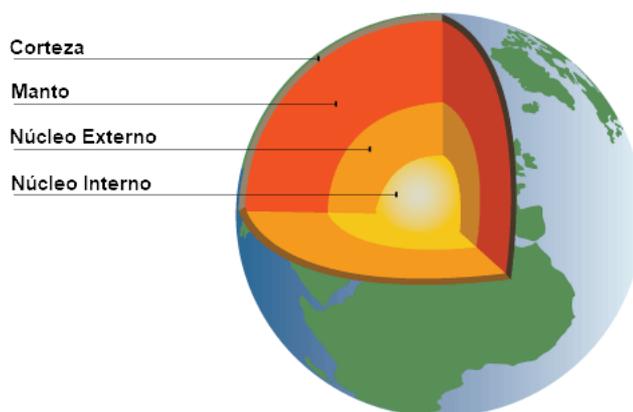
**Figura 2.6:** Muestra al dios Namazu aplacando a la bestia con la enorme piedra.

Otro sorprendente ejemplo de leyendas míticas es “Tepeyólotl”, el dios Jaguar creado por la mitología mexicana que está directamente vinculado con las montañas, la tierra y todos los fenómenos relacionados a ella (*tépetl*: monte, montaña, cerro; *yólotl*: corazón). Éste dios es un avatar (transformación, manifestación) del dios azteca Tezcatlipoca, que hace referencia a un ser superior que gobierna los cielos y la tierra y que de ella emanan todos los fenómenos naturales que le acontecen en el planeta. La información acerca de esta mitología es muy escasa, pues los primeros registros

de Tepeyollotl datan del siglo XVI en el Códice *Telleriano-Remensis* [32] el cual es un compendio pictográfico pintado sobre papel europeo por varios personajes mexicas anónimos, que reflejan información a través de dibujos sobre temas como: calendarios, ceremonias, deidades y acontecimientos históricos importantes. La relación de corazón y montaña se da directamente por el eco que se produce en las cavernas o cuevas y que hacen una alegoría a los sonidos que produce una montaña como si ésta estuviese viva [48].

“Los sismos, también llamados terremotos, son las rupturas violentas de roca que ocurren en el interior de nuestro planeta.” Así lo define Victor M. Atienza en su libro “Los sismos: Una amenaza cotidiana” [6], que sin palabras complicadas logra explicar la estructura y comportamiento del planeta para entender los sismos. Los temblores básicamente se originan por un choque de fuerzas entre las capas que conforman la superficie terrestre, estos a su vez producen las denominadas ondas sísmicas, las cuales son las que logran mover todo objeto sobre la superficie durante un sismo.

La siguiente figura muestra cómo funciona el planeta tierra por dentro en cuanto a las capas que lo conforman, tomando en cuenta cuatro principales capas: corteza, manto, núcleo externo y núcleo interno (ver Figura 2.7).



**Figura 2.7:** Capas internas del planeta tierra.

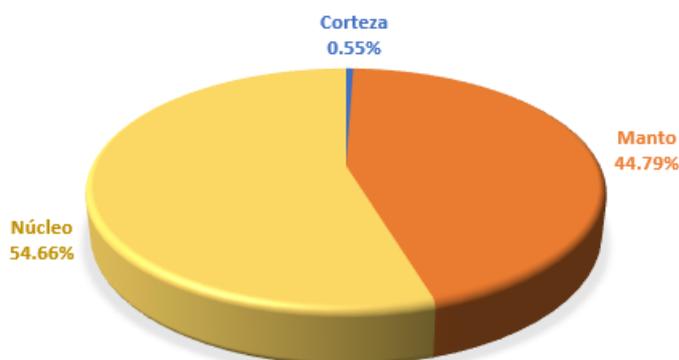
Si existiera una perforadora indestructible y lo suficientemente fuerte para perforar todas las capas terrestres, con la primera capa que tendría que luchar sería contra la capa que todo ser vivo conoce, la corteza terrestre, que comprende aproximadamente 35 km de grosor (dependiendo la zona), en general se pueden clasificar 70 km de profundidad sobre masas continentales o 10 km de profundidad bajo los mantos oceánicos. Hasta este punto la perforadora ha llegado a la “Discontinuidad de *Mohorovičić*” [30], que sin entrar en más detalles, es el punto donde termina la corteza terrestre y comienza el manto, el cual a su vez se comprende de muchas otras capas más, pero no serán relevantes para este estudio. Esta capa es robusta y compleja, pues abarca un grosor de 2,855 km, es decir, el manto terrestre es aproximadamente 81 veces más grande que la corteza misma (incluyendo superficies y océanos). Hasta este punto, la perforadora

## 2. MARCO TEÓRICO

---

ha llegado al núcleo, aproximadamente a 2,886 km de profundidad y se topa con dos capas densas, pesadas y altamente presurizadas, llamadas núcleo externo e interno.

En comparativa, el núcleo total tiene una profundidad de 3,484 km, es decir, el 55 % de las capas de la tierra está constituido por éste (ver Figura 2.8), seguido por el manto con un 45 % y la corteza terrestre que cubre a todas estas casi llega al 1 %, es decir, el humano conoce solamente la punta del iceberg en la que se encuentra viviendo.



**Figura 2.8:** Porcentajes de capas terrestres.

Los porcentajes son calculados con la distancia total del radio de la tierra que es de aproximadamente 6,370 km de profundidad, dependiendo la zona terrestre donde se calcule [30].

Desde la corteza terrestre y hasta el centro de la tierra, la perforadora imaginaria ha viajado la misma distancia que se recorre entre la Ciudad de México y la Ciudad de Santiago de Chile siguiendo una línea recta. Estas son distancias inimaginables para cualquier perforadora actual, ya que el registro máximo de perforación realizada por los humanos es de 13.5 km de profundidad, esto realizado por la compañía Exxon® en 2015 al noreste de Rusia [23], en la región de Sakhalin (ver Figura 2.9).

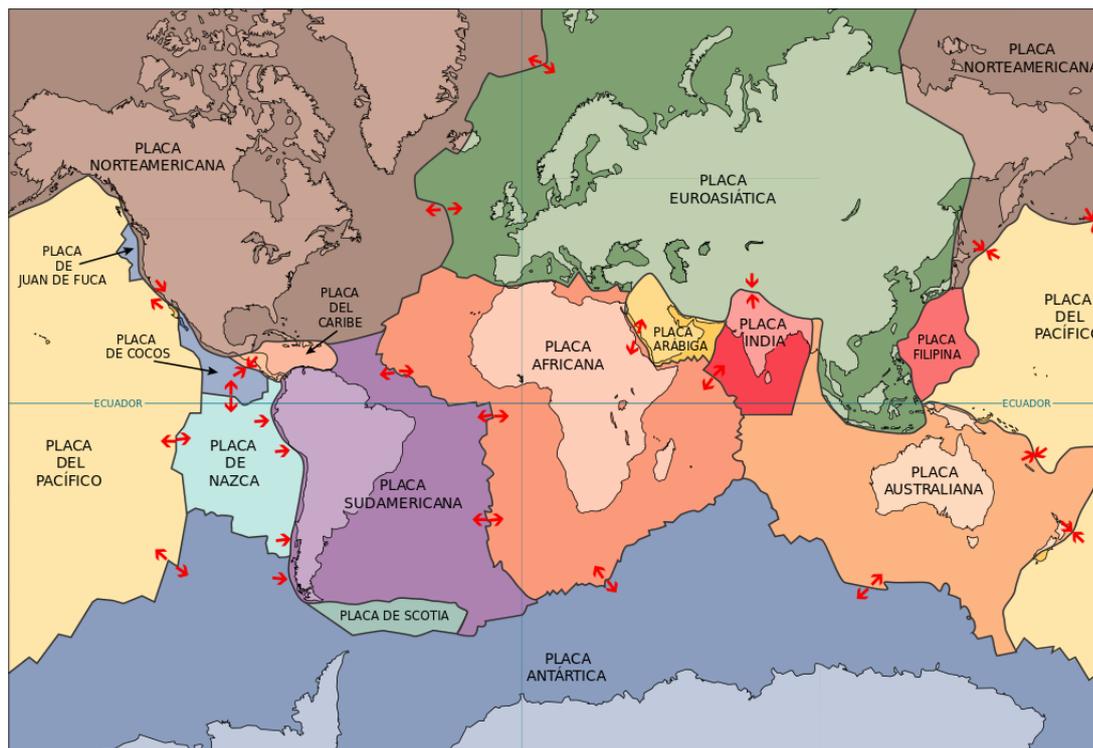
Hacer tanto hincapié en las capas que conforman al planeta, abren la puerta para estudiar a las placas tectónicas, las cuales en resumen son cúmulos de rocas de tamaño continental que reposan una sobre otra. Estas placas se formaron hace millones de años al separarse los elementos que conforman a la tierra, dejando a los minerales más ligeros en la superficie y los más pesados en el núcleo. Estas placas forman la denominada “litósfera”, que abarca a la corteza terrestre y más aún hasta los 130 km de profundidad [30]. La temperatura en el fondo de la litósfera es la clave para diferenciar a la siguiente capa que se encuentra en el manto terrestre, llamada “astenosfera”, la cual contiene rocas en un estado blando, pues la temperatura promedio de esta zona es de 1,200°C, lo cual provoca este curioso efecto en las rocas. Es importante para este estudio saber diferenciar estas dos capas que se encuentran dentro del manto, pues en él se encuentra la mayor actividad sísmica registrada.



**Figura 2.9:** Sobre estos inmensos pilares reposa la estructura que ha perforado el agujero más profundo en la tierra registrado por la humanidad hasta la fecha.

## 2. MARCO TEÓRICO

Las placas tectónicas lucen como un gran rompecabezas que embonan perfectamente una con otra para formar al planeta como lo conocemos, pero no es así. La manera en que visualmente se ha conceptualizado este fenómeno es parecido a la ilustración siguiente (ver Figura 2.10), pero no se debe pasar por alto que unas se encuentran sobre otras o en su defecto están colisionando con fuerzas contrarias y creando fricciones entre ellas.



**Figura 2.10:** Placas tectónicas, de las cuales México se rodea por cinco: Placa de Norteamérica, del Pacífico, de Cocos, del Caribe y la de Rivera

Si el choque de las placas tectónicas son las que producen terremotos, entonces ¿Qué es lo que las mantiene en movimiento?; como se describió en los párrafos anteriores, la energía en forma de calor en el núcleo provoca que las rocas más profundas se desprendan y generen un movimiento cíclico debido a las corrientes de convección en el manto, provocando que éstas floten hasta la litósfera, para que se enfríen y formen de nuevo parte de ella. Este proceso se ha repetido durante toda la vida de la Tierra, y es el mismo movimiento que provoca deslizamientos horizontales entre las placas y algunos otros verticales que avanzan a la misma velocidad promedio con que crecen las uñas [6].

Existen cuatro tipos de contactos entre placas que generan fascinantes fenómenos naturales:

- **Choque directo de placas ( $\Rightarrow\Leftarrow$ ):** Producen montañas y volcanes.

- **Contacto paralelo entre placas ( $\rightleftharpoons$ ):** También conocidas como fallas, estas originan sismos intensos que son menos comunes, un ejemplo famoso de este contacto es la “Falla de San Andrés”.
- **Separación de placas ( $\Leftarrow\Rightarrow$ ):** Generan la llamada “dorsal oceánica” o *rift* continental, dichas zonas se caracterizan por ser impactadas continuamente por material incandescente proveniente del manto, lo cual provoca la separación.
- **Zonas de subducción ( $\Rightarrow$ ):** Una región donde una placa se traslapa con otra debido al ciclo convectivo de las rocas y genera sismos frecuentes. Este conjunto de materiales vuelve hacia el manto para continuar con su ciclo, un claro ejemplo de este fenómeno es la placa de Cocos que se hunde por debajo de la placa de Norteamérica.

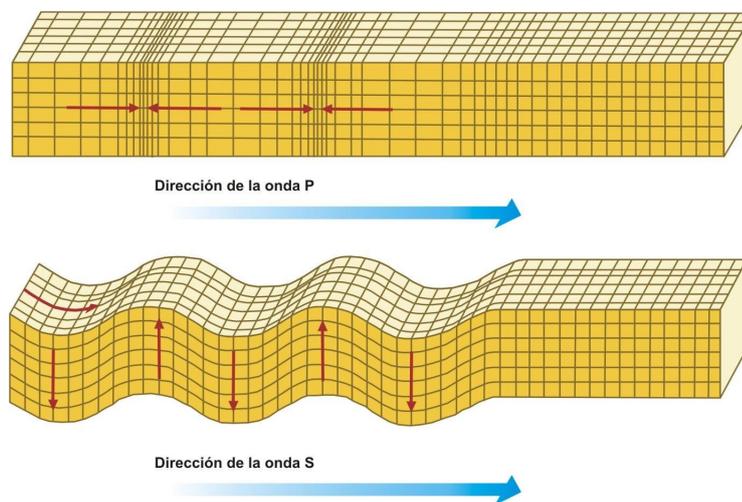
Puntualmente un sismo no es producto directo del movimiento de las placas tectónicas, sino que estos se producen a través de la ruptura de rocas que conforman estas placas continentales. Una manera fácil de visualizarlo es doblando una regla de plástico, que si bien es rígida, debido a grandes fuerzas contrarias o al estiramiento se puede romper; lo mismo sucede con las rocas, la fuerza es tan intensa que en algún momento deben ceder y estas generan los sismos o bien llamados terremotos a diferentes profundidades (no solo en la litósfera).

Para finalizar la parte sísmica de este estudio se abordarán los principales tipos de ondas sísmicas que se producen a partir de los terremotos, estas se dividen en dos y tienen diferentes propiedades cada una [6]:

- **Ondas P:** A pesar de que el suelo se percibe como un ente uniforme y sólido, a pequeña escala no lo es, principalmente porque tiende a tener cierta elasticidad (como se explicó en el capítulo 1, debido a los diferentes tipos de suelos) en la cual fácilmente se pueden propagar estas fuerzas. Las ondas “P”, también conocidas como ondas primarias, son fuerzas elásticas que se desplazan con gran velocidad pero a distancias cortas y en sentido longitudinal, es decir, comprimen y estiran la tierra.
- **Ondas S:** Ondas secundarias, tienen la propiedad de ser más lentas a comparación de las ondas P. Una vez que estas ondas llegan a la superficie de la corteza terrestre suelen ser las más destructivas y tienden a alcanzar mayores distancias.

### 2.3.2. Diferencia entre intensidad y magnitud

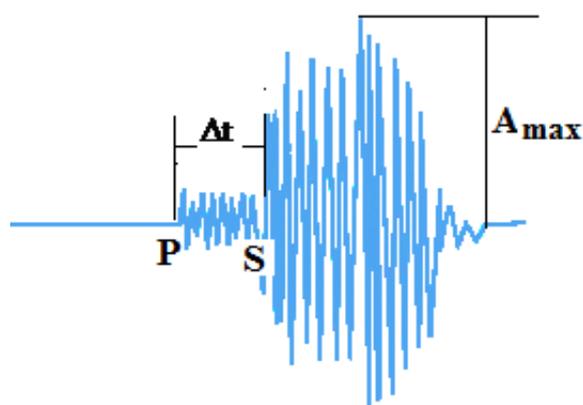
Comprendida la teoría sísmica, la tesis se aboca a explicar un elemento de diferenciación importante que a toda persona puede llegar a confundir, ya que la intensidad y la magnitud parecen ser sinónimos una palabra de otra, pero conceptualmente son diferentes. La principal diferencia es la escala con la que se miden estos fenómenos, la más popular es la escala Richter, que mide la **magnitud** de un sismo, esta escala fue



**Figura 2.11:** Principales ondas sísmicas.

implementada por el sismógrafo estadounidense Charles F. Richter en 1935, perfeccionada por H. Kanamori en 1977. Estas métricas están graduadas en grados Richter, y se utilizan para dimensionar el tamaño de un terremoto [22]. Richter logró identificar, en los sismógrafos de California, los comportamientos de las ondas P y S, y cómo hacían vibrar éstas a la tierra. Tras años de estudio definió su escala con los siguientes datos:

- I. Tiempo transcurrido entre la aparición de ondas P y ondas S ( $\Delta t$ ), medida en [s].
- II. La amplitud máxima de la onda S ( $A_{\max}$ ), medida en [mm].



**Figura 2.12:** Ejemplo de la gráfica de un sismógrafo, el cual registra la velocidad de un temblor.

Estos datos son aplicables a la siguiente fórmula (ver Fórmula 2.1) donde M representa la magnitud:

$$M = \log(A_{max}) + 3 \log(8\Delta t) - 2.92 \quad (2.1)$$

Debido a la naturaleza que compone esta fórmula, la escala Richter se considera una escala semilogarítmica, donde el valor de la magnitud del sismo no es lineal, es decir, un sismo de 8 grados es aproximadamente 32 veces más grande que uno de magnitud 7. Siguiendo esta lógica, uno de magnitud 5 es aproximadamente 32,000 veces menor que el de 8 grados (es decir  $32 \times 32 \times 32 = 32,768$  ).

La **intensidad** por su parte es cuantificada en la escala de Mercalli<sup>1</sup>, tabla desarrollada por el italiano Giuseppe Mercalli en el año de 1902 y refinada en 1931 por los sismólogos H. Wood y F. Neumann, que va de 0 hasta 12 grados donde se clasifican los daños de efectos observables por la sacudida de un terremoto [20].

### 2.3.3. Brecha de Guerrero

El territorio mexicano es un cúmulo de causas sísmicas debido a las placas tectónicas que lo conforman. Desde sus montañas hasta sus volcanes, por ejemplo, la sierra madre y el Popocatepetl. Estos extraordinarios paisajes naturales existen en esos puntos específicos gracias al movimiento continuo de la tierra. Hay otros tipos de causas por la tectónica de placas que no se pueden ver a simple vista, solamente son visibles gracias a los registros históricos creados por la ciencia, tal es el caso de la denominada “Brecha de Guerrero”. Una sección de 230 km de distancia sobre la costa de Guerrero [6], desde los poblados de Papanao y Copala (ver Figura 2.13), advierte una fuerza que se ha acumulado por décadas o incluso por centenas de años entre la placa de Cocos y la placa de Norteamérica. Los Registros históricos de la humanidad desconocen de la última vez que tembló entre Acapulco y Papanao, generando así una bomba de tiempo que no se sabe cuándo va a estallar. La fuerza o fricción que se ha acumulado en esa zona de subducción es desconocida, y el propósito de este tesis es preparar a la gente ante este gran sismo que debe ocurrir en algún momento. Puede ocurrir en cinco minutos o en mil años, hay que recordar que es imposible conocer la fecha exacta en que ocurrirá un sismo, pero con certeza se puede decir que históricamente la última vez que tembló cerca de esa zona fue el sismo de Petatán en 1979 con una magnitud de 7.6 en la escala Richter.

## 2.4. Recomendaciones de Protección Civil

Protección civil divide en tres pasos las recomendaciones para eventos sísmicos: Antes del sismo, durante el sismo y después del sismo. El primero es preventivo, el segundo son acciones que se deben aprender y practicar para sobre llevar una situación de emergencia y el tercero abarca temas posteriores a un siniestro.

---

<sup>1</sup>La escala completa se puede encontrar en la sección de apéndices (ver Apéndice A.1).



**Figura 2.13:** Brecha de Guerrero.

Según el manual de protección civil estos son los pasos más importantes a seguir para actuar antes de un sismo [8]:

- Acudir al centro de atención de Protección Civil más cercano en la localidad y conocer la vulnerabilidad sísmica del hogar, zona de trabajo o escuela, así como los riesgos que la rodean.
- Identificar salidas de emergencia, rutas de evacuación, zonas seguras e inseguras en el entorno.
- Ubicar llaves de gas, paso de agua, suministro eléctrico, entre otros.
- Detectar puntos de reunión y verificar que estos se encuentren fuera de peligro a su alrededor.
- Contar con un plan familiar para dentro y fuera de casa.
- Contar con un plan de acción para formar brigadas en zonas de trabajo o escolares.
- Preparar mochila de emergencia (El contenido de la misma será analizado con detenimiento en este estudio más adelante).
- Realizar ejercicios de simulacros sísmicos y evacuación en escuelas y oficinas.

Durante un sismo:

- Mantener la calma y ubicarse en zonas seguras dentro o fuera del inmueble si es el caso.

- De ser posible cerrar llaves de gas y cortar la corriente eléctrica del hogar, ya que son factores de riesgo por incendio.
- En lugares públicos seguir las indicaciones de brigadistas y evacuar en el momento que ellos indiquen.
- No correr, gritar o empujar durante un siniestro, ya que esto altera de sobre manera la reacción de las personas que estén cerca.
- Permanecer alejado de objetos inestables o peligrosos, como ventanas o muebles grandes.
- En caso de encontrarse en un segundo piso o más arriba es recomendable no evacuar y evitar el uso de escaleras o elevadores.
- En exteriores evitar postes de luz, árboles, marquesinas, vidrios, entre otros objetos que puedan colapsar.
- Como automovilista se debe frenar y aparcar el auto en un lugar seguro, evitando interferir en el paso de servicios de emergencia.

Después del sismo:

- Verificar si hay lesionados cerca y buscar o proporcionar ayuda médica, si se está capacitado.
- No usar elevadores y utilizar con cautela las escaleras, ya que éstas pudieron haber sufrido daños.
- No encender fuego o aparatos eléctricos hasta corroborar que no exista fuga de gas.
- Evacuar o regresar al inmueble solo con indicación de las autoridades.
- No inspeccionar por cuenta propia si el edificio se encuentra muy dañado, ya que puede colapsar con alguna réplica.
- No obstaculizar o entorpecer a las brigadas de ayuda si estas se encuentran trabajando con normalidad, sólo atender las indicaciones de protección civil.
- Permanecer al pendiente de la radio o medios informativos para recibir orientación y evitar rumores o noticias falsas.
- En caso de quedar atrapado es vital mantener la calma y tratar de establecer comunicación con el exterior golpeando con algún objeto sólido.

### 2.4.1. Nueva Ley de Edificación en la CDMX

Como lo fue el sismo del 85', el temblor del pasado 19 de septiembre de 2017 marcó una pauta en los reglamentos de construcción para la Ciudad de México. Actualmente, las leyes regulatorias para la construcción están denominadas como “Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal”, vigentes desde el 24 de enero de 2004 y publicadas en la Gaceta oficial del Distrito Federal ese mismo año. Este reglamento sufrió modificaciones a raíz del 19S, el 15 de diciembre de 2017, es decir, pasaron solamente tres meses para que el gobierno de la Ciudad de México impulsará nuevas normas técnicas para actualizar el reglamento de construcciones que llevaba doce años sin ser alterado (a excepción de ligeros cambios en 2016 [47]).

Antes de analizar los cambios que sufrió el reglamento de la CDMX, se sentarán las bases sobre reglamentos de construcción y la utilidad que brindan a la sociedad: Para diseñar un reglamento de construcción, los Ingenieros Civiles y Geomáticos deben calcular mediante métricas y técnicas especiales, la escala de vulnerabilidad sísmica por zona o por región para diseñar las bases más correctas en cuanto a construcción y asegurar la permanencia de las edificaciones, pero sobre todo para preservar vidas humanas [6]. En el caso de México, existe un reglamento especializado de construcción por cada estado de la república, conformando así un total de 32 tipos de reglamentos diferentes que se encuentran vigentes para cualquier edificación que se lleve a cabo en el territorio nacional [47].

En palabras de Manuel Atienza [6]:

*“... A pesar de que las normas de construcción actuales en la Ciudad de México y el resto del país deberían ser suficientes para garantizar la seguridad de todos, estudios muy recientes revelan algo preocupante. Por ejemplo, un estudio realizado por expertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM demuestra que, ante un sismo mayor, algunas de las construcciones erigidas en la CDMX a partir de 2004 podrían correr riesgos inaceptables, que a su vez podrían causar serias pérdidas económicas o, peor aún, la muerte de personas.”*

(Cruz Atienza, 2013.)

Dicho párrafo, hasta cierto punto profético, es una muestra de la certeza con la que se realizó el estudio por parte de la máxima casa de estudios, dando por hecho que las zonas más afectadas tras el sismo del 19 de septiembre de 2017 fueron las mismas que se se destacan en el estudio, dañando así la vida de miles de personas, matando a decenas y alterando la estabilidad de la ciudad de una manera radical.

Estas víctimas no fueron fruto, en su mayoría, por cuestiones civiles o una mala reglamentación en las normas actuales, sino que se deben a una incorrecta interpretación de las normas por parte de las grandes constructoras y el acelerado crecimiento en el que vive el valle de México, dando por resultado una inevitable corrupción de las entidades gubernamentales para otorgar permisos de construcción en zonas inestables e inseguras para el ciudadano mexicano.

Las actualizaciones al reglamento vigente de la Ciudad de México se llevaron a cabo por tres instituciones: Secretaría de Obras y Servicios (SOBSE), Secretaría de Desarrollo Urbano y de Vivienda (SEDUVI) y el Instituto de Seguridad de las Construcciones (ISC); las cuales coaligaron esfuerzos en investigación y tecnología en función de seguridad estructural y diseño arquitectónico para futuras construcciones, y con esto evitar pérdidas, tanto económicas como humanas.

Los ejes sobre los que trabajan las diez normas complementarias del reglamento de construcciones de la Ciudad de México son [63]:

1. Diseño y construcción de cimentaciones,
2. Estructuras de madera,
3. Estructuras de acero,
4. Estructuras de concreto,
5. Mampostería,
6. Diseño por sismo,
7. Diseño por viento,
8. Criterios y acciones.
9. Norma técnica complementaria de revisión y dictamen estructural de la seguridad estructural de las edificaciones.
10. Norma para la rehabilitación sísmica de edificios de concreto dañados por el sismo del 19 de septiembre 2017.

Estas dos últimas normas nacen a partir de la Ley para la Reconstrucción, Recuperación y Transformación de la Ciudad de México en una cada vez más resiliente [15]. Los ocho puntos principales abarcan la actualización de temas de gran interés para la Ingeniería Civil que no se habían actualizado desde 2004 en el antiguo reglamento de construcción.

### 2.4.2. Mochila de emergencia

Como lo menciona el actual director del CENAPRED, Dr. Carlos Miguel Valdés González en el audio podcast del Centro Nacional de Prevención y Desastres [13], no existe una lista única que objetos que deben contenerse en una mochila de emergencia, principalmente porque cada familia tiene necesidades diferentes y ante una eventualidad sísmica surgirán cuestiones diferentes variando de persona a persona. Por lo general se pueden hablar de cinco categorías diferentes de objetos que puede contener una mochila:

1. Documentación

## 2. MARCO TEÓRICO

---

- a) Documentos Importantes
  - b) Identificaciones oficiales
  - c) Escrituras del hogar
  - d) Directorio telefónico personal
  - e) Manuales de protección civil
2. Supervivencia para dos o tres días
- a) Agua embotellada
  - b) Comida enlatada
  - c) Botiquín de emergencia
  - d) Medicamentos para tratamientos
  - e) Alimento para mascotas (si aplica)
  - f) Papel higiénico
3. Dispositivos
- a) Linterna con baterías
  - b) Radio con baterías
  - c) USB con documentos digitalizados
4. Herramientas
- a) Navaja suiza
  - b) Silbato
5. Opcionales pero altamente recomendados
- a) Baterías nuevas
  - b) Muda de ropa térmica
  - c) Un juguete (cuando hay menores de edad)
  - d) Fotografías de familiares y mascotas
  - e) Cuerda

La lista puede seguir aumentando o disminuyendo según las necesidades de cada persona, y es importante crear esta mochila entre todos los integrantes de la familia para que estén enterados de qué elementos la conforman y puedan estar tranquilos con su contenido. Esta mochila debe permanecer en un lugar cercano a las zonas seguras dentro del inmueble o de camino en la ruta de emergencia. De preferencia es altamente recomendable colocarla a un lado de la puerta de salida sin obstruir la misma, para que sea de fácil acceso tomarla si es que se realizará una evacuación. Esta mochila debe tener el suficiente peso para evacuar de manera eficiente, es decir no debe tener un peso exagerado puesto que sería un obstáculo más en caso de correr un peligro real.

### 2.4.3. Identificación de zonas de mayor o menor riesgo

Las zonas de menor riesgo se dividen en dos principalmente:

- Internas al inmueble y
- Externas al inmueble

Depende del plan familiar si hay que evacuar o permanecer en el lugar. Un sismo dura en promedio 45 segundos [13], es decir, desde un piso elevado no tiene sentido evacuar en las escaleras si es que el sismo está ocurriendo en ese instante. En caso de que el tiempo de evacuación sea mayor a 45 segundos durante los ejercicios de simulacro, se recomienda permanecer en el inmueble y utilizar ese tiempo para cerrar llaves de gas y colocarse en una correcta posición dentro de una zona segura para esperar la sacudida con la mochila de emergencia.

Esta sección de la tesis omite zonas públicas o de entornos aglomerados, como lo son cines, teatros, auditorios, transporte público, estadios, bares, restaurantes, centros comerciales, hoteles, etc. Ya que cada uno de estos tiene sus propias medidas preventivas ante contingencias. Por tal motivo es ampliamente recomendable estudiar el lugar con la vista al llegar e identificar por lo menos las rutas o salidas de emergencia ante cualquier eventualidad, así como extintores y puntos de reunión.

Zonas de menor riesgo en el interior: Las zonas más seguras dentro de un inmueble se encuentran en umbrales de puertas, cerca de columnas, muros estructurales, o exteriores de ascensores (por sus marcos resistentes de acero), muebles sólidos lo suficientemente resistentes para permanecer inquebrantables ante un colapso estructural, es decir escritorios metálicos, sillones de una pieza, o mesas de materiales resistentes, alejados de ventanas o de cualquier otro objeto que pueda lastimar [49].

A estas zonas también se les conoce como triángulos de vida, que si bien es un concepto estadounidense que se ha tropicalizado a nuestro país, solo es funcional con muebles que puedan soportar el peso de losas de concreto, debido a que la mayoría de construcciones del país vecino son de madera y estas no presentan tanto peso como cualquier otra casa mexicana promedio. Así que el triángulo de vida es aún discutible por expertos de la seguridad civil en México, pero que sin duda en una situación de emergencia pueden ser la diferencia entre vida o muerte.

Normalmente estas son las señalizaciones que se encuentran en lugares de trabajo y/o centros educativos (ver Figura 2.14), que ayudan a identificar zonas de menor riesgo, ya que según el artículo 123 de la ley Federal del Trabajo, fracción XVI “... *consigna la obligación del patrón de instalar y operar las fábricas, talleres, oficinas, locales y demás lugares en que deban ejecutarse las labores, de acuerdo con las disposiciones establecidas en el reglamento y las normas oficiales mexicanas en materia de seguridad, salud y medio ambiente de trabajo, a efecto de prevenir accidentes y enfermedades laborales, así como de adoptar las medidas preventivas y correctivas que determine la autoridad laboral...*” [16], es decir que por ley deben existir estas señalizaciones que promuevan la seguridad civil de las personas que se encuentren dentro del inmueble.



**Figura 2.14:** Señalización utilizada para indicar una zona segura.

Por lo general en casas propias no se utilizan estas señalizaciones puesto que no son atractivas visualmente hablando, pero es importante tener bien identificado en casa las zonas antes mencionadas. La norma del CENAPRED “NOM-003-SEGOB-2011” define que para todos aquellos conjuntos habitacionales que alberguen más de 50 residentes, se deben colocar las señalizaciones correspondientes de protección civil que brinden apoyo visual a los habitantes de ese edificio en zonas comunes, como lo son: escaleras, patios y estacionamientos [9].

La siguiente tabla (ver Tabla 2.2) clasifica las zonas de menor riesgo dentro de un inmueble, así como de las zonas de mayor riesgo, estos datos fueron asesorados por especialistas de protección civil en el departamento de Protección Civil UNAM. La tabla califica la zona con valores del 1 al 5, donde uno es el multiplicador más bajo dentro de cada zona y el 5 es la evaluación más alta por cada zona, es decir los extremos dentro de cada una. Como ejemplo, la zona más segura dentro de las zonas de menor riesgo tendrá calificación de 5, así mismo la zona más insegura dentro de las zonas de mayor riesgo tendrá esa misma calificación.

Zonas de menor riesgo en el exterior:

1. Lugares abiertos
2. Camellones de avenidas
3. Banquetas despejadas(sin postes, cables o árboles)
4. Vías de tren
5. Alejado de cornisas o edificios que se balanceen demasiado

Zona	Puntaje de seguridad
Punto de reunión	5
Baño	4
Marco de puerta	3
Cuarto de lavado	2
Debajo de mesa	1
Zona neutra <sup>1</sup>	0
Muebles inestables	1
Cerca de ventanas	2
Paredes agrietadas	3
Escaleras comunes	4
Debajo de edificio	5

**Tabla 2.2:** Calificación en zonas de mayor y menor riesgo.

## 2.5. Diseño estructural de un edificio ante un sismo

El libro de Meli Piralla “Diseño estructural”, dedica un capítulo entero al tema de diseños sismorresistentes para edificaciones comunes, desde su estructura hasta las normas comunes con las que se debe edificar en zonas sísmicas, promoviendo que éstas sean capaces de absorber los efectos de un sismo y evitar fallas estructurales.

En este apartado se revela la importancia de la ductilidad de los materiales estructurales para reaccionar elásticamente ante un sismo sin que estos lleguen a su límite y que sufran daños severos, ya que el costo que implica esto, en estructuras que permitan ciertas deformaciones es elevado. Por esto, el diseño sísmico implica cuatro puntos principales que serán resumidos a continuación [39].

1. Definición de la acción de diseño: Todo reglamento oficial basado en normas técnicas civiles, debe indicar la intensidad sísmica que debe usarse en el diseño estructural para cada región. Aunque este dato se contenga en el reglamento es importante realizar estudios topográficos, geológicos y de mecánica de suelos para determinar la intensidad del sismo de diseño.
2. Elección de una estructura adecuada: El esquema estructural tiene entre sus principales bondades el bosquejar las acciones que lo puedan afectar, en caso de los

<sup>1</sup>Son todas aquellas zonas que tienen un porcentaje de incertidumbre del 50 % ante sismos.

## 2. MARCO TEÓRICO

---

sismos es fundamental contar con un esquema de este estilo, pues devela los efectos colaterales que puede sufrir una estructura y otra. De esta manera se puede mejorar la estructura para reducir las acciones que inducen un sismo en la construcción.

3. Cálculos de respuesta estructural: Sin profundizar en detalles matemáticos, los análisis sísmicos se pueden realizar desde la consideración de los efectos estructurales de una serie de fuerzas estáticas, hasta el análisis dinámico ante fuerzas y movimientos de la base de la estructura que experimenta durante un sismo.
4. Dimensionamiento y detallado de la estructura: Este último punto dentro del diseño estructural sismorresistente hace referencia a los detalles entre elementos estructurales y los no estructurales, tal es el caso de la mampostería con columnas o trabes. Esto con la finalidad de evitar el mayor número de fallas ante un sismo de gran magnitud en las diversas secciones que componen una estructura.

### 2.5.1. Daños generales

Segun el artículo publicado por la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural [25], existen tres diferentes tipos de daños que puede sufrir un inmueble ante un sismo, estos son:

- A. Daños estructurales,
- B. Daños No estructurales,
- C. Daños Geotécnicos.

Los daños del inciso A, son aquellos que se muestran en los elementos estructurales el inmueble y que impactan directamente en la estabilidad del mismo para permanecer de pie, la siguiente tabla (ver Tabla ??) muestra los elementos más comunes en estructuras y los daños que pueden causar los sismos en ellos.

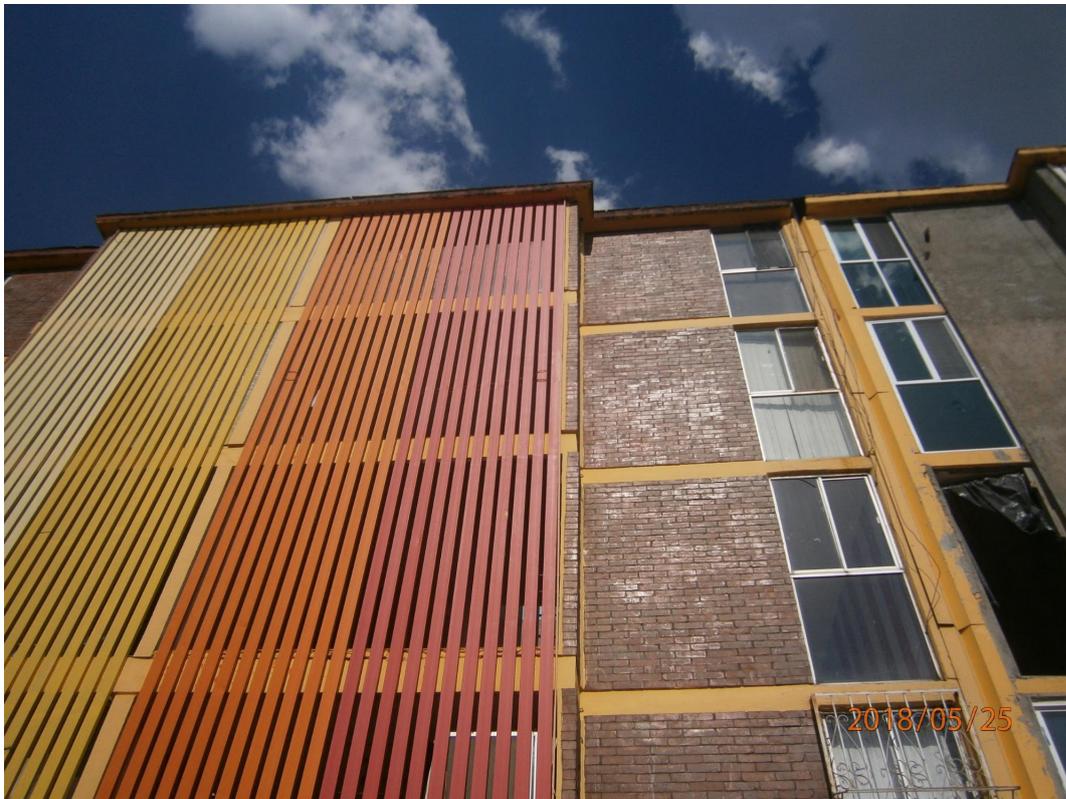
Los daños No estructurales del inciso B representan la mayor pérdida económica durante los sismos, pues simbolizan el mayor costo en materiales o elementos que se puedan perder. Cabe resaltar que estos daños no se apegan al inmueble como tal, sino pueden ser elementos añadidos al mismo, como maquinaria, tubería, cables, etc.

*“...Existe una gran variedad de elementos entre los considerados como no estructurales que son de gran importancia como fachadas, muros divisorios, puertas, ventanas, mobiliario, instalaciones, tanques, apéndices (elevadores, escaleras), etc.” [35]*

Por último, los daños geotécnicos se describen como los movimientos que presenta el suelo de la zona debido al material que lo conforma. De este modo, visualmente se notan como asentamientos o emersiones del concreto con respecto a su posición original, incluso como desplazamientos laterales. El estudio de estos daños debe ser especialmente atendido por ingenieros geotécnicos que se enfoquen en el comportamiento del suelo y verifiquen si el inmueble presenta algún tipo de hundimiento.

Elemento estructural	Tipos de daño
<b>Columnas</b>	Grietas diagonales Grietas verticales Desprendimiento de recubrimiento Aplastamiento del concreto y pandeo de barras
<b>Vigas</b>	Grietas diagonales Rotura de estribos Grietas verticales Rotura del refuerzo Aplastamiento del concreto
<b>Viga-Columna</b>	Grietas diagonales Falla por adherencia del esfuerzo de vigas
<b>Piso</b>	Grieta alrededor de columnas en losas o placas planas Grietas longitudinales
<b>Muros de concreto</b>	Grietas diagonales Grietas horizontales Aplastamiento del concreto y pandeo de barras
<b>Muros de mampostería</b>	Grietas diagonales Grietas verticales en las esquinas y centro Grietas como placa perimetralmente apoyada

**Tabla 2.3:** Elementos estructurales y sus principales daños ante sismos.



**Figura 2.15:** Fachada principal del edificio, Fotos por: Miguel Ángel Vargas Espinosa.

### 2.6. Caso de estudio: Rancho San Lorenzo 32

Este trabajo está basado en un caso real (ver Figura 2.15), se eligió a Rancho San Lorenzo 32 como el mejor escenario para lo que se pretende enseñar en la aplicación, sin llegar a los extremos de un colapso o derrumbe.

La unidad habitacional Girasoles III se compone de 36 cuerpos inmobiliarios unidos por 18 escaleras cada par. Varios de estos edificios fueron dañados durante el sismo del 19S, unos con mayor gravedad que otros. En general la tesis se enfoca en el edificio marcado con el número 32 sobre la calle San Lorenzo, en Coyoacán, CDMX. Este es un edificio de cinco niveles y azotea; construido principalmente por muros de mampostería y erigido hacia el año de 1983 [35], es decir, este edificio ha sobrevivido de pie desde el sismo de 1985, hasta los sismos intensos de 2017, en una zona transición altamente sísmica por el suelo compuesto de roca lacustre (ver Apéndice A.2) [45] que amplifica las ondas sísmicas que llegan a la capital (ver Figura 2.16).

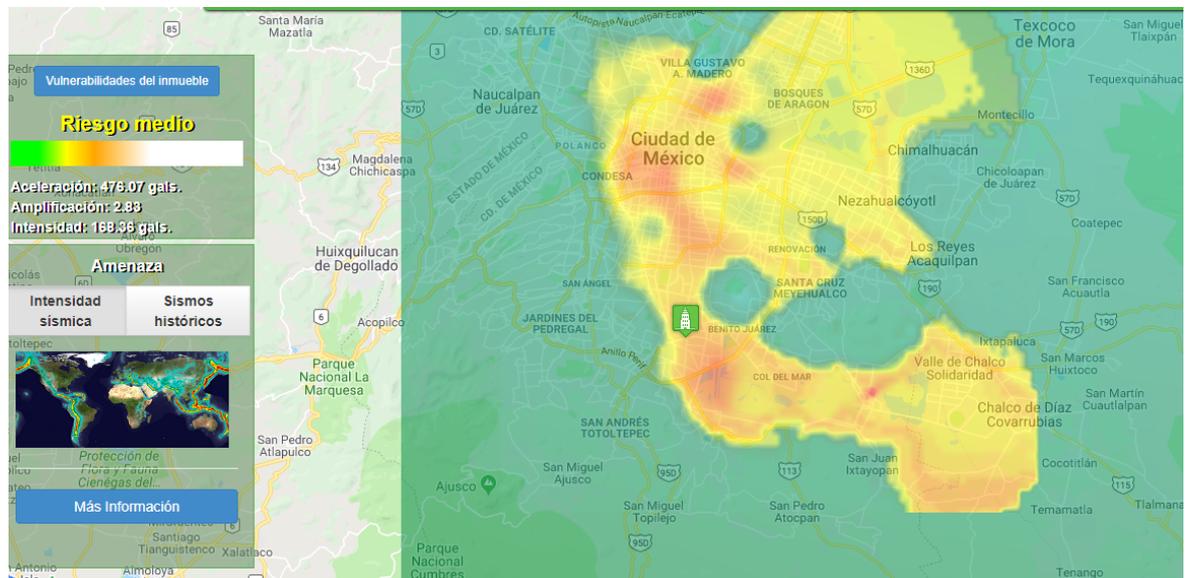


Figura 2.16: Imagen creada gracias a la plataforma del ERN [14].

Los **daños estructurales** en Rancho San Lorenzo 32 fueron validados con el Dr. Mauro Niño Pompeyo del departamento de Estructuras en la División de Ingenierías Civil y Geomática, que revelan los resultados siguientes:



Figura 2.17: Daño en nervadura principal del sistema de piso.



**Figura 2.18:** Daño en muro de mampostería, fisura diagonal por fuerza cortante.



**Figura 2.19:** Daño grado II [25] en ciertas columnas de planta baja del edificio.

## 2. MARCO TEÓRICO

---

Dentro de los daños a elementos **no estructurales** en el edificio de Girasoles III se encuentran:



**Figura 2.20:** Azulejo desprendido por fisura diagonal por fuerza cortante en el baño del departamento.



**Figura 2.21:** Desprendimiento de yeso, pintura y recubrimiento de los muros.

## 2. MARCO TEÓRICO

---



**Figura 2.22:** Tubería dañada.

No se encontraron **daños geotécnicos** en el edificio ni en sus alrededores.

## Diseño del proyecto

---

### 3.1. Metodología de trabajo

La metodología de trabajo utilizada fue una combinación de dos tipos:

1. Cascada: Esta metodología consiste en la división de tareas por etapas, de manera secuencial y detenida, es decir, cada tarea no se empezará si no se termina la anterior primero.
2. Scrum: Los proyectos en Scrum se dividen en *Sprints*, con una duración definida, en donde se realiza la identificación de objetivos, el desarrollo *perse* y retrospectiva de los resultados, de forma iterativa hasta concluir con un producto válido.

La forma de trabajo utilizada en la tesis se basa en la secuencialidad de tareas, realizando de forma ordenada los objetivos planteados para el periodo de tiempo. Sin embargo, la metodología de cascada es ciertamente inflexible en lo referente a los cambios llevados a cabo durante el desarrollo, por lo que una combinación con la forma iterativa de Scrum fue implementado, permitiendo así poder alterar según las necesidades y problemáticas que se pudieran presentar. Además de incluir la revisión de los resultados al término del periodo establecido, obteniendo una retroalimentación y de esta manera tomar las decisiones acorde a las prioridades. La primer fase de desarrollo se enfoca en preparar las herramientas de trabajo, la creación de un *GameObject* que represente al usuario y le permita moverse y observar el escenario virtual. La segunda fase implica la creación del modelado de las físicas y desarrollar el sistema que simula un sismo, los efectos de destrucción visual al inmueble y el sistema de audio. En la siguiente fase se modela el escenario 3D, utilizando las herramientas que se mencionan en el capítulo 4. Se crea el guión, es decir, lo que el usuario realiza durante toda la simulación y se desarrolla la interfaz gráfica. Con lo anterior, la cuarta fase se enfoca en la protección civil, colocar los objetos de la mochila de emergencia, zonas de mayor y menor riesgo, indicaciones de evacuación y programar las interacciones del usuario con el ambiente. Por último, se realiza el sistema de puntaje y retroalimentación que recolecta datos de todas las escenas para finalmente mostrar el resultado al usuario.

### 3. DISEÑO DEL PROYECTO

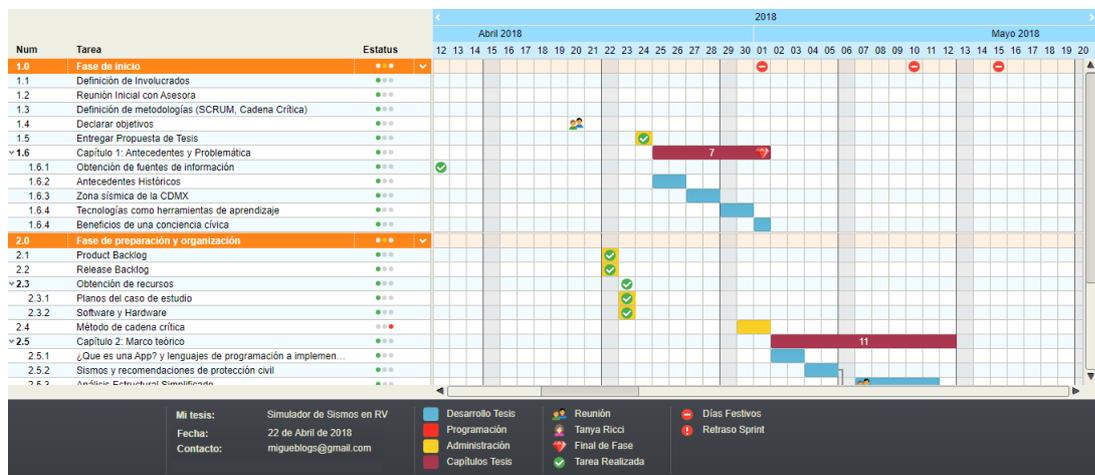


Figura 3.1: Captura de pantalla del diagrama de *Gantt* implementado en esta tesis.

### 3.2. SDK Google CardBoard

La parte de realidad virtual en esta tesis es realizada a través del *SDK Google CardBoard*, que permite la visualización correcta en los dispositivos móviles. El *CardBoard* de Google ofrece una plataforma para realidad virtual que es fácil, flexible y barata. Tiene soporte para los dispositivos Android y iOS. Utiliza los sensores del teléfono (giroscopio y acelerómetro) para crear un seguimiento de la cabeza en el mundo real al virtual [17]. Su accesibilidad es gracias al visor utilizado, pues es ligero, barato y fácil de usar. Sin embargo, existen visores de terceros que son compatibles con éste SDK, permitiendo una gran flexibilidad a la hora de escoger el visor de tu/su preferencia. Este SDK incluye un *UnityPackage* con los elementos necesarios para su funcionamiento dentro de Unity, además de escenas ejemplo y *prefabs* que el desarrollador puede usar como base para sus proyectos

Un SDK (*Software Development Kit*) se entiende como un conjunto de herramientas que se han creado para desarrollar aplicaciones de manera eficiente, ofreciendo flexibilidad y facilidad de uso. Estas herramientas (*API, IDE, Framework, etc.*) pueden ser varias y no necesariamente todos los SDKs contienen las mismas.



**Figura 3.2:** Visores de Google *CardBoard*.

### 3.3. *Front-End*

En esta sección se habla sobre conceptos técnicos que fueron utilizados para la creación del ambiente virtual, y más en concreto, su funcionamiento dentro del *software* de Unity 3D. Es importante mencionar que estos conceptos son específicos de la versión utilizada para el proyecto (que se describe en el capítulo 4), por lo que podrían cambiar en versiones futuras.

#### 3.3.1. Cámara

La cámara es un componente agregado a un *GameObject* que captura y muestra la información del mundo virtual hacia el usuario en la escena que define lo que se ve. Su posición define el punto de vista, su eje Z (“*forward*”) y su eje Y (“*up*”) definen la dirección de la vista. También es necesario señalar el tamaño y la forma de la región de vista. Con estos parámetros es posible mostrar en pantalla lo que actualmente es visible en la escena, y según los objetos se muevan o roten, la información a mostrar se actualizará como corresponda [53].

Se tiene la ventaja de que es posible personalizar los parámetros de la cámara, así como manipularlas a través de código, y con esto poder lograr cualquier efecto que se pretenda. Para el caso de una cámara de primera persona (típica en un “*First Person Shooter*”), la cámara se coloca a la altura de los ojos del personaje virtual, como es el caso de la cámara en esta tesis, siguiendo al personaje y mostrando en pantalla lo que

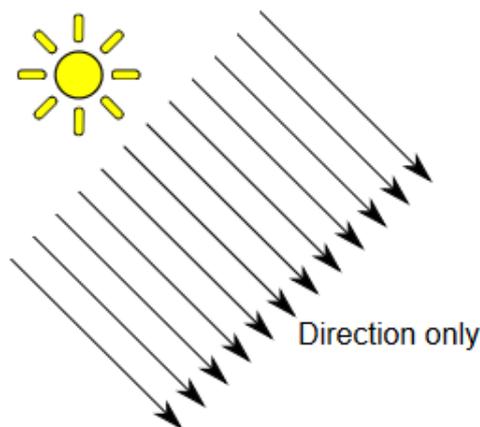
el usuario puede ver de acuerdo a su posición y rotación dentro de la escena.

#### 3.3.2. Luz

La iluminación es un elemento importante dentro de la escena, pues le permite dar una ambientación adecuada según las necesidades de cada proyecto, desde una iluminación más simple para algún estilo *cartoon*, hasta una ambientación lo más realista posible como son los juegos de última generación. A continuación se habla de los tipos de luz que existen dentro de Unity y que fueron utilizados dentro de la tesis.

##### **Luz direccional (*Directional Light*)**

Se puede hacer la analogía con la iluminación proveniente del Sol cuando hablamos de una luz direccional. Se puede pensar que su luz viene del infinito, y sus rayos son paralelos entre sí, lo que quiere decir que no se desvían y las sombras generadas tienen la misma forma, así mismo, los rayos no disminuyen con respecto a la distancia y afectan a todas las superficies en la escena [51].

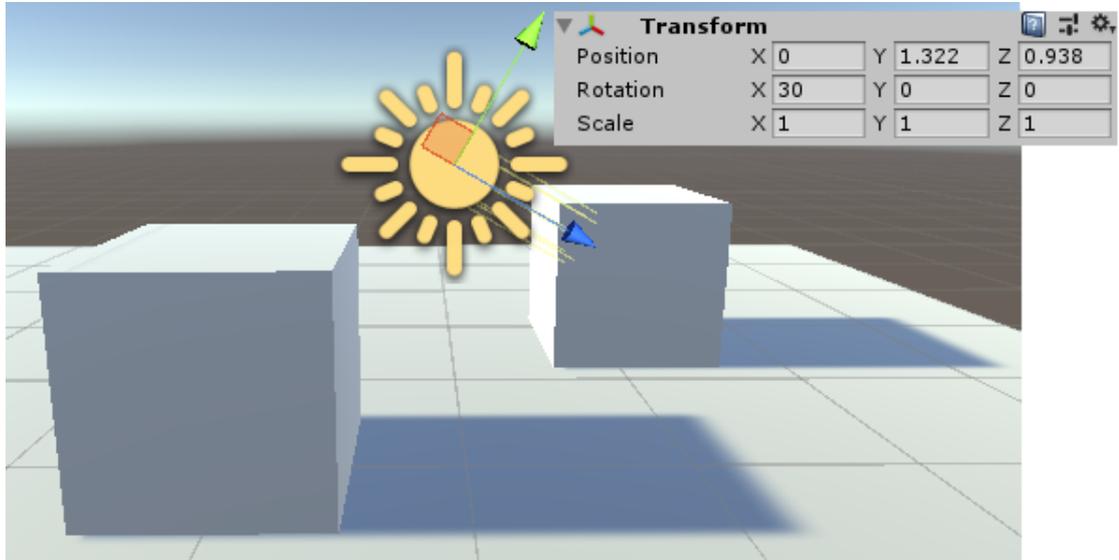


**Figura 3.3:** Dirección de los rayos de la luz direccional.

La posición de la fuente de luz no afecta en nada al efecto de la iluminación, pero rotarlo sí lo hace, esto es ideal para crear los efectos de un amanecer, un medio día, un atardecer o durante la noche, así que según la rotación que tenga la fuente de luz, será la iluminación sobre los objetos y su sombra creada <sup>1</sup>.

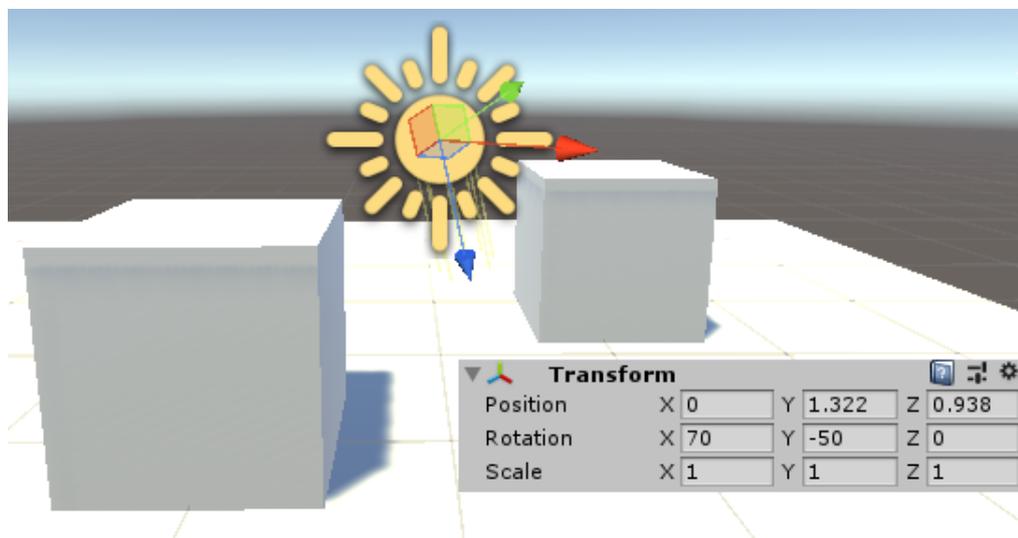
---

<sup>1</sup>Este tipo de luz es adecuada para la iluminación en exteriores.



**Figura 3.4:** Luz direccional con ángulo de  $30^\circ$  (en el eje X).

La luz direccional con un ligero ángulo (ver Figura 3.4), crea un efecto de iluminación similar a un amanecer. Se aprecia que a pesar de estar en medio de ambos cubos, las sombras proyectadas tienen la misma dirección.



**Figura 3.5:** Luz direccional con ángulo de  $70^\circ$  (eje X) y un ángulo de  $-50^\circ$  (eje Y).

La luz direccional con un ángulo diferente (Figura 3.5) con respecto a la Figura 3.4 afecta la sombra de los cubos que corresponden a la rotación de la fuente de luz. El efecto de iluminación logrado se asemeja a un medio día.

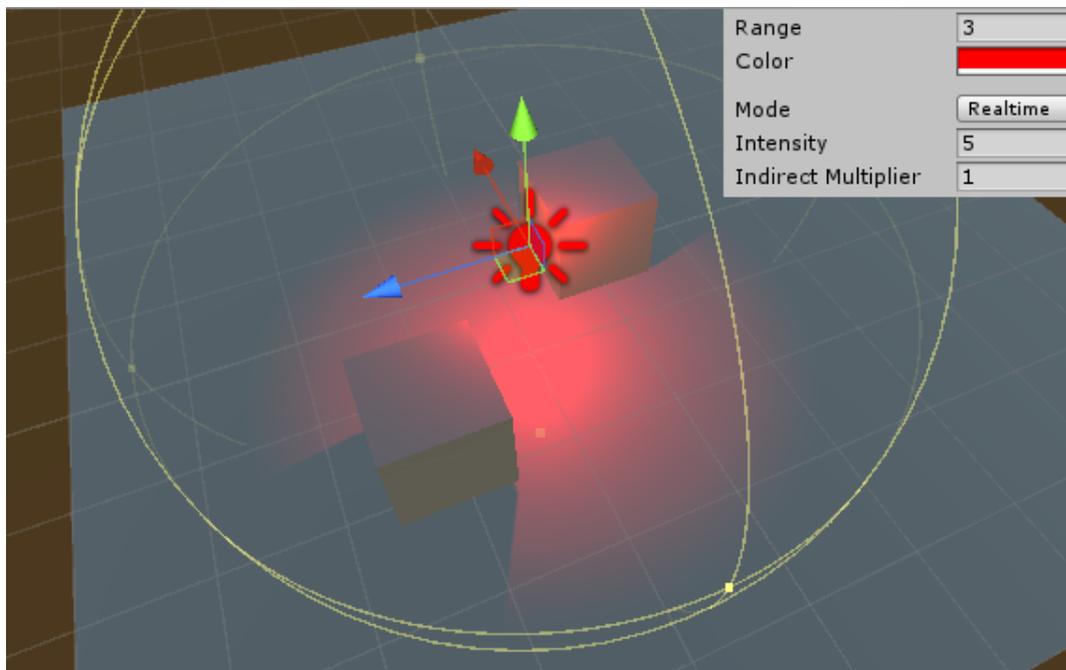


Figura 3.6: *Point light* entre dos cubos.

#### Luces puntuales (*Point Lights*)

Se puede pensar que una luz puntual es como una bombilla de luz típica, existe en un punto 3D preciso de la escena y a diferencia de la luz direccional, los rayos de luz emitidos viajan en todas direcciones y su intensidad decae cuadráticamente desde el centro (cuando vale el máximo) hasta el rango de alcance definido donde la intensidad llega a cero [51].

En la Figura 3.6 se observa un foco en medio de dos cubos, se aprecia que ambos se iluminan de acuerdo a la posición del foco, similar a como sería en la vida real. El rango de la luz está ilustrado por la esfera alrededor del ícono de una bombilla, con un radio igual al parámetro Range (mostrado en la esquina superior derecha), así como la intensidad, la cual entre mayor sea su valor, mayor será la cantidad de luz dentro de la esfera.

#### Foco (*Spotlight*)

El foco o *spotlight* es como una lámpara de mano o una lámpara de la calle. Básicamente es un cono de luz con dirección en el eje Z positivo (*forward*). Su alcance se define por el rango y el ancho de su ángulo de apertura tal y como se muestra en la Figura 3.7. Al igual que en la luz puntual, la intensidad decae conforme se aleja del centro además de presentar el mismo efecto en la orillas del cono, lo que se conoce como luz penumbra [51].

Se observa en la Figura 3.7 el cono de luz generado por el foco, en donde la altura del cono está dado por el rango, mientras que su ángulo de apertura lo define el parámetro

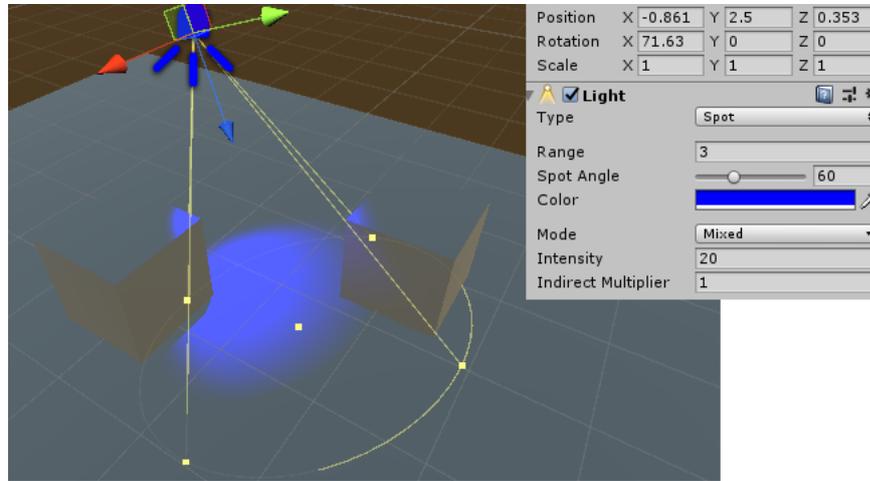
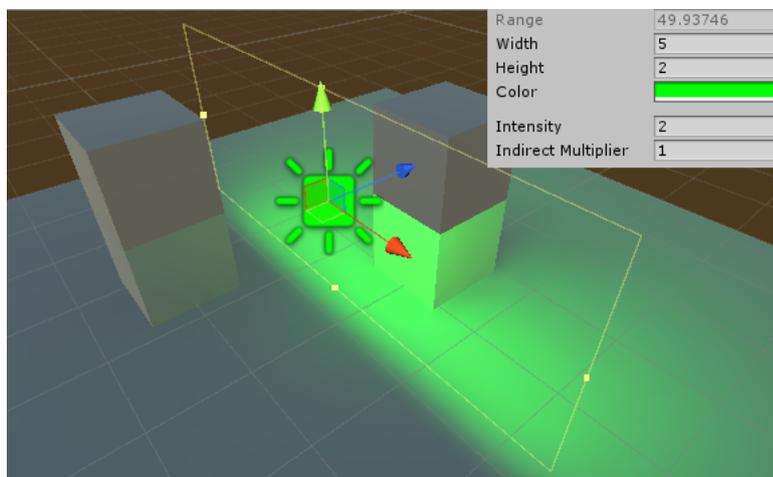


Figura 3.7: Luz tipo *Spotlight*.

“*Spot Angle*”. Solamente los objetos dentro del volumen son iluminados.

#### Luz de área (*Area Light*)

Las luces de área son rectángulos en la cual la luz es emitida en todas direcciones pero solamente desde el lado del eje positivo Z, iluminando de manera uniforme la superficie. Un uso típico sería para crear una luz de techo, su intensidad disminuye conforme al cuadrado inverso de la distancia recorrida. Sin embargo, este tipo de luz solo funciona para la iluminación precalculada (conocida como *Baked Global Illumination*), así que aquellos objetos que no se determinen como “estáticos (*Static*)” no serán afectados por esta fuente de luz, tal y como se aprecia en la Figura 3.8. Por otro lado, debido a que generan muchos rayos de luz en todas direcciones, esto puede tener un gran costo computacional al momento de calcular la luz, aunque crean un nivel alto de realismo, y este costo no tiene efecto negativo sobre la aplicación en tiempo de ejecución, ya que los cálculos se realizan antes [51].



**Figura 3.8:** Luz de área entre cuatro cubos.

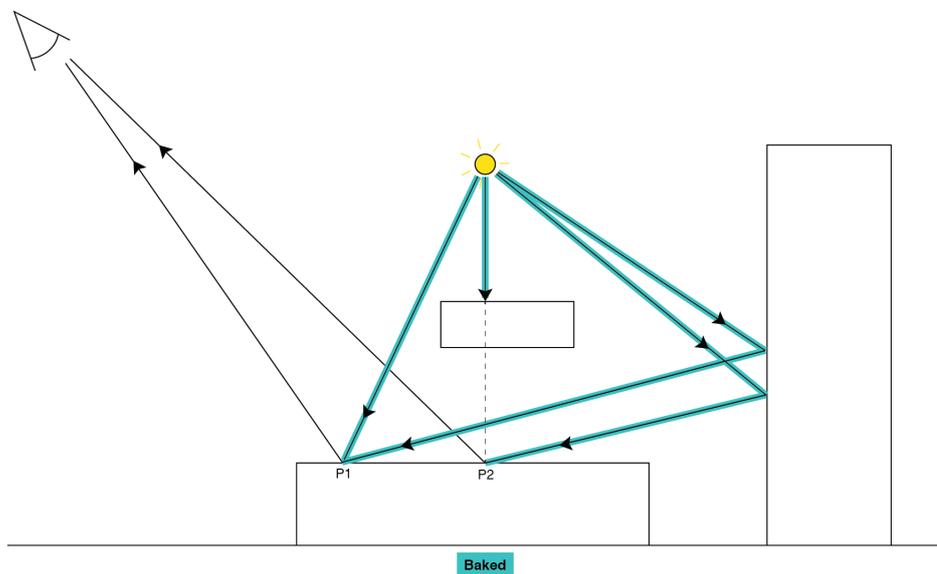
Se ve en la Figura 3.8 una luz de área donde el rectángulo se forma por el ancho (eje X) y la altura (eje Y), la luz solo afecta a los objetos estáticos que estén en dirección al eje Z positivo, aunque también a aquellos que estén detrás, debido a los rebotes de la luz.

#### **Iluminación en tiempo real**

En la iluminación en tiempo real, Unity hace el cálculo de la proyección de luz y las sombras que genera para todos los objetos con componentes de luz (Direccional, Foco, etc), los cuales están configurados para usar iluminación en tiempo real, y después actualiza los objetos iluminados, esto se realiza cada cuadro en tiempo de ejecución, por lo que responden a cada evento o acción durante la aplicación, por ejemplo: una luz que parpadea, o una lámpara de mano que se mueve con el usuario. Este tipo de iluminación afecta tanto a objetos estáticos como no estáticos, y se puede combinar con el uso de Iluminación Global en tiempo real o también conocida como *Realtime GI* para obtener unos mejores efectos de luz.

El uso de *Realtime GI* implica que además de la luz directa generada por la iluminación en tiempo real, se utilice iluminación indirecta. Sin embargo, el hacer uso de esta técnica, demanda muchos recursos del sistema, por lo que se recomienda no usarlo en efectos especiales o luces que cambian muy rápidamente, sino más bien en luces que tengan cambios más lentos, por ejemplo, el efecto de ciclo día-noche. Su uso está mayormente dirigido a dispositivos de gama media alta [55].





**Figura 3.10:** Iluminación precalculada.

Como se ve en la Figura 3.10, en la iluminación precalculada, se obtienen las proyecciones de los rayos de luz directos e indirectos (marcados en azul).

A continuación se presenta una tabla en la que, en términos generales, se puede resumir las diferencias entre la iluminación en tiempo real y la precalculada.

Tiempo real	Precalculada
Cálculos cada cuadro por segundo	Cálculos antes de la ejecución
Reduce el rendimiento	No tiene efecto negativo en el rendimiento
No hace uso de memoria extra	Requiere almacenar memoria extra
Afecta tanto objetos estáticos como no estáticos	Sólo afecta objetos estáticos

**Tabla 3.1:** Tabla comparativa de tipos de luz.

#### 3.3.3. Sonido

El sonido es parte fundamental para lograr una buena inmersión y experiencia del usuario en cualquier ambiente virtual, ya sea por efectos de sonido o música de fondo, un proyecto de ésta índole no estaría completo sin el audio correcto.

Así como en la vida real, los sonidos son emitidos por algún objeto y viajan a través del aire (u otro medio) hasta llegar a un receptor.

En Unity, para que un *GameObject* pueda emitir sonidos necesita que sea agregado un componente llamado “*Audio Source*”, el cual permite configurar parámetros con los cuales se emitirá el sonido. Estos parámetros pueden ser: rango de alcance, si el sonido es 2D o 3D, entre otros. Así como es necesario un componente para reproducir un sonido, es necesario otro componente que sea capaz de percibir el sonido, este es “*Audio Listener*” y por lo general siempre están junto a la cámara. Al *GameObject* que contiene este componente se le pueden agregar otros componentes que se encargan de generar efectos especiales al sonido recibido, como por ejemplo filtros de frecuencia o zonas de reverberación <sup>1</sup>.

Algunos otros efectos como el Efecto Doppler <sup>2</sup> se simulan automáticamente dentro de Unity, simplemente con la velocidad relativa de la fuente de sonido con respecto al escucha.

## 3.4. Back-End

### 3.4.1. C#

*C#* (*C-Sharp*) es un lenguaje de programación orientado a objetos (basado en clases, al igual que *Java*) que fue desarrollado por Microsoft para su propia plataforma .NET. Deriva de los lenguajes *C* y *C++*, así que cuenta con una sintaxis similar a éstos, y en comparación, tiene una curva de aprendizaje mejor lo que lo hace más fácil de usar si se está familiarizado con estos dos antecesores. Entre los varios compiladores que existen para el lenguaje, cuenta con Mono:

*“an open source implementation of Microsoft’s .NET Framework based on the ECMA standards for C# and the Common Language Runtime“ [42]* (Una implementación de código libre del *framework* .NET de *Microsoft*, basada en los estándares ECMA para *C#* y la Infraestructura de lenguaje común (CLI)).

Este compilador permite crear aplicaciones multiplataforma que además de ser código libre, hacen que sea una buena opción para los motores de juegos, y la razón por la cual Unity utiliza *C#* y Mono como principal lenguaje para los *scripts*.

---

<sup>1</sup>El efecto de reverberación es lo que se conoce típicamente como eco, en donde el sonido llega a un mismo escucha varias veces pero en diferente tiempo (generalmente en lugares cerrados) [31]

<sup>2</sup>”El efecto Doppler es el cambio en la frecuencia percibida de cualquier movimiento ondulatorio cuando el emisor, o foco de ondas, y el receptor, u observador, se desplazan uno respecto a otro” [24]

#### 3.4.2. Sistema de base de datos acelerográficos de la red sísmica mexicana

El Instituto de Ingeniería provee de una amplia base de datos de los sismos registrados en la república mexicana. Esta base fue de utilidad para obtener los registros del sismo para el caso de estudio.

La forma en que se cargan los datos a la *App* es la siguiente: Se cuenta con archivo de texto que contiene los datos del acelerómetro de la estación SCT B-2. Este se lee al inicio del programa y, a través de expresiones regulares se obtienen varios parámetros, como lo son la magnitud y la duración; también se consiguen los datos del acelerómetro para los tres ejes (N90E, V y N00E). Estos datos finalmente se guardan en memoria para su posterior uso.

Estos tres ejes están indicados por medio del sistema de rumbo, en el cual se crea una línea con un ángulo agudo desde un meridiano de referencia, generalmente el Norte o Sur geográficos. En este caso, el primer eje se lee: Partiendo del Meridiano Norte, se inclina 90° hacia el Este (sentido de las manecillas de reloj), entonces, la línea resultante apunta hacia el Este. El segundo eje es fácil de interpretar como un eje vertical mientras que el tercero apunta directamente al Norte. Si tomáramos de referencia un sistema de coordenadas cartesianas (X, Y, Z), para el cual el eje positivo X es el Este, Y positiva hacia arriba y Z positiva el Norte, entonces nuestros tres ejes N90E, V, N00E corresponden a cada uno de los ejes del sistema de coordenadas X, Y, Z.

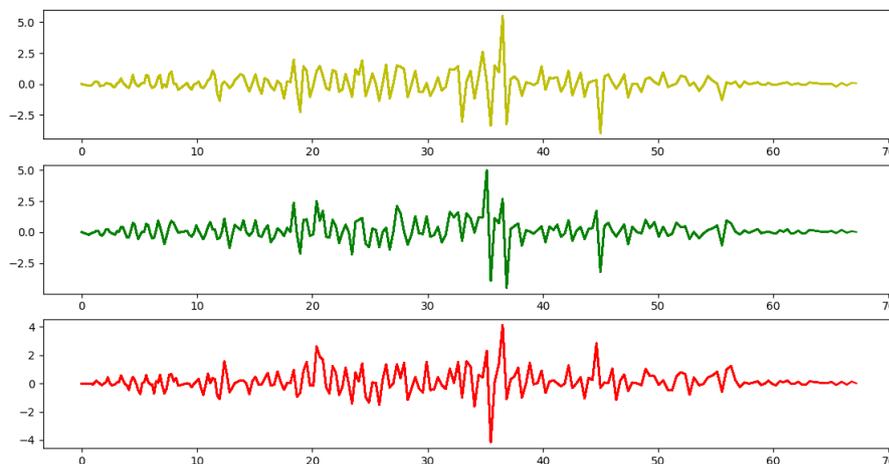
El portal web dónde fueron descargados los registros del acelerómetro resalta el siguiente fragmento:

*“...Los datos sísmicos proporcionados a través del Sistema de Base de Datos Acelerográficos en web (<http://aplicaciones.iingen.unam.mx/AcelerogramasRSM/>) han sido producto de las labores de instrumentación y procesamiento de la Unidad de Instrumentación Sísmica del Instituto de Ingeniería de la UNAM, así como de la infraestructura de TI del propio instituto...”*

#### 3.4.3. Sistema de físicas y modelado de ondas sísmicas

Unity provee de dos sistemas de físicas: Físicas 2D y Físicas 3D, que es el caso de este proyecto de tesis. Este sistema interno de Unity proporciona componentes que se encargan de la simulación de físicas, esto incluye colisiones, gravedad, entre otros. Todos los objetos con un componente *Rigidbody* serán afectados por el motor de físicas [54].

La manera en que los objetos con *Rigidbody* interactúan entre sí es por medio de *Colliders*, que definen el espacio físico que ocupan, y lo cual implica que diferentes objetos no podrán ocupar el mismo espacio, al mismo tiempo. Quiere decir que, estos objetos responden a ciertas acciones aplicadas al mismo, por ejemplo, una pelota que golpea una pared será detenida y rebotará hacia atrás.



**Figura 3.11:** Datos de la aceleración (cm/s<sup>2</sup>) generados en la aplicación para un sismo con una magnitud de 7.1 y con una duración de 60 segundos. Las gráficas corresponden a los ejes X, Y y Z respectivamente.

Los ejes X y Z dentro de Unity representan al movimiento de las ondas P (como fue explicado en el capítulo 2), y el eje Y al movimiento de la onda S. Estos ejes corresponden con los tres ejes vistos en el apartado anterior, de esta manera los datos leídos pertenecen a un eje en particular, lo que facilita la aplicación de la aceleración con el motor de físicas.

Durante el sismo, se muestrean los datos almacenados en intervalos de tiempo fijos (determinado por Unity), el dato seleccionado contiene la aceleración de cada eje, así que finalmente estos valores son aplicados directamente al componente *Rigidbody* del suelo en el escenario, los cuales a través del sistema de físicas de Unity, simulan un “empuje” en el eje correspondiente según el valor leído del archivo.

Sin embargo, si no se desea simular a través de un archivo, o si no se dispone de uno, se ha diseñado una forma de simular el movimiento de ambas ondas. Su funcionamiento, de manera simplificada, es la siguiente:

Basados en la campana de Gauss, con inicio y final respecto a la duración del sismo, se obtiene una amplitud basada en el tiempo actual y la magnitud del sismo. No obstante, esto sólo produciría valores positivos y de manera simétrica al llegar a la cresta, por lo tanto, se apoya de la función senoidal para poder generar picos positivos y negativos, todo esto, se realiza en intervalos aleatorios, de esta manera, no se crearía el mismo comportamiento.

## 3.5. Guión gráfico - Diagramas de escenas

A continuación se muestran unos diagramas que simplifican el flujo de eventos que suceden para cada escena, como son las acciones o tareas que el usuario tiene que realizar.

### ■ Escena 1

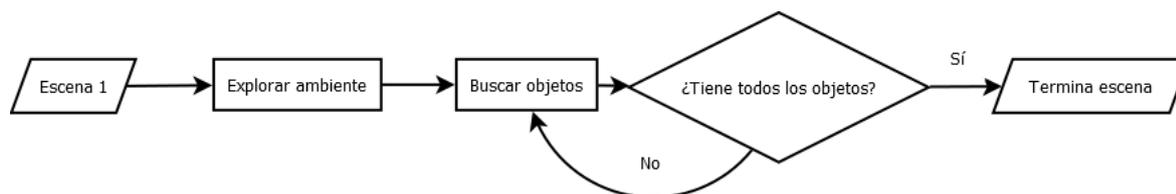


Figura 3.12: Diagrama de escena uno

### ■ Escena 2

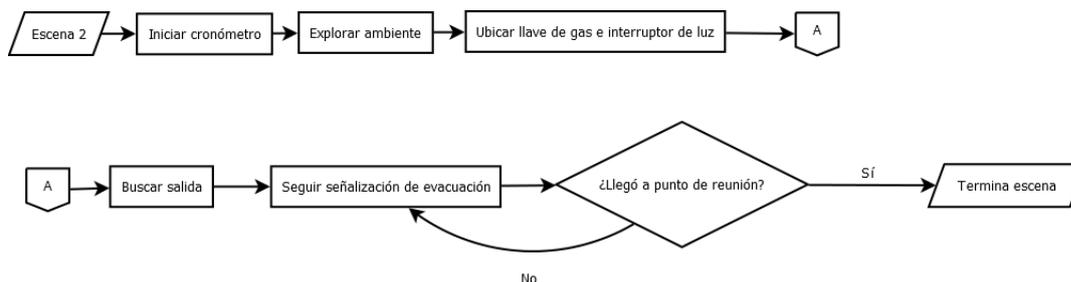


Figura 3.13: Diagrama de escena dos

### ■ Escena 3



Figura 3.14: Diagrama de escena tres

Para este escenario, las decisiones que el usuario puede tomar son: cerrar llave de gas, bajar el *switch* de caja de luz, agarrar la mochila. Estas acciones son opcionales, ya que el usuario no está obligado a realizarlas ni tampoco en algún orden específico o tiempo, pero es preferible que se ejecuten antes del sismo. Sin embargo, evacuar es una acción que se deberá realizar al finalizar el sismo, si es que no se evacuó antes. Otras de

las acciones que el usuario puede tomar durante el sismo es la decisión de moverse, o no, a alguna zona de menor riesgo o que se ubique dentro de una de mayor riesgo. Por último, la retroalimentación y obtención de resultados es mostrado al usuario cuando éste llegue al punto de reunión, ahí se despliegan comentarios acerca de las acciones realizadas (o no realizadas), así como una comparativa de los tiempos de evacuación y finalmente, un porcentaje de seguridad referente a todo lo recabado.



---

## Capítulo 4

# Implementación del proyecto

---

Así como se abordó en el capítulo 2 y 3, este segmento de la tesis pretende mostrar el desarrollo del proyecto al que está ligado esta investigación, y que propone un producto final que podrá ser utilizado para la experimentación que se verá en el apartado siguiente durante las pruebas y validación de la *App*.

Como se puede notar en los diagramas anteriores del capítulo 3, la aplicación se divide en tres escenas con sus respectivas instrucciones cada una.

**Primer escena:** Está orientada a que el usuario recorra, explore y reconozca un entorno que es totalmente desconocido para él, así como para que ubique las zonas seguras e inseguras dentro del mismo; todo esto recolectando los objetos que comprenden a la mochila de emergencia; este escenario y todos los de las siguientes escenas, comienzan en un departamento del tercer piso del edificio de Rancho San Lorenzo 32. Se eligió este nivel por ser la parte media del edificio ya que abre la duda a si permanecer o no en esa planta durante un sismo.

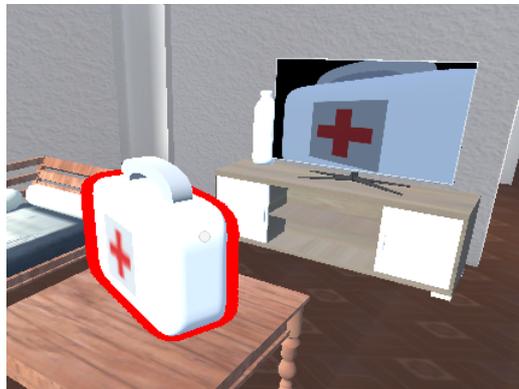
Los objetos de la mochila de emergencia son diferenciables en el entorno, ya que tienen una rotación continua y flotan sobre la superficie que se encuentren, además de cambiar de color al momento que el usuario voltea a ver directamente a los objetos.

La vista de la cámara principal cuenta con un punto fijo en el centro, para que sea más fácil para el usuario visualizar, centrar y enfocar el objeto al cual se desea dirigir. Estos objetos son recolectables presionando el botón “A” mientras el objeto cambia de color, eso desencadena la animación de una mano que colecta el objeto y lo desaparece de la escena simulando el cargarlo a la mochila.

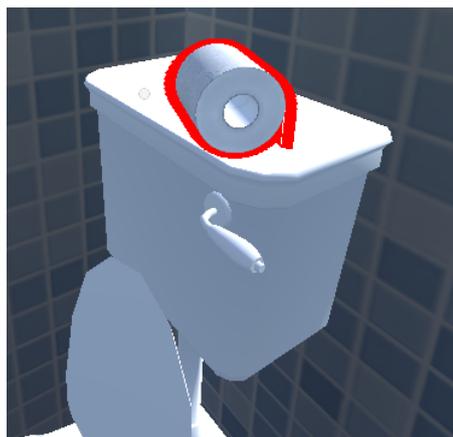
La guía de la recolección de objetos, será la pantalla de la televisión de la casa (ver Figura 4.1), la cual muestra continuamente los objetos recolectables en el escenario, de esta manera se le brinda un apoyo visual al usuario para que sea más fácil reconocer o saber que objetos buscar en la escena. El orden para recolectar los objetos no es necesario, y una vez que un objeto sea recolectado la TV mostrará el objeto siguiente hasta que se complete la lista. Los objetos a recolectar en la escena son:

#### 4. IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO

---



**Figura 4.1:** Botiquín de primeros auxilios y botella de agua (El botiquín se muestra en pantalla y la botella se encuentra a un costado de ella).



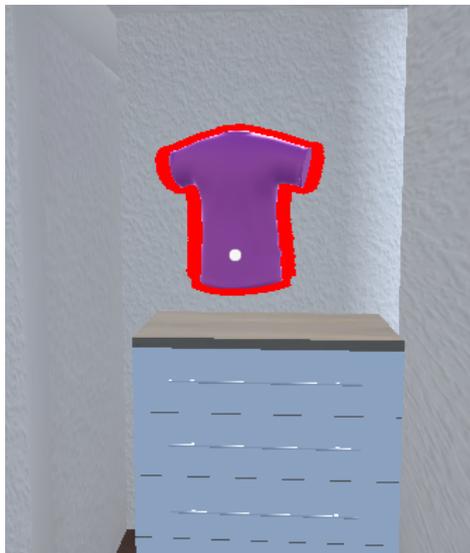
**Figura 4.2:** Papel higiénico.



**Figura 4.3:** Silbato.



**Figura 4.4:** Lámpara de mano y comida enlatada.



**Figura 4.5:** Muda de ropa.

#### 4. IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO

---



**Figura 4.6:** Documentos importantes (En esta imagen se muestra un ejemplo cuando el punto no está fijo sobre el objeto a recolectar pues no cambia su contorno de color.)

Cabe resaltar que el *SkyBox* de esta escena está configurado para que luzca como una mañana cualquiera en la Ciudad de México, el escenario cuenta con sus limitantes para que el personaje no caiga al vacío mientras éste explora el entorno. No se tiene tiempo límite para recolectar los objetos y eso permite una experiencia más flexible para reconocer el escenario y sus fronteras. Una vez completada la lista de elementos en la mochila de emergencia avanzará a la escena siguiente con un *fadeout* total.

**Segunda escena:** Su objetivo es cronometrar el tiempo en que el usuario evacúa desde el departamento, hasta el punto de encuentro en la zona más segura dentro del conjunto habitacional. Este cronómetro inicia al terminar de leer las instrucciones y avanzar con el botón "A". No existe límite de tiempo para este ejercicio, sin embargo, el objetivo de esta herramienta es mejorar los tiempos de evacuación, mientras el usuario se adapta al control y a los movimientos del simulador (ver Figura 4.7).



**Figura 4.7:** Cronómetro de evacuación.

Para llegar a la zona segura, existe una guía visual para el usuario durante toda la escena, esta se muestra como una serie de señalizaciones de rutas de evacuación, de esta manera, no se pierde de vista el objetivo principal en esta escena, que es reconocer las señalizaciones y respetar las reglas de protección civil durante un ejercicio de evacuación.

El *Skybox* <sup>1</sup> [61] para este ejercicio se colocó en un horario vespertino, con una puesta de sol intensa, esto con el fin de modificar un poco el entorno del ambiente para que no sea plano para el usuario y sea atractivo visualmente como experiencia del mismo.

El cronómetro se detendrá al posicionar al personaje sobre la marca verde del punto de reunión, ubicada en la planta baja frente al cuerpo principal del edificio, mostrando el resultado por unos segundos y saltando a la siguiente escena automáticamente <sup>2</sup>.

**Tercer escena:** En este punto, el usuario conoce el edificio por dentro y por fuera, es capaz de reconocer las zonas seguras e inseguras del inmueble y tiene en mente el tiempo que tarda en evacuar hasta una zona segura; de esta manera comienza la escena final de la simulación ubicando al personaje en la habitación principal del inmueble, con el sonido de la alerta sísmica de fondo, esto brinda al usuario segundos aleatorios (entre 20 y 40) para tomar las decisiones pertinentes: evacuar o permanecer, cortar el paso de gas o luz o ninguna, permanecer en una zona segura o insegura. Todo esto es ponderado en el cálculo de seguridad que se brinda al final de la escena. Después del sismo se recrea una pequeña fuga de gas en el departamento (que ocurriría posiblemente después de un sismo real si no se cerrara la llave de paso de gas), para lo cual debe evacuar y llegar

---

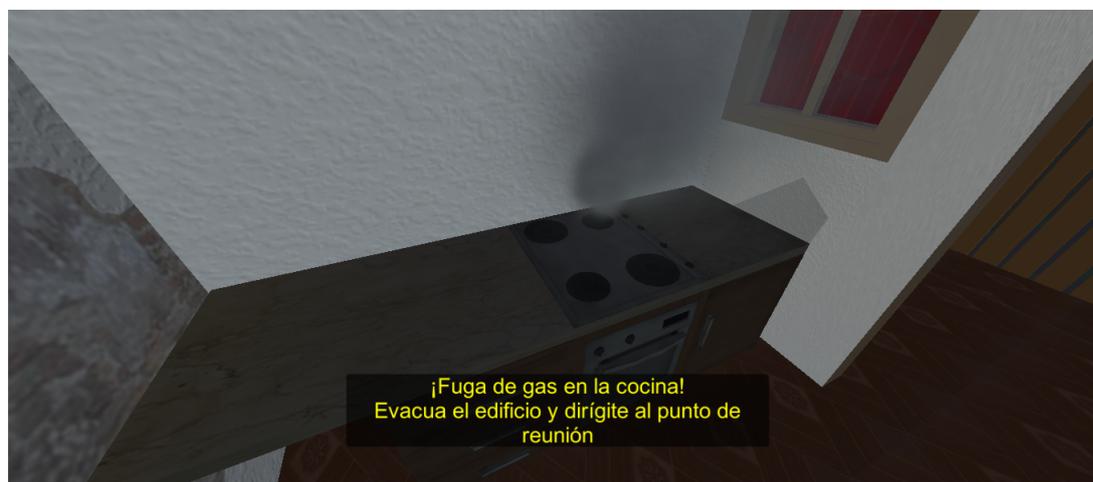
<sup>1</sup>Es un elemento de la escena que funciona como una envoltura alrededor de la misma para mostrar el mundo más allá de su geometría.

<sup>2</sup>Este resultado es almacenado y será ponderado en la calificación final del porcentaje de seguridad.

## 4. IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO

---

a una zona segura (ver Figura 4.8). Terminando la simulación se muestran resultados del porcentaje de seguridad obtenidos.



**Figura 4.8:** Fuga de gas en la cocina.

La fórmula para el cálculo de porcentaje de seguridad es la siguiente y se divide en dos secciones<sup>1</sup>:

### 1. Puntuación durante sismo mediante zonas de mayor o menor riesgo.

Como se vió en la Tabla 2.2, cada zona está evaluada con un número entero del 0 al 5, que será directamente multiplicado por el tiempo en el que el “*Player*” se encuentre parado en esa zona, como se muestra en la ecuación 4.1.

$$P_Z = \text{Puntuación en la zona actual} * \Delta T \quad (4.1)$$

Esta operación no contempla las zonas neutras, y divide de esta manera el tiempo en “tiempo útil” y “tiempo no útil”. El “tiempo útil”  $\Delta T$ , es aquel en el que el personaje se encuentra en una zona de mayor o menor riesgo durante el sismo, mientras que el tiempo “no útil” es todo aquel tiempo en el que el personaje permanece en la zona neutra, o zona de incertidumbre, región catalogada por no tener claridad si pertenece a una zona de mayor o menor riesgo. La puntuación total ( $P_T$ ) se obtiene como la suma de la puntuación en la zona de menor riesgo ( $P_m$ ) y la puntuación en la zona de mayor riesgo ( $P_M$ ), como se muestra a continuación:

---

<sup>1</sup>Esta fórmula es propuesta por los autores de esta tesis, es decir, este cálculo no se encuentra en la literatura de protección civil, puesto que dichas instituciones no cuentan con datos similares para calcular este porcentaje. Por tal motivo, se debe catalogar como una sugerencia y no debe considerarse como absoluta, ya que ésta puede variar dependiendo el escenario en el que se encuentre.

---


$$P_T = P_M + P_m \quad (4.2)$$

Con este dato ( $P_T$ ), el algoritmo procede a revisar los límites que se encuentran dentro de cada zona, tanto la de mayor riesgo como la de menor riesgo, y multiplica ese valor por el tiempo útil, solo para obtener un umbral del mejor o peor caso en el que el usuario pudo haber estado durante el tiempo de simulación, este valor se multiplica por dos para tener el umbral completo, mejor caso y peor caso <sup>1</sup>.

$$MitadEscala = ValorMax(\text{Puntuación de zonas}) * \Delta T \quad (4.3)$$

$$MaxEscala = ValorMax(\text{Puntuación de zonas}) * \Delta T * 2 \quad (4.4)$$

Si la puntuación de mayor riesgo ( $P_M$ ) es mayor que la puntuación de menor riesgo ( $P_m$ ) se obtiene un nuevo valor de puntuación final ( $P_F$ ) restando el resultado de MitadEscala con la puntuación total ( $P_T$ ), y de la misma manera operamos en el caso contrario pero con una suma, esto para verificar que suba mas o menos del 50% en su nivel de puntaje de seguridad.

$$Si(P_M > P_m) \quad (4.5)$$

Entonces:

$$P_F = MitadEscala - P_T \quad (4.6)$$

Caso contrario:

$$P_F = MitadEscala + P_T \quad (4.7)$$

A esto mediante regla de tres se obtiene un porcentaje que representa un valor de puntuación de seguridad y entra en juego la sección dos de la fórmula.

$$PorcentajeSeguridad = \%PS = \frac{P_F * 100}{MaxEscala} \quad (4.8)$$

Como se puede notar, es fácil obtener un 100% en porcentaje de seguridad si se permanece todo el tiempo del sismo en la zona más segura del inmueble, por tal motivo y para evitar confusiones, se han limitado los extremos dentro de los porcentajes, es decir no se puede obtener más de 95% o menos de 5% en la puntuación, esto con el fin de no asegurar con un cien por ciento que permanecer

---

<sup>1</sup>Este paso contempla toda la escala de zonas que ya está pre establecida, y no es únicamente con las zonas que interactuó el usuario.

## 4. IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO

---

en cierta área pone a salvo tu vida, sino simplemente tenerlo como un parámetro y dejar ese 5% como un umbral de incertidumbre en si realmente es el lugar más seguro o no, ya que en la vida real existen variantes que pueden modificar esta estimación de seguridad.

### 2. Evaluación de acciones dentro del departamento.

Las acciones son ponderadas como números enteros el 0 al 3, y están relacionadas directamente al dato *booleano* que se encuentra en el “*GameManager*”, es decir, realizar una acción como cerrar la llave de paso de gas es tomada en cuenta y cambia el valor de acciones de 0 a 1, así sucesivamente hasta completar todas las acciones en el mejor de los casos (las acciones que pueden elevar este número es cerrar la llave de paso de gas, cortar la corriente eléctrica y tomar la mochila de emergencia). Este dato ( $N_A$ ) es operado de la siguiente forma dependiendo del valor del porcentaje de seguridad <sup>1</sup>.

$$Si(\%PS \geq 50\%) \quad (4.9)$$

Entonces:

$$NPS = \frac{(4 - N_A) + \%PS}{5 - N_A} \quad (4.10)$$

Caso contrario:

$$NPS = \frac{4 - N_A}{(4 - N_A) + \%PS} \quad (4.11)$$

Finalmente:

$$\%PS = \%PS + (1 - NPS); \quad (4.12)$$

Cabe resaltar que si no se realizó ninguna acción, es decir, si  $N_A = 0$ , no entra en el algoritmo anterior y no realiza las operaciones correspondientes. Dicho algoritmo fue aplicado a todo el umbral de resultados posibles con cada una de las acciones y se obtuvo la siguiente gráfica (ver Figura 4.9), donde se puede notar el comportamiento del algoritmo aplicado en las cuestiones de mejora del porcentaje de seguridad si se toman en cuenta acciones dentro del hogar, independientemente si se evacúa o no, donde cada punto sube su porcentaje (incluso más en zonas medias) si se llevan a cabo las tres acciones correspondientes recomendadas por Protección Civil dentro del cualquier hogar ante un sismo. En el apéndice A.4 se detalla el código implementado para el sistema de porcentaje de seguridad.

---

<sup>1</sup>Para el cálculo de las ecuaciones 4.10, 4.11 y 4.12 %PS es usado en decimales y no en porcentaje.

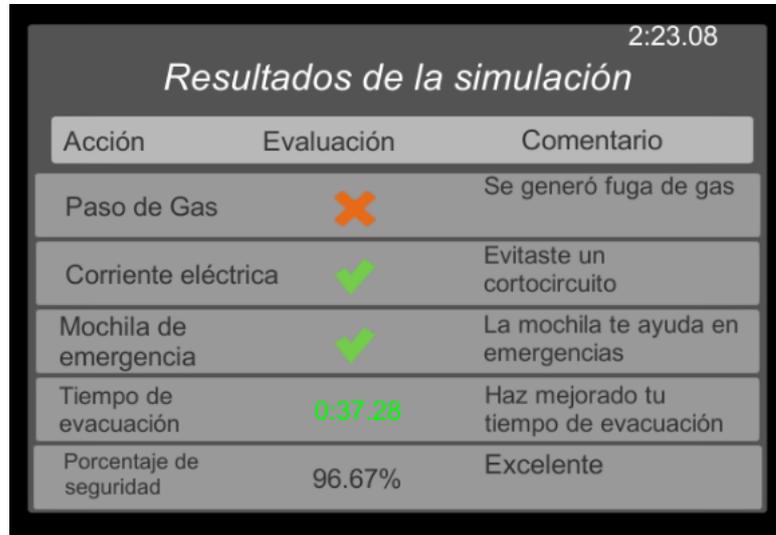


Figura 4.10: Resultados de la simulación.

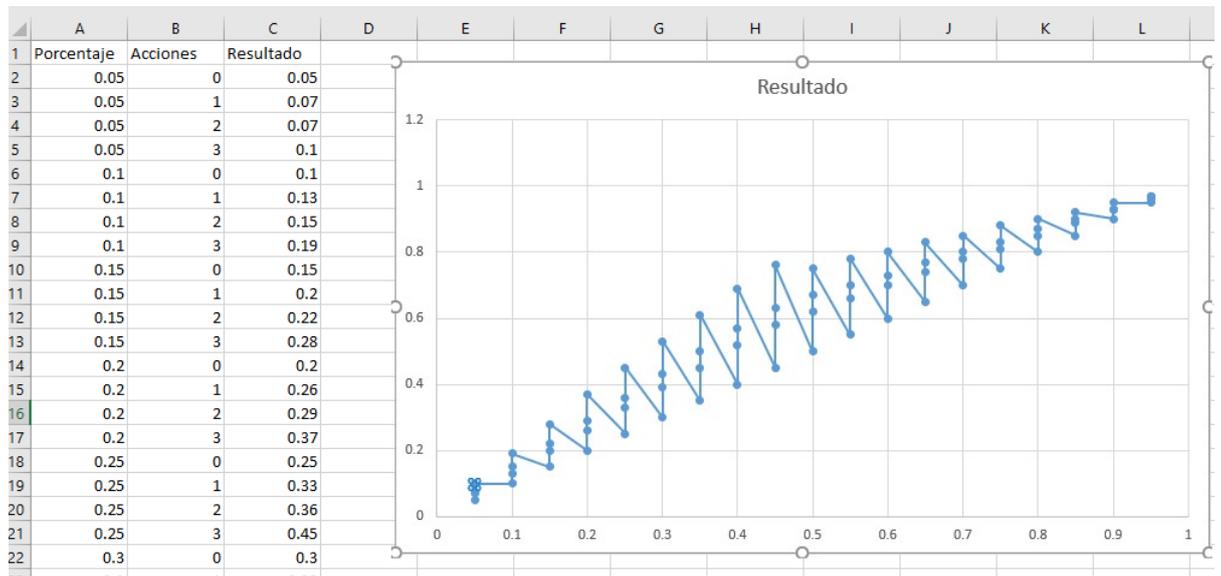


Figura 4.9: Resultados del algoritmo “acciones de protección civil”

Los resultados finales de la aplicación son los siguientes (ver Figura 4.10), donde destaca el tiempo de evacuación (si es que se decide evacuar del edificio) y un comentario si mejoró o empeoró según en comparación con el tiempo obtenido en la escena de “Ruta de evacuación”, y en la esquina superior derecha el tiempo total de uso de la aplicación.

Finalmente, en el siguiente código QR (ver Figura 4.11), muestra una grabación de la simulación final, donde se puede apreciar de manera visual y fluida lo descrito en los



**Figura 4.11:** Uso de Tepeyollotl en la versión de escritorio.

párrafos anteriores.

### 4.1. Herramientas

#### 4.1.1. Unity

Esta es la principal herramienta con la que se desarrollan videojuegos de la manera más rápida y simplificada hoy en día. *Unity* es un motor de juegos multiplataforma creada por *Unity Technologies* ® hacia el año de 2005, en Dinamarca [11]. *Unity* integra un conjunto de *middleware* impulsado por el motor de físicas de nVidia PhysX y un entorno de desarrollo versátil integrando documentación, una comunidad de desarrolladores, el entorno de utilidades drag-n-drop, con renderizado y físicas adicionales, una distribución multiplataforma y existe en versión gratuita para desarrolladores aprendices o empresas que generen ingresos menores a los 100,000 *USD* anuales con esta herramienta.

Este *software*, como se mencionó en el capítulo 3, integra elementos 3D, sonido, objetos y elementos que conforman a la realidad virtual en una sola plataforma. Sobre esta herramienta se programan las acciones que se llevan a cabo mediante *scripts* y finalmente exporta la escena a una aplicación (*.apk*), para que se envíe al teléfono inteligente y se pueda instalar la aplicación para ser utilizada.

La versión implementada para este proyecto de tesis es la 2018.2.10f1 (64-bit), liberada desde el 26 de Septiembre del 2018 para sistemas operativos *Windows* 7, 8, 10, solo en versiones de 64 bits; y para Mac OS X 10.9.

Los requerimientos principales de la plataforma *Unity* son los siguientes [60]:

- *Hardware* y procesamiento gráfico:
  - CPU: Soporte para el conjunto de instrucciones SSE2.
  - GPU: Tarjeta de video con capacidad para DX10 (shader modelo 4.0) (el resto depende principalmente de la complejidad de sus proyectos.)
- Requisitos adicionales para el desarrollo de plataformas:

- iOS: Computadora Mac con sistema operativo versión macOS 10.12.6 como mínimo y Xcode 9.0 o superior.
- Android: Kit de desarrollo Android SDK y Java (JDK); el IL2CPP *scripting backend* requiere Android NDK.
- Plataforma Windows universal: Windows 10 (64 bits), Visual Studio 2015 con componente C++ Tools o posterior y SDK para Windows 10.

#### 4.1.2. 3Ds Max

*“3ds Max es una potente solución de animación y modelado 3D que utilizan los desarrolladores de juegos, los artistas de efectos visuales y los diseñadores gráficos para crear mundos enormes, escenas impresionantes y experiencias de realidad virtual cautivadoras.” [1]*

Esta herramienta programada en C#, se eligió por tener alta compatibilidad con planos desarrollados en AutoCAD, el cual a su vez es otro producto de software de la familia Autodesk® englobado en los programas CAD<sup>1</sup>, con el cual se pueden dibujar y modelar objetos en 2D o 3D gracias a su amplia diversidad de herramientas y *plugins* que facilitan el uso de esta herramienta.

Con los planos desarrollados en AutoCAD<sup>2</sup>, se pudo realizar la tarea del levantamiento de paredes, columnas, trabes, losas, ventanas, puertas y demás elementos que conforman el modelo virtual de un piso detallado en la unidad habitacional de Rancho San Lorenzo num 32, estos planos fueron trabajados en extensión .dwg, el cual es el formato más utilizado por Arquitectos e Ingenieros Civiles en cuestiones estructurales.

---

<sup>1</sup>Computer Assisted Design, por sus siglas en inglés, que significan Diseño Asistido por Computadora.

<sup>2</sup>Se agradece a la M.I. Yolanda Melendez Alcaraz el proporcionar dichos planos para poder realizar este proyecto con la máxima calidad y cercanía a los datos estructurales reales.

#### 4. IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO

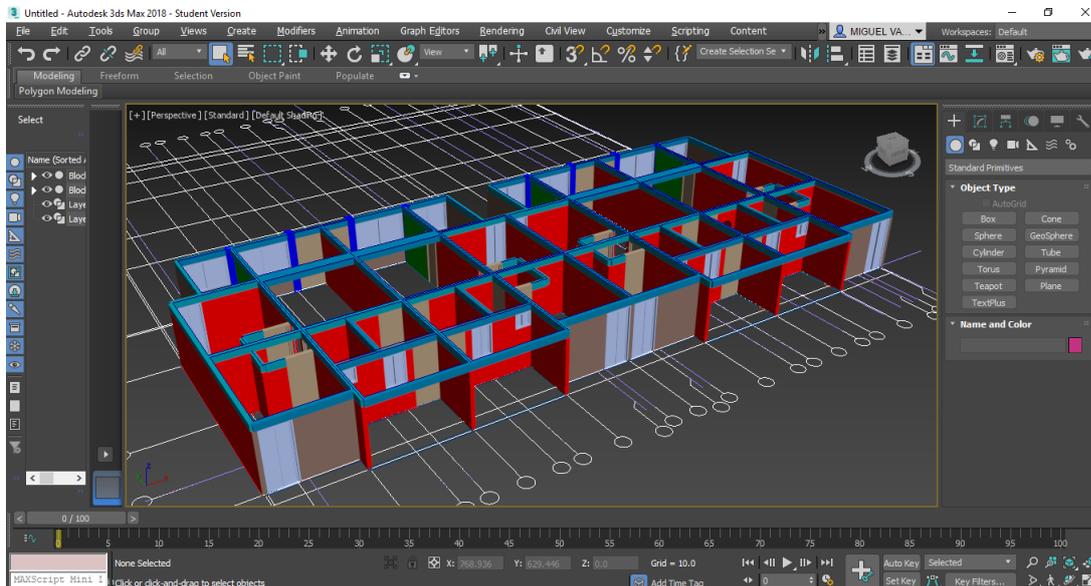


Figura 4.12: Planos del edificio Rancho San Lorenzo num 32.

Estos elementos, al ser en su mayoría cuadrados, se pudieron replicar con primitivas cúbicas llamados “Box” en el software de 3Ds Max, es decir todos los elementos que rodean la estructura del mismo son cubos separados entre sí para dar la ilusión de ser elementos únicos y no un sólido completo que abarque toda la escena en Unity.

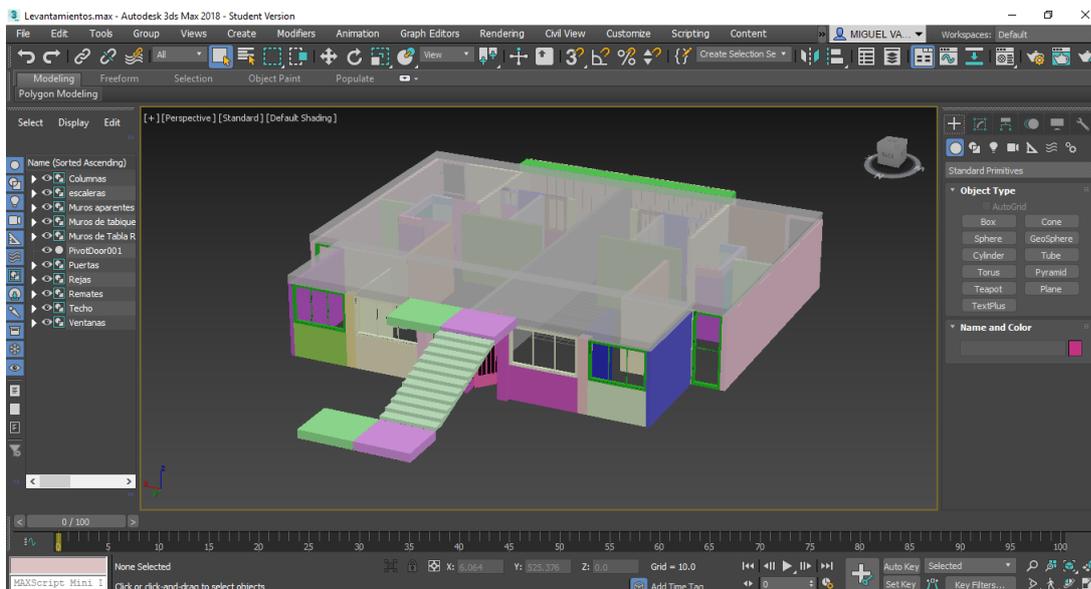
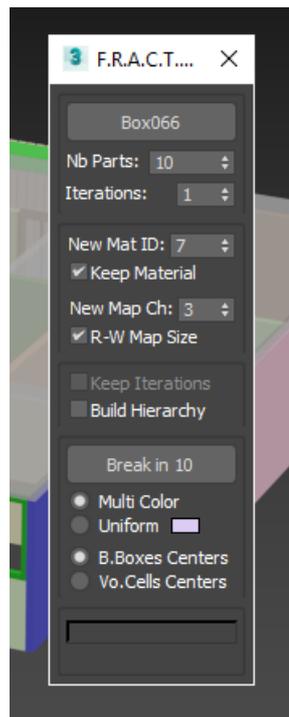


Figura 4.13: Levantamiento de un piso modelado en 3Ds Max

A su vez, en este software se implementó el algoritmo Voronoi, que será detallado en el apartado de “Grietas y Daños” en este mismo capítulo, utilizado para crear el efecto destructivo en objetos prediseñados de la escena, como lo son vidrios, jarrones y demás elementos frágiles que pueden romperse en un sismo real. Este algoritmo es aplicado por el *script* de FractureVoronoi v1.1 y tiene la capacidad de fragmentar cualquier objeto en diferentes partes y dar el mismo efecto precalculado <sup>1</sup>.



**Figura 4.14:** Parámetros del *Script* con algoritmo *Voronoi* (F.R.A.C.T.U.R.E.)

## 4.2. Modelado 3D

Este subcapítulo abarca tanto modelado como texturización de los objetos, para asemejarlos más a una vista real. Esto con el fin de brindar una mejor experiencia de usuario y crear un entorno inmersivo para que no luzcan como objetos cuadrados o demasiado rígidos. La base de estos modelados considera elementos denominados como “*low poly*”, que a grosso modo hacen referencia a objetos creados con una baja cantidad de caras o polígonos, de tal manera que estos sean más fáciles de procesar en el programa, ya que a una gran cantidad de polígonos requiere procesar una magnitud

<sup>1</sup>El autor de este código es anónimo, y es utilizado bajo licencia de uso no comercial. Tomado de [5], el código completo puede ser consultado en la sección A.3 del apéndice.

## 4. IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO

---

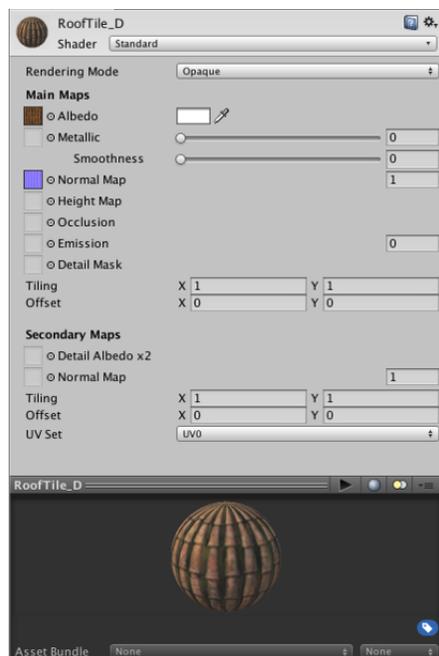


Figura 4.15: Vista de un material en Unity con *Shader* tipo *Standard*

considerable de operaciones para poder dibujar el objeto en la vista el usuario, por tanto una baja cantidad de vértices en los objetos mejora el rendimiento, así como el procesamiento de la información, para que sea dibujado más fácilmente cualquier elemento en la escena y tenga una sensación más fluida con el uso.

### 4.2.1. Edificio

El modelado del edificio se ha considerado en los apartados anteriores (4.1.2) con el software de 3Ds Max, este nuevo apartado hace referencia a las texturas que le proporcionan realismo a las paredes y demás elementos que promueven una sensación inmersiva al usuario.

La documentación de Unity [59] define los siguientes parámetros de un objeto que contenga *Mesh Render*, ya que pueden ser aplicados ciertos elementos visuales y mejorar el realismo de este, puesto que para que todo elemento en Unity sea visible, debe contar con un renderizado y esto se logra gracias a los *Materials*, *Shaders* y *Textures*.

Los *Materials* (ver Figura 4.15) son un conjunto de definiciones acerca de cómo la superficie del objeto debe ser renderizada, incluyendo referencias a texturas, información del *Tiling* (repeticiones de textura), colores utilizados, entre otros. Las opciones disponibles dentro del material serán definidas por el tipo de *Shader* que se esté utilizando.

Por otra parte, los **Shaders** son pequeños *scripts* que contienen operaciones matemáticas y algoritmos para el cálculo del color en cada *pixel* que es renderizado, basado en la luz que incide en el objeto y la configuración del material.

Finalmente las **Textures** se resumen a un conjunto de imágenes *bitmap*, la cual es una imagen de mapa de bits, es decir, definida por pixeles en una rejilla de información. Un mismo material puede tener referencia a diferentes tipos de texturas, ya que el *Shader* es el que se encarga de calcular el color de la superficie, mientras se aplica la textura. La textura va más allá de ser una plana renderización de imágenes, pues estas pueden contener información relevante de aspectos como rugosidad o profundidad del material (*Normal Map*), es decir cómo incide la luz en el objeto y como éste lo refleja para crear un efecto óptico de alta definición en el objeto.

La técnica utilizada en el renderizado de las paredes, techo y suelo, es conocida como “texturado por patrones”, en la cual se debe elegir una imagen en miniatura, regularmente de 24x24 pixeles, que se repite un N número de veces para “envolver” a la figura y así crear una vista diferente de la misma. En el caso del edificio se utilizaron 5 texturas diferentes, a continuación se muestra una tabla de elementos y texturas utilizadas para cada una.

#### 4. IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO

---

Objeto	Textura
Paredes y techo	
Piso	
Baño	
Patio	
Daños <sup>1</sup>	

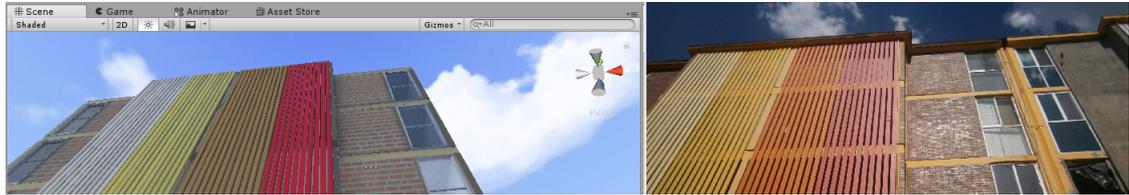
**Tabla 4.1:** Texturas utilizadas en Unity.

Los demás elementos como marcos, escaleras, barandales y bordes, fueron renderizados con materiales simples que pueden ser creados fácilmente en Unity, simplemente seleccionando el color deseado y arrastrando al objeto para que sea aplicado.

Las siguientes son comparativas entre fotografías reales del edificio y capturas de pantalla del programa compilado en Unity, para notar el realismo con el que fue creado y el grado de inmersión que puede tener este simulador.

---

<sup>1</sup>Varios daños en paredes internas al inmueble, se utilizaron texturas diferentes para cada grieta.



**Figura 4.16:** Fachada del edificio.



**Figura 4.17:** Muro de recámara principal.

#### 4.2.2. Interiores

Este apartado explica los elementos con los que tiene interacción directa el usuario dentro del inmueble. Los pisos aledaños, así como los departamentos inferiores o superiores son inaccesibles durante la simulación, de tal manera que todos los muebles,

#### 4. IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO

---

ventanas, puertas y demás elementos están concentrados en el tercer piso. El modelado de estos objetos fue omitido gracias a la gran cantidad de elementos gráficos que se encuentran gratis en Internet, la mayoría de estos elementos cuentan con una licencia gratuita de uso mientras no sean comercializados, como lo es el caso de esta tesis. La fuente principal de estos objetos se puede encontrar en la tabla siguiente (ver Tabla 4.2).

Página	Acceso Web	Modelos descargados
<b>Turbo Squid</b>	<a href="https://www.turbosquid.com/">https://www.turbosquid.com/</a>	Auto, mesa, jarrón, sanitario, silbato, botella de agua, lámpara, botiquín, mueble de cocina, cama, televisión, cajoneras y roperos.
<b>Free 3D</b>	<a href="https://free3d.com/">https://free3d.com/</a>	Sala, lavadora, tablero eléctrico y papel higiénico.
<b>GCTrader</b>	<a href="https://www.cgtrader.com/">https://www.cgtrader.com/</a>	Mano derecha, mochila y llave de paso de gas.
<b>Asset Store</b>	<a href="https://assetstore.unity.com/">https://assetstore.unity.com/</a>	Linterna, cuchillo, cerillos, botiquín de primeros auxilios.

**Tabla 4.2:** Páginas web utilizadas a lo largo del proyecto.



**Figura 4.18:** Objetos que componen la sala.

### 4.2.3. Grietas y daños

La simulación sísmica replica las 6 paredes dañadas durante el sismo del 19 de septiembre de 2017, de tal manera que se modelaron las grietas <sup>1</sup> a la escala correcta de las paredes para que éstas encajaran y fuera lo más acercado a la realidad.

Durante el sismo se recrea un cambio de texturas entre la textura base (pared con aplanado normal) y la textura de las grietas. De tal manera como lo muestra el siguiente segmento de código programado como *script*:

```
void destruction(){
    //pared principal de la sala
    if (valor1 == i) {
        mat[8] = giretas [0];
        //intercambio de materiales.
        rend.sharedMaterials = mat;
        //Comando que le dice a Unity
        que elemento "renderear".
        particleController1.Emit(30);
        //Activar elemento de polvo al
        intercambiar las grietas en muros.
    }
    //pared que esta a un lado de la ventana
    if (valor2 == i) {
        mat[2] = giretas [1];
        rend.sharedMaterials = mat;
        particleController2.Emit(30);
    }
    //pared que comparten los cuartos
    if (valor3 == i) {
        mat[7] = giretas [2];
        rend.sharedMaterials = mat;
        particleController3.Emit(30);
    }
    //pared que esta de frente al bano
    if (valor4 == i) {
        mat[10] = giretas [3];
        rend.sharedMaterials = mat;
        particleController4.Emit(30);
    }
    //la otra pared
```

---

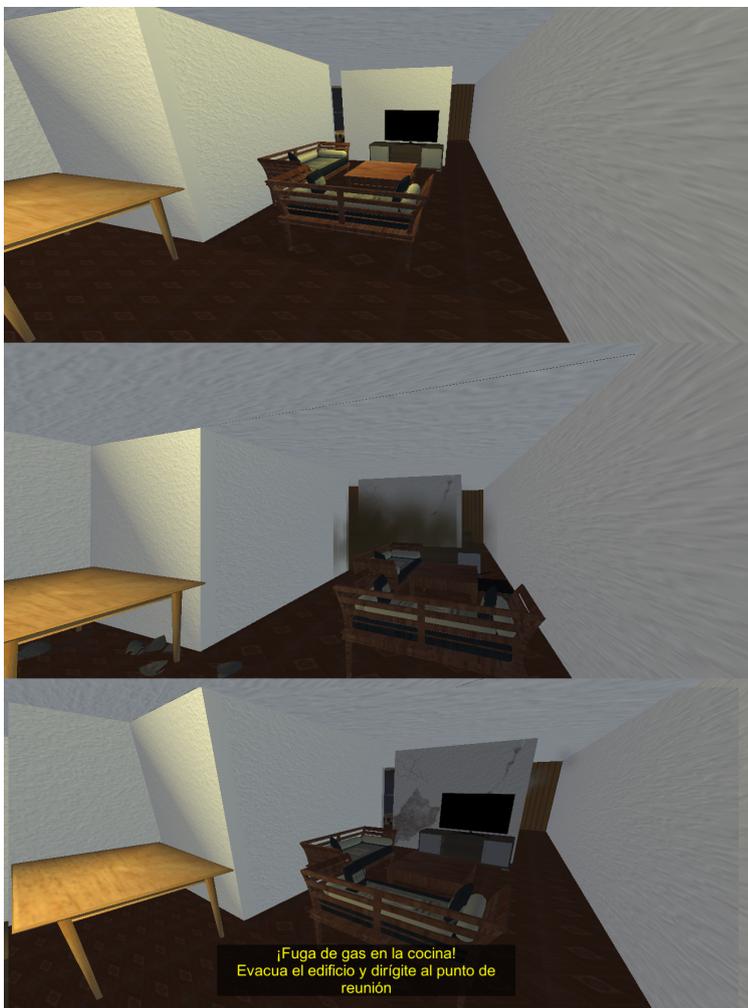
<sup>1</sup>Lo daños en las grietas fueron creados por la diseñadora Vanessa Vargas, que brindó apoyo durante esta sección del proyecto en la parte visual.

#### 4. IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO

---

```
    if (valor5 == i) {  
        mat[11] = giretas [4];  
        rend.sharedMaterials = mat;  
        particleController5.Emit(30);  
    }  
    return ;  
}
```

En tiempo de ejecución, los resultados son más realistas con un sistema de partículas que simulan la caída de polvo y/o escombros a partir de los daños provocados en las paredes, como se puede apreciar en la siguiente figura:



**Figura 4.19:** (De arriba hacia abajo) pared de la sala antes del sismo, durante y después del sismo.

### 4.3. Lentes de realidad virtual

Los lentes de realidad virtual, también conocidos como cascos de realidad virtual o gafas de realidad virtual, son una familia de dispositivos que permiten reproducir o transmitir imágenes creadas por computadora, pantalla o *smartphone* con una cercanía tal a la vista humana, que permite crear un efecto de tercera dimensión para el usuario. Sus precios son muy variados dependiendo la marca pero sobre todo la tecnología con la que cuenten. Estos principalmente se enfocan en el efecto inmersivo a una realidad virtual, aunque otros se basan en la realidad aumentada o realidad mixta, que conjunta cámaras, giroscopios, acelerómetros y demás sensores que permiten recrear esta experiencia.

Los lentes utilizados para este proyecto de tesis son las “Gafas de realidad virtual móvil”, que en realidad son una carcasa o accesorio para el *smartphone* y cuentan con una charola de inserción, para acomodar el móvil en una posición correcta y que este no se mueva o pueda caer durante su uso, y un par de lentillas que enfocan el objetivo de la pantalla para crear la ilusión óptica en 3D. Es decir, estos lentes no cuentan con tecnología alguna o dispositivo electrónico que sea vital para su uso, ya que toda la carga operativa es llevada a cabo por el mismo *smartphone*.

Google lanzó en junio de 2014, durante el evento de Google I/O, una novedosa pieza de cartón, con la capacidad de recrear la realidad virtual gracias a unos cuantos dobleces, un par de lentillas de resina, imanes y un *smartphone* con Android [33]. Esto le dió un gran golpe a la industria de la realidad virtual, que si bien para ese tiempo no era tan implementada con teléfonos inteligentes, ya existían dispositivos con su propia pantalla integrada que tenían un costo muy elevado pero recreaban el mismo efecto inmersivo. Las primeras versiones de los Google Cardboard se llegaron a comercializar en \$5 dólares, lo cual demostró que no se necesita un gran precio para que todo el mundo pueda disfrutar de una vista 3D con su propio *smartphone*.

#### 4.3.1. VR BOX HEADSET

*“Convierte tu móvil Android o iOS en tu sala de cine particular y en la entrada al mundo de la realidad virtual y el 3D. Abre la aplicación o película y coloca tu móvil dentro de las gafas vrBox para disfrutar de una experiencia única.” [7]*

Plástico es el principal componente de estas gafas, que cuentan con una colchoneta alrededor de donde se colocan los ojos y la nariz para que su uso no sea dañino a la piel o cansado en largos periodos de tiempo.

Las lentillas de estos mismos dispositivos también son de resina sólida, su forma cóncava es especial para crear el efecto óptico de inmersión 3D. Estas lentillas tienen la función de moverse en los ejes X, Z desde la perspectiva visual, esto con la finalidad de enfocar correctamente, ya que todo humano tiene un punto focal diferente, y esto se toma en cuenta en el diseño de estos dispositivos.

#### 4. IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO

---



**Figura 4.20:** Movimientos de lentes para ajustar a la visión del usuario.

La compatibilidad de estos lentes de realidad virtual es amplia entre los diferentes modelos de *smartphones*, ya que van desde las 3.5 pulgadas hasta dispositivos con pantallas de 6".



**Figura 4.21:** Compatibilidad de dispositivos con *VR BOX*.

Otra gran diferencia entre *VRBOX* y los *Google Cardboard* es la cinta ajustable que permite colocar los lentes en la cabeza sin que estos tengan que estar sujetos por las manos todo el tiempo, lo cual libera las manos para utilizar los otros elementos que mejoren la realidad virtual, como controles, *gamepads* o sensores de movimiento.

### 4.3.2. Control *Bluetooth*

Adicional a los lentes de realidad virtual, no se debe pasar por alto el *gamepad* o también conocido como control *bluetooth*. El cual es un dispositivo muy similar al que usan los videojuegos actuales, con la diferencia de que este tiene una gran compatibilidad entre dispositivos y generalmente tienen menos botones o sensores. El origen de este tipo de controles es desconocido, pues el *bluetooth* lleva mucho más tiempo implementado en dispositivos móviles que el acelerómetro y su uso principalmente se ve reflejado en juegos para móvil.

Este dispositivo utiliza baterías AAA no recargables y tiene 6 botones y 2 gatillos para su uso con videojuegos o un sinnúmero de aplicaciones compatibles. Su *joystick* permite un movimiento libre del personaje para este proyecto y cuenta con un botón de encendido y otro para la sincronización con *bluetooth*. Los botones de este control son denominados de “membrana”, el *joystick* es mecánico. Es de baja sensibilidad, por lo cual los movimientos y la presión debe ser exacta para que se envíe la señal desde el control al dispositivo móvil.



**Figura 4.22:** Componentes internos del gamepad.

A continuación se enlistan las acciones que se pueden realizar dentro de la aplicación de Tepeyollotl y los botones asignados a cada una de estas acciones.

## 4. IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO

---

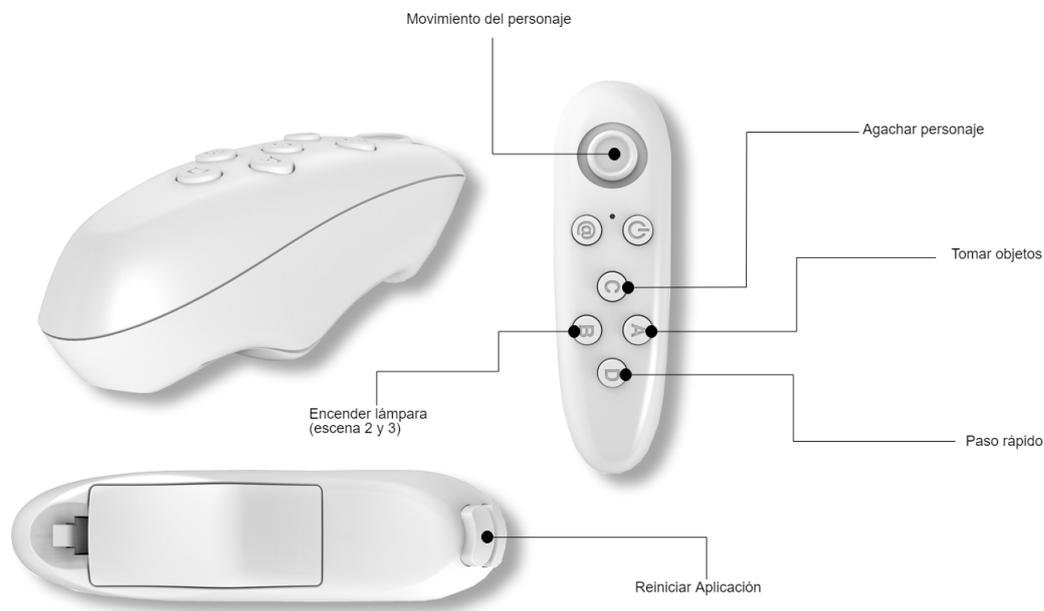


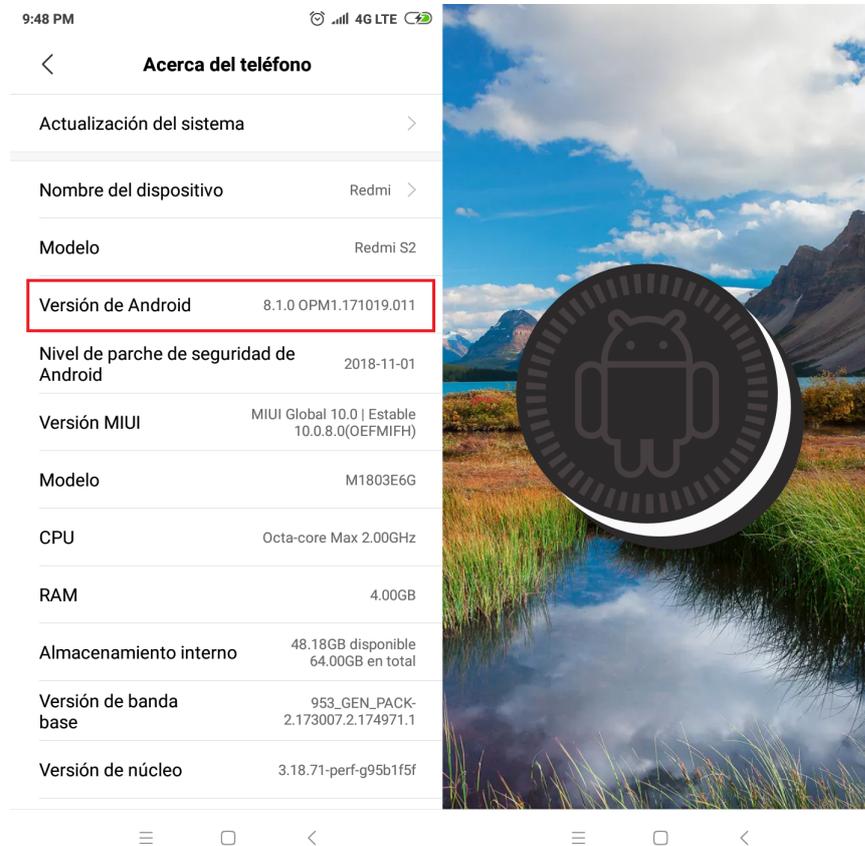
Figura 4.23: Gamepad y botones asignados.

### 4.4. Requerimientos

Las ventajas principales de trabajar con Unity, es la compatibilidad multiplataforma de los programas, juegos o simuladores que se generen con éste, pues dependiendo de la SDK con la que se trabaje es el sistema operativo con el que va funcionar la *App*. Por defecto se puede desarrollar en el sistema operativo en el que se esté programando directamente en Unity, es decir en este caso Windows 10 (*Home Edition*, 64 bits). Cabe aclarar que no necesariamente este proyecto debe trabajar en una sola versión para Android específica, es decir, la compilación es el proceso final de la herramienta Unity, que convierte el proyecto en un solo ejecutable o instalable, en el caso de Android este será un “.apk” instalable en la respectiva plataforma para la que fue diseñado. Se eligió trabajar sobre Android debido a que ya se contaban con las herramientas de trabajo suficientes con las características específicas y brindar una buena experiencia de inmersión sin gastar demasiado, pues el presupuesto era limitado.

#### 4.4.1. Sistema Operativo

Este proyecto se implementó en un dispositivo Android con las siguientes características:



**Figura 4.24:** S.O. Android 8.1.0.

#### 4.4.2. *Hardware* del sistema

- Marca: Xiaomi
- Modelo: Redmi S 2
- RAM: 4.00 GB
- ROM: 64 GB
- CPU: Snapdragon 625 Octa Core que trabaja a 2.0 [GHz]
- GPU: Adreno™ 506 (Qualcomm(R))
- Giroscopio: Sí
- Resolución de la pantalla: 1440x720 pi [64]



---

## Capítulo 5

# Pruebas y verificación de la aplicación.

---

La verificación de la *App* fue un proceso reiterativo durante el desarrollo del proyecto, es decir, mediante la metodología descrita en el capítulo 3, el proyecto de estudio se centró en probar cada una de las nuevas características que se estaban añadiendo al proyecto gracias a la concatenación de tareas entre la implementación y el mantenimiento en el modelo en cascada. En este caso los mismos desarrolladores fueron los *testers* que abordaron cada una de las tareas para verificar el correcto funcionamiento de la aplicación. Esto conlleva ventajas y desventajas, los desarrolladores no siempre pueden explorar todos los casos o escenarios posibles que ayudan a encontrar algún fallo en la aplicación. Mientras que los casos ideales son probados durante todo el proceso de desarrollo, y con esto las fallas encontradas son fácilmente detectadas en el código ya que se tiene un conocimiento amplio del funcionamiento de la aplicación.

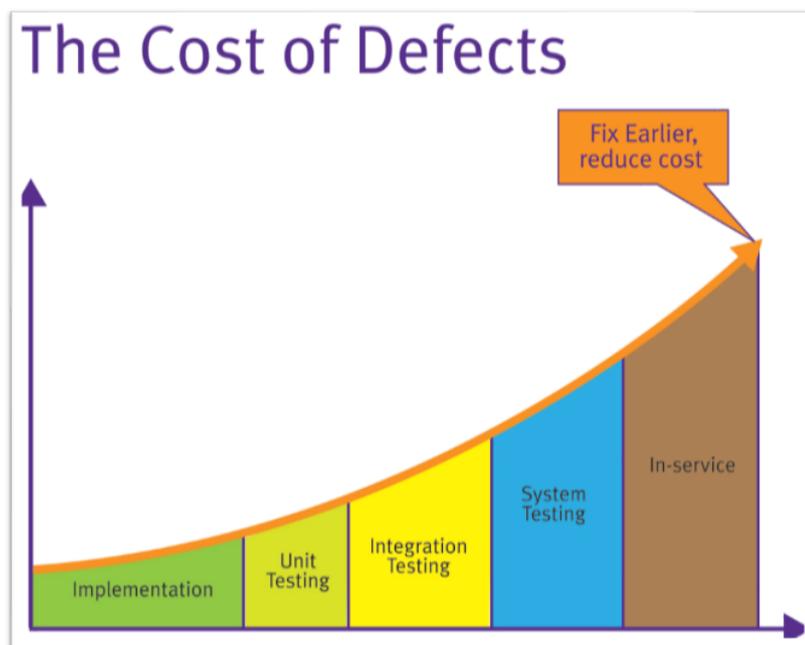
El objetivo de este capítulo es demostrar la hipótesis descrita en el apartado 1.4.3, mediante una serie de pruebas controladas en entornos ideales y presentar los resultados, datos, gráficas y elementos necesarios para comprobar dicho apartado. Como introducción se describe de manera teórica la naturaleza de un conjunto de pruebas y en qué se basan.

Generalmente todas las metodologías de desarrollo de software contemplan un estatus de pruebas o validación para avanzar con el desarrollo del proyecto, antes de que un producto final llegue a manos del cliente. Las pruebas se implementan para descubrir errores que se cometieron de manera inadvertida conforme se diseñó o se construyó el proyecto; formalmente esta tarea debe ser llevada a cabo por los ingenieros de software, el gerente de proyecto, testers o especialistas en pruebas. Este paso es importante debido a que en la escala de implementación o desarrollo de cualquier producto, es mucho más rentable descubrir errores <sup>1</sup> de un sistema antes de que este se lance al público en la fase final de la metodología (ver Figura 5.1 <sup>2</sup>).

---

<sup>1</sup>También conocidos como "*bugs*"

<sup>2</sup>En el eje de las abscisas se maneja la variable costo y en el eje de las ordenadas la variable tiempo, es decir mientras más se aleja del origen el encontrar un error es más costoso y más tardado en comparación a etapas tempranas.



**Figura 5.1:** El costo de los defectos.

En resumen, las pruebas unitarias se basan en el principio de “divide y vencerás”, cuyo sentido es modularizar la estructura de los proyectos para crear pequeños componentes con ciertas funciones y acciones programadas, que unidos en uno solo generan la aplicación final por sí misma. Esto con el fin de probar individualmente cada submódulo y detectar errores fáciles de corregir antes de llegar al software final.

Una correcta estrategia de pruebas tiene como resultado una serie de documentos y manuales con los datos obtenidos en los análisis y obtención de errores que detallan cada uno de los problemas encontrados y como fueron solucionados [40].

Por la naturaleza de esta tesis cabe aterrizar las definiciones antes mencionadas a la situación real con la que se ha desarrollado este proyecto, ya que en principio no se tiene un cliente directo con el cual validar los escenarios o datos requeridos, por tanto las pruebas no tienen un fundamento definido de “cómo debe quedar” o “cómo debe funcionar”, ya que es una innovación tecnológica que no tiene comparación con alguna otra aplicación en el mercado nacional actual, por tanto no existen clientes inmediatos a cuáles satisfacer o recibir una retroalimentación. Esta brecha abre una nueva ventana al enfoque de pruebas, basadas en versiones *beta*, *alfa* o en algún *Framework* de desarrollo de pruebas unitarias. Para esta tesis están implementadas las pruebas *alfa* y *beta* [2], ya que, es virtualmente imposible que un programador prevea como un usuario final utilizará el programa. Un manual de usuario puede ser fácilmente malinterpretado por un tercero y regularmente existen ciertas entradas de datos que pueden provocar resultados inesperados a las salidas del programa, ya que un desarrollador contempla generalmente solo los casos esperados. Caso contrario al desarrollo de un software a

la medida, el cual involucra a una persona o grupo de personas predefinidas con las cuales verificar y validar el funcionamiento del programa. Para el caso de Tepeyótl, éstas pruebas brincan el escalón inicial de *testear* la *App* con un grupo de personas especializadas en los requerimientos y se enfoca en probar con un grupo de personas acercadas a ser el “usuario final”, ya que con un enfoque crítico son capaces de detectar errores o anomalías en el funcionamiento y dar una retroalimentación constructiva en ese sentido.

El investigador Roger Pressman, de la Universidad de Connecticut, define estos ambientes de prueba de la siguiente manera:

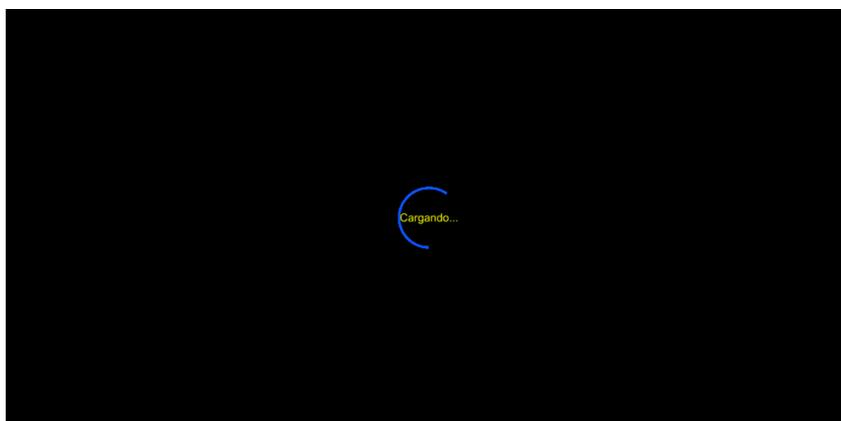
*“La prueba alfa se lleva a cabo en el sitio del desarrollador por un grupo representativo de usuarios finales. El software se usa en un escenario natural con el desarrollador “mirando sobre el hombro” de los usuarios y registrando los errores y problemas de uso. Las pruebas alfa se realizan en un ambiente controlado. La prueba beta se realiza en uno o más sitios del usuario final. A diferencia de la prueba alfa, por lo general el desarrollador no está presente. Por tanto, la prueba beta es una aplicación “en vivo” del software en un ambiente que no puede controlar el desarrollador. El cliente registra todos los problemas (reales o imaginarios) que se encuentran durante la prueba beta y los reporta al desarrollador periódicamente. Como resultado de los problemas reportados durante las pruebas beta, es posible hacer modificaciones y luego preparar la liberación del producto de software a toda la base de clientes”.*

Para efectos prácticos, se decidió combinar ambas pruebas (*alfa* y *beta*), ya que se tuvo acceso remoto a verificar el comportamiento y los resultados del usuario en “tiempo real”, para así obtener las métricas necesarias y evaluar el comportamiento gracias a la serie de resultados que provee la *App* al finalizar la simulación.

## 5.1. Pruebas unitarias y de Integración

Como se redactó en el capítulo 4, la aplicación se divide en tres escenas, las cuales se han programado como módulos independientes entre sí, de tal manera que una no dependa de otra directamente y así sea transparente para el usuario que el funcionamiento de la *App* depende solamente del contexto en que se está implementando, en el educativo. No obstante, los resultados relacionados entre la escena 2 (ruta de evacuación) y escena 3 (simulación sísmica) si son trascendentales, pues generan las métricas que se explicarán a continuación y que proveen los resultados y estadísticas.

Una prueba unitaria se enfoca en la unidad más pequeña del diseño de software, en la cuál la estrategia de pruebas es puesta en marcha para verificar la funcionalidad de cada módulo probado. Las pruebas unitarias se enfocan en la lógica de procesamiento interno y de las estructuras de datos dentro del componente, para este caso de estudio las pruebas son secuenciales, es decir primero con la escena 1 (mochila de emergencia), después escena 2 (ruta de evacuación) y finalmente la escena 3 (simulación sísmica),



**Figura 5.2:** Imagen de transición entre escenas.

en ese orden siempre. De esta manera se han elegido a las escenas como la unidad más pequeña en las pruebas unitarias, debido a que las funcionalidades entre cada una de ellas no dependen o afectan directamente a las otras escenas, ya que cada una de ellas tiene un propósito específico.

El procedimiento de las pruebas unitarias, por su naturaleza, pueden realizarse inmediatamente después de compilar el código fuente, pues éste se enlaza ejecutando el código en el Engine de Unity que muestra el funcionamiento de la aplicación una vez realizado un cambio si se desea. Este comportamiento es único para este tipo de ambientes pues ya cuentan con un software predefinido para pruebas y hacer revisiones rápidas hasta con el más pequeño cambio. En la industria este tipo de pruebas son automatizadas y ya no necesitan un tercero usando la aplicación una y otra vez, pero para uso práctico este proyecto no contempla este tipo de pruebas robustas por módulos.

Las pruebas de integración son el escalón siguiente de las pruebas unitarias, bajo la lógica de pensamiento, en que si en un módulo ya sirven las cosas como se esperaba, se puede trabajar junto con otro módulo y de esta manera ir integrando el proyecto hasta utilizarlo todo en conjunto, a su vez las pruebas de integración son una técnica sistemática para construir la arquitectura del software mientras se llevan a cabo pruebas para descubrir errores asociados con la interfaz. De esta forma, al tener el proyecto funcional por módulos se ligaron las tres escenas bajo una pantalla de “espera” entre cada una al completar los objetivos de ese nivel.

En este punto es donde se concreta la prueba de software realizada el 1 y 2 de octubre de 2018 en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería, durante el XVII Ciclo de Conferencias “Nuevo reto en la gestión de infraestructura a partir de la experiencia del sismo de septiembre de 2017”, que gracias a la coordinación de la DICyG se tuvo el acceso para presentar el proyecto por primera vez a estudiantes, profesores y docentes de la Universidad Nacional Autónoma de México para tener una retroalimentación de la aplicación.

Esta prueba contempló una breve introducción teórica del desarrollo de la aplicación a todos los asistentes, esto gracias a una pequeña presentación en grupos reducidos. Por limitaciones técnicas solo se utilizó un dispositivo Android con la aplicación instalada y un control bluetooth para poder utilizarla. El apoyo durante toda la simulación se hizo en compañía del usuario para saber qué hacer en todo momento, es decir parecido a una prueba *alfa*, pero con la variante de ir anotando todos los problemas que presentaban durante el uso de la aplicación y las complicaciones que llegaban a presentar, como mareos, dificultad con el control, desorientación, etc.



**Figura 5.3:** Estudiantes de primeros semestres probando la aplicación "Tepeyollotl".

Estas pruebas fueron documentadas con material audiovisual, que se encuentra disponible en el siguiente código QR (ver Figura 5.4) dónde se puede mostrar el uso de la aplicación por estudiantes y la aceptación que tuvieron gracias a su acercamiento con la tecnología. Cabe resaltar que no solo estudiantes de ingeniería fueron los usuarios principales, sino también se tuvo la fortuna de contar con alumnos de la Facultad de Psicología y Arquitectura, quienes brindaron su punto de vista sobre las áreas de oportunidad principales de la aplicación, lo cual enriqueció el proyecto desde diferentes perspectivas.



**Figura 5.4:** Sesión de demostración en la entrada de la Facultad de Ingeniería.

### 5.2. Experimentación y obtención de estadísticas

Una vez realizados los cambios en la versión anterior (el control de versiones es llevado automáticamente por Unity), el proyecto se completó en su fase final para iniciar pruebas con un grupo reducido de personas y obtener con ellos datos que permitan comprobar la hipótesis antes mencionada.

Puntos a evaluar durante la experimentación:

- a) Tiempo de uso completo de la aplicación (desde el inicio en la escena 1, hasta el final de la escena 3).
- b) Tiempo de evacuación escena 2, ruta de evacuación.
- c) Tiempo de evacuación escena 3, si es que evacuó durante el sismo.
- d) Calificación obtenida en la simulación sísmica (porcentaje de seguridad).
- e) Acciones realizadas por el usuario.
- f) Edad.
- g) Nivel de estudios.
- h) Sexo.

**Proceso de experimentación:** Para utilizar la aplicación sin problema alguno, se utilizó un salón amplio con baja iluminación y sin ningún obstáculo cerca para evitar



**Figura 5.5:** Uso de lentes y control *bluetooth*.

que el usuario se lastime al experimentar la simulación. En principio, se le brindó una instrucción verbal al usuario para que pudiera ajustar los lentes de realidad virtual al enfoque de su vista y no tener complicaciones para utilizarla. Posteriormente se le indicó al sujeto de prueba con que botón se realizan cada una de las acciones. Al entregar el control en sus manos, se procedió a iniciar la aplicación con el botón “A” del control. En ese mismo instante se comenzó a cronometrar el tiempo de uso de la aplicación durante todo el experimento dentro de la misma *App*. Una vez finalizada la simulación se detiene el cronómetro, se registra el tiempo y se retiran los lentes para proceder con el siguiente sujeto. Este ejercicio se repitió 3 veces por cada sujeto de prueba, para obtener un conjunto de muestras para analizar y mejorar el aprendizaje. El lapso de tiempo entre los usuarios, le sirve a cada sujeto de prueba como descanso por si éste presentaba mareo o si le era incómodo el uso de los visores en el rostro durante un periodo extendido de tiempo.

**Grupo de control:** Para llevar a cabo una muestra limpia de resultados, únicamente se probó la aplicación con seis personas que no hayan tenido contacto alguno con la *App* anteriormente, debido a que en usuarios de prueba anteriores ya existe una predisposición de cómo funciona y cómo actúa la aplicación, lo cual no es el objetivo de esta tesis. Por tanto se seleccionó un grupo aleatorio de personas entre conocidos, familiares y amigos para llevar a cabo esta experimentación <sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Se acordó ocultar el nombre de los asistentes, para que sean anónimos en todo momento durante la experimentación de esta tesis.

## 5. PRUEBAS Y VERIFICACIÓN DE LA APLICACIÓN.

---

Sujeto	Género	Edad	Nivel de estudios
1	Femenino	58	Licenciatura
2	Femenino	22	Estudiante Lic.
3	Masculino	25	Estudiante Lic.
4	Masculino	23	Estudiante Lic.
5	Masculino	22	Estudiante Lic.
6	Masculino	28	Licenciatura

**Tabla 5.1:** Sujetos de prueba.

### Resultados:

#### ■ Sujeto 1:

Ronda	Tiempo total de uso de App [m:s]	Tiempo evacuación en escena 2 [m:s]	Tiempo evacuación en escena 3 [m:s]	¿Cerró paso de gas?	¿Cerró paso de corriente eléctrica?	¿Tomó la mochila de emergencia?	Porcentaje de seguridad
Ronda 1	12:45	04:49	No evacuó	No	Si	Si	19.49 %
Ronda 2	07:10	02:09	No evacuó	Si	Si	Si	9.76 %
Ronda 3	06:47	02:44	No evacuó	Sí	No	Sí	20.88 %

**Tabla 5.2:** Resultados sujeto 1.

#### ■ Sujeto 2:

Ronda	Tiempo total de uso de App [m:s]	Tiempo evacuación en escena 2 [m:s]	Tiempo evacuación en escena 3 [m:s]	¿Cerró paso de gas?	¿Cerró paso de corriente eléctrica?	¿Tomó la mochila de emergencia?	Porcentaje de seguridad
Ronda 1	07:27	01:21	No evacuó	Sí	Sí	Sí	90.97 %
Ronda 2	05:12	01:32	No evacuó	Sí	Sí	Sí	92.53 %
Ronda 3	04:55	01:19	00:22	Sí	Sí	Sí	97.33 %

**Tabla 5.3:** Resultados sujeto 2.

- Sujeto 3:

Ronda	Tiempo total de uso de <i>App</i> [m:s]	Tiempo evacuación en escena 2 [m:s]	Tiempo evacuación en escena 3 [m:s]	¿Cerró paso de gas?	¿Cerró paso de corriente eléctrica?	¿Tomó la mochila de emergencia?	Porcentaje de seguridad
Ronda 1	05:25	01:26	No evacuó	Sí	Sí	Sí	9.76 %
Ronda 2	05:00	01:26	No evacuó	Sí	Sí	Sí	92.99 %
Ronda 3	04:55	01:30	No evacuó	No	Sí	Sí	90.91 %

**Tabla 5.4:** Resultados sujeto 3.

- Sujeto 4:

Ronda	Tiempo total de uso de <i>App</i> [m:s]	Tiempo evacuación en escena 2 [m:s]	Tiempo evacuación en escena 3 [m:s]	¿Cerró paso de gas?	¿Cerró paso de corriente eléctrica?	¿Tomó la mochila de emergencia?	Porcentaje de seguridad
Ronda 1	07:56	00:57	00:27	Sí	Sí	Sí	97.50 %
Ronda 2	03:33	00:50	00:25	Sí	Sí	No	96.67 %
Ronda 3	04:01	00:48	00:30	Sí	Sí	Sí	97.50 %

**Tabla 5.5:** Resultados sujeto 4.

- Sujeto 5:

Ronda	Tiempo total de uso de <i>App</i> [m:s]	Tiempo evacuación en escena 2 [m:s]	Tiempo evacuación en escena 3 [m:s]	¿Cerró paso de gas?	¿Cerró paso de corriente eléctrica?	¿Tomó la mochila de emergencia?	Porcentaje de seguridad
Ronda 1	04:37	00:45	00:33	No	Sí	Sí	96.67 %
Ronda 2	03:42	00:54	00:29	Sí	Sí	Sí	97.50 %
Ronda 3	04:10	00:51	00:25	Sí	Sí	Sí	97.20 %

**Tabla 5.6:** Resultados sujeto 5.

- Sujeto 6:

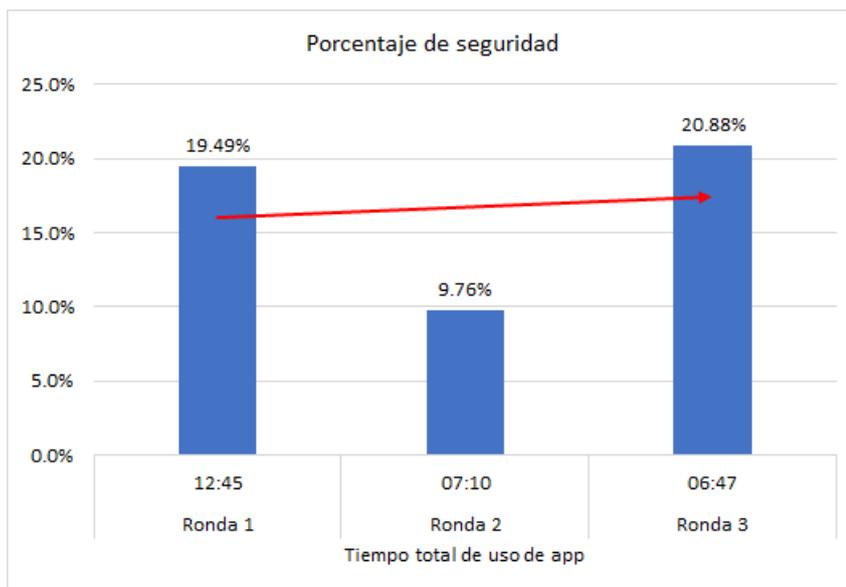
Ronda	Tiempo total de uso de <i>App</i> [m:s]	Tiempo evacuación en escena 2 [m:s]	Tiempo evacuación en escena 3 [m:s]	¿Cerró paso de gas?	¿Cerró paso de corriente eléctrica?	¿Tomó la mochila de emergencia?	Porcentaje de seguridad
Ronda 1	04:07	01:03	00:27	Sí	Sí	Sí	10.04 %
Ronda 2	03:42	00:54	00:33	Sí	No	Sí	40.50 %
Ronda 3	04:10	00:51	No evacuó	Sí	Sí	Sí	90.80 %

**Tabla 5.7:** Resultados sujeto 6.

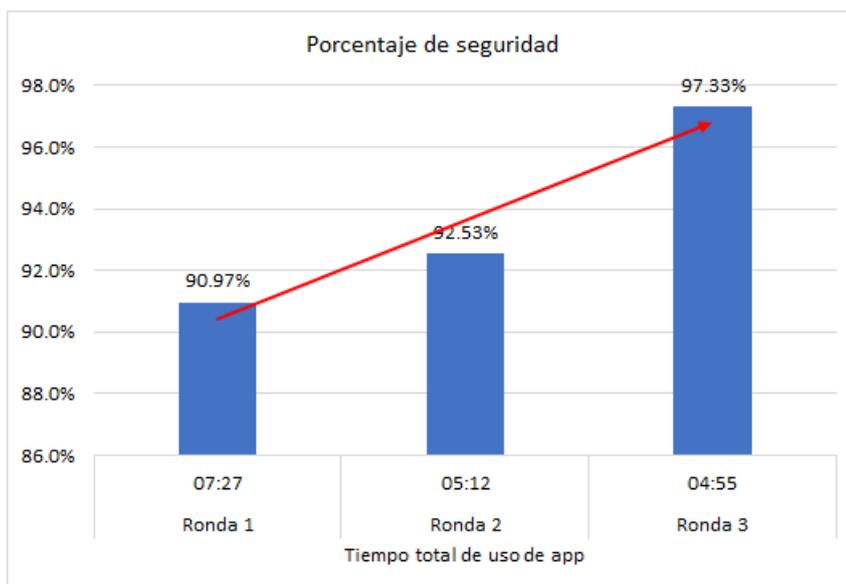
## 5. PRUEBAS Y VERIFICACIÓN DE LA APLICACIÓN.

---

**Estadísticas:** Para facilitar la visualización en la tendencia del aprendizaje en cada sujeto de prueba, se colocó en las gráficas una línea roja que representa la moda o tendencia lineal entre las columnas de porcentaje de seguridad en cada ronda y definen la mejora del aprendizaje.



**Figura 5.6:** Tendencia de aprendizaje sujeto 1.



**Figura 5.7:** Tendencia de aprendizaje sujeto 2.

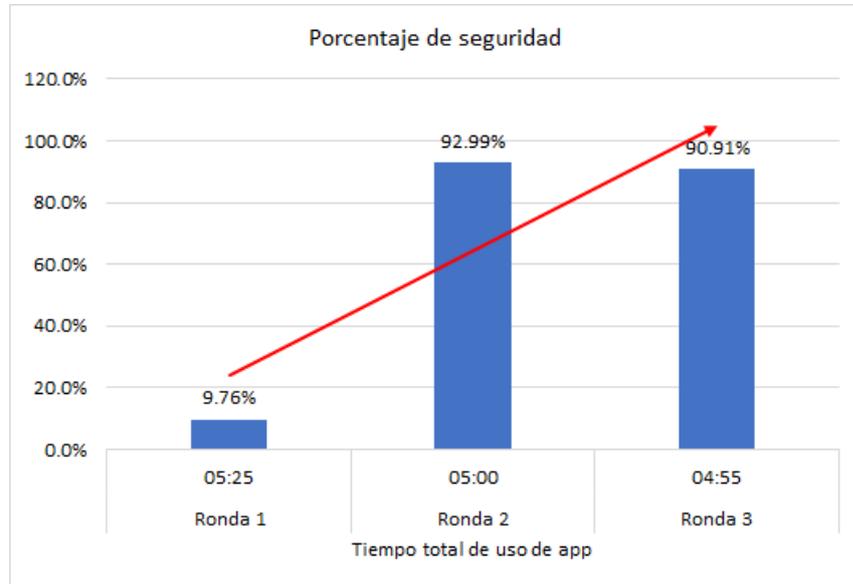


Figura 5.8: Tendencia de aprendizaje sujeto 3.

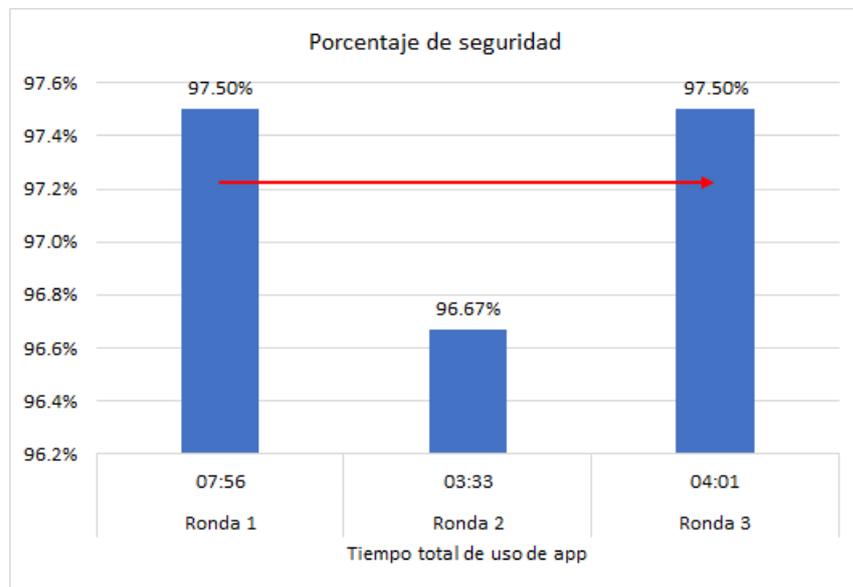
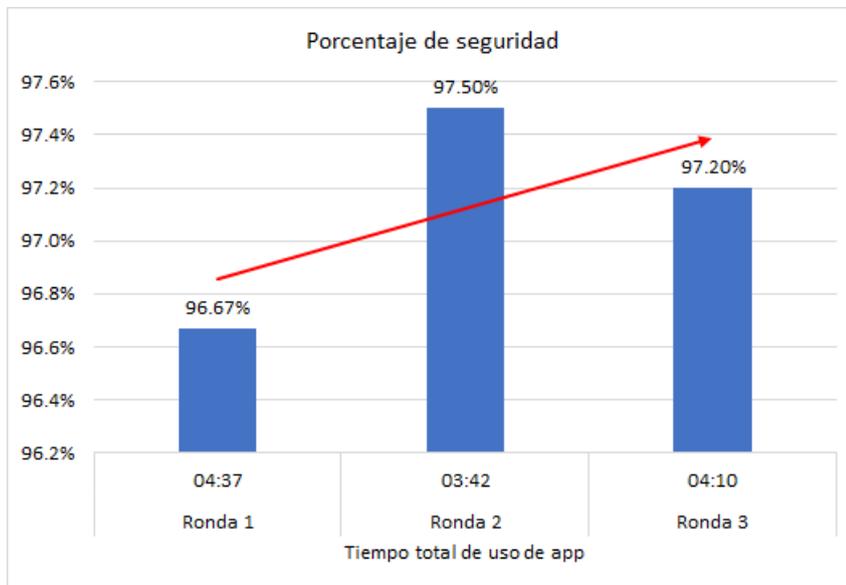


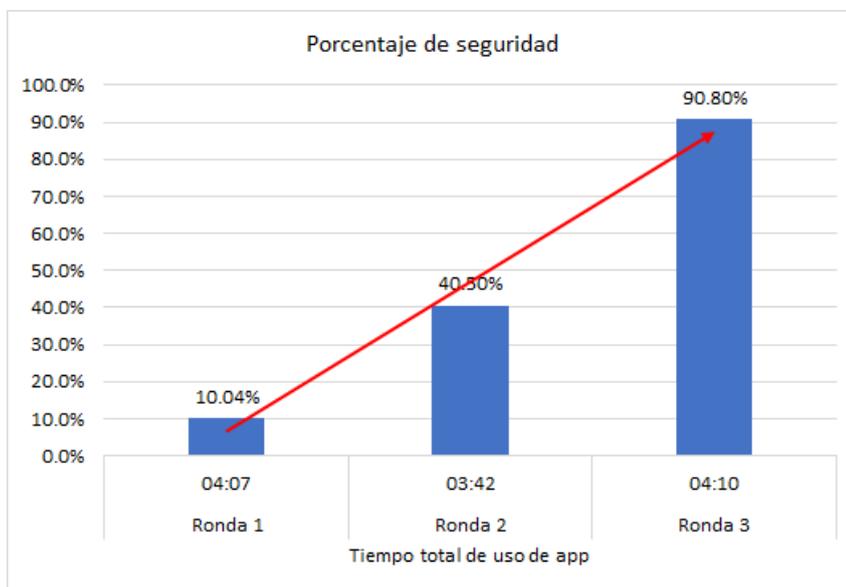
Figura 5.9: Tendencia de aprendizaje sujeto 4.

## 5. PRUEBAS Y VERIFICACIÓN DE LA APLICACIÓN.

---



**Figura 5.10:** Tendencia de aprendizaje sujeto 5.



**Figura 5.11:** Tendencia de aprendizaje sujeto 6.

### 5.3. Verificación de la hipótesis

A partir de los datos obtenidos de las tablas del apartado anterior, se puede calcular la siguiente información:

Tiempo promedio	Ronda 1	Ronda 2	Ronda 3
Uso total	06:21	04:06	03:26
Evacuación Escena 2	01:33	01:08	01:12

**Tabla 5.8:** Tiempo promedio para las tres rondas

Como se puede notar en las gráficas y tablas del apartado 5.2, además de la tabla anterior, tras cada iteración en el uso de la aplicación, fueron mejorando de manera general los tiempos de uso de la misma y de evacuación, así como la calificación final en el porcentaje de seguridad. Si bien hay casos en donde alguna persona tuvo un revés en el siguiente intento, la tendencia de ésta sigue siendo una mejora en comparación al primer intento, mientras que por otra parte, se observa que el sujeto 4 tuvo un rendimiento excelente debido a que su porcentaje de seguridad se mantuvo en el rango máximo posible, quiere decir que esta persona en particular le es fácil interactuar con el ambiente y tomó las mejores decisiones posibles. De lado contrario, sujeto 1 mostró un porcentaje de seguridad bajo para los tres intentos, mejorando para la ronda 3, sin embargo, demuestra que el uso de esta tecnología no le es familiar y se le dificulta, así como haber llevado a cabo ciertas toma de malas decisiones durante la simulación del sismo.

Un factor importante a resaltar en las pruebas fueron las pocas rondas que se aplicaron para esta experimentación, ya que generalmente en pruebas más robustas, los sujetos de prueba tienen un acercamiento libre al programa sin ser guiados, de esta manera tienen un factor de aprendizaje mejor, en comparación a las únicas tres rondas que se implementaron para esta evaluación. Es decir el grado de familiarización del control y del entorno afecta directamente en el aprendizaje y rendimiento de los sujetos de prueba.



---

## Capítulo 6

# Conclusiones

---

Según los resultados obtenidos de la experimentación, los participantes mejoraron su rendimiento conforme a los intentos realizados, lo que infiere que con cada simulación que se intente, este rendimiento tenderá a ser más alto. Esto demuestra la hipótesis planteada gracias a la tendencia lineal positiva en cada una de las gráficas de resultados. Se concluye que la aplicación mejoró el aprendizaje de las personas que realizaron las pruebas con el uso continuo de la misma, siendo diferente la mejora dependiendo del grupo de edad. También, se observa que el grupo de personas jóvenes, está más familiarizada con el uso de la tecnología usada en el proyecto, lo que conlleva a que les sea más fácil intuir el funcionamiento así como la interacción con el ambiente virtual.

El proyecto presenta un límite, que es esencialmente un objetivo propuesto y el diseño del mismo: “ser lo más accesible económicamente hablando para llegar a una gran parte de la población”, es así que el proyecto se ha acotado a ciertas medidas técnicas del proyecto, las cuales pueden recibir mejoras futuras. Es decir, cuestiones como aspectos visuales de mayor calidad, han sido omitidos debido a la capacidad de procesamiento a los que va dirigido este proyecto, a los cuales no se les debe exigir demasiado costo computacional para mostrar añadidos visuales sin afectar el rendimiento de la aplicación y producir algún efecto negativo en la persona que la esté usando. Así mismo, el aspecto del sistema de físicas y el número de *GameObjects* con un componente *RigidBody*, pues este no sería capaz de soportar, para el dispositivo objetivo, los cálculos necesarios para una gran cantidad de ellos, es así que se redujo en la medida de lo posible este número y así evitar un efecto negativo en el rendimiento.

Un punto importante a resaltar en el desarrollo de la experimentación es la población con la que se realizaron dichas pruebas, debido a que por cuestiones de tiempo, horarios y factores externos al desarrollo de esta tesis, solo se pudo experimentar con un grupo reducido de edades similares. Esto no quiere decir que los resultados sean únicos o que apliquen para todos los rangos de edad, ya que dependiendo de los diferentes factores, los resultados pueden variar como es el caso del sujeto de prueba 1 en comparación con los demás sujetos de prueba, esto sucede principalmente a la brecha de edad que se presenta entre ellos.

Dentro de las varias mejoras que el proyecto pueda recibir, una de las principales

## 6. CONCLUSIONES

---

es la posibilidad de seleccionar el escenario a simular, pues en la aplicación se visualiza un ambiente virtual específico, esto abre las puertas a incluir algún lugar (existente o generado) y poder realizar una simulación de un sismo con la herramienta ya desarrollada en la tesis. La siguiente mejora es en relación a los parámetros para la ejecución del sismo, pues actualmente la aplicación tiene estos valores de manera precompilada, es decir, no se pueden modificar durante el uso de la misma, por lo que la posibilidad de modificar dichos parámetros antes de la simulación del sismo permitiría una mejora significativa para esta herramienta.

Los temas abarcados durante el desarrollo de ésta tesis, requieren de una tarea multidisciplinaria, es decir, no son solo los conocimientos aprendidos durante la carrera de Ingeniería en Computación, sino que se expanden a diversas disciplinas y nuevas áreas que no están directamente relacionadas con la carrera, pero que fueron necesarias para la elaboración de este proyecto, añadiendo nuevos panoramas, lo que mejoró sustancialmente el abanico de conocimientos y calidad del proyecto.

El principio fundamental de este simulador es que no solo se quede estancado como un proyecto final de tesis para obtener el grado de Ingeniero en Computación, sino que pueda penetrar en la población mexicana gracias al apoyo de las instituciones de protección civil y sea tomado en cuenta como un ejercicio serio dentro de los estándares en capacitación y adiestramiento dirigidos a todo público en general en la sociedad.

Como tareas a futuro se podrían desarrollar ciertas variantes que puedan ser similares a esta aplicación, puesto que partiendo de la misma base teórica con la que fue desarrollada “Tepeyollotl”, pueden crearse una docena de aplicaciones enfocadas a los diferentes desastres naturales, como lo son:

- Deslaves,
- Huracanes,
- Erupciones volcánicas,
- Tornados,
- Inundaciones,
- Tsunamis,
- Avalanchas, etc.

Esto abre las puertas a que las áreas de interés subsecuentes se expandan y puedan llegar a diferentes localidades o países, donde sean más frecuentes otros tipos de desastres naturales que, en comparación con México, no lo sean tanto o no lleguen a suceder debido a la posición geográfica y/o climas. Esto implica que los diversos escenarios se puedan tropicalizar en un entorno más real para la población local y así influir positivamente en la prevención de catástrofes o sucesos naturales alrededor del mundo.

---

Apéndice A

## Código/Manuales/Publicaciones

---

En esta sección de la tesis se muestran diferentes elementos de apoyo que surgieron a partir de la investigación profunda realizada a lo largo del desarrollo de la misma. El siguiente contenido visual e informativo es de carácter público y por tal motivo no interfiere con derechos de autor. Así mismo todo el material se encuentra referenciado en el apartado de Bibliografía.

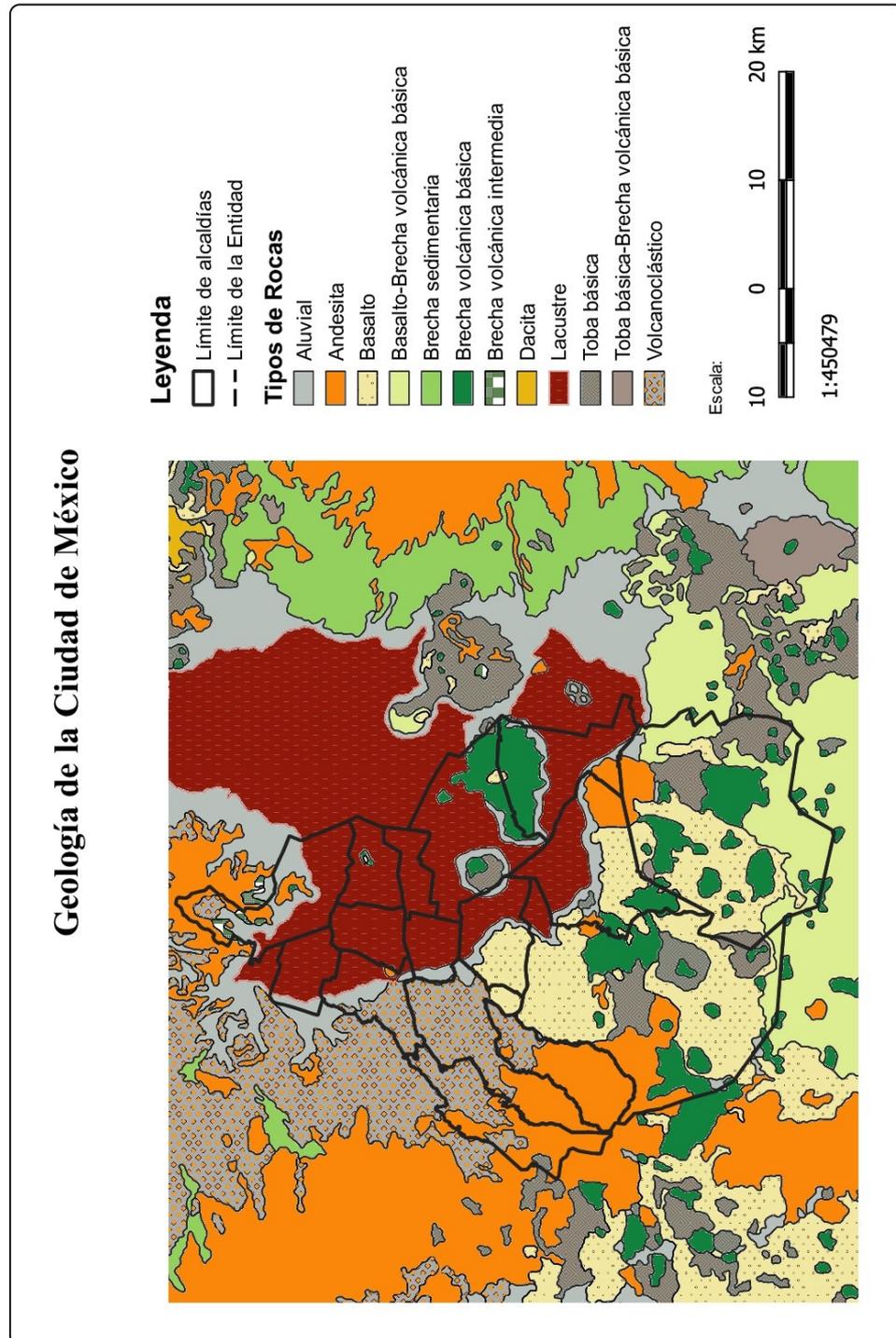
## A.1. Escala Mercalli

### ESCALA DE INTENSIDADES SISMICAS

#### **Escala de Mercalli modificada en 1931 por Harry O. Wood y Frank Neuman.**

- I. Sacudida sentida por muy pocas personas en condiciones especialmente favorables.
- II. Sacudida sentida sólo por pocas personas en reposo, especialmente en los pisos altos de los edificios. Los objetos suspendidos pueden oscilar.
- III. Sacudida sentida claramente en los interiores, especialmente en los pisos altos de los edificios, muchas personas no lo asocian con un temblor. Los vehículos de motor estacionados pueden moverse ligeramente. Vibración como la originada por el paso de un carro pesado. Duración estimable.
- IV. Sacudida sentida durante el día por muchas personas en los interiores, por pocas en el exterior. Por la noche algunas despiertan. Vibración de vajillas, vidrios de ventanas y puertas; los muros crujen. Sensación como de un carro pesado chocando contra un edificio, los vehículos de motor estacionados se balancean claramente.
- V. Sacudida sentida casi por todo el mundo; muchos despiertan. Algunas piezas de vajillas, vidrios de ventanas, etcétera, se rompen; pocos casos de agrietamiento de aplanados; caen objetos inestables. Se observan perturbaciones en los árboles, postes y otros objetos altos. Se detienen los relojes de péndulo.
- VI. Sacudida sentida por todo mundo; muchas personas atemorizadas huyen hacia afuera. Algunos muebles pesados cambian de sitio; pocos ejemplos de caída de aplanados o daño en chimeneas. Daños ligeros.
- VII. Advertido por todos. La gente huye al exterior. Daños sin importancia en edificios de buen diseño y construcción. Daños ligeros en estructuras ordinarias bien construidas; daños considerables en las débiles o mal planeadas; ruptura de algunas chimeneas. Estimado por las personas conduciendo vehículos en movimiento.
- VIII. Daños ligeros en estructuras de diseño especialmente bueno; considerable en edificios ordinarios con derrumbe parcial; grande en estructuras débilmente construidas. Los muros salen de sus armaduras. Caída de chimeneas, pilas de productos en los almacenes de las fábricas, columnas, monumentos y muros. Los muebles pesados se vuelcan. Arena y lodo proyectados en pequeñas cantidades. Cambio en el nivel del agua de los pozos. Pérdida de control en la personas que conducen autos.
- IX. Daño considerable en las estructuras de diseño bueno; las armaduras de las estructuras bien planeadas se desploman; grandes daños en los edificios sólidos, con derrumbe parcial. Los edificios salen de sus cimientos. El terreno se agrieta notablemente. Las tuberías subterráneas se rompen.
- X. Destrucción de algunas estructuras de madera bien construidas; la mayor parte de las estructuras de mampostería y armaduras se destruyen con todo y cimientos; agrietamiento considerable del terreno. Las vías del ferrocarril se tuercen. Considerables deslizamientos en las márgenes de los ríos y pendientes fuertes. Invasión del agua de los ríos sobre sus márgenes.
- XI. Casi ninguna estructura de mampostería queda en pie. Puentes destruidos. Anchas grietas en el terreno. Las tuberías subterráneas quedan fuera de servicio. Hundimientos y derrumbes en terreno suave. Gran torsión de vías férreas.

## A.2. Geología de la Ciudad de México



### A.3. Código Voronoi F.R.A.C.T.U.R.E

```

— * * * * *
— * FRACTURE VORONOI – v1.1 – april 2009 – 3ds max 9 *
— *
— * Divides an object in parts (Voronoi cells). *
— * – several iterations; *
— * – original UVs are preserved and 'projected' onto *
— * the new faces; *
— * – simple planar mapping is applied to a new channel *
— * and consistent throughout the new parts; *
— * – new material ID is applied to the new faces; *
— * – can keep intermediate generations; *
— * – can build hierarchy. *
— *
— * GARP – 2009 *
— * * * * *

```

```
(
    — start script
```

```

global rltFractureVoronoi
try destroyDialog rltFractureVoronoi catch()

rollout rltFractureVoronoi "F.R.A.C.T.U.R.E"
(
    groupBox boxSetUp "" pos:[5,0] width:116 height:83
    fn geometryFilter obj = superClassOf obj == GeometryClass
    pickButton pbObject "Pick Object" pos:[10,11]
    width:106 height:25 filter:geometryFilter tooltip:"object to
        fracture"
    spinner spnNbParts "Nb Parts: " pos:[09,41] width:106
    height:16 range:[2,1000,10] type:#integer enabled:false
    spinner spnNbIter "Iterations: " pos:[28,61] width:87
    height:16
    range:[1,10,1] type:#integer enabled:false

    groupBox boxMat "" pos:[5,81] width:116 height:89
    spinner spnNewID "New Mat ID:" pos:[24,93] width:91 height:16
    range:[1,100,1] indeterminate:true type:#integer enabled:false

```

```
checkBox cbKeepMat "Keep Material" pos:[12,110] checked:true
  enabled:false
spinner spnNewCh "New Map Ch:" pos:[32,133] width:83 height:16
  range:[1,10,3] type:#integer enabled:false
checkBox cbRWMS "R-W Map Size" pos:[12,150] checked:true
  enabled:false

groupBox boxHierarchy "" pos:[5,168] width:116 height:48
checkBox cbKeepGen "Keep Iterations" pos:[12,179] checked:
  false enabled:false
checkBox cbLinkGen "Build Hierarchy" pos:[12,196] checked:
  false enabled:false

groupBox boxCreate "" pos:[5,214] width:116 height:109
button btnCreate "Break in 10" pos:[10,225] width:106 height
:25 tooltip:"pick object first" enabled:false
radiobuttons rdoColor "" pos:[12,253] width:72 height:32
  labels:#("Multi Color","Uniform") default:1 columns:1
  enabled:false
colorPicker cpParts "" pos:[70,270] fieldWidth:20 height:12
  visible:false
radiobuttons rdoCenter "" pos:[12,288] width:72 height:32
  labels:#("B.Boxes Centers","Vo.Cells Centers") default:1
  columns:1 enabled:false

groupBox boxProgress "" pos:[5,321] width:116 height:49
progressBar pbProgress "" pos:[10,335] width:106 height:15
  value:0 color:[0,96,0]
label lblProStatus "" pos:[10,351] width:100 height:17

local theObject          -- holds the original object

on pbObject picked obj do
(
pbObject.text = obj.name
theObject = obj
spnNbParts.enabled = true
spnNbIter.enabled = true
spnNewID.enabled = true
cbKeepMat.enabled = true
spnNewCh.enabled = true
cbRWMS.enabled = true
```

```
cbLinkGen.enabled = true
btnCreate.enabled = true
btnCreate.tooltip = "start creating parts"
rdoColor.enabled = true
rdoCenter.enabled = true
cpParts.color = obj.wireColor
cpParts.visible = true

when obj deleted do
(
  btnCreate.enabled = false
  btnCreate.tooltip = pbObject.text + " has been deleted!"
  pbObject.text = "Pick Object"
)

undo off
(
  — gets new mat ID for new faces
m = edit_mesh()
addModifier obj m
spnNewID.value = amax(for i = 1 to obj.numfaces collect
  getFaceMatID obj i) + 1
deleteModifier obj m
)

) — end on btnMesh picked theMesh

on btnCreate pressed do
(
  undo off
  (
  disableSceneRedraw()
  clearSelection()
  start = timeStamp()

  local nbParts = spnNbParts.value
  local nbIter = spnNbIter.value
  local keepGen = cbKeepGen.checked
  local linkGen = cbLinkGen.checked
  local aPartsStart = #()
  local aPartsEnd = #()
  local aAllParts = #()
  local aAllCoords = #()
```

```
local thePlane = plane width:1 length:1 widthSegs:1 lengthSegs
:1      — plane helper for slice plane
local theMesh = editable_mesh()
local abortBreaking = false

lblProStatus.caption = " Breaking..."

—      BREAKING UP
—
— clean copy (no custom attributes, keyframes, weird
  transforms, etc
theCopy = copy theObject
theCopy.name = "toto"
resetXForm theCopy
convertToMesh theCopy
theMesh.mesh = theCopy.mesh
theMesh.transform = theCopy.transform
theMesh.pivot = [0,0,0]
resetXForm theMesh
convertToMesh theMesh
delete theCopy

— material and UVs
if cbKeepMat.checked do theMesh.material = theObject.material
addModifier theMesh (uvwMap mapChannel:spnNewCh.value
  realWorldMapSize:cbRWMS.checked)
convertToMesh theMesh
setFaceSelection theMesh #{}

— parts creation
aPartsEnd = #(theMesh)
for iter = 1 to nbIter while not abortBreaking do
(
aPartsStart = aPartsEnd
aPartsEnd = #()

for obj in aPartsStart while not abortBreaking do
(
aPartsTemp = for i = 1 to nbParts collect copy obj
pSys = pcloud emitter:obj formation:3 total_number:nbParts
  quantityMethod:1 viewPercent:100 seed:(random 0 100)
```

```
aCoords = for i = 1 to nbParts collect particlePos pSys i
  — fill with random coordinates
delete pSys
for i = 1 to nbParts - 1 do for j = i + 1 to nbParts while not
  abortBreaking do — for each pair of coords
(
thePlane.pos = (aCoords[i] + aCoords[j]) / 2
thePlane.dir = aCoords[j] - aCoords[i]

addModifier aPartsTemp[i] (sliceModifier slice_type:2)
addModifier aPartsTemp[j] (sliceModifier slice_type:3)
aPartsTemp[i].slice.slice_plane.transform = thePlane.transform
aPartsTemp[j].slice.slice_plane.transform = thePlane.transform
addModifier aPartsTemp[i] (cap_holes())
addModifier aPartsTemp[j] (cap_holes())
convertToMesh aPartsTemp[i]
convertToMesh aPartsTemp[j]

if keyboard.escPressed do abortBreaking = queryBox "Do you
  want to abort and delete already created parts?"
)
  — end i loop
aPartsEnd += aPartsTemp
aAllParts += aPartsTemp
aAllCoords += aCoords

total = nbParts * ((nbParts^nbIter - 1) / (nbParts - 1))
prog = 100 * aAllParts.count / total
pbProgress.value = prog
pbProgress.color = [200 - prog * 2, prog * 2, 0]
)
  — end obj loop
)
  — end iter loop

if not abortBreaking then
(
lblProStatus.caption = " Finalizing..."

—      TIDYING UP


---



delete theMesh
delete thePlane
hide theObject
```

```
— intermediate generations
if not keepGen and nbIter != 1 do
(
ind = 0
for i = 1 to nbIter - 1 do for j = 1 to nbParts^i do
(
ind += 1
delete aAllParts[ind]
aAllCoords[ind] = undefined
)
aAllParts = for obj in aAllParts where not isDeleted obj
collect obj
aAllCoords = for c in aAllCoords where c != undefined collect
c
)

— coordinates
if rdoCenter.state == 1 then centerPivot aAllParts
else for i = 1 to aAllParts.count do aAllParts[i].pivot =
aAllCoords[i]
resetXForm aAllParts
convertToMesh aAllParts

— new faces ID
newID = spnNewID.value
for obj in aAllParts do
(
for f in getFaceSelection obj do setFaceMatID obj f newID
setFaceSelection obj #{}
)

— names
if not keepGen or nbIter == 1 then
for i = 1 to aAllParts.count do aAllParts[i].name = theObject.
name + "_Part_" + i as string
else
(
for i = 1 to nbParts do aAllParts[i].name = theObject.name + "
_Part_" + i as string
indP = 0
indC = nbParts
for i = 1 to nbIter - 1 do for j = 1 to nbParts^i do
(
```

```
indP += 1
for k = 1 to nbParts do
(
indC += 1
aAllParts[indC].name = aAllParts[indP].name + "_" + k as
  string
)      -- end k loop
)      -- end j loop
)      -- end else

-- layers
-- (comment out this block if you don't want any layer,
  intermediate generations will not be hidden)
-- (FROM HERE...)
if not keepGen or nbIter == 1 then
(
if layerManager.getLayerFromName (theObject.name + "_Parts")
  == undefined then
theLayer = layerManager.newLayerFromName (theObject.name + "
  _Parts")
else theLayer = layerManager.getLayerFromName (theObject.name
  + "_Parts")
for obj in aAllParts do theLayer.addNode obj
)      -- end if
else
(
aTheLayers = for i = 1 to nbIter collect
(
if layerManager.getLayerFromName (theObject.name + "_Gen_" + i
  as string) == undefined then
layerManager.newLayerFromName (theObject.name + "_Gen_" + i as
  string)
else layerManager.getLayerFromName (theObject.name + "_Gen_" +
  i as string)
)
for i = 1 to nbIter - 1 do aTheLayers[i].isHidden = true
ind = 0
for i = 1 to nbIter do for j = 1 to nbParts^i do
(
ind += 1
aTheLayers[i].addNode aAllParts[ind]
)      -- end i loop
)      -- end else
```

```
— (...TO HERE)

— hierarchy
if linkGen do
(
if not KeepGen or nbIter == 1 then for obj in aAllParts do
attachObjects theObject obj move:false
else
(
for i = 1 to nbParts do attachObjects theObject aAllParts[i]
move:false
indP = 0
indC = nbParts
for i = 1 to nbIter - 1 do for j = 1 to nbParts^i do
(
indP += 1
for k = 1 to nbParts do
(
indC += 1
attachObjects aAllParts[indP] aAllParts[indC] move:false
) — end k loop
) — end j loop
) — end else
) — end if linkGen

— colors
if rdoColor.state == 1 then for obj in aAllParts do obj.
wireColor = random black white
else aAllParts.wireColor = cpParts.color

lblProStatus.caption = " Done in " + (formattedPrint ((
timestamp() - start) / 1000.0) format:".1f") + "sec."

enableSceneRedraw()
completeRedraw()
)
else
(
delete thePlane
delete theMesh
delete aAllParts
pbProgress.value = 0
lblProStatus.caption = " Stopped"
```

```
enableSceneRedraw()
)      — end test abortBreaking

)      — end undo off

)      — end btnCreate pressed

on spnNbParts changed val do
(
btnCreate.caption = "Break in " + ((val ^ spnNbIter.value) as
string)
)

on spnNbIter changed val do
(
btnCreate.caption = "Break in " + ((spnNbParts.value ^ val) as
string)
cbKeepGen.enabled = val != 1
)

on rltFractureVoronoi close do
(
enableSceneRedraw()
CompleteRedraw()
callbacks.removeScripts id:#FVcbID01
)

)      — end rollout rltFractureVor

createDialog rltFractureVoronoi 126 375 60 130

)      — end script
```

#### A.4. Fragmento del código que calcula el porcentaje de seguridad

```
if (TiempoUtil == 0f)
{
    PorcentajeSeguridad = 50f;
}
else
{
    PuntuacionTotal = Mathf.Abs(PuntuacionMayorRiesgo)
        + PuntuacionMenorRiesgo;
    float nivelMaximo = Mathf.Max(new float [] {
        PuntuacionVentana, PuntuacionBano,
        PuntuacionEscaleras, PuntuacionZotehuela,
        PuntuacionEstancia, PuntuacionMueble,
        PuntuacionGarage });
    // establecemos el valor del 50%
    float mitad = TiempoUtil * nivelMaximo;
    // ahora el del 100%
    float valorMax = mitad * 2f;
    // operamos dependiendo valor
    float valor;
    if (Mathf.Abs(PuntuacionMayorRiesgo) >
        PuntuacionMenorRiesgo)
    {
        // Restamos
        valor = mitad - PuntuacionTotal;
    }
    else
    {
        //Sumamos
        valor = mitad + PuntuacionTotal;
    }
    // Calculamos regla de 3
    // valorMax -> 100% (1.0f)
    // valor    -> ?   (0.0f)
    PorcentajeSeguridad = (valor * 100f) / valorMax;

    // Limitar
    if (PorcentajeSeguridad >= 95f)
    {
```

```
        PorcentajeSeguridad = 95f;
    }
    else if (PorcentajeSeguridad <= 5f)
    {
        PorcentajeSeguridad = 5f;
    }
}
// Convertir a rango 0.0-1.0
PorcentajeSeguridad = PorcentajeSeguridad * 0.01f;

int acciones = 0;
if (GameManager.instance.mochilaTomada)
{
    acciones++;
}
if (!GameManager.instance.luzEncendida)
{
    acciones++;
}
if (!GameManager.instance.gasAbierto)
{
    acciones++;
}
if (acciones > 0)
{
    float score;
    if (PorcentajeSeguridad >= 0.5f)
    {
        score = ((4 - acciones) + PorcentajeSeguridad)
            / (5 - acciones);
    }
    else
    {
        score = (4 - acciones) / (4 - acciones +
            PorcentajeSeguridad);
    }

    PorcentajeSeguridad = PorcentajeSeguridad + (1 -
        score);
}

// Pasar de nuevo a rango 0-100
PorcentajeSeguridad *= 100f;
```

# Bibliografía

---

- [1] 3ds Max (2018). 3ds max. <https://www.autodesk.mx/education/free-software/3ds-max>. [En línea; accesado el 21-Agosto-2018]. 95
- [2] Adolph, M. (2009). Itu-t techwatch alert, mobile applications. [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-t/oth/23/01/T230100000C0004PDFE.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/oth/23/01/T230100000C0004PDFE.pdf). [En línea; accesado el 01-Julio-2018]. 36
- [3] Alamilla, R. (2018). Ecosistema competitivo del mercado de smartphones al cierre de 2017. <https://www.theciu.com/publicaciones-2/2018/5/7/ecosistema-competitivo-del-mercado-de-smartphones-al-cierre-de-2017>. [En línea; accesado el 15-Julio-2018]. 38
- [4] Alejandro, M. R. (1985). La política urbana en la ciudad de México. *Problemas del Desarrollo, Instituto de Investigaciones Económicas, Universidad Nacional Autónoma de México*, 16(62-3). 26
- [5] Anónimo (2009). Fracture voronoi. <http://www.scriptspot.com/3ds-max/scripts/fracture-voronoi>. [En línea; accesado el 1-Abril-2018]. 97
- [6] Atienza, V. (2013). *Los sismos: una amenaza cotidiana*. La Caja de Cerillos Ediciones. 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 45, 48, 49, 51, 54
- [7] BUHOsoft (2018). vrbox. <http://www.vr-box.es/>. [En línea; accesado el 2-Noviembre-2018]. 105
- [8] CENAPRED (2014). Manual de protección civil. <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/293-MANUALDEPROTECCINCIVIL.PDF>. [En línea; accesado el 1-Agosto-2018]. 52
- [9] CENAPRED (2015). Nom-003-segob-2011, señales y avisos para protección civil.- colores, formas y símbolos a utilizar. <http://www.cenapred.gob.mx/es/documentosWeb/Enaproc/Presentacionsena.pdf>. [En línea; accesado el 28-Enero-2019]. 58

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [10] COURSERA (2018). Evaluación de peligros y riesgos por fenómenos naturales. <https://es.coursera.org/learn/riesgos-fenomenos-naturales>. [En línea; accesado el 30-Abril-2018]. 33
- [11] Craighead, J., Burke, J., and Murphy, R. (2008). Using the unity game engine to develop sarge: a case study. In *Proceedings of the 2008 Simulation Workshop at the International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2008)*. 94
- [12] Dashner, J. (2014). *The Eye of Minds (The Mortality Doctrine, Book One)*. Ember. 40
- [13] de Prevención de Desastres, C. N. (2017). Prepara una mochila de emergencia para toda la familia. <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/prepara-una-mochila-de-emergencia-para-toda-la-familia>. [En línea; accesado el 22-Junio-2018]. 55, 57
- [14] de Riesgos Naturales, E. E. (2018). Calcula tu riesgo. <http://serv.ern.com.mx:86/>. [En línea; accesado el 5-Julio-2018]. v, 63
- [15] del Distrito Federal, A. L. (2017). La ley para la reconstrucción, recuperación y transformación de la ciudad de México en una cada vez más resiliente. <http://www.aldf.gob.mx/archivo-05ef73e68fe4de6ce1dfff11c3588fde.pdf>. [En línea; accesado el 12-Junio-2018]. 55
- [16] del Trabajo y Prevención Social, S. (2012). Marco normativo de seguridad y salud en el trabajo. <http://asinom.stps.gob.mx:8145/Centro/CentroMarcoNormativo.aspx>. [En línea; accesado el 13-Agosto-2018]. 57
- [17] Developers., G. (2018a). Cardboard — google vr — google developers. <https://developers.google.com/vr/discover/cardboard>. [En línea; accesado el 10-Noviembre-2018]. 70
- [18] Developers., G. (2018b). Cardboard — google vr — google developers. <https://developers.google.com/vr/discover/cardboard>. [En línea; accesado el 10-Noviembre-2018].
- [19] DOBLEVIA (2007). Rumbo y azimut. <https://doblevia.wordpress.com/2007/03/19/rumbo-y-azimut/>. [En línea; accesado el 20-Enero-2019].
- [20] Dávila, Z. R. D. (2011). Posgrado en ciencias de la tierra, centro de geociencias. *UNAM-CAMPUS Juriquilla*, pages 32–36. 51
- [21] Escartín, E. R. (2000). La realidad virtual, una tecnología educativa a nuestro alcance. *Píxel-Bit. Revista de Medios y Educación*, 15:5–21. 40, 41
- [22] Espíndola, J. (1994). *Terremotos y ondas sísmicas*, volume 1. UNAM. 50

- 
- [23] Exxon (2016). Sakhalin-1 project overview. [https://cdn.sakhalin-1.com/~media/sakhalin/files/publications/sakhalin1\\_overview\\_brochure\\_2016.pdf](https://cdn.sakhalin-1.com/~media/sakhalin/files/publications/sakhalin1_overview_brochure_2016.pdf). [En línea; accesado el 25-Julio-2018]. 46
- [24] Fernández, J. L. (2013). Efecto doppler. <https://www.fisicalab.com/apartado/efecto-dopplercontenidos>. [En línea; accesado el 8-Diciembre-2018]. 79
- [25] García, S. A. G. (2017). Avances recientes en las metodologías para la evaluación estructural de edificaciones típicas. [http://www.smie.org.mx/SMIE\\_Articulos/co/co\\_17/te\\_08/ar\\_17.pdf](http://www.smie.org.mx/SMIE_Articulos/co/co_17/te_08/ar_17.pdf). [En línea; accesado el 22-Agosto-2018]. v, 60, 65
- [26] García, M. L. and Ortega, J. G. M. (2007). Las tic en la enseñanza de la biología en la educación secundaria: los laboratorios virtuales. *Revista electrónica de enseñanza de las ciencias*, 6(3):562–576. 40
- [27] Google (2018). Play store. <https://play.google.com/store/apps>. [En línea; accesado el 15-Julio-2018]. v, 36
- [28] Inc., A. (2018). App store. <https://www.apple.com/mx/ios/app-store/>. [En línea; accesado el 15-Julio-2018]. v, 37
- [29] INEGI (2015). Información para niños y no tan niños. <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/df/poblacion/>, year=201. [En línea; accesado el 3-Marzo-2018]. 28
- [30] Jordan, T. H. (1979). Structural geology of the earth's interior. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 76(9):4192–4200. 45, 46
- [31] la Torre., G. C. D. (1971). Física. *México: Progreso S.A.* 79
- [32] León-Portilla, M. (1985). *Los franciscanos vistos por el hombre náhuatl: testimonios indígenas del siglo XVI*. Universidad Nacional Autónoma de México. 45
- [33] Levy, K. (2014). Google figured out how to turn any phone into a virtual reality headset for next to nothing. <https://www.businessinsider.com/google-cardboard-2014-6>. [En línea; accesado el 8-October-2018]. 105
- [34] Linera, F. W. (2008). Estudios para la reducción de daños por sismos en las construcciones del estado de veracruz. *Universidad Veracruzana*. 22
- [35] M., M. C. V. (2017). Memoria de cálculo para el reforzamiento del edificio rancho san lorenzo 32, coyoacán, ciudad de méxico. [CVM Diseño y Proceso Numérico]. 60, 62
- [36] Murota, T. et al. (1995). Concepto de la regulación del diseño sísmico de construcciones en japon. *México. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). feb. 1995. México, DF MX*. 26

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [37] Ángel Vargas Espinosa, M. (2017). Apuntes de la materia de desarrollo de interfaces multimedia y realidad virtual. *José Roque Román Guadarrama - UNAM - Facultad de Ingeniería*. 40
- [38] Orozco Narváez, R. A. (2007). Revisión a 50 años de los daños ocasionados en la ciudad de México por el sismo del 28 de julio de 1957 con ayuda de investigaciones recientes y sistemas de información geográfica. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61807604>. [En línea; accesado el 29-Abril-2018]. 23
- [39] Piralla, R. M. and Meli, R. (2001). *Diseño estructural*. Editorial Limusa. 59
- [40] Pressman, R. S. and Troya, J. M. (1988). *Ingeniería del software*. 112
- [41] Program, U. E. H. (2018). How much bigger...? calculator. <https://earthquake.usgs.gov/learn/topics/calculator.php>. [En línea; accesado el 25-Junio-2018]. 22
- [42] Project., M. (2019). Home — mono. <https://www.mono-project.com/>. [En línea; accesado el 15-Enero-2019]. 79
- [43] Reitherman, R. (2014). Earthquake mythology. *2014 CUREE Calendar*. 44
- [44] SECRETARÍA DE PREVENCIÓN, A. Y. S. U. (2018). Capacitación en protección civil. <http://www.seguridadyproteccion.unam.mx/PC3/capacitacion.php>. [En línea; accesado el 29-Abril-2018]. 32
- [45] (SGM), S. G. M. (2018). Geología de la ciudad de México. <https://www.gob.mx/sgm>. [En línea; accesado el 20-Diciembre-2018]. 62
- [46] Sánchez Correa, Mara; Islas Arredondo, I. (2017). Recuento de los daños 7s y 19s: a un mes de la tragedia. <http://bit.do/eFHTp>. [En línea; accesado el 14-Marzo-2018]. 22
- [47] Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, A. (2017). Normas para la rehabilitación sísmica de edificios de concreto dañados por el sismo del 19 de septiembre de 2017. <http://www.smie.org.mx/informacion-tecnica/reglamentos-construccion-mexico.php?estado=ciudad-de-mexico>. [En línea; accesado el 8-Agosto-2018]. 54
- [48] Spence, L. (1994). *The myths of Mexico and Peru*. Courier Corporation. 45
- [49] STCONAPRA (2017). Manual de protección civil ante casos de emergencia, contingencias y desastres del stconapra. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/252641/Manual\\_de\\_Proteccion\\_Civil\\_STCONAPRA.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/252641/Manual_de_Proteccion_Civil_STCONAPRA.pdf). [En línea; accesado el 3-Agosto-2018]. 57
- [50] SUÁREZ, G. (1991). El sismo de jalapa del 3 de enero de 1920. <http://www.smis.mx/index.php/RIS/article/view/290>. [En línea; accesado el 28-Febrero-2018]. 21

- [51] Technologies, U. (2018a). Light types - unity. <https://unity3d.com/es/learn/tutorials/topics/graphics/light-types>. [En línea; accesado el 12-Noviembre-2018]. 72, 74, 75
- [52] Technologies, U. (2018b). Unity - manual: Baked lighting. <https://docs.unity3d.com/Manual/LightMode-Baked.html>. [En línea; accesado el 15-Noviembre-2018]. 77
- [53] Technologies, U. (2018c). Unity - manual: Cameras. <https://docs.unity3d.com/Manual/CamerasOverview.html>. [En línea; accesado el 10-Noviembre-2018]. 71
- [54] Technologies, U. (2018d). Unity - manual: Physics. <https://docs.unity3d.com/Manual/PhysicsSection.html>. [En línea; accesado el 27-Noviembre-2018]. 80
- [55] Technologies, U. (2018e). Unity - manual: Real-time lighting. <https://docs.unity3d.com/Manual/LightMode-Realtime.html>. [En línea; accesado el 12-Noviembre-2018]. 76
- [56] UNAM (2013). Sismos históricos: Sismos de 1932 (m 8.2, m 7.8 y m 6.9). [http://www.ssn.unam.mx/jsp/reportesEspeciales/sismos\\_de\\_1932.pdf](http://www.ssn.unam.mx/jsp/reportesEspeciales/sismos_de_1932.pdf). [En línea; accesado el 3-Mayo-2018]. 20
- [57] Unity (2018a). Codificación en c sharp en unity para principiantes. <https://unity3d.com/es/learning-c-sharp-in-unity-for-beginners>. [En línea; accesado el 20-Julio-2018]. 43
- [58] Unity (2018b). Unity 5.0. <https://unity3d.com/es/unity/whats-new/unity-5.0>. [En línea; accesado el 20-Julio-2018]. 42
- [59] UNITY, U. (2018a). Materiales, shaders y texturas. <https://docs.unity3d.com/es/current/Manual/Shader.html>. [En línea; accesado el 1-October-2018]. 98
- [60] UNITY, U. (2018b). Requisitos del sistema para la unity versión. <https://unity3d.com/es/unity/system-requirements>. [En línea; accesado el 21-Agosto-2018]. 94
- [61] UNITY-Documentation, U. (2018). Skybox manual. <https://docs.unity3d.com/es/current/Manual/class-Skybox.html/>. [En línea; accesado el 17-Agosto-2018]. 89
- [62] Vygotski, L. (1984). Aprendizaje y desarrollo intelectual en la edad escolar. *Infancia y aprendizaje*, 7(27-28):105–116. 40
- [63] Web, O. (2017). La construcción en la cdmx tiene nuevas normas complementarias. <https://obrasweb.mx/construccion/2017/12/18/la-construccion-en-la-cdmx-tiene-nuevas-normas-complementarias>. [En línea; accesado el 1-Julio-2018]. 55

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [64] Xiaomi (2018). Redmi s2. <http://www.vr-box.es/>. [En línea; accesado el 2-  
Noviembre-2018]. 109