

Simulación y evaluación del comportamiento de peregrinos guadalupanos en un evento de sismo para planificar rutas de evacuación

José Abraham Montelongo Campos, Héctor Rafael Orozco Aguirre

Universidad Autónoma del Estado de México,
Centro Universitario UAEM Valle de México,
México

jmontelongoc414@alumno.uaemex.mx, {hrorozco,
mquintanal}@uaemex.com

Resumen. La Basílica de Guadalupe cada año recibe a millones de peregrinos desde diversas partes del mundo. En caso de que se presente una situación de riesgo como un sismo, esta pudiera representar que peregrinos sufran un accidente e incluso fallezcan. En este artículo, se propone hacer uso de la plataforma AnyLogic y de su biblioteca de peatones para modelar y simular el comportamiento de peregrinos en un escenario 3D que represente a la Basílica de Guadalupe y sus alrededores. Se provocará una situación de sismo y se evaluará el comportamiento de los peregrinos tomando como caso de estudio el día 12 de diciembre que es cuando se celebra su fiesta anual y cuando acude una mayor concentración de personas. Esto permitirá las rutas de evacuación existentes y conocer los efectos provocados por la situación de riesgo.

Palabras clave: Agente, comportamiento, multitud, situación de riesgo.

Guadalupan Pilgrims' Behavior Simulation and Evaluation in an Earthquake Event for Planning Evacuation Routes

Abstract. Every year the Basilica of Guadalupe receives millions of pilgrims from different parts of the world. In the case of a risky situation such as an earthquake, this could represent that pilgrims suffer an accident and even die. In this paper, it is proposed to use the AnyLogic platform and its pedestrian library to model and simulate the pilgrims' behavior in a 3D scenario that represents the Basilica of Guadalupe and its surroundings. An earthquake will be provoked, and the behavior of the pilgrims will be evaluated taking as a case study the 12th of December which is when their annual festival is celebrated and when a greater concentration of people comes. This will allow evaluating the existing evacuation routes and knowing the effects caused by the risk situation.

Keywords: Agent, behavior, crowd, risk situation.

1. Introducción

La importancia de las simulaciones de evacuación para peatones en conjunto como una multitud es generalmente aceptada para diseñar edificios y para garantizar una buena seguridad en eventos masivos, donde pueda requerirse de una o más rutas de evacuación frente a una situación de riesgo o peligro como un desastre natural, por ejemplo, una inundación o terremoto, o bien, ante un acto terrorista. Se han desarrollado múltiples modelos para la simulación de peatones en las últimas décadas, entre los más populares que han sido empleados se encuentran los modelos basados en la fuerza, los autómatas celulares y las variaciones de los modelos de comportamiento y dirección de Reynold [1]. No obstante, en los últimos años, se han empleado otras alternativas que se adaptan mejor a la simulación de la dinámica de grupos en una sociedad, donde la más destacada es el empleo de los sistemas multiagente (SMA).

La simulación basada en agentes (SBA) se ha extendido a muchas áreas, incluida la sociología, biología, economía, física, química, ecología, aplicaciones industriales y simulación de multitudes en situaciones de riesgo o peligro como evacuaciones y desastres naturales. Para la mayoría de estas áreas, la SBA está reemplazando gradualmente las técnicas de microsimulación y la simulación orientada a objetos. Esto es debido a la capacidad de la SBA para capturar diferentes modelos dinámicos que generalmente consisten en interacciones entre entidades simples, conocidas como agentes a las cuales se les puede asignar un comportamiento individual o colectivo de manera estática o dinámica.

En [2], se dice que para reconocer una situación de riesgo y gestionar una evacuación exitosa de una multitud, entran en escena tres etapas clave como sigue:

1. Interpretación: se refiere al tiempo necesario para que miembros de una multitud puedan reconocer que existe un peligro para la misma.
2. Preparación: es el tiempo necesario para que cada miembro, o bien, un subgrupo de la multitud pueda decidir el curso de acción más apropiado.
3. Acción: es todo aquello que impacta en la eficiencia de la evacuación. Se refiere al tiempo que tardan una multitud en realizar una evacuación de un lugar, o bien, un traslado a otro sitio.

Acorde a [3], los criterios clave que pueden caracterizar de forma conjunta a una multitud son los siguientes:

- Tamaño: número de individuos reunidos.
- Densidad: multitud localizada en un área en particular.
- Tiempo: período de tiempo mensurable en el cual se reúne una multitud.
- Colectividad: tienen en común una identidad social, o bien, los mismos objetivos e intereses.

Los peregrinos representan un caso muy particular de multitud que comparte una misma ideología religiosa. Siendo estos en los cuales este artículo se centra. La Basílica Guadalupe (BG) ubicada en la Ciudad de México (CDMX) en México es uno de los lugares con más concentraciones de personas en el mundo, en donde más de 6 millones de personas acuden en peregrinación cada 12 de diciembre [4], fecha en que se festeja a la Virgen de Guadalupe, dejando una derrama económica de millones de pesos.

Al año se calcula que cerca de 20 millones entre peregrinos y visitantes acuden a ella [5], lo cual indica que cada día en promedio se concentran como multitud 54794.52 personas, cifra que excede en más de 5 veces la capacidad máxima de la BG en su interior que es 10 mil personas [6]. Una multitud de esta magnitud puede estar en peligro ante una situación de riesgo como lo puede ser un sismo, en la cual se pudieran perder vidas, o bien, resultar un considerable número de personas lesionadas por la estampida provocada ante una evacuación. Una estrategia de evacuación apropiada puede ayudar a resolver el problema y reducir aún más el riesgo de causalidades [7].

El antecedente más cercano a un evento de sismo como el que se simula en este artículo ocurrió el día 10 de diciembre de 2011, registrado a las 19:47:25 hora local (01:47, hora GMT), con magnitud de 6.5 grados Richter (recalculada) y con coordenadas de 17.85 N y 99.98 W a una profundidad de 58 km, el epicentro se ubicó a 55 km al NW de Chilpancingo, Guerrero. El movimiento fue fuertemente sentido en los estados de Guerrero, Oaxaca, Michoacán, Morelos, Puebla, Tlaxcala, D.F. e Hidalgo [8]. Como incidente mayor se tuvo el fallecimiento de tres personas a causa del sismo, un menor de 11 años y dos adultos [9]. Este artículo se centra en la simulación de dichos eventos para intentar prevenir el fallecimiento de personas.

El Centro de Comando, Control, Cómputo, Comunicaciones y Contacto Ciudadano de la CDMX, conocido como C5, el cual actualmente ofrece los servicios de: video monitoreo, altavoces, servicio de atención de llamadas de emergencia 911 CDMX, denuncia anónima 089 y LOCATEL 5658 1111. Todos los servicios del C5 operan las 24 horas, los 365 días del año. Los altavoces que tienen diversas cámaras de videovigilancia de la CDMX son una herramienta de difusión que permiten transmitir alertas e información de seguridad a la ciudadanía como: sismos, incidentes de alto riesgo, incluso el voceo de personas extraviadas [10] Además, cuenta con la Alerta Sísmica, la cual se activará cuando se detecte algún sismo que por su magnitud ponga en riesgo a la CDMX. También, cuenta con una aplicación para teléfonos inteligentes con sistema operativo iOS o Android, que conecta a las y los usuarios directamente al 911 de la CDMX, puede ser por llamada telefónica convencional o silenciosa y por chat [11].

En mayo de 1986, ocho meses después de los sismos de septiembre de 1985 que impactaron gravemente a la CDMX, se creó el Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC), con la finalidad de establecer un sistema que permitiera a las autoridades y a la sociedad civil coordinarse de una manera eficiente y rápida en caso de un desastre [12]. El SINAPROC reúne métodos y procedimientos entre las dependencias del Gobierno de la República Mexicana, organizaciones de los diversos grupos voluntarios, sociales, privados y con las autoridades de la CDMX, de los estados y los municipios. Su propósito es efectuar acciones coordinadas para la protección de la población contra los peligros que se presenten en nuestro territorio, ya sean de origen natural, como los sismos o huracanes, o aquellos originados por la actividad humana que puedan eventualmente terminar en un desastre.

La responsabilidad principal del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) consiste en apoyar al SINAPROC en los requerimientos técnicos que su operación demanda [13]. Sin embargo, no es sencillo el identificar un plan de acción óptimo basado en las limitaciones físicas del espacio urbano circundante, sobre todo de la capacidad de atención de los puntos de ingreso/egreso a la BG y los edificios a su alrededor.

Para poder lidiar con el problema antes descrito, el análisis, modelado y simulación de multitudes [14] mediante un SMA y la SBA ofrece una buena alternativa de solución ya que permite analizar y simular el comportamiento individual, o bien, colectivo de los peregrinos representados por agentes autónomos, tanto a una escala micro como a una macro. En este artículo, se emplea a la plataforma AnyLogic [15] para tales efectos, puesto que permite crear entornos virtuales de simulación a manera de escenarios 2D/3D, poblarlos con agentes, predefinir comportamientos para estos, o bien, generarlos de manera dinámica acorde a situaciones provocadas en el entorno, obtener estadísticas, entre más como analizar el comportamiento de los agentes. Con ello, es posible simular y evaluar situaciones de riesgo para juzgar sobre las ubicaciones más convenientes de puntos de evacuación (ingreso/egreso), rutas de evacuación a seguir y capacidad ideal de tales puntos. De esta manera, se creará un caso de estudio para simular y evaluar estrategias de evacuación de peregrinos ante una situación de riesgo representada por un sismo.

Con el uso de la Biblioteca de Peatones de AnyLogic (BPA) como herramienta de simulación y análisis de multitudes se permite modelar, visualizar y analizar con precisión el comportamiento de los flujos de multitudes en un entorno físico y eliminar sus posibles ineficiencias. Un peatón en un modelo AnyLogic se mueve de acuerdo con reglas físicas simuladas. Interactúa con los objetos circundantes, como paredes y escaleras, y evita posibles colisiones. Se pueden preasignar peatones con propiedades, preferencias y estados individuales. El conjunto de herramientas de la biblioteca incluye un mapa de densidad de flujo, contadores de peatones y elementos para calcular los tiempos de espera y servicio. La BPA es útil al simular dinámicas peatonales en entornos urbanos como lo es la BG. En una etapa preliminar de diseño del escenario virtual, los modelos de simulación de peatones ayudarán a evaluar la capacidad del entorno real para hacer frente a una carga planificada y cumplir con los requisitos de seguridad ante una evacuación por sismo. Las capacidades de la BPA serán fundamentales al evaluar problemas de capacidad, movilidad y accesibilidad. Durante la simulación del sismo y la concierne evacuación, la herramienta de gestión de multitudes permitirá probar los cambios planificados y determinar la mejor ubicación de una ruta de evacuación.

2. Trabajos relacionados

Las grandes concentraciones de personas son un riesgo de seguridad, ya que no existe una mejor estrategia real para poner rápidamente a salvo a grandes cantidades de personas en caso de emergencia. Es probable que haya cuellos de botella cuando la multitud se mueva a través de las puertas, por ejemplo. La evacuación prolongada de la multitud puede llevar a las personas a estar expuestas a peligros por más tiempo. Un movimiento masivo impulsivo de personas, una estampida, también puede ser peligroso en sí mismo. No solo evitará un escape efectivo: también puede provocar lesiones aplastantes. Las personas a menudo entran en pánico en situaciones que justifican la evacuación y, como tal, el daño físico puede llegar a las personas ya que la multitud se empujará violentamente o incluso se atropellará entre sí [16].

Ante un sismo o terremoto, la falla de los componentes no estructurales y los desastres secundarios inducidos por la caída de escombros siguen siendo un problema

grave, lo que hace que la evacuación al aire libre sobre calles o carreteras sea más peligrosa. En [17], se propone un marco de simulación de evacuación de peatones que considera los escombros que caen inducidos por un terremoto, y también se establece un modelo de predicción asociado para calcular la distribución de escombros. Se adopta un modelo de fuerza social para realizar la simulación de una evacuación. Se realiza un caso de estudio del área de enseñanza ubicada en el campus de la Universidad de Tsinghua en China. El método propuesto puede ayudar a identificar áreas de alto riesgo entre las carreteras de evacuación, así como a proporcionar una base científica para la planificación urbana futura y el desarrollo de simulacros de evacuación de emergencia.

Los científicos sociales han criticado los modelos computacionales de flujos de peatones por su tratamiento de las multitudes psicológicas como meras agregaciones de individuos. De hecho, la mayoría de los modelos de dinámica de evacuación utilizan analogías de la física donde los peatones se consideran partículas. Si bien esto garantiza que los resultados de la simulación coincidan con fenómenos físicos importantes, como la desaceleración de la multitud con una densidad creciente, se ignoran los fenómenos sociales, como los procesos grupales. De acuerdo con lo dicho en [18], el contar con un buen modelo de locomoción realista es de vital importancia en escenarios de simulación de evacuaciones de peatones. Sin embargo, se suelen dejar de lado el contemplar aspectos del comportamiento social. Dicho de otra manera, estos aspectos y sus efectos han sido ampliamente examinados en la investigación empírica por psicólogos sociales, pero a menudo están ausentes en los modelos computacionales.

En una multitud, las personas tienen identidades sociales que comparten entre sí. El proceso de auto categorización determina las normas dentro de la multitud e influye en cómo las personas se comportarán en situaciones de evacuación. En la propuesta que fue dada en [1], se formula la aplicación de la identidad social en la simulación de peatones algorítmicamente. El objetivo es examinar si es posible trasladar el modelo psicológico a modelos computacionales de movimiento de peatones para que los resultados de la simulación correspondan a las observaciones de la psicología de masas. Esta propuesta fue restringida a un escenario específico que fue investigado a fondo por psicólogos de masas: el bombardeo y la posterior evacuación de un vagón subterráneo de Londres el 7 de julio de 2005.

Un ejemplo de un modelo de movimiento de peatones que incorpora el comportamiento social y psicológico es dado en [19]. Sin embargo, su enfoque está en la implementación del modelo y no en intentar emular los hallazgos empíricos de la psicología. La distancia de los modelos a las teorías subyacentes, la falta de información de modelado detallada y la cantidad de parámetros para calibrar, hacen que sea casi imposible replicar los modelos y compararlos con las observaciones. La representación de las trayectorias de peatones en [20] se enumeran y se definen brevemente los parámetros elegidos para el vector de entrada que se utilizará en cada uno de los algoritmos empleados para determinar la trayectoria del peatón. Estos parámetros se pueden dividir en dos grupos: parámetros descriptivos y parámetros estadísticos.

La implementación de las características/cualidades de un pasajero partimos de la definición que Anylogic da al Pedestrian, o viandante, denominado Ped (Pedestrian), están compuestas por una capacidad de aceleración y deceleración de movimiento, una velocidad de movimiento, y un ámbito de influencia [21]. En [7] proponen el uso de AnyLogic que incluye una biblioteca peatonal que se ocupa principalmente de diferentes aspectos de modelado de simulación de multitudes.

En [22] un modelo generalmente se prueba en varios escenarios de rendimiento. Cuando se considera un número tan grande de escenarios bajo evaluación, los datos pueden acumularse muy rápidamente y deben ganar cierta estructura dentro del sistema. Esto significa que se necesitan ciertos mecanismos para que este tipo de sistema maneje las grandes cantidades de datos generados e información estructurada. Como tal, es importante describir la diferencia entre los dos tipos de modelos en uso:

- Modelos estáticos: versiones de los modelos de edificios bajo evaluación de diseño.
- Modelos dinámicos: extensiones de los modelos estáticos, que aportan datos, información y conocimientos relacionados con el análisis adicional.

En la simulación propuesta en AnyLogic por [7], un modelador puede diseñar entornos espaciales para cualquier gran multitud. La geometría espacial se puede modelar con precisión hasta la escala de un entorno del mundo real. Además, el modelador puede utilizar el enfoque del MBA para describir la naturaleza de los individuos y sus interacciones en una multitud, definiendo atributos, por ejemplo, edad, peso, género, etc. AnyLogic proporciona varias distribuciones de probabilidad para inicializar una población de agentes y generar aleatoriamente valores iniciales de estos atributos basados en una distribución de probabilidad seleccionada. El comportamiento de los agentes se controla mediante diagramas de flujo de estado con transiciones activadas por tiempo o activadas por eventos [15].

3. Metodología

De acuerdo con [22], representar el conocimiento sobre el proceso de creación y análisis de escenarios de simulación de multitudes es un paso requerido para facilitar la minería de conocimiento. Esto generalmente requiere varias iteraciones de modelado y análisis y se basa en los modelos de información. Existen dos procesos principales involucrados:

1. Generación de escenarios: el proceso de comprender, las áreas y el entorno de los edificios para crear escenarios de simulación válidos a partir de esto, donde se hacen varias suposiciones de acuerdo con los requisitos de análisis.
2. Análisis de retroalimentación: el proceso de analizar los resultados del escenario y proporcionar retroalimentación para la toma de decisiones de diseño.

Actualmente, los SMA constituyen un área de creciente interés dentro de la inteligencia artificial, debido a la capacidad de adaptación para resolver problemas complejos no resueltos de manera satisfactoria mediante otras técnicas. Mediante el buen uso y aprovechamiento de las ciencias computacionales, en específico, en las áreas de la inteligencia artificial y la realidad virtual, se puede contribuir mediante estrategias de simulación 2D/3D basadas en un SMA para entender y resolver problemas del mundo real que engloben el comportamiento humano. Con la SBA, las entidades activas, conocidas como agentes, deben identificarse para definir su comportamiento. Estas entidades pueden ser personas, hogares, vehículos, equipos, productos o empresas, lo que sea relevante para el sistema. Se establecen conexiones entre ellas, se establecen las variables del entorno y se ejecutan simulaciones.

La dinámica global del sistema emerge entonces de las interacciones de los muchos comportamientos individuales y colectivos posibles de los agentes.

En este artículo, se propone la creación de un escenario virtual 2D/3D para la simulación de la BG y su entorno colindante, así como de los peregrinos que ahí arriban como tipo de multitud. Esto se hace mediante el uso primordial de la BPA (ver figura 1) para simular el comportamiento de los peregrinos. AnyLogic como herramienta de simulación soporta metodologías de simulación comunes: dinámica de sistemas (DS), sistemas de eventos discretos (SED), y el modelado basado en agentes (MBA) [23]. AnyLogic proporciona como ventajas para su elección una plataforma como herramienta para la creación rápida de prototipos a través de una interfaz amigable y fácil de usar, al igual que un entorno de desarrollo basado en el lenguaje Java y un conjunto de bibliotecas de componentes 2D/3D multipropósito (objetos y agentes), que en conjunto ayudan a acelerar el proceso de modelado proporcionando un entorno de ejecución para la simulación de un entorno y el análisis del comportamiento de quienes lo habitan a escala real.

En esencia con la BPA se dispondrá de lo siguiente:

1. Los peatones representados por peregrinos se mueven según un modelo de fuerza social. Eligen la ruta más corta, evitan colisiones con otros objetos mediante el análisis del entorno actual y toman decisiones sobre nuevos movimientos.
2. El comportamiento de los peregrinos se define mediante un diagrama de flujo de proceso, que es fácil de crear y comprender. Además de los bloques básicos para simular movimientos en un entorno físico, la biblioteca contiene elementos de marcado de espacio para colocar muros, servicios, atractores y escaleras, por nombrar algunos.
3. Los peregrinos pueden ser asignados previamente con propiedades individuales, preferencias y estados, como su sexo, edad o el lugar de interés al que se dirigen a visitar. Esto es posible debido al enfoque basado en agentes, que se implementa en modelos peatonales.
4. Las estadísticas de salida del modelo permiten evaluar la capacidad y el rendimiento de las instalaciones de la BG y su entorno colindante, contar a los peatones en diferentes zonas y medir los tiempos de espera y servicio.
5. Densidad de flujo peatonal de los peregrinos mostrada en un mapa de densidad a color. Este mapa se repinta constantemente de acuerdo con los valores reales: cuando la densidad cambia en algún punto, el color cambia dinámicamente para reflejar este cambio. El color rojo indica la densidad crítica y el color azul se usa para bajas densidades. Cuando la densidad en alguna área es cero, el mapa de densidad para esta área en particular no se dibuja en absoluto.
6. La BPA se puede integrar perfectamente con la Biblioteca de Tráfico Vial (BTV) para crear un modelo que considere el flujo e infraestructura vial de los alrededores de la BG dando un mayor realismo y riqueza visual al modelo virtual para asemejarlo más al mundo real.
7. AnyLogic admite la importación de objetos 3D almacenados en archivos X3D y VRML. Los modelos peatonales se pueden animar con activos 3D de personas y objetos circundantes.

Tabla 1. Bloques usados en diagramas de flujo de peatones.

Nombre del Bloque	Descripción
PedSource	Genera peatones. Se usa por lo general como un punto de inicio para el flujo de peatones. Este bloque también puede ser usado para generar grupos de peatones.
PedSink	Retira peatones entrantes. Es usado como punto final del flujo de peatones.
PedGoTo	Provoca que los peatones vayan a una ubicación especificada. La ubicación puede ser definida con figuras de marcación especial (línea objetivo o área), o como un punto con coordenadas dada.
PedService	Simula como los peatones reciben servicios en puntos designados. Los puntos de servicio son dibujados gráficamente usando figuras especiales de marcación (servicio con líneas, servicio con área).
PedWait	Hace que los peatones se dirijan a la ubicación especificada y esperen allí por un periodo especificado de tiempo. La ubicación puede ser definida por una meta, área o punto con coordenadas dadas.
PedSelectOutput	Dirige a los peatones entrantes a uno de los cinco puertos de salida según las relaciones o condiciones especificadas.
PedEnter	Acepta peatones generados en otros lugares (por ejemplo, en otro diagrama de flujo) y los introduce dentro del entorno simulado en una ubicación específica.
PedExit	Acepta peatones en el puerto de entrada. Retira peatones de un entorno simulado y los saca del mismo a través de un puerto de salida.
PedEscalator	Simula como los peatones son transportados por escaleras eléctricas.
PedChangeLevel	Mueve el flujo de peatones desde su piso o nivel actual a uno nuevo.
PedAreaDescriptor	Permite definir reglas y/o restricciones a los peatones estando dentro de un área rectangular o poligonal. Permite modificar la velocidad de los peatones y definir una velocidad máxima.
PedGroupAssemble	Organiza grupos a partir de la secuencia de peatones que ingresa al bloque. Permite definir criterios múltiples para la creación de grupos.
PedGroupChangeFormation	Hace que los grupos de peatones cambien su formación. Tres tipos de formaciones de grupo son admitidas: multitud, en cadena y frontal.
PedGroupDisassemble	Dispersa grupos de peatones. Cuando el líder de grupo entra a este bloque, el grupo se disuelve, de manera que los peatones disueltos sigan sus propias rutas.
PedSettings	Bloque opcional separado que permite especificar parámetros generales para todos los bloques de la BPA en el modelo.

- Las capacidades de AnyLogic permiten cargar datos de archivos de dibujo CAD, archivos de forma y archivos de base de datos directamente al modelo peatonal de la BG.

La BPA permite general un diagrama de flujo del movimiento de los peatones a través de los bloques mostrados en la Tabla 1 y los elementos de marcado espacial dados en la Tabla 2. Estos bloques y elementos se muestran en la Fig. 1.

Tabla 2. Elementos de marcado espacial usados en diagramas de flujo de peatones.

Elemento	Descripción
Wall	Para dibujar paredes de formas complejas.
Rectangular Wall	Para dibujar áreas rectangulares no accesibles para los peatones.
Circular Wall	Para dibujar obstáculos circulares dentro del área simulada.
Target Line	Para definir el lugar donde aparecen los peatones en el espacio simulado.
Service with Lines	Para definir los servicios con líneas de cola donde los peatones esperan hasta que el servicio esté disponible.
Service with Area	Para definir los servicios con áreas de cola donde los peatones esperan hasta que el servicio esté disponible.
Rectangular Area	Para definir gráficamente el lugar donde aparecen los transeúntes en el espacio simulado; destino del movimiento peatonal, y peatones esperando lugar.
Polygonal Area	Para definir un área de forma compleja. Se comporta como el área rectangular.
Attractor	Para controlar la ubicación de los peatones dentro de un área, estos definen los puntos exactos donde los peatones esperarán dentro del área.
Escalator Group	Para simular cómo se transportan los peatones por escaleras mecánicas.
Pathway	Para restringir el movimiento de peatones al moverse a lo largo de un camino o ruta, simplemente define la pauta de movimiento.
Density Map	Para mostrar la densidad peatonal a colores. El color de cada punto del espacio corresponde a la densidad de corriente en esta área en particular.
Ped Flow Statistics	Para recopilar estadísticas sobre los peatones que cruzan la sección transversal dibujada.

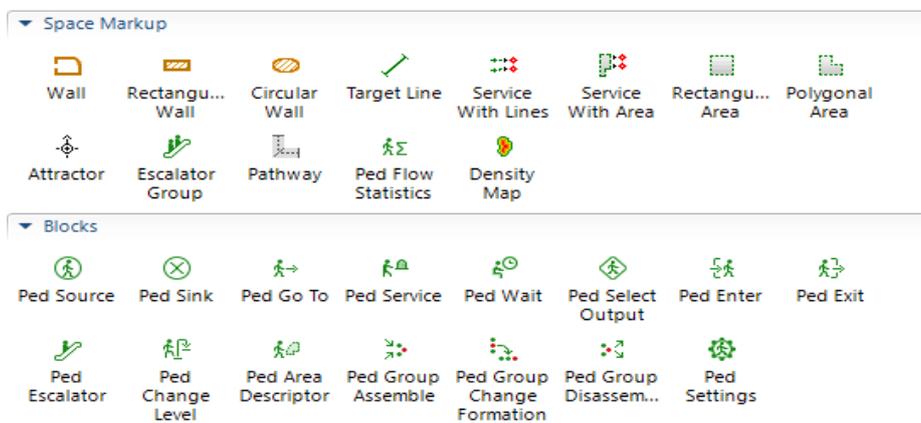


Fig. 1. Vista de los bloques y elementos de marcado espacial de la BPA.

4. Creación del escenario de simulación

Para la creación del escenario de simulación de la BG ante una evacuación por una situación de sismo en AnyLogic se hizo lo siguiente:

1. Definir los puntos de acceso/egreso o entrada/salida de los peregrinos: a través de estos los peregrinos se desplazan en puntos de interés (ver Fig. 2 definidos por números negros):
 - Punto principal: localizado sobre la Calzada de Guadalupe que permite que los peregrinos ingresen/egresen a la Plaza Mariana.
 - Punto secundario derecho inferior: sobre la Av. Fray Juan de Zumárraga por donde los peregrinos pueden ingresar/egresar de la Plaza Mariana y la Plancha de Imagen de la Virgen de Guadalupe.
 - Punto lateral izquierdo inferior: ubicado en Calzada de los Misterios que conduce al ingreso/egreso de peregrinos a la parte inferior de la BG y la Plaza Mariana.
 - 2 puntos laterales izquierdos centrales: por ellos los peregrinos ingresan/egresan a la parte trasera de la BG.
 - Punto del Bautistero: como lo indica su nombre a través de él los peregrinos ingresan/egresan al Bautistero.
 - Punto lateral derecho superior: para el ingreso/egreso de peregrinos a la Capilla del Pocito y Antigua Parroquia de Indios.
2. Definir puntos de reunión: ante el evento de sismo es en estos lugares donde los peregrinos van a reunirse previo a una evacuación (ver Fig. 2 definidos por números rojos):
 - Punto de reunión de la Plaza Mariana: es el mayor de todos y a él se deben conducir los peregrinos que se encuentren en dicha plaza o dentro de la BG, el Templo Expiatorio y la Parroquia de la Santa María.
 - Punto del Camino del Pocito: los peregrinos que se localicen cerca de éste o de la Capilla del Pocito o la Antigua Parroquia de Indios a él acudirán.
 - Punto del Bautistero: todo peregrino ubicado cerca de él y del Museo de la BG ese será su punto de reunión.
3. Definir sitios de interés: estos representan los lugares a los que los peregrinos tienen particular intención de visitar y conocer (ver Fig. 3):
 - BG: es el sitio de atracción principal al cual los peregrinos se encolarán para su ingreso. El 60% de los peregrinos que ingresan por el punto principal, punto secundario derecho inferior y punto lateral izquierdo inferior decidirán ir a este sitio. El 100% de los peregrinos que ingresan por los puntos laterales izquierdos centrales se dirigirán a la BG.
 - Templo Expiatorio: conocido como la Antigua BG, es el segundo lugar de interés para los peregrinos. El 20% de los peregrinos que ingresan por el punto principal, punto secundario derecho inferior y punto lateral izquierdo inferior decidirán ir a este sitio.
 - Antigua Parroquia de Santa María: es el tercer lugar de interés para los peregrinos. El 20% de los peregrinos que ingresan por el punto principal, punto secundario derecho inferior y punto lateral izquierdo inferior decidirán ir a este sitio.



Fig. 2. Escenario creado en AnyLogic para simular la afluencia de peregrinos y su comportamiento y evacuación ante un evento de sismo en la BG.

- Bautistero: El 50% de los peregrinos que ingresan por el punto del Bautistero de dirigirán a este sitio.
 - Museo de la BG: El 50% de los peregrinos que ingresan por el punto del Bautistero de dirigirán a este sitio.
 - Capilla de los Juramentos: El 33.33% de los peregrinos que ingresan por el punto lateral derecho superior elegirán a este sitio como de interés.
 - Antigua Parroquia de Indios: El 33.33% de los peregrinos que ingresan por el punto lateral derecho superior elegirán a este sitio como de interés.
 - Capilla del Pocito: El 33.33% de los peregrinos que ingresan por el punto lateral derecho superior elegirán a este sitio como de interés.
 - Capilla del Cerrito: por este sitio sólo transitan peregrinos que hayan ingresado por los puntos de ingreso cercanos a ella.
4. Definir el diagrama de flujo del comportamiento peatonal de los peregrinos: este diagrama se generó con los bloques y elementos de marcado espacial de la BPA para definir el flujo de movimiento de los peregrinos en el escenario y para controlar la lógica de desplazamiento peatonal y de comportamiento ante el evento de sismo y su evacuación. En la Fig. 3 se muestra dicho diagrama.
 5. Definir un flujo vehicular simple en las vialidades aledañas al escenario: se empleó la BTV para darle un mayor realismo al escenario de la BG y sus alrededores. A través de los componentes de dicha biblioteca se definió el comportamiento del flujo vial. Este flujo es complementario más no esencial para lo respectivo a la parte peatonal con los peregrinos.

En la Fig. 3, se muestra la lógica del comportamiento peatonal de los peregrinos mediante un grafo de conexión entre estados de navegación de los peregrinos por el escenario creado.

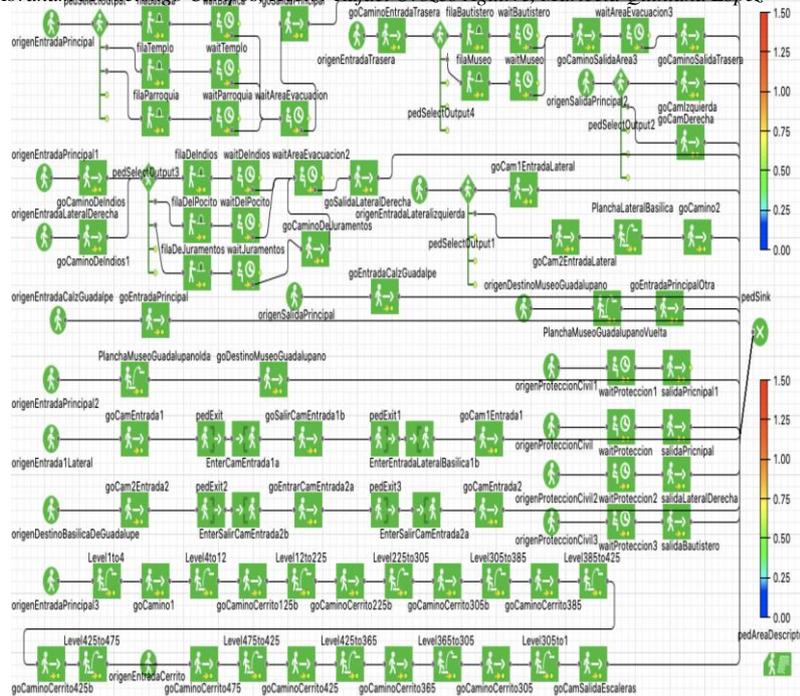


Fig. 3. Lógica del comportamiento peatonal de peregrinos en AnyLogic en el escenario creado.

Este grafo permite que haya afluencia peatonal de peregrinos a lugares de interés para que ingresen/egresen a ellos. Cuando se lance el evento de sismo los peregrinos deberán salir de dichos lugares para concentrarse en los puntos de reunión cercanos y esperar por la indicación de evacuación tras 5 minutos de espera para que abandonen el escenario egresando por los puntos cercanos.

4.1. Resultados

La Fig. 4 permite apreciar la simulación 3D del escenario de la BG y sus alrededores. La afluencia de peregrinos es de 39 peregrinos por minuto para que cada hora ingresen 2340 peregrinos y en 24 horas se tenga el aproximado al promedio diario de afluencia que es de 56160 peregrinos visitantes.

Por su parte, la Fig. 5 es para ver el comportamiento de los peregrinos ante la evacuación por un sismo. Para efectos de poder visualizar un ejemplo de evacuación ante un evento de sismo se muestra el caso para los peregrinos que arribaron en 1 hora.

Cabe mencionar que se empleó la versión estudiantil de AnyLogic para crear el escenario presentado en este artículo y se tienen limitantes en el número de agentes peregrinos que pueden generarse en el modelo.

Para poder tener un escenario de caso de estudio con un número de peregrinos cercano al que arriba cada 12 de diciembre a la BG, se debe emplear la versión de investigador bajo licencia.



Fig. 4. Simulación 3D en AnyLogic de una afluencia de peregrinos a la BG y sus alrededores.

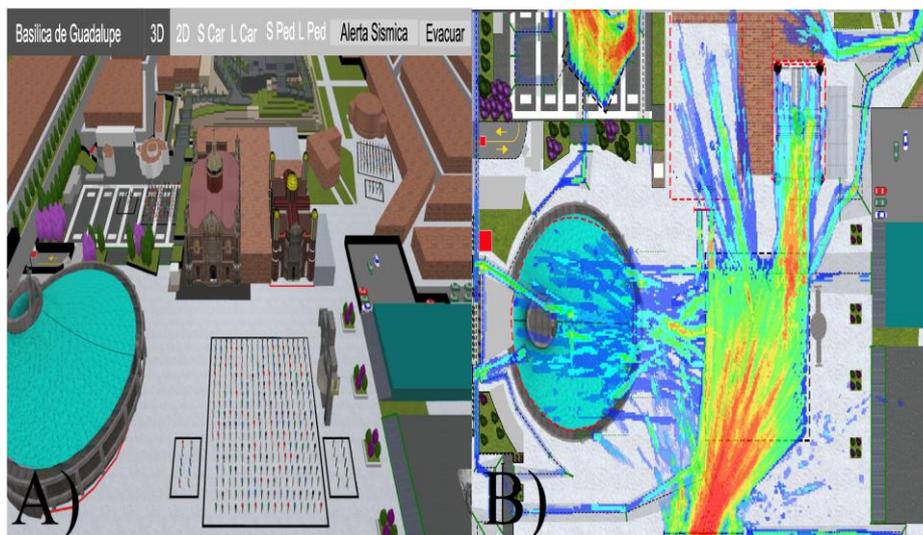


Fig. 5. Evacuación por sismo de peregrinos en la BG y sus alrededores en AnyLogic. A) Concentración en puntos de reunión cercanos. B) Mapa de densidad del flujo de evacuación de peregrinos.

En la simulación y tras emitirse la alerta sísmica, el tiempo total de arribo de todos los peregrinos a los puntos de reunión fue de 5 minutos y 45 segundos, mientras que el tiempo total de evacuación por sismo de los peregrinos desde los puntos de reunión fue de 8 minutos y 25 segundos. Estos tiempos deben mejorarse explorando alternativas de estrategias de reducción evaluando rutas de arribo a puntos de reunión y de evacuación más eficaces.

5. Conclusiones y trabajo a futuro

Hasta el momento, sólo se ha simulado el comportamiento de afluencia peatonal de peregrinos, así como la evacuación por una situación de riesgo dada por un sismo que ocurre tras una hora de afluencia. Sin embargo, es necesario analizar la capacidad de desalojo de los sitios de interés para saber en cuánto tiempo pueden los peregrinos salir, si lo harán de manera segura, si se suscitarán accidentes, o bien, hasta incluso muertes por el caos provocado. Además, cuando los peregrinos egresen por los puntos correspondientes, se debe hacer algo similar. Este análisis permitirá rediseñar el escenario para proponer un plan de acción óptimo que reduzca en lo mínimo posible las incidencias que se puedan suscitar y ver la posibilidad de reubicación de puntos de ingreso/egreso para un mejor control de la multitud de peregrinos. Para ello, un análisis estadístico de los datos recabados por la simulación y replanteando distintas simulaciones sobre el escenario serán la pauta que dirá qué es lo más adecuado para que en el mundo real ante un sismo como tal se tenga la mejor estrategia a seguir de manera adecuada.

En un trabajo futuro se extenderá la simulación a un escenario que incluya el número máximo de peregrinos para el 12 de diciembre y poder obtener resultados que sean concluyentes. Para enriquecer la simulación y tener una mejor comprensión de una situación de riesgo y los efectos de esta buscando que se lleguen a dar posibles cursos de acción para una mejor evacuación con la menor cantidad de incidencias posibles, es decir, su minimización, lo que se puede hacer para extender el escenario presentando en este artículo es principalmente lo siguiente:

- Incorporar diferentes comportamientos individuales y grupales en los peregrinos para representar una multitud más parecida a la real.
- Emplear la Biblioteca de Simulación de Procesos de AnyLogic (BSP) para tener un comportamiento dinámico y más apegado a la realidad ante una situación de riesgo para los agentes. Esto permitirá un detalle más fino ante una situación de riesgo como lo es un sismo.
- Emplear cámaras a nivel de piso y a manera de drones para tener otras vistas del comportamiento peatonal de los peregrinos y de su reacción ante la situación de riesgo y sus efectos.
- Recabar estadísticas de las tasas de accidentalidad o muerte posible de los peregrinos.
- Trabajar con esquemas inteligentes de control de evacuaciones ante una situación de riesgo.
- Evaluar las mejores ubicaciones de los puntos de ingreso/egreso.
- Mejorar los tiempos de arribo a los puntos de reunión y de evacuación para poder reducirlos mediante estrategias de simulación eficaces.

Referencias

1. von Sivers, I., Templeton, A., Künzner, F., Köster, G., Drury, J., Philippides, A., Bungartz, H. J.: Modelling social identification and helping in evacuation simulation. *Safety Science*, 89, pp. 288–300 (2016)

2. Ochoa Zezzatti, C.A., Rudomin, I., Vargas Solar, G., Espinosa-Oviedo, J.A., Pérez, H., Zechinelli Martini, J.L.: Humanitarian logistics and cultural diversity within crowd simulation. *Computación y Sistemas*, 21(1), pp. 7–21 (2017)
3. Zhou, B., Wang, X., Tang, X.: Understanding collective crowd behaviors: Learning a mixture model of dynamic pedestrian-agents. In: *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 2871–2878 (2012)
4. Natgeo: National geographic en español. <https://www.ngenespanol.com/traveler/el-12-de-diciembre-la-cdmx-recibe-peregrinos-de-todo-el-mundo/> (2017)
5. Sectur: <https://www.gob.mx/sectur/prensa/mexico-entre-los-paises-mas-visitados-por-turismo-religioso-sectur> (2016)
6. Artigas, J.B.: *La Basílica del siglo XX en la Villa de Guadalupe* (2010)
7. Mahmood, I.H.: Analyzing emergency evacuation strategies for mass gatherings using crowd simulation and analysis framework: Hajj scenario. In: *Proceedings of the ACM SIGSIM Conference on Principles of Advanced Discrete Simulation*, pp. 231–240 (2017)
8. Servicio Sismológico Nacional: Reporte de sismo CDMX: Instituto de Geofísica. http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2011/SS_NMX_rep_esp_20111210_guerrero_M65.pdf (2011)
9. UNIVERSITAM: <https://universitam.com/academicos/sismologia/informe-sismologico-mundial-9-diciembre-2011-iran-meridional-2/> (2011)
10. Gobierno CDMX: Centro de Comando, Control, Cómputo, Comunicaciones y Contacto de la Ciudad de México. <https://www.c5.cdmx.gob.mx/dependencia/acerca-de/el-c5-de-la-cdmx> (2015)
11. Gobierno CDMX: Centro de Comando, Control, Cómputo, comunicaciones y Contacto de la Ciudad de México. <https://www.c5.cdmx.gob.mx/canales-de-atencion-emergencias/app-9-1-1-de-la-cdmx> (2017)
12. CENAPRED: <https://datos.gob.mx/busca/organization/about/cenapred> (2020)
13. SINAPROC: <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/que-es-el-sinaproc-y-como-se-consolido-en-nuestro-pais-enterate> (2020)
14. De Gyves, O.T.: Comportamientos en simulación de multitudes: revisión del estado del arte. *Research in Computer Science*, 62, pp. 319–334 (2013)
15. Grigoryev, I.: *AnyLogic in three days*. AnyLogic (2018)
16. Isak-Peterson, E.J.: Simulation and evaluation of strategies for emergency evacuation of high-density crowds. *Stockholm*, pp. 4–5 (2018)
17. Lu, X., Yang, Z., Cimellaro, G.P., Xu, Z.: Pedestrian evacuation simulation under the scenario with earthquake-induced falling debris. *Safety Science*, 114, pp. 61–71 (2019)
18. Templeton, A., Drury, J., Philippides, A.: From mindless masses to small groups: conceptualizing collective behavior in crowd modeling. *Review of General Psychology*, 19(3), pp. 215–229 (2015)
19. Chu, M.L., Kincho, L.: Computational framework incorporating human behaviors for egress simulations. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 27(6), pp. 699–707 (2013)
20. Grande, B.D.: Detección de comportamientos anómalos en la marcha de peatones mediante técnicas de aprendizaje automático. pp. 29–34 (2017)

21. Benitez, Y.F.: Sistema de evaluación para toma de decisión en la modificación de una estación de tren via simulación informática. Universitat Autònoma de Barcelona, pp. 13–14 (2013)
22. Calin Boje, H.L.: Crowd simulation based knowledge mining supporting building evacuation design. Cardiff University, pp. 13–17 (2017)
23. Beatriz-Andres, R.S.: Modelado y Simulación de la Cadena de Suministro con AnyLogic. Universitat Politècnica de València, pp. 60–61 (2016)