

MODELO DE SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MULTITUDES
BASADO EN AGENTES Y LÓGICA DIFUSA

LEYSTON ALEXANDER OÑATE LIZARAZO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA
BUCARAMANGA

2020

MODELO DE SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MULTITUDES
BASADO EN AGENTES Y LÓGICA DIFUSA

LEYSTON ALEXANDER OÑATE LIZARAZO

Trabajo De Grado Para Optar El Título De Ingeniero De Sistemas E Informática

Director:

Ph D. CARLOS JAIME BARRIOS HERNÁNDEZ

Codirector

MSc. HUGO HERNANDO ANDRADE SOSA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA
BUCARAMANGA

2020

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres Leyston Yuri Oñate Freitte y Sonia Ruth Lizarazo castro, por apoyarme durante todo mi proceso académico, por su dedicación, paciencia y sabiduría al guiarme por los pasos de la vida, por darme las herramientas para poder cumplir mis sueños de convertirme en profesional en la carrera que escogí, y por su incondicional amor a mi persona

Al profesor Carlos Jaime Barrios, por dirigir mi proyecto de grado y brindarme un apoyo continuo durante todas las etapas del proyecto.

Al profesor Hugo Andrade Sosa por el tiempo y respaldo que me dio como codirector del proyecto de grado.

CONTENIDO

	pág.
<i>INTRODUCCIÓN</i>	14
<i>1. OBJETIVOS</i>	16
1.1 OBJETIVOS GENERALES.....	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
<i>2. MARCO DE REFERENCIA</i>	17
2.1 USO E IMPLEMENTACIONES DE LAS SIMULACIONES DE MULTITUDES. .	17
2.2 CONCEPTO DE AGENTES.	19
2.3. CONCEPTO DE LÓGICA DIFUSA.	22
2.3.1 <i>Agentes con lógica difusa</i>	24
<i>3. METODOLOGÍA PARA LA SIMULACIÓN DE MULTITUDES</i>	25
3.1 CREACIÓN DE SIMULACIONES DE MULTITUDES.	25
<i>4. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LOS CASOS DE USO</i>	28
4.1 MODELADO Y SIMULACIÓN EN MIARMY CON MAYA AUTODESK.....	28
4.1.1 <i>Nodos de decisión</i>	28
4.1.2 <i>Gestión y modelado de agentes</i>	30
4.1.3 <i>Gestión y modelado de escenarios</i>	33
4.2. CASOS DE USO.....	35
4.2.1 <i>Lógica del agente</i>	35
4.2.2 <i>Primer caso de uso</i>	41
4.2.3 <i>Segundo caso de uso</i>	42
4.2.4 <i>Tercer caso de uso</i>	44
<i>5. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LOS CASOS DE USO</i>	47

5.1 GRÁFICAS DE DESEMPEÑO.	47
5.2 HEATMAP.....	48
5.2.1 <i>Implementación de los HeatMaps para la simulación de multitudes.</i>	49
5.3 CREANDO HEATMAPS EN MAYA.	49
5.3.1 <i>Constancia de los análisis en Maya Autodesk.</i>	50
5.4 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS.	52
5.4.1 <i>Frame específico.</i>	55
6. ANÁLISIS DE LOS CASOS DE USO.....	56
6.1 ANÁLISIS DEL PRIMER CASO DE USO.	56
6.1.1 <i>Desempeño del primer caso de uso.</i>	58
6.1.2 <i>Resultados de los Heatmaps.</i>	59
6.2 SEGUNDO CASO DE USO.....	60
6.2.1 <i>Desempeño del segundo caso de uso.</i>	62
6.2.2 <i>Resultados de los Heatmaps</i>	64
6.3 TERCER CASO DE USO.	65
6.3.1 <i>Desempeño del Tercer caso de uso.</i>	67
6.3.2 <i>Resultados de los Heatmaps.</i>	68
7. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS.....	70
8. CONCLUSIONES.....	73
9. LIMITACIONES.....	76
10. RECOMENDACIONES.....	77
BIBLIOGRAFÍA.....	78
ANEXOS.....	80

LISTA DE TABLAS

	pág.
TABLA 1: ANÁLISIS DE LOS AGENTES EN EL PRIMER CASO DE USO	59
TABLA 2: ANÁLISIS DE LOS AGENTES EN EL SEGUNDO CASO DE USO.....	64
TABLA 3: ANÁLISIS DE LOS AGENTES EN EL TERCER CASO DE USO.	68

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1 REPRESENTACIÓN DE LA LÓGICA DIFUSA.....	23
FIGURA 2 DIAGRAMA DE SIMULACIÓN DE MULTITUDES.....	27
FIGURA 3 NODO DE DECISIÓN.....	29
FIGURA 4 LISTA DE PRIORIDAD DE NODOS DE DECISIÓN.....	29
FIGURA 5 AGENTE CREADO EN MAYA AUTODESK.....	30
FIGURA 6 ADMINISTRADOR DE AGENTES.....	31
FIGURA 7 ADMINISTRADOR DE HUMAN IK.....	33
FIGURA 8 ESCENARIO 3D.....	34
FIGURA 9 SECUENCIA DE ANIMACIÓN.....	36
FIGURA 10 NODO DE DECISIÓN PARA CAMINAR.....	36
FIGURA 11: EJEMPLO DE UNA ZONA.....	37
FIGURA 12: LÓGICA DE DECISIÓN PARA EVITAR UNA ZONA.....	38
FIGURA 13: EJEMPLO DE UN ROAD (CAMINO).....	39
FIGURA 14: NODO DE DECISIÓN PARA SEGUIR UN CAMINO.....	39
FIGURA 15: NODO DE DECISIÓN PARA EVITAR OTROS AGENTES.....	40
FIGURA 16: PRIMER CASO DE USO EN MAYA AUTODESK.....	41
FIGURA 17: SEGUNDO CASO DE USO EN MAYA AUTODESK.....	43
FIGURA 18: TERCER CASO DE USO EN MAYA AUTODESK.....	44
FIGURA 19: EJEMPLO DE UNA GRÁFICA DE DESEMPEÑO.....	48
FIGURA 20: EJEMPLO DE UN HEATMAP.....	49
FIGURA 21: REPRESENTACIÓN DE UN HEATMAP EN MAYA AUTODESK.....	50
FIGURA 22: SIMULACIÓN DE MAYA AUTODESK EN DOS OCASIONES DIFERENTES.....	51
FIGURA 23: IMPLEMENTACIÓN DE LA LÓGICA DIFUSA.....	52
FIGURA 24 DIAGRAMA DE LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS.....	54
FIGURA 25: PRIMER CASO DE USO CON LÓGICA DIFUSA DEL 0%.....	56
FIGURA 26: PRIMER CASO DE USO CON LÓGICA DIFUSA DEL 10%.....	57

FIGURA 27: PRIMER CASO DE USO CON LÓGICA DIFUSA DEL 20%.	57
FIGURA 28: GRÁFICA DEL DESEMPEÑO DEL PRIMER CASO DE USO.	58
FIGURA 29: SEGUNDO CASO DE USO CON LÓGICA DIFUSA DEL 0%.	60
FIGURA 30: SEGUNDO CASO DE USO CON LÓGICA DIFUSA DEL 10%.	61
FIGURA 31: SEGUNDO CASO DE USO CON LÓGICA DIFUSA DEL 20%.	62
FIGURA 32: GRÁFICA DEL DESEMPEÑO DEL SEGUNDO CASO DE USO.	63
FIGURA 33: TERCER CASO DE USO CON LÓGICA DIFUSA DEL 0%.	65
FIGURA 34: TERCER CASO DE USO CON LÓGICA DIFUSA DEL 10%.	66
FIGURA 35: TERCER CASO DE USO CON LÓGICA DIFUSA DEL 20%.	66
FIGURA 36: GRÁFICA DE DESEMPEÑO DEL TERCER CASO DE USO.	67

LISTA DE ILUSTRACIONES

	pág.
ILUSTRACIÓN 1: PORTERÍA DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.	42
ILUSTRACIÓN 2: PLAZA DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.....	45

LISTA DE ANEXOS

pág.

A. VIDEO DEL PRIMER CASO DE USO CON LÓGICA DIFUSA DEL 0%:	80
B. VIDEO DEL PRIMER CASO DE USO CON LÓGICA DIFUSA DEL 10%:	80
C. VIDEO DEL PRIMER CASO DE USO CON LÓGICA DIFUSA DEL 20%:	80
D. VIDEO DEL SEGUNDO CASO DE USO CON LÓGICA DIFUSA DEL 0%:	80
E. VIDEO DEL SEGUNDO CASO DE USO CON LÓGICA DIFUSA DEL 10%:	80
F. VIDEO DEL SEGUNDO CASO DE USO CON LÓGICA DIFUSA DEL 20%:	80
G. VIDEO DEL TERCER CASO DE USO CON LÓGICA DIFUSA DEL 0%:	80
H. VIDEO DEL TERCER CASO DE USO CON LÓGICA DIFUSA DEL 10%:	80
I. VIDEO DEL TERCER CASO DE USO CON LÓGICA DIFUSA DEL 20%:	80
J. HEATMAPS.....	80

GLOSARIO

AGENTE: Clasificación general de un individuo o grupo de individuos autónomos cuyo comportamiento dicta los resultados de una simulación basada en agentes¹

FRAME: Es una de las varias imágenes estáticas que componen un vídeo o animación.

LÓGICA DIFUSA: Es el término usado habitualmente para hacer referencia a la interacción entre el hombre y lo que lo rodea, más específicamente a la interacción hombre-máquina².

LÓGICA TRADICIONAL: Modelo computacional normalmente utilizado para la creación de software, basado en el lenguaje binario de 0 y 1 en donde una de las variables es verdadera y la otra es falsa.

RENDER: Proceso de generar una imagen o vídeo mediante un proceso automatizado según un modelo por medio de un programa computacional.

RECURSOS COMPUTACIONALES: es cualquier componente físico o virtual de disponibilidad limitada en un sistema informático. Cada dispositivo y componente interno del sistema es un recurso computacional³.

SIMULACIÓN DE MULTITUDES: Es el proceso de simular el comportamiento de un gran número de objetos o personajes.

SIMULACIÓN BASADA EN AGENTES: Es un tipo de modelo computacional que permite la simulación de acciones e interacciones de individuos autónomos dentro de un entorno, y permite determinar qué efectos producen en el conjunto del sistema.

VISUALIZACIÓN DE SIMULACIONES: Proceso por el cual se realiza la simulación en un medio visual que permita una mejor observación de los resultados obtenidos.

¹ https://en.wikipedia.org/wiki/Agent-based_model

² http://www.biblioteca.udel.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_185_184_133_1746.pdf

³ https://es.wikipedia.org/wiki/Recursos_computacionales

RESUMEN

TÍTULO: MODELO DE SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MULTITUDES BASADO EN AGENTES Y LÓGICA DIFUSA^{4*}

AUTOR: LEYSTON ALEXANDER OÑATE LIZARAZO^{5**}

PALABRAS CLAVE: Lógica difusa, simulaciones, multitudes, Modelado, Visualización, Agentes, Comparación.

DESCRIPCIÓN:

En este proyecto, se estudiará el comportamiento de los modelos de simulación de multitudes al implementar lógica difusa en el comportamiento de los agentes, al realizar estas acciones se espera aumentar la complejidad de la simulación a tal grado que se puedan observar comportamientos más cercanos a la realidad sin el problema de invalidar los modelos creados.

Se describen las herramientas utilizadas para la creación e implementación de los modelos a simular, y como estas herramientas pueden ser utilizadas para la integración de la lógica difusa dentro de las simulaciones.

Se evalúan el rendimiento y efectividad de las simulaciones al cambiar el comportamiento de los agentes.

también se comparan las diferencias encontradas entre los modelos y como estas diferencias son reflejadas en los resultados de las simulaciones.

^{4*}Trabajo de grado

^{5**} Facultad de Físico mecánica. Escuela de ingeniería de sistemas. Director: Carlos Jaime Barrios. Codirector: Hugo Andrade Sosa.

ABSTRACT

TITLE: SIMULATION MODEL OF AGENT-BASED CROWD BEHAVIOR AND FUZZY LOGIC *

AUTHOR: LEYSTON ALEXANDER OÑATE LIZARAZO **

KEY WORDS: Fuzzy logic, Simulation, Crows, Modeling, Visualization, Agents, Comparison.

DESCRIPTION:

In this project, it is proposed to study the behavior of crowd simulation models by implementing fuzzy logic in the behavior of agents, by performing these actions it is expected to increase the complexity of the simulation to such a degree that behaviors closer to reality can be observed without the problem of invalidating the created models.

The tools used to create and implement the models to be simulated are described, and it is presented how these tools can be used to integrate fuzzy logic into simulations.

Simulation performance and effectiveness are evaluated by changing agent behavior.

The differences found between the models are also compared and how these differences are reflected in the results of the simulations.

* Degree work

** Faculty of Physical Mechanics. School of Systems Engineering. Director: Carlos Jaime Barrios.
Co-director: Hugo Andrade Sosa

INTRODUCCIÓN

En el mundo de las simulaciones de multitudes uno de los objetivos que se desea alcanzar es el de obtener simulaciones lo suficientemente realistas, ya sea al simular un grupo de peces en el mar, personas caminando en una terminal, o las corrientes eléctricas en un circuito, las simulaciones normalmente desean imitar partes de nuestro mundo real en un entorno controlado cuyo objetivo es dar resultados que pueden ser aplicados al mundo real.

hoy en día existe una creciente necesidad de poder representar modelos de simulación de multitudes cada vez más cercanas a lo real, en donde los factores impredecibles de la vida cotidiana necesitan ser tomados en cuenta como variables necesarias para la creación de estos modelos.

Es esta necesidad para la creación de simulaciones de multitudes más realistas lo que ha empezado a generar problemas en el desarrollo de nuevas simulaciones debido al incremento de la complejidad presente en los modelos de simulación a crear. Esta problemática existe no solo por el aumento del número de elementos a simular, sino también al incremento de la complejidad del comportamiento de estos elementos dentro de la simulación, dando como resultado simulaciones erróneas que no son capaces de representar correctamente los escenarios que se desean estudiar, esto es debido a que en la implementación de estos comportamientos que buscan la creación de simulaciones más realistas resultan en el incremento de los recursos computacionales utilizados en la simulación hasta el punto en el que el modelo de simulación utilizado deja de ser representativo del escenario.

Una solución para esta problemática puede existir en el uso de la lógica difusa dentro del comportamiento de los elementos de una simulación, específicamente dentro del comportamiento de los agentes, en donde las características de la lógica difusa de representar una lógica computacional más cercana a lo observable en el mundo real puede permitir un incremento de la complejidad de las simulaciones de multitudes sin la necesidad de incrementar drásticamente los recursos computacionales utilizados en esta.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVOS GENERALES.

Crear modelos de simulación que representen el comportamiento de multitudes mediante agentes cuyas acciones sean basadas en lógica difusa para la toma de decisiones, con esto modelos se espera observar un incremento de la complejidad de las simulaciones.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Construir modelos de simulación basados en agentes para entornos específicos.
- Identificar las características de los agentes para la implementación de la lógica difusa en los modelos de simulación.
- Implementación de un modelo general de simulación para visualizar el comportamiento de los agentes en las multitudes.
- Realizar una evaluación del modelo creado para confrontar la efectividad de este con otras observaciones.

2. MARCO DE REFERENCIA

En este capítulo se definirán los conceptos más importantes para tener en cuenta en el desarrollo de este proyecto, estableciendo los conocimientos necesarios para entender que es la simulación de multitudes, el concepto de agentes, la lógica difusa y su correspondiente aplicación dentro de las simulaciones.

2.1 USO E IMPLEMENTACIONES DE LAS SIMULACIONES DE MULTITUDES.

La mayoría de las industrias y organizaciones modernas, tanto públicas como privadas, utilizan modelos de simulación a la hora de la toma de decisiones en sus respectivas actividades y por ende ha habido una creciente demanda por la creación de modelos de más alta complejidad y escala.

Uno de estos modelos, es el modelo de simulación de multitudes el cual se caracteriza por trabajar con un gran número de entidades y de no solo observar el comportamiento y acciones de dichas entidades individualmente sino también el del total de las entidades y de cómo estas interactúan una con la otra y con el entorno en el que se observan.

Los entes gubernamentales cada vez presentan un mayor interés en este tipo de modelo de simulación, ya que estos buscan estudiar fenómenos y situaciones que les permitan tomar decisiones en cuanto ámbitos de planificación urbana y de seguridad pública en donde se verían involucradas un gran número de personas, cuyas acciones pueden cambiar dependiendo de lo que está pasando a sus alrededores.

"Gobiernos alrededor del mundo están tratando de utilizar este tipo de simulaciones para planificar sus ciudades, asegurando que la infraestructura sea suficiente para las necesidades de la población."⁶

En la actual industria del entretenimiento, como en la industria cinematográfica y en la de los videojuegos, también se ha visto un constante incremento en el uso de simulaciones de multitudes en donde se ha logrado crear escenarios que presentan un mayor realismo e inmersión para sus usuarios, esto se puede observar en películas como "El señor de los Anillos", "Avatar" y "Guerra mundial z" así como en videojuegos como "Uncharted 4: A Thief's End", "Days Gone" y "Guerra mundial z: el videojuego" ⁷.

Las simulaciones de multitudes también suelen ser utilizadas como una herramienta de investigación alrededor del mundo, utilizando patrones de comportamiento de animales que se mueven en manadas para entender sus acciones con respecto a cambios climáticos, a la contaminación del ambiente, a desastres naturales y humanos, a las migraciones naturales, etc. Y así poder realizar análisis científicos a partir de estas simulaciones.

Es importante destacar que la simulación de multitudes no sólo se considera un modelo de simulación de alta complejidad por el gran número de entidades y objetos que deben ser renderizados por la computadora, sino que también existen diferentes factores que pueden alterar el comportamiento de las multitudes, como los elementos que se desean simular, sean peces, aves o personas, o el mismo entorno en donde se realizarán las simulaciones; estos factores, que dependen del

⁶ Dashun Wang and others, 'Human Mobility, Social Ties, and Link Prediction', in *Proceedings of the 17th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, KDD'11*, 2011, pp. 1100–1108 <<https://doi.org/10.1145/2020408.2020581>>.

⁷ Oriam De Gyves, Leonel Toledo, and Isaac Rudomin, 'Comportamientos En Simulación de Multitudes: Revisión Del Estado Del Arte', *Research in Computing Science*, 64 (2013), 319–34.

contexto de las situaciones a simular, influyen de gran manera la creación de los modelos de simulación de multitudes y siempre deben ser tomados en cuenta.

El amplio campo de utilidades que abarca la simulación de multitudes ha llevado a la realización de estudios tanto a un nivel macroscópico, que da enfoque al conjunto, como a un nivel microscópico que da enfoque al individuo; gracias a estas observaciones realizadas en un ámbito investigativo se pueden estudiar diferentes comportamientos sociales que no se pueden encontrar al analizar individuos⁸ también se han realizado estudios enfocados a observar la carga computacional que los computadores deben realizar en estas simulaciones⁹.

La demanda del mercado actual ha llevado a la necesidad de la implementación de diferentes motores generadores de multitudes, cuyas características les permiten ser enfocadas en situaciones especializadas que cumplan con las necesidades de los usuarios. Uno de los métodos más utilizados para la creación de modelos de multitudes es la dinámica de simulaciones basadas en la teoría de agentes, el cual se enfoca en la utilización de entidades cuyo comportamiento individual es muy semejante a la de los seres humanos que los lleva a operar de una manera predeterminada.

2.2 CONCEPTO DE AGENTES.

La definición de lo que se constituye como un agente, en el campo de ciencia de la computación, es un concepto que puede ser implementado en diferentes escenarios dependiendo del contexto en el que es utilizado, hasta tal punto que no

⁸ Oriam De Gyves and others, 'Simulación de Grandes Multitudes Con Dinámica de Grupos', 2014; *Readings in Agents*, ed. by Michael N. Huhns and Munindar P. Singh, 1 edition (San Francisco, Calif: Morgan Kaufmann, 1997).

⁹ David Leonardo Burgos Granados, 'SIMULACIÓN Y VISUALIZACIÓN DE LA DINÁMICA DEL COMPORTAMIENTO DE MULTITUDES USANDO ACELERADORES GRÁFICOS', 2015, 106.

es posible dar una generalización de lo que es un agente en sí, pero aun así es posible establecer criterios y condiciones que permitan realizar una distinción de lo que sería considerado como un agente y de lo que no lo es.

A lo largo de los años varios autores han tratado de crear una definición que satisfaga el concepto de un agente y sus características.

Según *M. N. Huhns y M. P. Singh*¹⁰ el término es habitualmente utilizado para describir programas autónomos que pueden controlar sus propias acciones basados en sus percepciones del entorno; pero para *Russell*¹¹ un agente puede ser cualquier cosa capaz de percibir el entorno en el que se encuentra con ayuda de sensores y que actúen en ese medio con el uso de actuadores. De las diferentes definiciones dadas por diferentes autores a lo largo de los años la más citada como herramienta para identificar a un agente es la de *Wooldridge*¹² quien establece que: Un agente es un sistema informático situado en un entorno y que es capaz de realizar acciones de forma autónoma para conseguir sus objetivos de diseño.

Observando las diferentes definiciones de lo que se constituye como un agente, se puede ver que muchas de sus características como su autonomía y su interacción con el entorno, no son lo bastante distintivas para separarlos claramente de

¹⁰ Huhns and Singh.

¹¹ Stuart Russell and Peter Norvig, *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, 2 edition (Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall, 2002).

¹² M. Wooldridge, 'Agent-Based Software Engineering', *IEE Proceedings - Software Engineering*, 144.1 (1997), 26–37 <<https://doi.org/10.1049/ip-sen:19971026>>.

sistemas convencionales. Según las definiciones de *Wooldridge y Jennings*¹³ los agentes informáticos suelen estar compuestos típicamente por los siguientes componentes:

- Autonomía: Los agentes operan sin que otros tengan control directo de sus acciones y de su entorno interno.
- Habilidad social: Los agentes interactúan con otros agentes.
- Reactivada: Los agentes pueden percibir su entorno y pueden responder al mismo.
- Proactividad: Los agentes también son capaces de tomar la iniciativa, involucrándose en comportamientos dirigidos a un objetivo propio.

Estos componentes también pueden ser atribuidos a otros programas y sistemas que no correspondan a lo que es un agente, una forma más útil para crear un agente es establecer que posee las siguientes características ¹⁴:

- Percepción: Pueden percibir el entorno, posiblemente incluyendo la presencia de otros agentes a su alrededor.
- Representación: Tiene un conjunto de comportamientos que son capaces de representar. Con frecuencia, estos comportamientos incluyen:
 - Movimiento: Se pueden mover dentro de un espacio (ambiente).
 - Comunicación: Pueden enviar y recibir los mensajes de otros agentes.
 - Acción: Pueden interactuar con el entorno.
 - Memoria: Tienen una memoria, que almacena sus percepciones de anteriores estados y acciones.

¹³ Michael Wooldridge and Nicholas R. Jennings, 'Intelligent Agents: Theory and Practice', *The Knowledge Engineering Review*, 10.2 (1995), 115–52 <<https://doi.org/10.1017/S0269888900008122>>.

¹⁴ Nigel Gilbert, *Agent-Based Models*, 1 edition (Los Angeles: SAGE Publications, Inc, 2007).

- Políticas: Tienen un conjunto de reglas, características, y/o estratégicas que determinan, dada su situación actual, qué comportamientos no deben llevar a cabo¹⁵.

2.3. CONCEPTO DE LÓGICA DIFUSA.

"La lógica, de acuerdo con el *Webster's dictionary*, es la ciencia de los principios formales del razonamiento¹⁶. En ese sentido, la lógica difusa es considerada la ciencia de los principios formales del razonamiento aproximado, en donde el razonamiento preciso es un caso limitante¹⁷. "

Cuando se está hablando de lo que se considera como la lógica difusa, primero es necesario entender cómo ésta se diferencia de la lógica tradicional, la cual realiza sus operaciones según declaraciones que pueden ser verdaderas o falsas, en donde la lógica difusa realiza sus declaraciones con la posibilidad de que estas pueden ser verdaderas, falsas, o cualquier de los valores continuos que están en medio¹⁸.

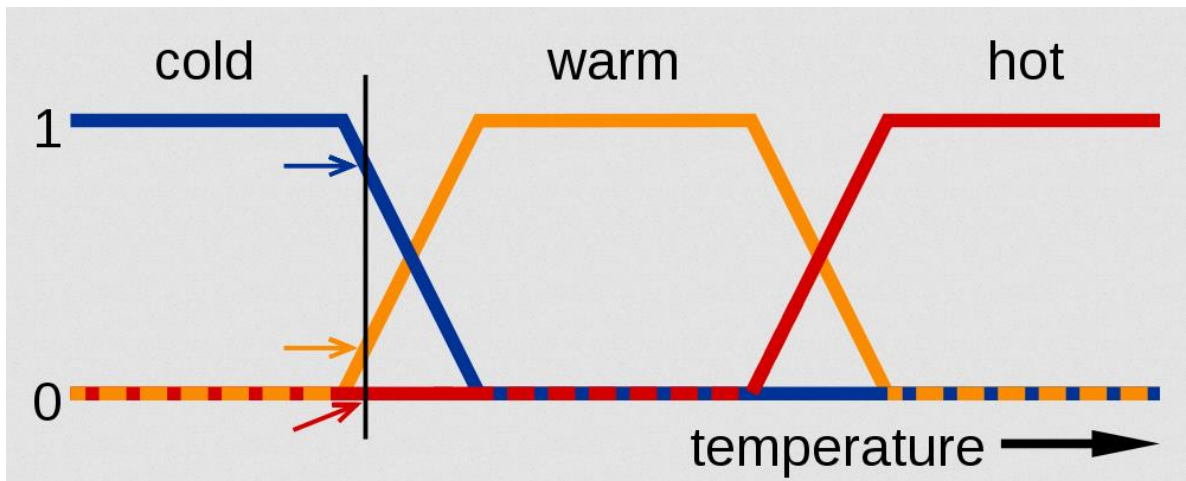
¹⁵ Elena González, 'Modelado de Evacuación de Multitudes Mediante Agentes y Transcripción de Comportamientos', 2011.

¹⁶ <https://www.merriam-webster.com/dictionary/logic>

¹⁷ Lotfi A. Zadeh and Rafik A. Aliev, *Fuzzy Logic Theory and Applications: Part I and Part II* (New Jersey: WSPC, 2018).

¹⁸ [https://www.merriam-webster.com/dictionary/fuzzy logic](https://www.merriam-webster.com/dictionary/fuzzy%20logic)

Figura 1 Representación de la lógica difusa¹⁹.



En la *Figura 1* se utiliza el cambio de temperatura de frío a caliente, como medio para ilustrar la implementación de la lógica difusa, en donde no solo existen los valores de frío y caliente, sino que también se toma en cuenta valores en donde la temperatura puede ser considerada como tibia.

La propiedad de la lógica difusa de no trabajar en absolutos la hacen la herramienta ideal para realizar representaciones de nuestro mundo real en el mundo digital, esto ha llevado a su integración en varias áreas del desarrollo de software, en donde se pueden crear sistemas cuyas características sean representativas de elementos observados en el mundo real.

Hoy en día en el mundo de la ciencia de computación existe una gran variedad de programas y sistemas, como los agentes, que pueden utilizar la lógica difusa y su metodología de programación enfocada a resultados aproximados como la base para la realización de sus operaciones; gracias al amplio rango de resultados presentes al trabajar con la lógica difusa se ha abierto un nuevo camino para la creación de software más representativo del mundo real.

¹⁹ Imagen tomada de: https://en.wikipedia.org/wiki/Fuzzy_logic

2.3.1 Agentes con lógica difusa. Una de las posibles implementaciones para la lógica difusa, en el contexto de las simulaciones de multitudes, es la de la utilización de esta para la creación de agentes, más concisamente, en la modificación del comportamiento de los agentes cuya tarea es la de representar elementos del mundo real; con esta implementación de la lógica difusa dentro de los agentes se espera resolver el problema del aumento de la complejidad de las simulaciones de multitudes al crear modelos de simulación cuyos elementos puedan ser representativos de escenarios realistas sin la necesidad de aumentar el consumo de los recursos computacionales.

Ya teniendo una comprensión de la mayoría de los conceptos e ideas de la simulación de multitudes y de la lógica difusa que se utilizarán dentro de este proyecto, es necesario centrarse en cómo estos conocimientos serán implementados de manera práctica, en el siguiente capítulo se enfocará en los correctos métodos y prácticas utilizados para la creación de simulaciones con multitudes.

3. METODOLOGÍA PARA LA SIMULACIÓN DE MULTITUDES

En este capítulo se ilustran las metodologías usualmente utilizadas para la creación de simulaciones de multitudes basadas en agentes.

3.1 CREACIÓN DE SIMULACIONES DE MULTITUDES.

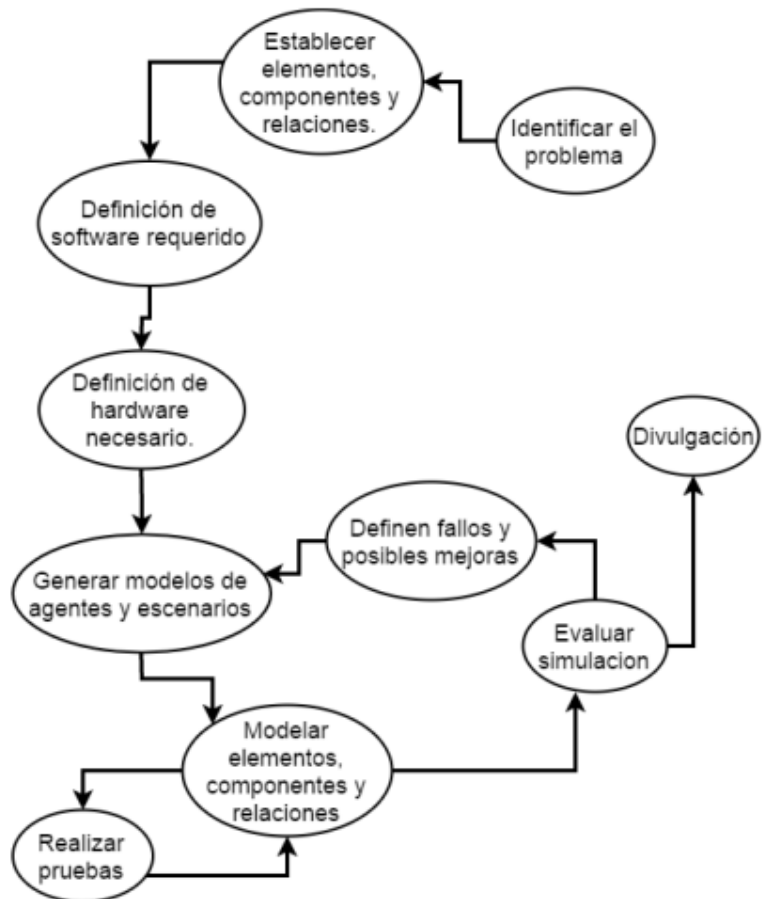
Cuando se desea crear una simulación de multitudes hay ciertas pautas que deben ser tomadas en cuenta para poder crear una simulación que cumpla con sus operaciones correctamente y entregue resultados exitosos que puedan ser de utilidad al usuario.

Estas pautas van desde la identificación del problema a simular hasta la fase experimental de la simulación, en donde se analiza si se cumplen con los parámetros establecidos.

- Es necesario identificar el problema y definir el tipo de simulación que se realizará, el entorno en el que el agente interactúa, la densidad de agentes, la causa y las consecuencias del fenómeno a simular, así como las reglas, obstáculos y condiciones presentes, el nivel de realismo que se generará en el escenario.
- Después de establecer el problema, es necesario identificar qué software cumple con las características dadas para realizar las simulaciones y que posea las mejores herramientas a utilizar.
- Con el software seleccionado se definen los requerimientos de hardware necesarios para realizar la simulación.

- A partir del tipo de densidad, complejidad y representación gráfica de los agentes, se seleccionará una arquitectura gráfica para procesos de cálculo.
- Se procede a generar los modelos de los agentes, con sus determinados comportamientos, reglas y efectos, y los escenarios en los que se realizará la simulación.
- Luego se realizan las pruebas, modificaciones y mejoras necesarias para finalmente evaluar los comportamientos dinámicos de los agentes en la simulación con relación al problema planteado.

Figura 2 Diagrama de simulación de multitudes



En la *Figura 2* se puede observar el flujo de trabajo necesario para la creación de una simulación de forma gráfica, mostrando los pasos a seguir para poder obtener simulaciones correctas que puedan dar los resultados buscados.

Después de aprender la estructura básica para la creación de una simulación de multitudes que se utilizarán dentro de este proyecto de grado, se continuara en el siguiente capítulo a establecer las herramientas y componentes que se implementarán en la creación de los modelos de estudio.

4. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LOS CASOS DE USO

En este capítulo se establecerán las herramientas y escenarios que se utilizarán para la creación de los modelos de simulación de multitudes, denominados como casos de uso, cuya función será la de ilustrar como la implementación de la lógica difusa dentro de estas simulaciones alteran los resultados observados.

4.1 MODELADO Y SIMULACIÓN EN MIARMY CON MAYA AUTODESK.

Gracias a la integración del *plug-in*²⁰ de **Miarmy**²¹, **Maya Autodesk**, un software especializado en el modelado, simulación y rendering de animaciones 3D, puede ser utilizado para la realización de simulaciones de un gran número de elementos cuya lógica está basado en el lenguaje humano, en donde los individuos toman decisiones a cada momento a partir de lo que está sucediendo a su alrededor.

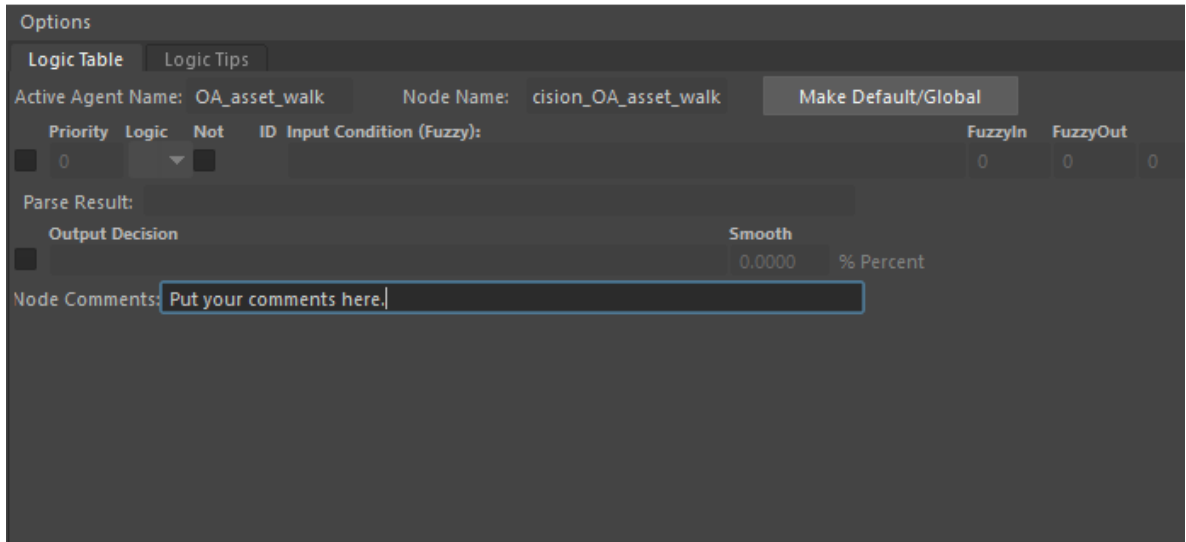
En **Miarmy** las condiciones y decisiones que afectan a los agentes son denominadas como "sentencias de entrada" y "salida de decisiones" respectivamente y son evaluadas automáticamente con lógica difusa.

4.1.1 Nodos de decisión. El comportamiento de los agentes está dictado por medio de nodos de decisiones, las cuales son pruebas condicionales que determinan si un agente realiza una acción o no.

²⁰ Componente de software que añade una característica específica a un software existente.

²¹ <http://www.basefount.com/miarmy.html>

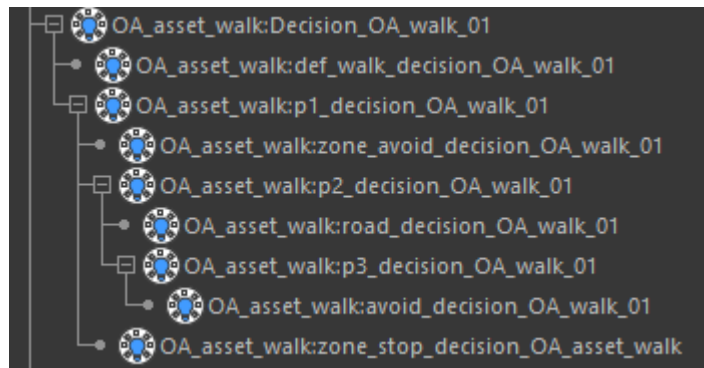
Figura 3 Nodo de decisión.



La *Figura 3* muestra la ventana básica para la creación de un nodo de decisión antes que algún parámetro sea integrado.

Los nodos de decisiones pueden ser organizados por prioridad de importancia, creando una jerarquía que indica a los agentes las acciones que deben ser tomadas por encima de otras.

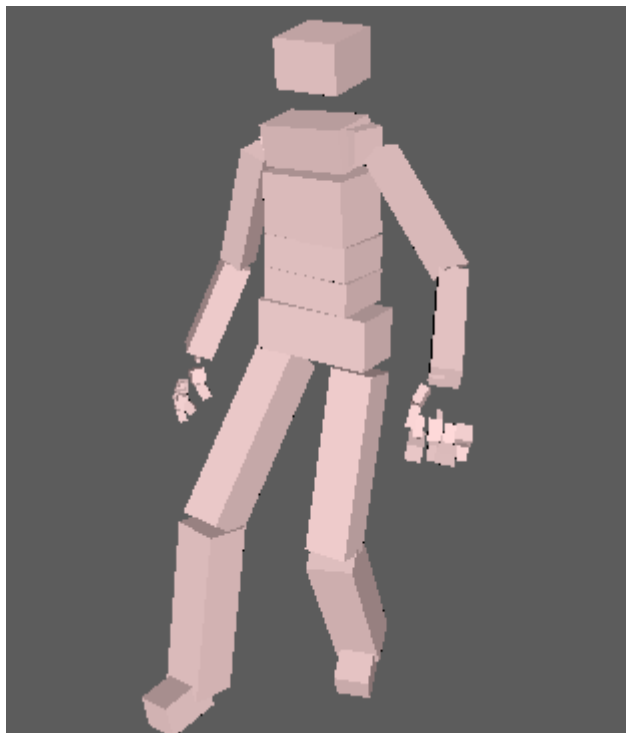
Figura 4 Lista de prioridad de nodos de decisión.



En la *Figura 4* vemos la lista de prioridad implementada durante este proyecto donde OA_asset_walk:p1_decision_OA_walk _01 indica que los nodos dentro de este elemento son de prioridad 1 y así sucesivamente.

4.1.2 Gestión y modelado de agentes. Con la ayuda de *Miarmy* se pueden crear una gran variedad de modelos como agentes, siempre y cuando estos tengan una estructura ósea que esté integrada a *Miarmy* y “*placement node*”²², *Miarmy* puede generar automáticamente un prisma rectangular alrededor de la estructura ósea conocida como la “*Skin*”²³, cuyas dimensiones pueden ser alteradas según las necesidades del modelo.

Figura 5 Agente creado en Maya Autodesk.



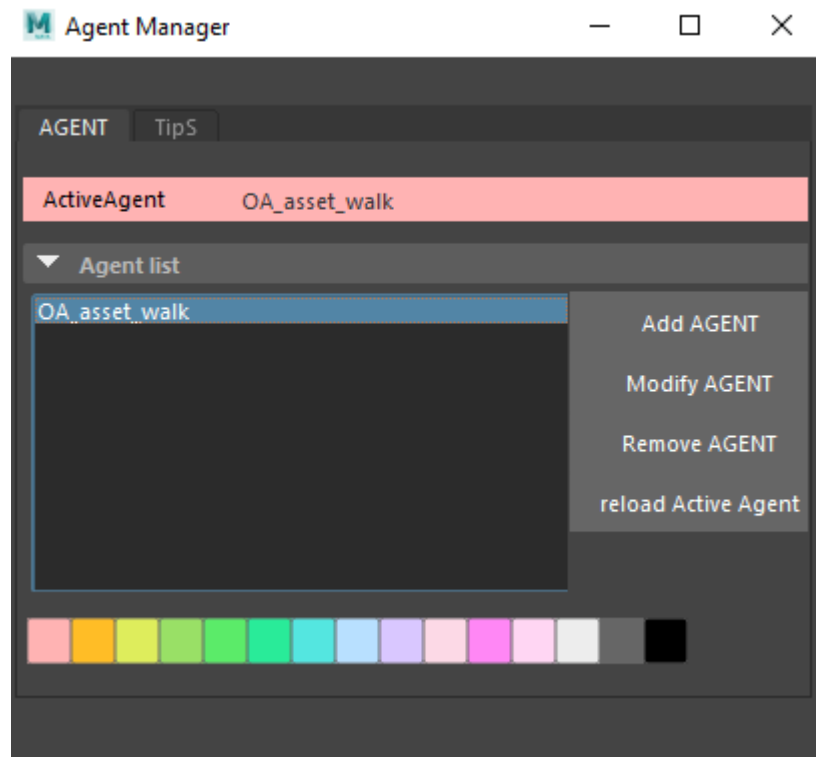
²² Punto de referencia que ubica a un agente en el espacio.

²³ Representación digital de la piel, la carne, etc.

En la imagen de la *Figura 5* se puede apreciar el modelo de agente creado para el desarrollo de este proyecto, siendo una representación de una persona adulta.

Miarmy puede gestionar más de un agente al mismo tiempo utilizando la herramienta de "**Agent Manager**" con la cual se puede controlar los parámetros de cada tipo de agente, desde el nombre que los identifica hasta el color que utilizan en la simulación.

Figura 6 Administrador de agentes.



El Administrador de agentes, como se observa en la *Figura 6*, es una herramienta de **Miarmy** para la administración de diferentes agentes según las necesidades del usuario.

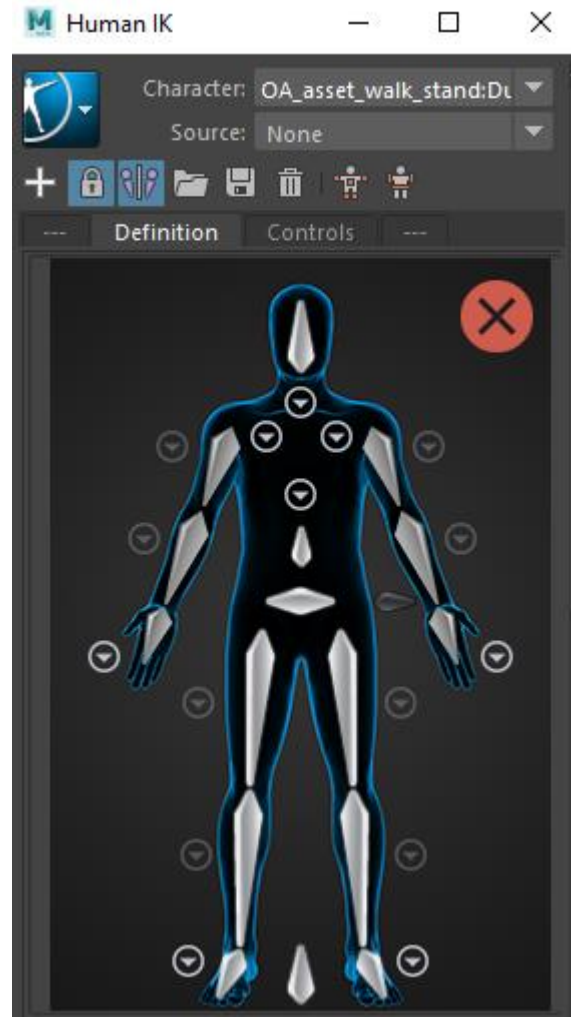
Otra de las características que tiene **Miarmy** es la de gestionar las animaciones²⁴ que pueden realizar los agentes; las animaciones son la herramienta utilizada para la creación del comportamiento básico del agente que se desean observar, cómo son las acciones de caminar, detenerse, correr, etc. Las animaciones son creadas con el uso de **Maya Autodesk** e implementadas en **Miarmy** donde nodos de decisión se encargan de correr las animaciones según las acciones que se desean realizar.

Para la creación de los agentes en si se utilizan las herramientas dadas por **Maya Autodesk** y **Miarmy**; la estructura ósea y las animaciones son creadas con el módulo de **Human IK**, utilizando el “**Human IK Example**” como control *rig*²⁵ y la “**walk animation example**” como la animación principal para el movimiento del agente, la cual es integrada al agente por medio de nodos de decisión.

²⁴ Movimiento de un objeto 3D en repetición.

²⁵ Estructura a la que se le aplicarán las animaciones y que permite el control de la estructura ósea como una unidad

Figura 7 Administrador de Human IK.

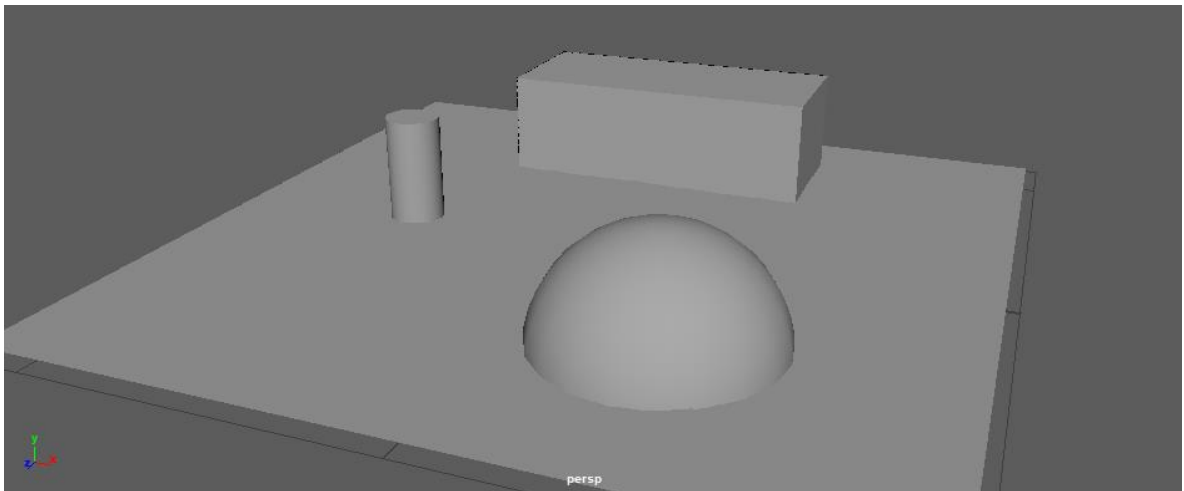


Una de las herramientas que posee Maya Autodesk para la creación de animaciones es el Administrador de Human IK, la cual es utilizada para identificar la estructura general del elemento a animar, como se observa en la *Figura 7*.

4.1.3 Gestión y modelado de escenarios. Los escenarios creados para las simulaciones están compuestos de dos partes, los objetos 3D creados y administrados por **Maya Autodesk**, y los componentes delimitantes de **Miarmy**.

Los objetos 3D son en sí figuras geométricas de polígonos cuya tarea es la de generar una representación virtual del espacio en donde se realizará la simulación, su función es puramente estética ya que los objetos 3D en si no interactúan con la simulación, la tarea de estos objetos es la de proveer una asistencia visual al observador de cómo los agentes deberán interactuar si se encontraran en el mundo real.

Figura 8 Escenario 3D.



En la *Figura 8* se puede observar un ejemplo de un escenario creado en **Maya** utilizando las herramientas de modelado 3D

La interacción del escenario es realizada por **Miarmy** con el uso de “**zones**”, “**roads**”, “**spots**”, y otras herramientas de **Miarmy** los cuales crean regiones, tanto tridimensionales como dimensionales, los cuales pueden ser detectados por los agentes y, por medio de nodos de decisión, afectar el comportamiento de los agentes según las necesidades de la simulación.

4.2. CASOS DE USO.

En el estudio de modelos de simulación es necesario crear ambientes donde se puedan observar las situaciones a realizar, en este proyecto de simulación de multitudes con lógica difusa se crearán 3 casos de uso en donde se analizarán el comportamiento de los agentes en la misma situación, pero con diferentes aplicaciones de lógica difusa en un mismo escenario. Los casos de uso serán utilizados como base de comparación para demostrar en cuál de los modelos se ilustra una representación más cercana a la realidad.

4.2.1 Lógica del agente. Todos los casos de usos trabajarán con el mismo modelo de agente, cuyos nodos de decisión se encargarán de determinar el movimiento de los agentes en los escenarios dados, el comportamiento que los agentes deberán seguir es el siguiente:

- Prioridad 0
 - Reproducir la animación de caminar.
- Prioridad 1
 - Evitar las **“zones”** o zonas que representan objetos sólidos.
- Prioridad 2
 - Seguir un **“road”** o camino determinado.
- Prioridad 3
 - Evitar otros agentes cuando estén cerca de otros agentes.

Animación de caminar. Para lograr que el agente camine, es necesario crear una animación que realice dicho movimiento. Para lograr el movimiento de caminar se debe cambiar la ubicación de cada uno de los huesos del modelo de tal forma de que la estructura ósea del agente realice la acción de caminar dentro de la línea de tiempo de Maya creando así un ciclo de animación.

Figura 9 Secuencia de animación.

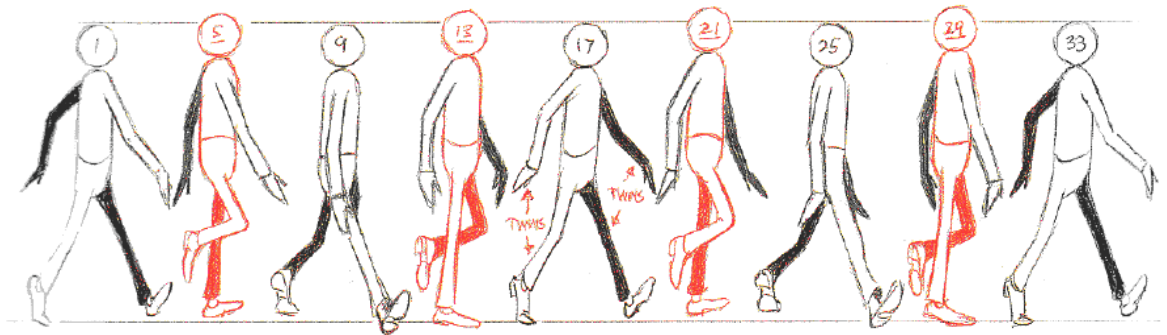
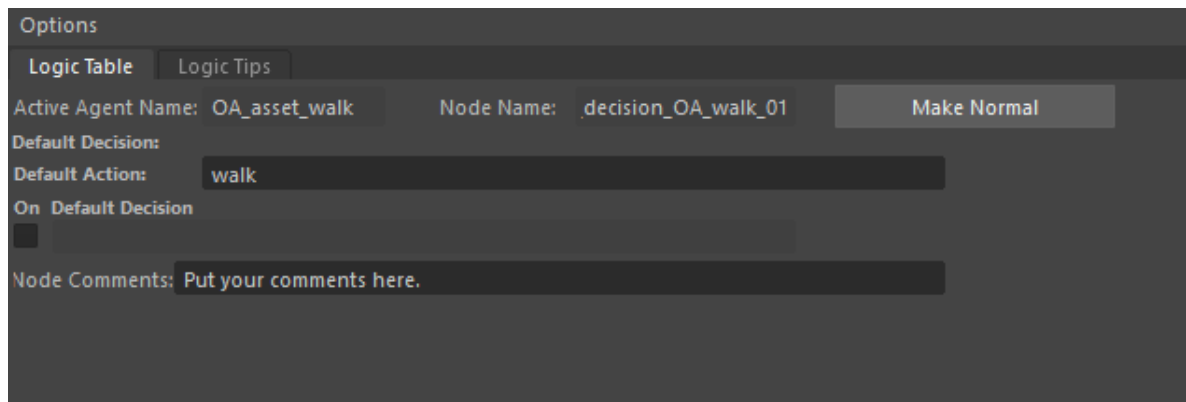


Figura 9 muestra un ciclo de animación que debe ser integrado dentro del agente como un elemento de un nodo de decisión para que este puede realizar la acción de caminar.

Figura 10 Nodo de decisión para caminar.

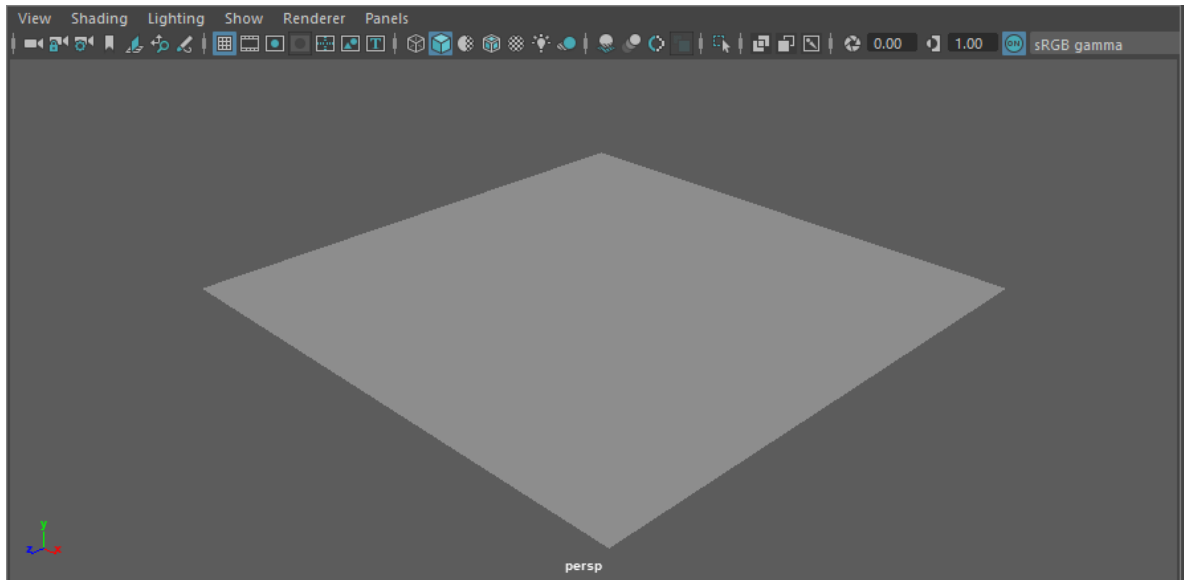


En la *Figura 10* se puede ver cómo se implementa el nodo de decisión para establecer las animaciones que realizara el agente.

Al crear un nodo de decisión de tipo default para la animación de caminar, de prioridad 0, se establece que la principal acción a realizar por el agente es la de caminar y la de tratar de caminar sin importar los obstáculos que encuentre el agente.

Evitar zonas. Al crear un escenario en donde se realiza la simulación se deben crear limitantes que permitan al agente interactuar con el escenario como si fuera un espacio físico, uno de los métodos que permiten lograr esto, es el uso de zonas a evitar, con el uso de las herramientas de **Miarmy** se pueden crear zonas a partir de planos 2D a los que se les puede asignar propiedades y uno de esas propiedades es la evitar dichas zonas.

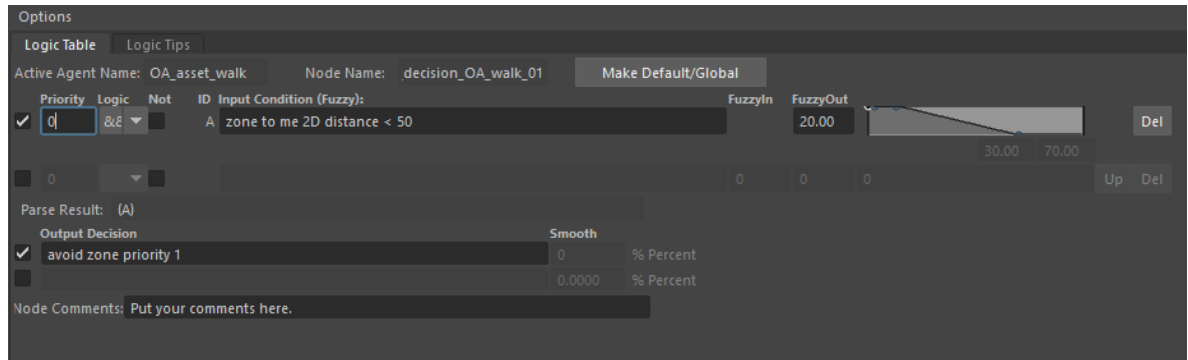
Figura 11: Ejemplo de una zona.



La *Figura 11* se puede observar una zona, la cual es un plano 3D integrado al módulo de **Miarmy**, su utilidad depende de las necesidades de los usuarios, pero en este proyecto se usará como delimitante del comportamiento de los agentes.

Hay varias razones para crear zonas dentro de una simulación, pero comúnmente son utilizadas para la representación de objetos sólidos por los cuales los agentes no pueden pasar. Ya que el escenario es un grupo de polígonos geométricos que representan estructuras físicas que no interactúan con las simulaciones, es necesario indicarle al agente como este debe interactuar con estos obstáculos.

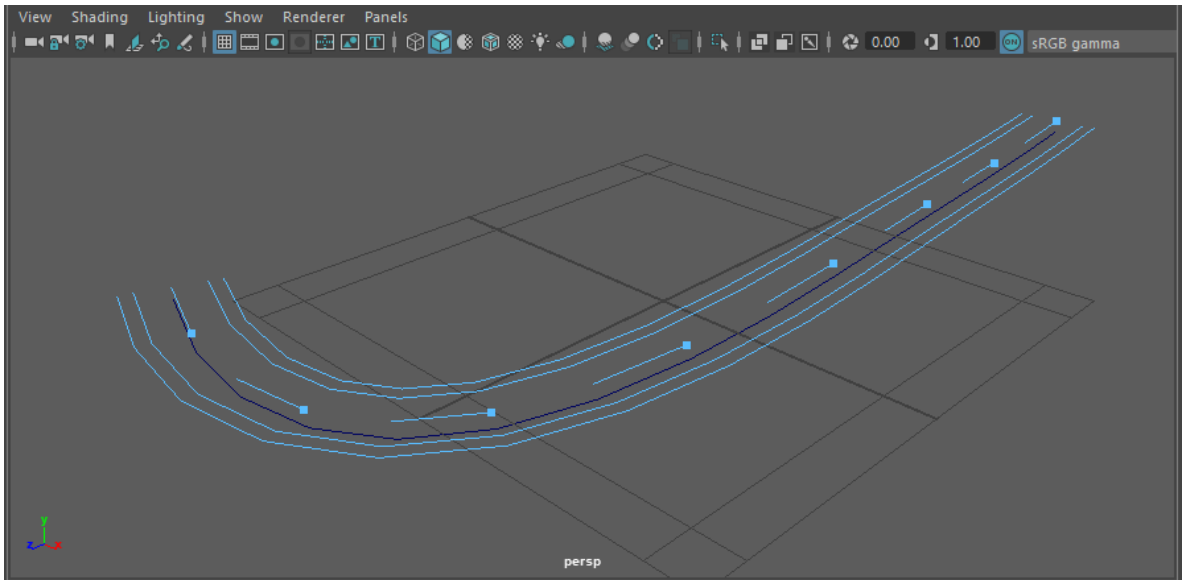
Figura 12: Lógica de decisión para evitar una zona.



La *Figura 12* muestra el nodo de decisión, con sus respectivos parámetros, utilizado en este proyecto para crear el comportamiento de los agentes de evitar las zonas.

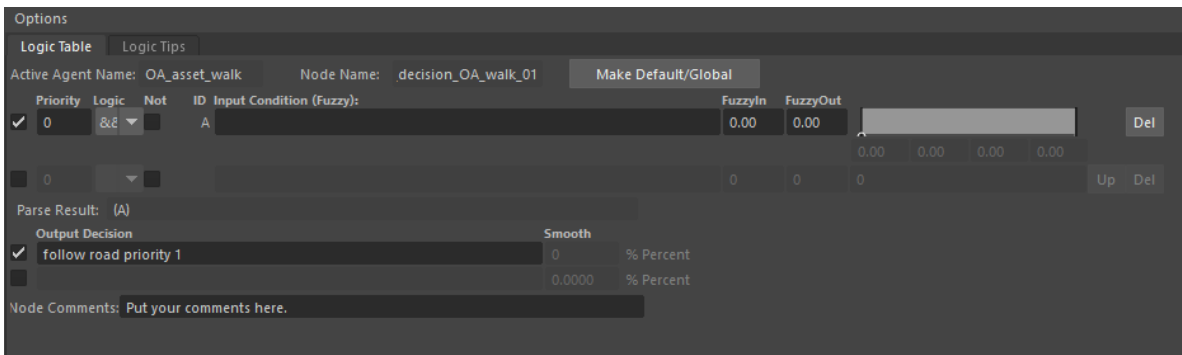
Seguir un camino. Dependiendo de la simulación a realizar se puede desear que algunos de los comportamientos realizados por los agentes sean predecibles, pero no a tal grado de que toda la simulación lo sea. gracias al uso de "**roads**" o caminos, los cuales son líneas 2D integradas a **Miarmy**, se pueden sugerir caminos a seguir por los agentes los cuales los pueden guiarlos por secciones específicas del escenario, sin la necesidad de modificar los otros comportamientos de los agentes.

Figura 13: Ejemplo de un Road (camino).



En la *Figura 13* se puede observar un Road o camino, creando una línea e implementando un elemento de **Miarmy** el cual tiene dirección y área de efecto que puede interactuar con los agentes.

Figura 14: Nodo de decisión para seguir un camino.



La *Figura 14* muestra el nodo de decisión, con sus respectivos parámetros, utilizado en este proyecto para crear el comportamiento de los agentes de seguir los **Roads**.

El nodo de decisión para los caminos está pensado para guiar a los agentes por los obstáculos presentes en el escenario y para simular el movimiento natural de las personas en un ambiente real.

Evitar otros agentes. Otro comportamiento importante que se debe tener en cuenta es el de representar correctamente a los agentes como entidades físicas que ocupan un espacio real, no solo con el ambiente en el que se encuentran sino entre ellos mismos.

Figura 15: Nodo de decisión para evitar otros agentes.

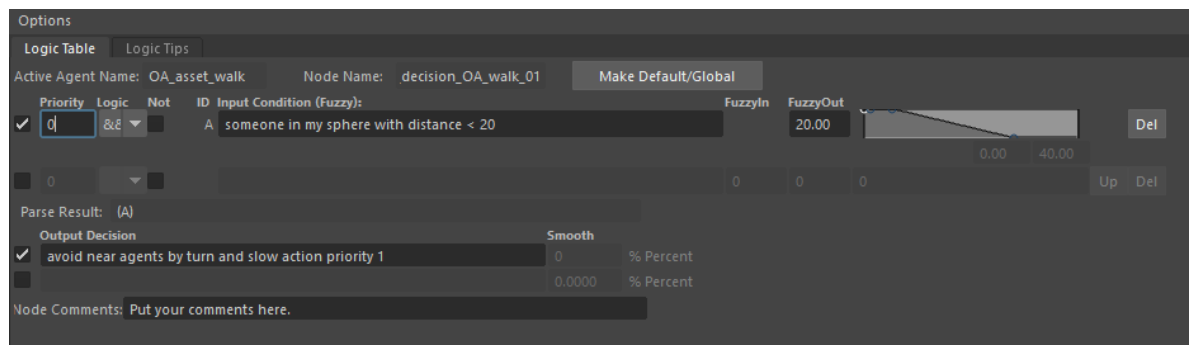


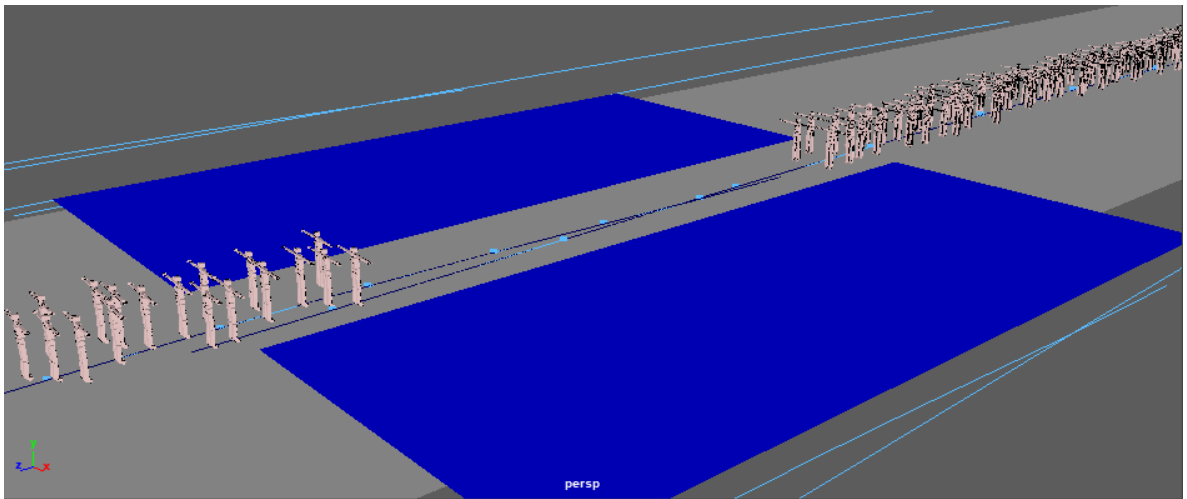
Figura 15. Muestra el nodo de decisión utilizado en este proyecto para crear el comportamiento de los agentes de evitar otros agentes, con el parámetro de activarse al detectar agentes a una distancia de 20 píxeles.

El nodo de decisión para evitar agentes se encarga de observar si otros agentes se encuentran en el camino del agente, de desacelerar las otras acciones que el agente puede estar realizando y de tomar una dirección diferente a donde se encontró el otro agente.

4.2.2 Primer caso de uso. Como primer caso de uso se visualizó la utilización de un escenario sencillo para poder observar el comportamiento del agente entre sí, sin obstáculos.

Escenario Como escenario se creó un corredor por donde los agentes caminaran por ambos lados al mismo tiempo.

Figura 16: Primer caso de uso en Maya Autodesk.



La imagen anterior muestra la implementación del primer caso de uso dentro de Maya Autodesk.

objetivo El objetivo de este caso de uso es el de comprobar el correcto comportamiento de los agentes al moverse en multitudes y al encontrarse con otros agentes, se busca observar una correcta implementación de los nodos de decisión de los agentes en un campo experimental.

4.2.3 Segundo caso de uso. Como segundo caso de uso se busca plantear una situación real cuyos resultados puedan ser comparados con eventos que se puedan observar en la vida cotidiana, el caso que se planteó es el de la simulación de los peatones pasando a través del portón de la universidad industrial de Santander, donde se espera observar un comportamiento semejante a la realidad por parte de los agentes.



Ilustración 1: Portería de la Universidad Industrial de Santander²⁶.

²⁶ Fotográfica tomada de: <http://marisela-castellanos.blogspot.com/2010/07/universidad-industrial-de-santander-uis.html>

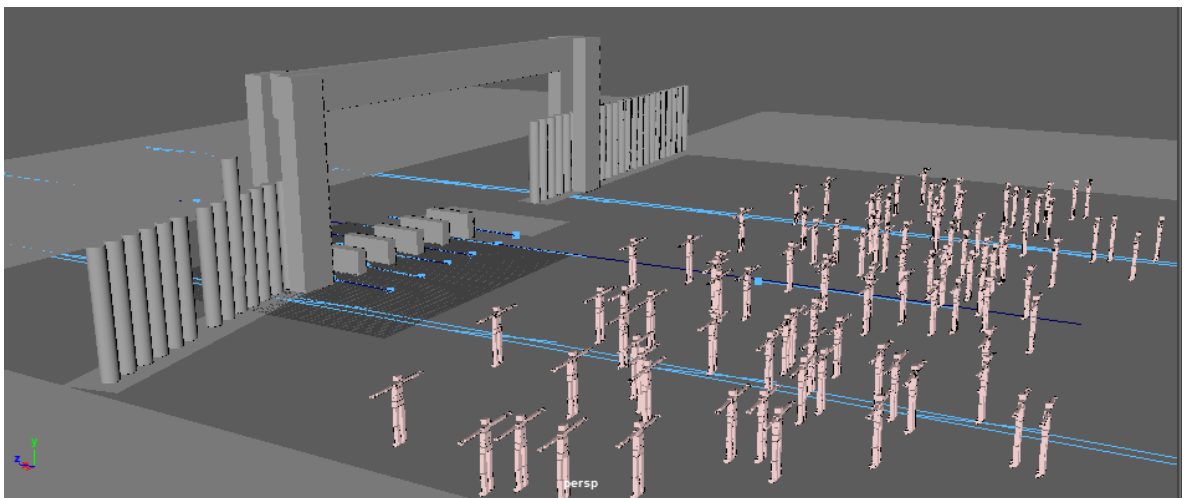
Escenario El escenario a simular es el estudio de la dinámica de comportamiento de una multitud al entrar y salir por la portería principal de la Universidad Industrial de Santander en los horarios de mayor flujo de individuos.

En horas específicas durante el día, como los espacios dados para el intercambio de clases, se puede apreciar un incremento significativo del flujo de personas que utilizan la portería principal de la Universidad, esto es debido a que la Universidad no trabaja con un horario continuo por lo que las actividades académicas son organizadas de tal forma que estas se realicen en bloques de dos horas, creando espacios en los que un gran número de estudiantes terminan o empiezan actividades al mismo tiempo.

Para la simulación se establece los diferentes componentes de la portería como obstáculos, estos elementos son:

- Las barandas separadoras.
- La caseta para los celadores.
- Las columnas de concreto.

Figura 17: Segundo caso de uso en Maya Autodesk.

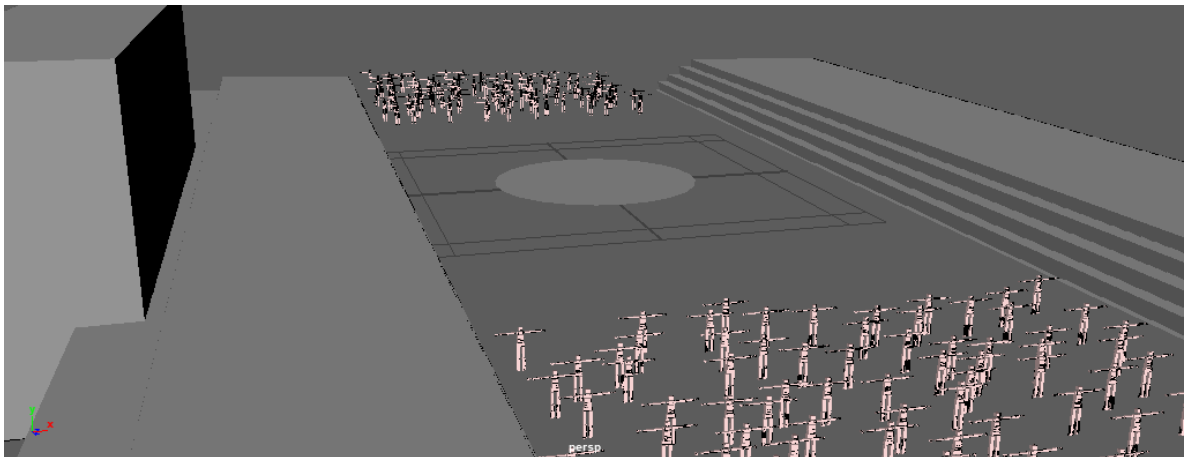


Esta imagen nos muestra la implementación del segundo caso de uso dentro de Maya Autodesk.

Objetivo El objetivo de este caso de uso es el de recrear una situación presente en el mundo real realizado por personas reales que pueda demostrar la efectividad de los agentes para recrear el comportamiento de individuos reales en un ámbito virtual.

4.2.4 Tercer caso de uso. En el tercer caso de uso se desea observar una situación específica en donde el uso de una simulación de multitudes permita tomar decisiones concisas en el mundo real a partir de los resultados dados, por lo que se plantea el escenario del análisis de un incidente, provocado por una “explosión” en la plaza del Che en la Universidad Industrial de Santander cuando hay un gran número de personas transitando por la plaza.

Figura 18: Tercer caso de uso en Maya Autodesk.



La imagen anterior muestra la implementación del tercer caso de uso dentro de Maya Autodesk.

Escenario En este escenario en particular se estudia el comportamiento de una multitud al encontrarse perturbado por fuerzas externas.

Tomando a la plaza del Che, en la Universidad Industrial de Santander, como escenario para la simulación por su amplia zona abierta sin obstáculos y por el gran número de personas que suelen transitar por la plaza para salir y entrar a la Universidad a cualquier hora del día, se puede crear una situación representativa de la realidad que permita una fácil observación del comportamiento de los agentes sin tener que preocuparse de obstáculos físicos.



Ilustración 2: Plaza de la Universidad Industrial de Santander²⁷.

Objetivo Este objetivo en particular está enfocado en el estudio del comportamiento de los agentes cuando se ven alterados por fuerzas externas, prestando atención a la capacidad de los agentes a seguir las reglas con los que fueron creados.

²⁷ Fotografía tomada de: <https://www.semana.com/noticias/industria-del-petroleo-en-colombia/115794>

Ya teniendo una idea de cómo y de qué manera serán creados los modelos de simulación en este proyecto es necesario establecer los métodos de cómo estos “casos de usos” nos pueden dar condiciones concisas a partir de nuestras observaciones analíticas, como se podrá ver en el siguiente capítulo.

5. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LOS CASOS DE USO

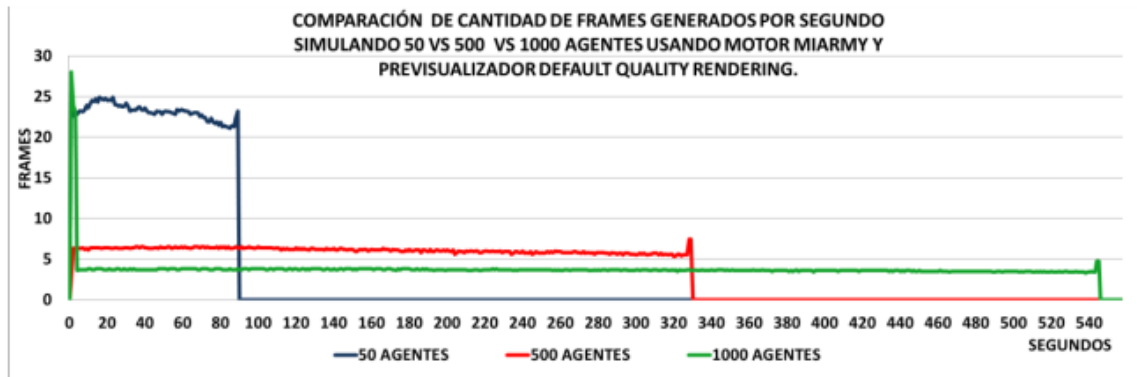
En este capítulo se establecerán los métodos que se utilizarán para demostrar las diferencias que se presentan al realizar la implementación de lógica difusa en diferentes modelos de simulación, también se realizarán las observaciones y análisis necesarios para establecer resultados concretos a partir de los modelos.

5.1 GRÁFICAS DE DESEMPEÑO.

Debido a que se espera un aumento en la complejidad de las simulaciones, gracias a la implementación de la lógica difusa al comportamiento de los agentes, es necesario la utilización de graficas de desempeño que permitan realizar comparaciones visuales del rendimiento de las simulaciones según las modificaciones que se hagan.

En este proyecto se realizará un análisis de desempeño a partir del conteo de los frames por segundo (FPS) para determinar el rendimiento de las simulaciones. Debido a que Maya Autodesk, en óptimas condiciones, ejecuta sus animaciones a 24 FPS se puede concluir que una caída en el número de FPS en una simulación debe ser el resultado de la dificultad de maya de renderizar la simulación.

Figura 19: Ejemplo de una gráfica de desempeño²⁸.



La *Figura 19* muestra el análisis de desempeño de una simulación en donde se observan las diferencias de rendimiento causadas por el número de agentes dentro de la simulación.

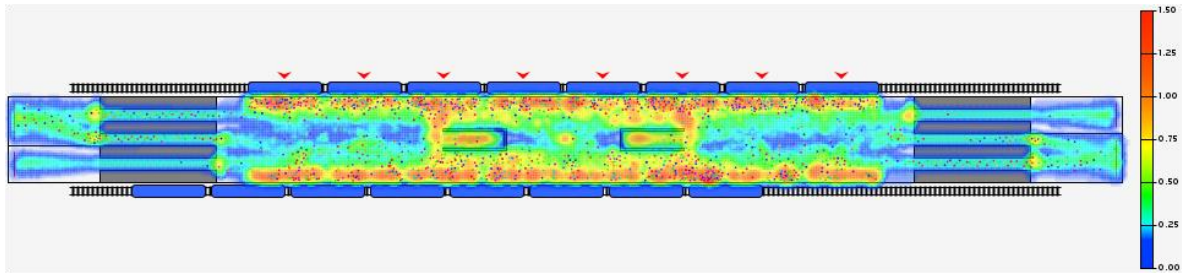
5.2 HEATMAP.

Los mapas de densidad (o Heatmap²⁹) son representaciones gráficas de interacciones que utilizan una serie de colores para indicar la forma en la que ciertos datos se superponen unos con otros.

²⁸ Imagen tomada de: SIMULACIÓN Y VISUALIZACIÓN DE LA DINÁMICA DEL COMPORTAMIENTO DE MULTITUDES USANDO ACELERADORES GRÁFICOS Granados.

²⁹ Alexandre Perrot and others, 'Large Interactive Visualization of Density Functions on Big Data Infrastructure', in *2015 IEEE 5th Symposium on Large Data Analysis and Visualization (LDAV)*, 2015, pp. 99–106 <<https://doi.org/10.1109/LDAV.2015.7348077>>.

Figura 20: Ejemplo de un Heatmap³⁰



En la *Figura 20* se aprecia un HeatMap mostrando la concurrencia del movimiento de una multitud de personas dentro de una terminal.

5.2.1 Implementación de los HeatMaps para la simulación de multitudes. Con el uso de heatmap dentro de una simulación se puede realizar un análisis visual del comportamiento de los agentes al crear una ilustración de las zonas en un escenario donde un gran número de agentes se conglomeran al mismo tiempo.

En el contexto de las simulaciones de multitudes los heatmaps muestran la concurrencia del movimiento de los agentes, señalando los lugares de más frecuentan los agentes, permitiendo observar las zonas en donde los agentes no tiene un flujo constante de movilidad en el escenario.

5.3 CREANDO HEATMAPS EN MAYA.

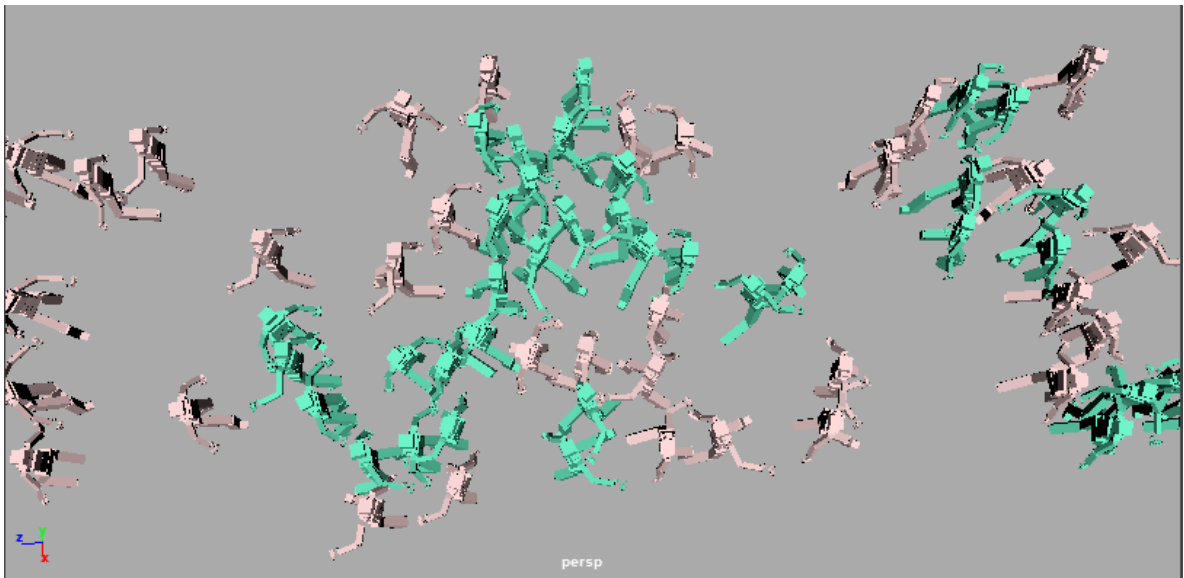
Maya Autodesk es un programa especializado en la creación y automatización de animaciones por lo que no está equipado con las herramientas necesarias para el análisis de las simulaciones creadas en ella, por lo que se utilizara una implementación de un Heatmap que permitir realizar un estudio visual de los movimientos generados por los agentes dentro de las simulaciones que permitan llegar a conclusiones concisas.

³⁰ Imagen tomada de:

https://help.anylogic.com/index.jsp?topic=%2Fcom.anylogic.help%2Fhtml%2Fmarkup%2FDensityMap.html&cp=2_2_5_0

Este heatmap será creado con la implementación de nodos de decisión que se encargará de cambiar el color de los agentes en relación a otros agentes, teniendo en cuenta que estas nuevas reglas no afecten el comportamiento establecido de los agentes existentes

Figura 21: Representación de un HeatMap en Maya Autodesk.



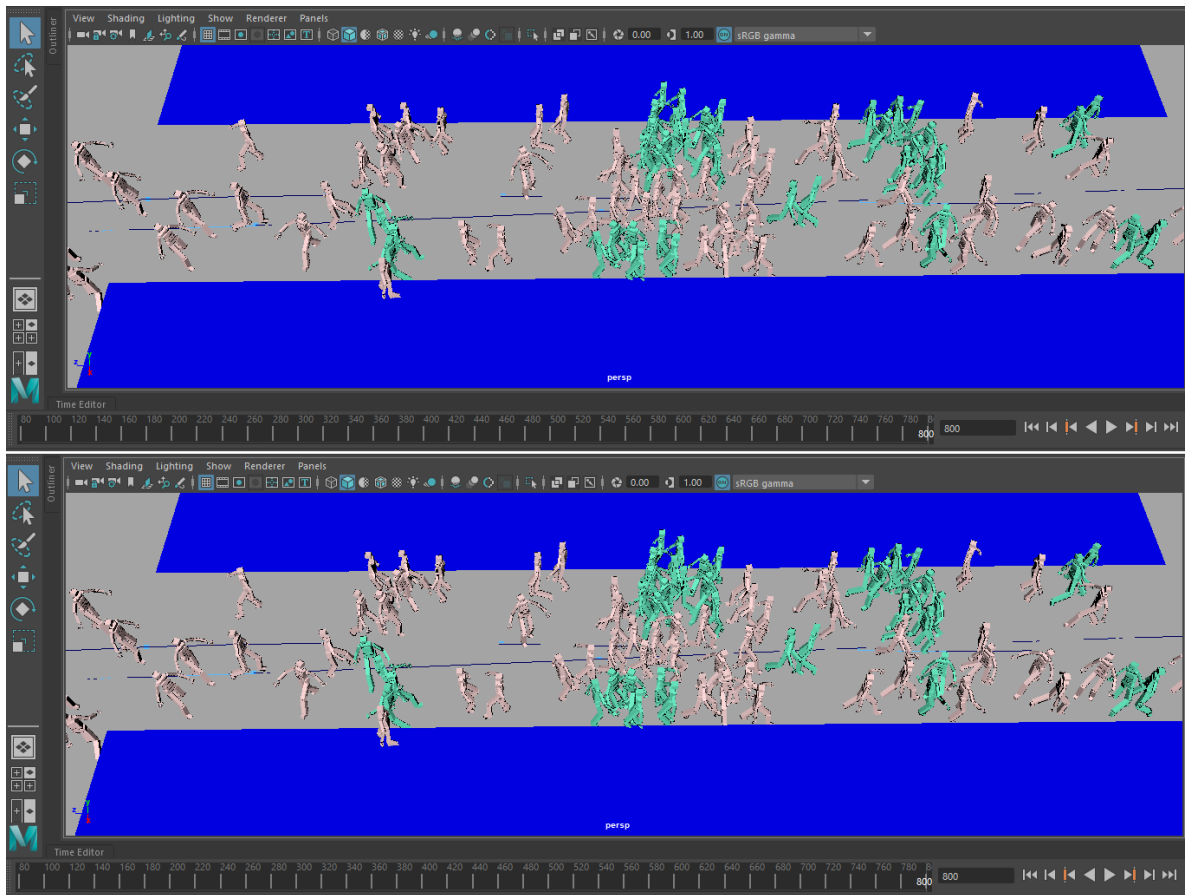
En la imagen de la *Figura 21* se puede apreciar un HeatMap rudimentario creado en Maya Autodesk con la utilización de las hermanitas dadas por **Miarmy**, en donde un nodo de decisión cambia el color de los agentes en colisiones.

5.3.1 Constancia de los análisis en Maya Autodesk. Gracias al proceso de animación automatizado que **Maya Autodesk** y **Miarmy** utilizan para las

simulaciones de los casos de uso, se puede asegurar un grado de constancia exacto, en donde los movimientos de los agentes se desarrollaran de la misma manera siempre y cuando las simulaciones realizadas utilicen los mismos parámetros, permitiéndonos observar los efectos presentes en los análisis al hacer cambios a dichos parámetros.

Gracias a este hecho se puede asegurar que las observaciones y comparaciones realizadas con heatmaps presentan resultados precisos que reflejan el puro comportamiento de los agentes según las circunstancias dadas.

Figura 22: Simulación de Maya Autodesk en dos ocasiones diferentes.



La imagen anterior ilustra la constancia que se puede encontrar dentro de las animaciones de Maya Autodesk, donde las animaciones son idénticas siempre y cuando no haya cambios en la lógica de estas.

5.4 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS.

El análisis que se realiza será la observación de la diferencia entre heatmaps después de la aplicación de lógica difusa a uno de los nodos de comportamiento a un grado de 0%, 10% y 20% de implementación; observando a los agentes, tanto fuera como dentro de los obstáculos de la simulación.

Figura 23: Implementación de la lógica difusa.



En la *Figura 23* se pueden ver los diferentes grados de lógica difusa que será implementado dentro de los nodos de decisión de este proyecto.

Los grados de implementación de la lógica difusa fueron escogidos arbitrariamente después de observar, por medio de experimentaciones, que el uso de valores de lógica difusa de 50% o mayor, modifica el comportamiento de los agentes a tal grado que este deja de ser el deseado para el desarrollo de la simulación.

Con el uso de los heatmaps se realizarán observaciones comparativas del comportamiento de los agentes y gracias a la manera como Maya genera las animaciones de las simulaciones se puede asegurar que los cambios observados serán causados por las modificaciones específicas realizadas a los agentes.

En este caso en particular se enfocará en el análisis de los cambios del comportamiento de los agentes al aplicar lógica difusa, específicamente, al nodo

de decisión encargado de evitar otros agentes. El enfoque en este nodo en especial es porque de los nodos utilizados para la creación de los agentes, este nodo es el encargado de dictar la mayoría de las interacciones en la simulación, por lo que cualquier cambio realizado a este nodo se refleja claramente como variaciones visibles en un heatmap.

Figura 24 Diagrama de la metodología de análisis.



La *Figura 24* muestra los pasos a seguir para recopilación y análisis de los datos obtenidos de las diferentes animaciones.

5.4.1 Frame específico. Debido a que las simulaciones son procedimientos complejos y que se desarrollan a lo largo de un tiempo dado, no es posible realizar un análisis del comportamiento correspondiente a toda la simulación en sí, por lo que es más práctico y eficiente escoger un frame o imagen, el cual sería el representante de toda la simulación a analizar.

Normalmente el frame utilizado como representante de la simulación muestra el mayor número de actividad y acciones teniendo lugar en la simulación, gracias a esto, se puede realizar observaciones que pueden ser trasladadas al resto de la simulación sin ningún problema; el método para seleccionar dicho frame depende de las necesidades de los usuarios.

Con los conceptos para el proceso de analizar las simulaciones definidos, es tiempo de pasar al desarrollo del análisis en sí, en el siguiente capítulo se realizará el análisis de los casos de uso establecidos y se señalará las observaciones encontradas al implementar la lógica difusa en las simulaciones.

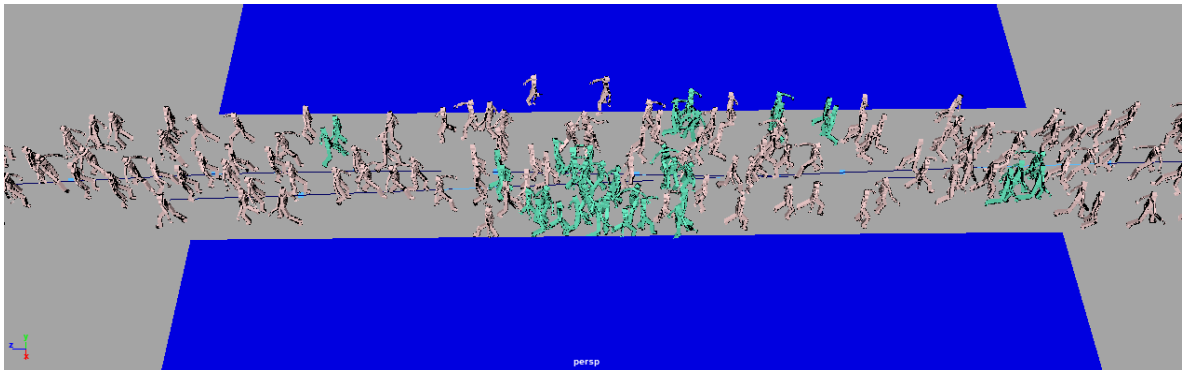
6. ANÁLISIS DE LOS CASOS DE USO

En este capítulo se implementarán los métodos establecido para el análisis de los diferentes casos de uso, observando las variaciones ocurridas al introducir los grados de lógica difusa dentro de cada simulación.

6.1 ANÁLISIS DEL PRIMER CASO DE USO.

Al correr las simulaciones del primer caso de uso, utilizando al frame 800 como el punto en donde se realizarán las comparaciones, se pueden observar las diferencias presentes en cada una de las simulaciones con sus grados de lógica difusa.

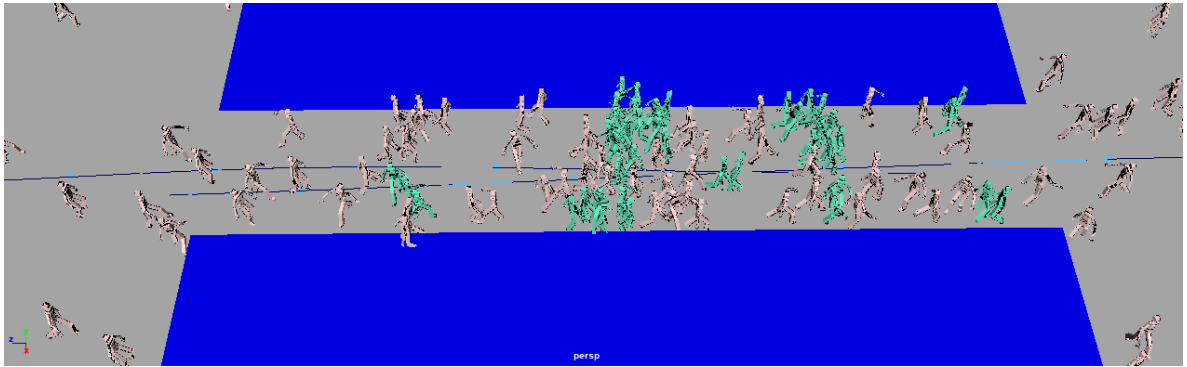
Figura 25: Primer caso de uso con lógica difusa del 0%³¹.



Al correr la simulación con una implementación de lógica difusa del 0% se puede observar el comportamiento general de los agentes, siguiendo las reglas establecidas, se observa que sin ninguna variación la mayoría de los agentes entran a la simulación sin ningún problema

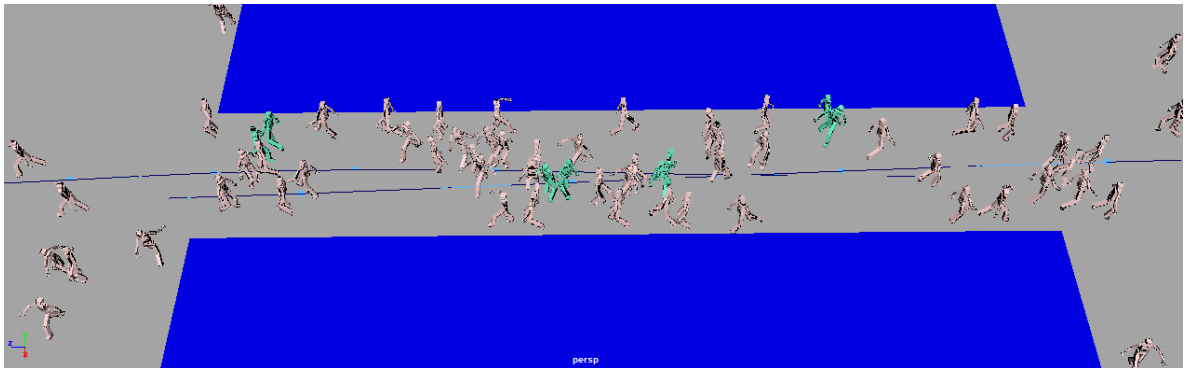
³¹ Video del primer caso de uso con lógica difusa del 0%: <https://youtu.be/c-nFTZcGUOc>

Figura 26: Primer caso de uso con lógica difusa del 10%³².



Al implementar la lógica difusa de un 10% se puede apreciar un cambio inmediato en el número de agentes que entran en la simulación, se puede observar que aun con la disminución del volumen de los agentes el patrón de su comportamiento sigue siendo parecido a lo observado con una lógica difusa de 0%, siendo la mayor diferencia los espacios vacíos entre grupos de agentes.

Figura 27: Primer caso de uso con lógica difusa del 20%³³.



Con una lógica difusa de 20% se puede observar que el comportamiento de los agentes cambia a tal grado que el número de los agentes dentro de la simulación disminuye sustancialmente hasta el punto de que cualquier observación realizada

³² Video del primer caso de uso con lógica difusa del 10%: <https://youtu.be/KgeDa1dmzNs>.

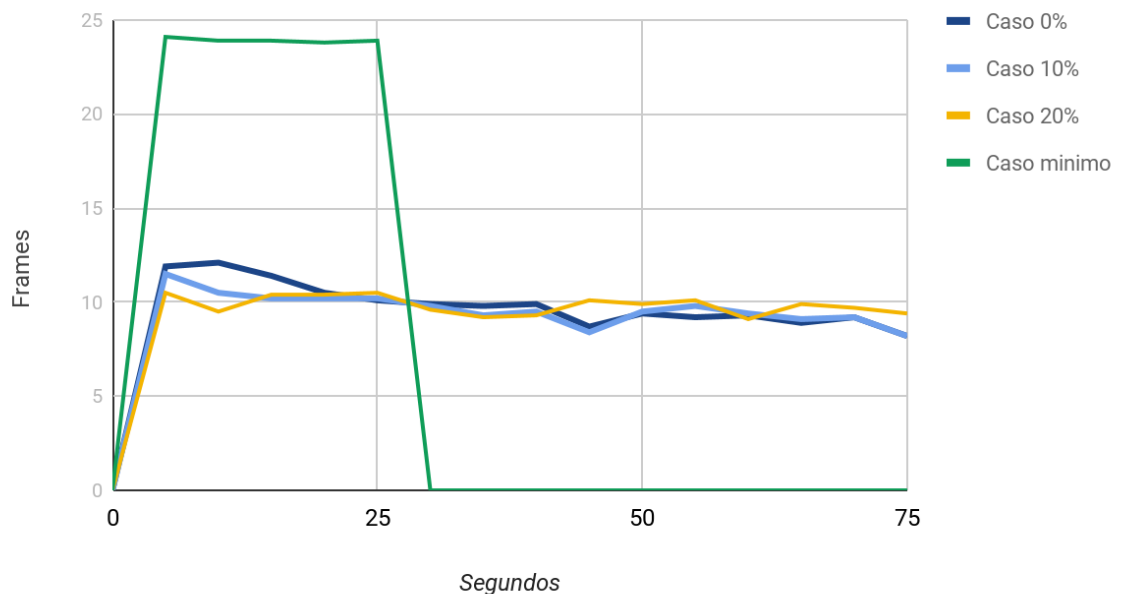
³³ Video del primer caso de uso con lógica difusa del 20%: <https://youtu.be/P4wR203CKR8>.

a este escenario darían resultados diferentes a las simulaciones con implementación de lógica difusa de 0 % o 10%.

6.1.1 Desempeño del primer caso de uso. Analizando el número de FPS en cada segundo de la simulación se puede observar la dificultad de ejecución del caso de uso.

Figura 28: Gráfica del desempeño del primer caso de uso.

Desempeño del primer caso de uso



La *Figura 28* muestra el desempeño de la ejecución de la simulación para el segundo caso de uso, corriendo la simulación con un número mínimo de agentes (Caso mínimo, 2 agentes), y con las implementaciones de la lógica difusa del 0% (Caso 0%), 10% (Caso 10%) y 20% (Caso 20%).

Gracias a estos datos se puede apreciar como un gran número de agentes puede afectar el desempeño de una simulación, en este caso en particular se puede observar un aumento del tiempo de ejecución de la simulación debido a una

disminución de los FPS en esta, pero aparte de estos cambios no se pudo identificar cambios significativos debido a la aplicación de la lógica difusa.

6.1.2 Resultados de los Heatmaps. Al contar el número de agentes en cada uno de los escenarios obtenidos con el uso de Heatmaps se observan los siguientes resultados:

Tabla 1: Análisis de los agentes en el primer caso de uso

Primer caso de uso					
Grado de lógica difusa	Total, número de agentes	Agentes dentro de la simulación	Agentes fuera de la simulación	Agentes en colisiones	Agentes sin colisiones
0%	200	114	86	40	74
10%	200	95	105	39	56
20%	200	49	151	8	41

En la Tabla 1 se pueden observar la cantidad de agentes observados en el frame específico de la simulación y según su contexto, las columnas de “Agentes dentro de la simulación” y los “Agentes fuera de la simulación” indica el número de agentes que se encuentran dentro del escenario que fue creado y los que se encuentran por fuera, de igual forma las columnas “Agentes en colisiones” y “Agentes sin colisiones” muestra la cantidad de agentes que se encuentran en colisiones con otros agentes y los que no lo están.

Después de analizar la información del primer caso de uso se pudo observar como el incremento de la lógica difusa dentro de las simulaciones puede cambiar el comportamiento de los agentes hasta tal punto en que los resultados mostrados

por la simulación no permitirían la toma de decisiones representativas de lo que ocurriría en el mundo real.

6.2 SEGUNDO CASO DE USO.

El segundo caso de uso simula un escenario real donde se puede observar como el comportamiento de los agentes se asemeja al de personas reales. Se utiliza el frame 800 como frame específico, y será necesario tener en cuenta que los agentes deberán pasar los obstáculos de simulación y que esta interacción cambiará el comportamiento de los agentes cuando se aplicara la lógica difusa dentro del escenario.

También fue necesario crear una distinción entre los agentes que pasan los obstáculos del lado izquierdo o derecho del escenario para evitar confusión en el movimiento de los agentes, esta distinción fue creada con un nodo de decisión encargado de cambiar los colores de uno de los grupos de agentes.

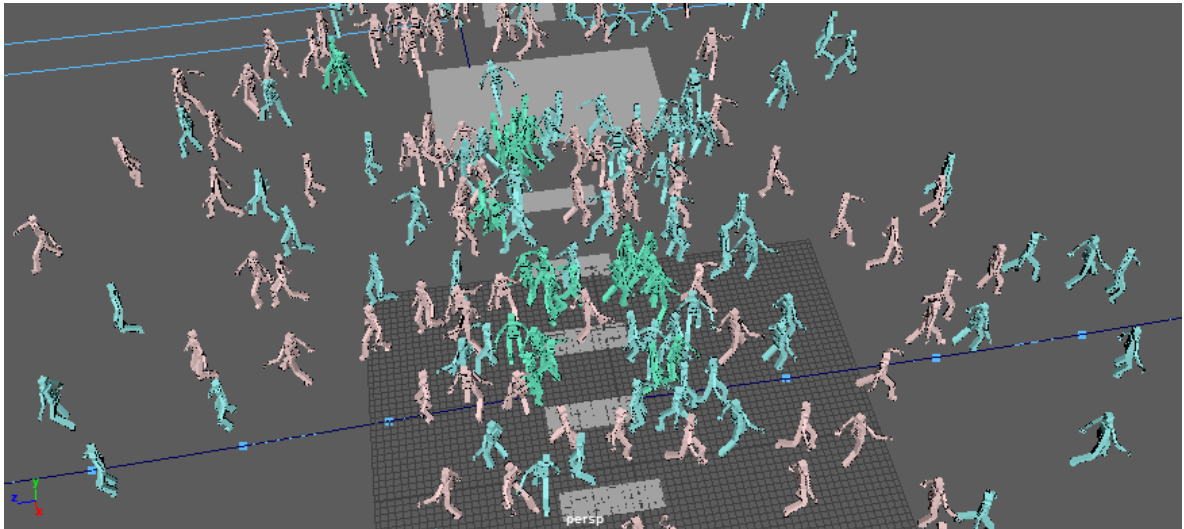
Figura 29: Segundo caso de uso con lógica difusa del 0%³⁴.



³⁴ Video del segundo caso de uso con lógica difusa del 0%: <https://youtu.be/Qf8KSCslsTw>.

Sin la aplicación de lógica difusa a la simulación se puede apreciar el comportamiento de los agentes y las dificultades que estos tiene al tratar de pasar los obstáculos en multitudes, también se observa la cercanía de los agentes que logran pasar los obstáculos y un alto número de colisiones.

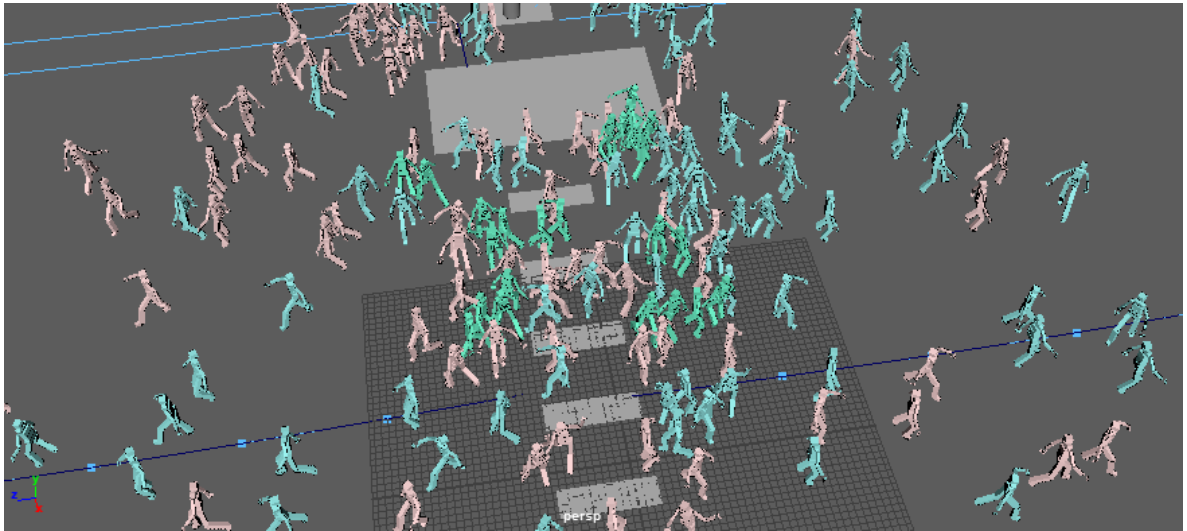
Figura 30: Segundo caso de uso con lógica difusa del 10%³⁵.



Con una implementación de 10% de lógica difusa se puede observar una reducción en el número de colisiones entre los agentes y un mayor distanciamiento entre los agentes que pasan los obstáculos, se destaca que las colisiones se concentran en los obstáculos, actuando como se esperaría en un escenario real.

³⁵ Video del segundo caso de uso con lógica difusa del 10%: <https://youtu.be/2PGx3UF-5lo>.

Figura 31: Segundo caso de uso con lógica difusa del 20%³⁶.



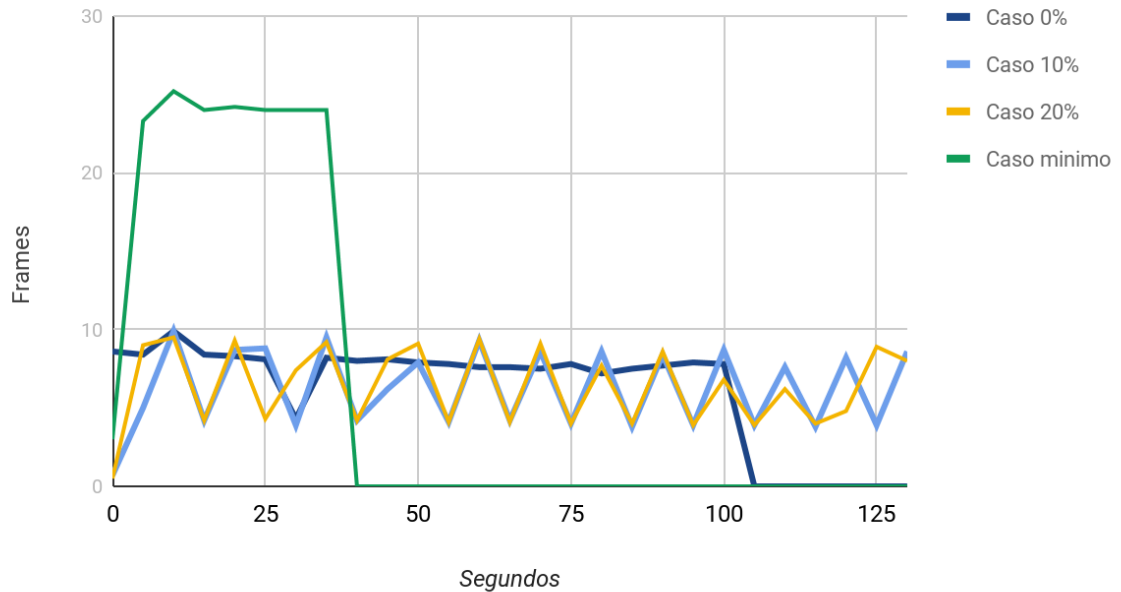
Observando el escenario con una lógica difusa del 20% se puede apreciar que las colisiones entre los agentes están ocurriendo después de que los agentes pasan los obstáculos, también se puede observar una mayor separación entre los agentes que pasan los obstáculos comparados con los otros escenarios.

6.2.1 Desempeño del segundo caso de uso. Analizando el número de FPS en cada segundo de la simulación se puede observar la dificultad de ejecución del caso de uso.

³⁶ Video del segundo caso de uso con lógica difusa del 20%: https://youtu.be/Dj5_KI7Ijw8.

Figura 32: Gráfica del desempeño del segundo caso de uso.

Desempeño del segundo caso de uso



La *Figura 32* muestra el desempeño de la ejecución de la simulación para el segundo caso de uso, corriendo la simulación con un número mínimo de agentes (Caso mínimo, 2 agentes), y con las implementaciones de la lógica difusa del 0% (Caso 0%), 10% (Caso 10%) y 20% (Caso 20%).

Con estos datos del segundo caso de uso se puede visualizar no solo los cambios sufridos de desempeño debido al aumento de los agentes en la simulación, sino que también se puede observar bajas periódicas en el número de FPS cuando se empiezan a aplicar la lógica difusa a este caso de uso.

6.2.2 Resultados de los Heatmaps. Al contar el número de agentes en cada uno de los escenarios se observan los siguientes resultados:

Tabla 2: Análisis de los agentes en el segundo caso de uso.

Segundo caso de uso						
Grado de lógica difusa	Total, de agentes	Agentes en la simulación	Agentes fuera de la simulación	Agentes de la izquierda	Agentes de la derecha	Agentes con colisión
0%	200	124	76	38	31	55
10%	200	89	111	29	34	26
20%	200	79	121	30	26	23

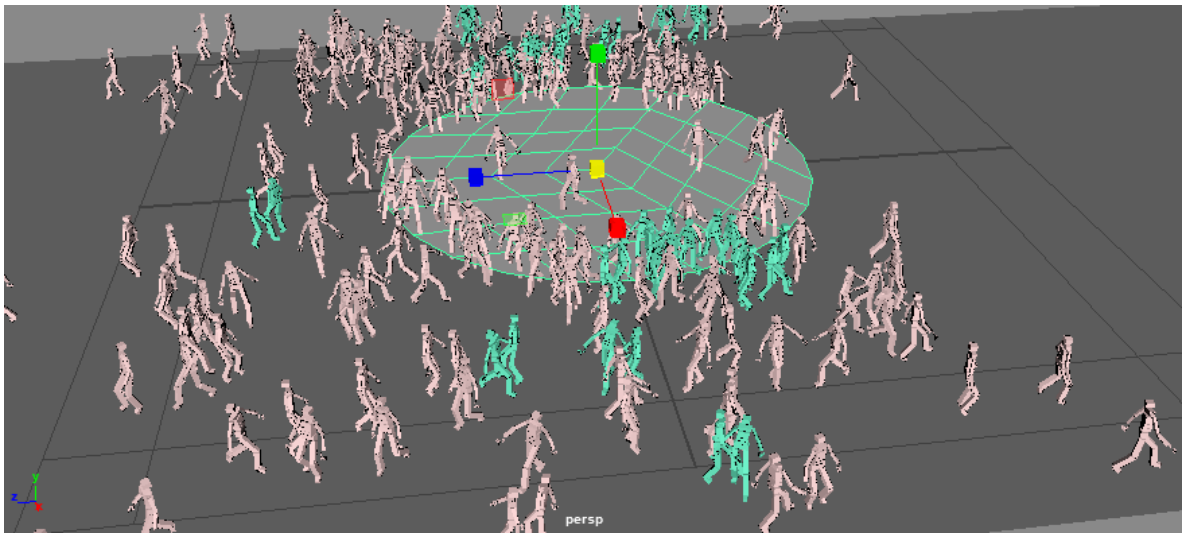
En la Tabla 2 se pueden observar la cantidad de agentes observados en el frame específico de la simulación y según su contexto, las columnas de “Agentes dentro de la simulación” y los “Agentes fuera de la simulación” indica el número de agentes que se encuentran dentro del escenario que fue creado y los que se encuentran por fuera, las columnas “Agentes de la izquierda” y “Agentes de la derecha” se encargan de señalar el número de agentes que pudieron pasar los obstáculos del escenario y la columna de “Agentes con colisiones” muestra la cantidad de agentes que se encuentran en colisiones con otros agentes.

Al realizar las observaciones de la implementación de la lógica difusa en una simulación más representativa del mundo real se puede apreciar diferencias más sutiles en varios escenarios, como un mayor distanciamiento entre los agentes que no se encuentran en los obstáculos y un enfoque más centrado de las colisiones de los agentes.

6.3 TERCER CASO DE USO.

El tercer caso de uso fue planteado con el objetivo específico de observar el comportamiento de los agentes al ser alterados por interacciones fuera del escenario inicial de la simulación, para crear esta interacción se utilizó una zona con animación que le permita entrar al escenario, también se establece como frame específico al frame 920.

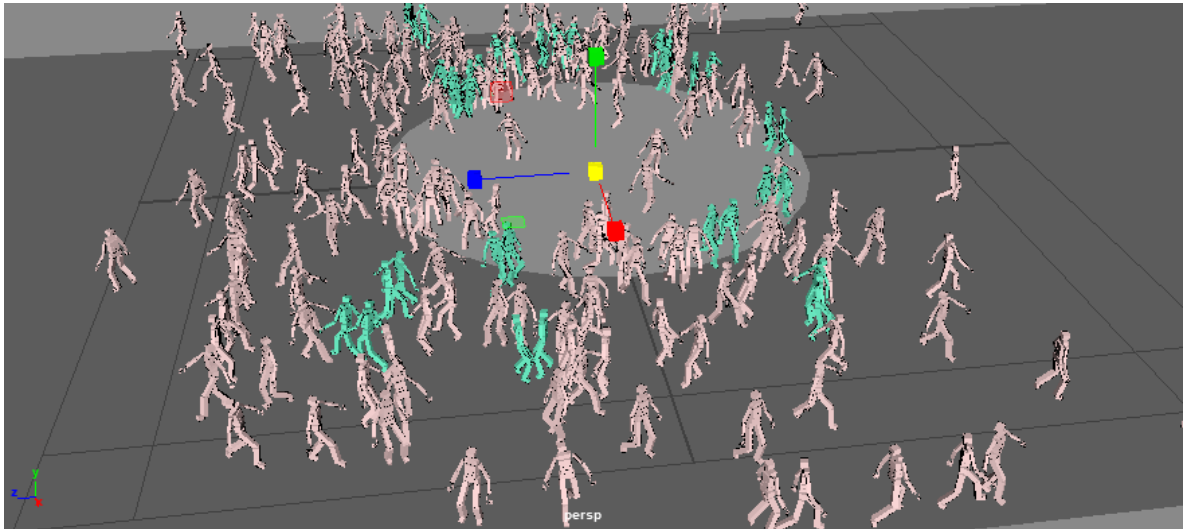
Figura 33: Tercer caso de uso con lógica difusa del 0%³⁷.



Observando la simulación sin la implementación de lógica difusa se puede ver el comportamiento normal de los agentes, los cuales tratan de seguir las reglas establecidas por los nodos de decisión y evitar la nueva zona, con una lógica difusa del 0% se pueden observar colisiones entre los agentes no solo en la cercanía a la zona a evitar sino también en lugares lejanos a esta.

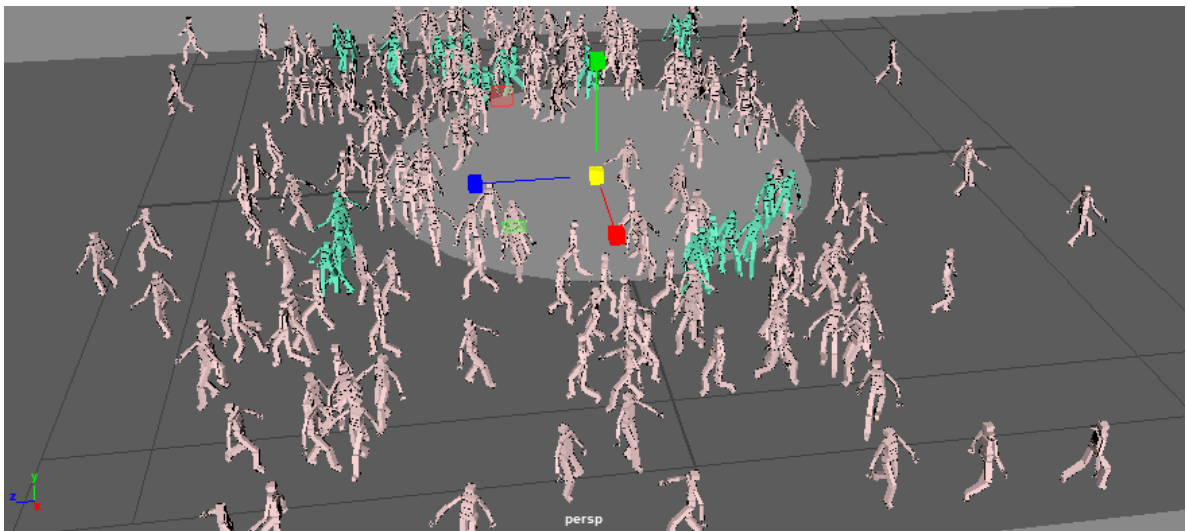
³⁷ Video del tercer caso de uso con lógica difusa del 0%: https://youtu.be/mx__tLLp47E.

Figura 34: Tercer caso de uso con lógica difusa del 10%³⁸.



Al implementar 10% de lógica difusa se puede observar una mayor agrupación en las colisiones alrededor de la zona a evitar, mostrando una alteración más uniforme del comportamiento de los agentes al tratar de alejarse del nuevo obstáculo

Figura 35: Tercer caso de uso con lógica difusa del 20%³⁹.



³⁸ Video del tercer caso de uso con lógica difusa del 10%: <https://youtu.be/atWBC5Kggqs>.

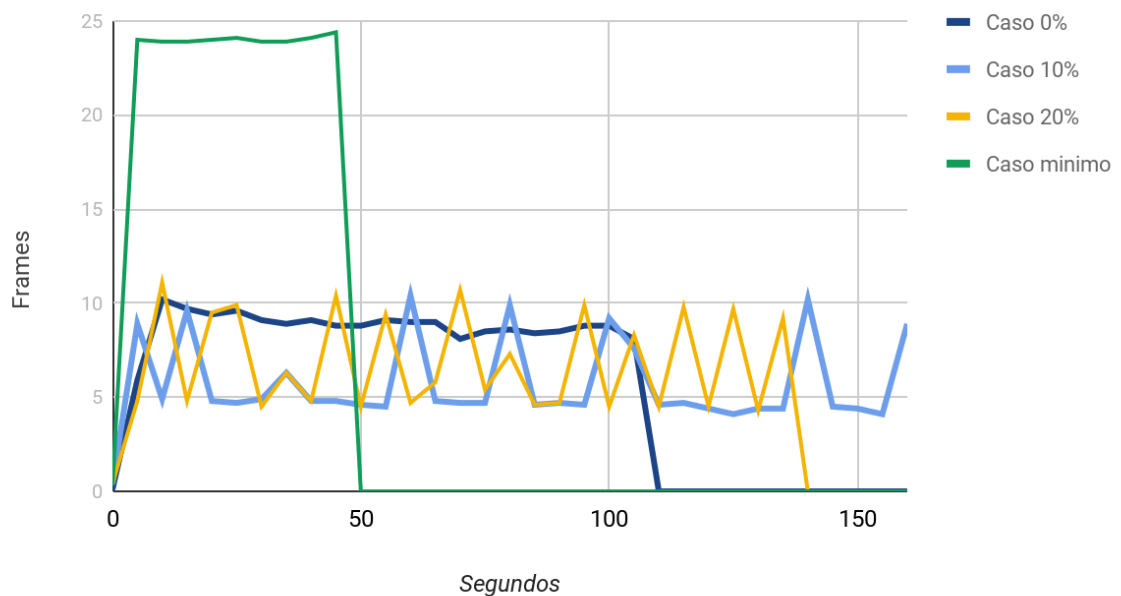
³⁹ Video del tercer caso de uso con lógica difusa del 20%: <https://youtu.be/sVbg7HKgafE>.

Al correr el escenario con una lógica difusa 20% se pueden observar pequeñas pero importantes diferencias con los otros escenarios, principalmente un mayor distanciamiento entre los agentes más lejanos a la nueva zona a evitar, también se puede denotar que, aunque se presenta casi el mismo número de colisiones entre los agentes se puede apreciar una separación de estos grupos de agentes.

6.3.1 Desempeño del Tercer caso de uso. Analizando el número de FPS en cada segundo de la simulación se puede observar la dificultad de ejecución del caso de uso.

Figura 36: Gráfica de desempeño del tercer caso de uso.

Desempeño del tercer caso de uso



La *Figura 36* muestra el desempeño de la ejecución de la simulación para el segundo caso de uso, corriendo la simulación con un número mínimo de agentes (Caso mínimo, 2 agentes), y con las implementaciones de la lógica difusa del 0% (Caso 0%), 10% (Caso 10%) y 20% (Caso 20%).

Debido a que en el tercer caso de uso se presenta la alteración del escenario original dentro de la simulación se observa una disparidad entre los datos obtenidos, en donde cada uno de los análisis de desempeño muestra datos

6.3.2 Resultados de los Heatmaps. Al contar el número de agentes en cada uno de los escenarios se observan los siguientes resultados:

Tabla 3: Análisis de los agentes en el tercer caso de uso.

Tercer caso de uso			
Grado de lógica difusa	Total, de agentes	Agentes en la zona a evitar	Agentes con colisiones
0%	200	38	51
10%	200	42	31
20%	200	45	37

En la Tabla se pueden observar la cantidad de agentes observados en el frame específico de la simulación y según su contexto, la columna “Agentes en la zona a evitar” muestra los agentes que aún no han salido de la nueva zona ha evitado que es introducida de forma externa, la columna de “Agentes con colisiones” muestra la cantidad de agentes que se encuentran en colisiones con otros agentes.

Observado las simulaciones del tercer caso de uso se puede apreciar cómo el comportamiento de los agentes se adapta a la integración de nuevas situaciones súbitas que los obligan a modificar las acciones que se encontraban realizando en el momento; se puede destacar que, aunque esto tome cierto tiempo, los agentes hacen lo posible para no romper las reglas establecidas en ellos por los nodos de decisión y que, aunque es de una forma sutil, el nuevo comportamiento establecido por la situación es afectada por la implementación de la lógica difusa

Después de observar y recopilar los cambios encontrados dentro de cada uno de los casos de uso es tiempo de establecer qué es lo que estos diferentes resultados pueden decirnos de la aplicación de la lógica difusa en el comportamiento de los agentes y que aportes computacionales podemos establecer de esos resultados.

7. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS

Al analizar toda la información dada por cada uno de los casos de usos en conjunto se puede empezar a observar como la implementación de la lógica difusa puede llegar a obtener resultados diferentes de los esperados inicialmente.

Con la implementación de la lógica difusa se empiezan a ver cambios en todas la simulaciones, y uno de estos cambios es la pérdida del desempeño computacional; debido a la simplicidad del primer caso de uso, *Figura 28*, no se puede observar fácilmente la diferencia en el rendimiento de las simulaciones, pero en el segundo y tercer caso de uso, *Figura 32* y *Figura 36*, se puede ver que la implementación de la lógica difusa afecta la ejecución del programa, generando un conteo errático de FPS y un aumento en general en la duración de las simulaciones, especialmente en el tercer caso de uso en donde debido a la forma en que los agentes necesitan reaccionar a una nueva situación rápidamente se observa una disparidad en los tiempos de ejecución.

En un análisis más centro en las simulaciones en sí, y estableciendo a las simulaciones de las multitudes con un grado de lógica difusa del 0% como los modelos básicos, se puede observar los resultados que las simulaciones normalmente deberían dar, en donde, sin la implementación de algún parámetro dentro de los agentes para alterar el nodo de decisión que evitar otros agentes se observa un alto número de colisiones en cada uno de los casos de uso, número que decrece significativamente al introducir lógica difusa a los agentes, estas colisiones ocurren debido a un tendencia de los agentes de permanecer en las posiciones aproximadas en las que originalmente fueron generados.

Con una lógica difusa del 10% los cambios dentro de la simulación son inmediatos, el número total de agentes dentro de la simulación disminuyen, las rutas tomadas por estos son alteradas y empieza a ver un mayor distanciamiento entre los agentes, algo que es de destacar, es la disminución y centralización de los agentes que experimenta colisiones entre sí, en vez de tener un gran número de colisiones dispersas en varios sectores de la simulación, las colisiones sólo pueden ser observadas en sectores específicos, normalmente en secciones cerca a los obstáculos, formando así un comportamiento más orgánico reflejando la tendencia de las personas de agruparse en lugares donde hay una baja movilidad en general.

Estas diferencias entre la lógica difusa de 0% y 10% son visibles en todos los casos de uso, pero pueden ser observados con mayor facilidad en el segundo caso de uso ilustrado por las *figuras 30 y 31*, en donde se puede observar una centralización de los agentes alrededor de los obstáculos en la simulación, después de aplicar la lógica difusa al comportamiento de los agentes.

Al observar las simulaciones con la implementación de lógica difusa del 20% se pueden observar que los cambios presentes en los escenarios siguen las tendencias encontradas en los casos que utilizan lógica difusa del 10%, en donde hay un mayor decrecimiento de colisiones, un mayor distanciamiento entre los agentes y, especialmente, un aumento en el número de agentes fuera de la simulaciones en sí, lo que empieza a afectar el comportamiento general de los agentes en general, ya que interacciones que existían dentro de los modelos que usan el 0% y el 10% de lógica difusa dejan de aparecer, se denota la tendencia de que las colisiones observadas en las implementaciones del 20% suelen estar dictadas sólo por las interacciones entre los agentes y no por los elementos que conforman las simulaciones.

Esta desviación del comportamiento de los agentes puede ser observados en las *figuras 2 y 27* del primer caso de uso, en donde la implementación de la lógica difusa del 20% evita a la mayoría de los agentes a entrar al corredor e interactuar en un espacio cerrado como es observado en el caso de no utilizar la lógica difusa, haciendo que el análisis de estas dos simulaciones que representan el mismo escenario dé resultados completamente diferentes entre sí.

Otro aspecto que puede ser observado en los casos que utilizan la lógica difusa del 20%, en diferencia a los que utilizan un 10%, es la falta de interacción entre los agentes y el entorno en el que se encuentren, a diferencia de las *figuras 30 y 32* en donde la implementación de la lógica difusa lleva a las colisiones de los agentes a centrarse alrededor de los obstáculos que se encuentran en la simulación, las *figuras 34 y 35* muestran un distanciamiento entre los elementos que normalmente llevarían a personas a agruparse y el posicionamiento de las colisiones en las simulaciones.

8. CONCLUSIONES

Dentro de este proyecto se realizó un estudio enfocado en la observación de las diferencias que se pueden encontrar en una simulación cuando se implementa la lógica difusa como un parámetro del comportamiento de los agentes en multitudes, y como los efectos encontrados pueden mostrar una representación más cercana a la realidad.

Se evaluaron tres simulaciones con el objetivo de observar el comportamiento de los agentes dentro de dichas simulaciones antes y después de implementación de la lógica difusa y cómo estas alteraciones pueden cambiar los resultados obtenidos de las simulaciones.

En el proceso de evaluación se identificó al nodo de decisión encargado de “evitar otros agentes”, como el componente ideal para ser integrado con la lógica difusa debido a su importancia a la hora de dictar el comportamiento de los agentes.

También se pudo observar como la implementación de la lógica difusa puede crear modelos de simulaciones con comportamientos más cercanos a la realidad, sin la necesidad de crear modelos más complejos, por medio de gráficas de desempeño encargadas de ilustrar las diferencias de rendimiento al utilizar lógica difusa en el comportamiento de los agentes.

Después de realizar el análisis del comportamiento de los agentes en diferentes situaciones se puede destacar como la implementación de la lógica difusa del 10%

puede generar alteraciones suficientemente distintas para que la forma en que los agentes responden en ciertas interacciones sea diferenciable sin ninguna dificultad, y que al mismo tiempo sean lo suficientemente parecidas a las simulaciones en su estado original para que los resultados obtenidos no puedan ser destacados por presentar escenarios diferentes a los que inicialmente fueron planteados.

Utilizando a **Maya Autodesk** y a **Miarmy** como herramienta para la creación de modelos de simulación de multitudes, se ha logrado hacer un énfasis en la importancia del comportamiento de los agentes a la hora de obtener resultados más representativos de lo que se encontraría en situaciones de la vida real.

Gracias a las herramientas encontradas en Maya Autodesk y Miarmy, que han sido desarrollados a lo largo de varios años por diferentes equipos de profesionales con sus respectivas áreas de especialidad, que son de fácil acceso y utilización, se ha podido hacer un enfoque en la búsqueda de la correcta implementación de estas herramientas para el desarrollo de este proyecto de análisis del comportamiento de agentes en simulaciones de multitudes. Con la ayuda de estos softwares se ha podido generar un ambiente en el que no existe la necesidad de crear nuevos programas que cumplan con las características necesarias para realizar las observaciones deseadas al comportamiento de los agentes al utilizar la lógica difusa como parámetro en sus interacciones dentro de las simulaciones.

Con la integración de la lógica difusa al comportamiento de los agentes se espera crear modelos de simulación que se acerquen a escenarios realistas sin la necesidad de ser de alta complejidad, utilizando las herramientas descritas durante este proyecto. Por ejemplo, con la utilización de este método se podría aumentar el realismo de las simulaciones para la planeación del ingreso y evacuación del personal de un edificio sin la necesidad de preocuparse por la

creación de comportamientos lógicos para los agentes que reflejen la variabilidad de una persona normal.

9. LIMITACIONES

Una de las limitaciones que se encontró en el desarrollo de este proyecto es la de la integración de lógica difusa dentro de los agentes. La mayoría de los programas especializados para la creación de simulaciones no permiten la implementación de agentes originales con sus propios parámetros de lógica, con la única opción siendo la integración de un módulo de lógica difusa del lenguaje de programación utilizado por el programa, esto llevó a la utilización de Maya Autodesk como programa principal para la creación de las simulaciones y no programas especializados como **Anylogic** o **Atreva Adaptive Modeler**.

Otras limitantes que se encontraron fueron:

El número de agentes dentro de la simulación, con los componentes de un computador de gama media se pudieron crear modelos de simulación con 200 agentes que permiten la observación del comportamiento de las multitudes, pero no se pudo realizar análisis con un número mayor de agentes.

Los escenarios diseñados para este proyecto no tuvieron en cuenta las mediciones de los lugares en los que se basan, ya que estos fueron creados con el objetivo de ser implementados en este proyecto.

Y la falta de información correspondiente al fenómeno de la utilización de la lógica difusa dentro de las simulaciones debido a una falta de estudios enfocados al tema.

10. RECOMENDACIONES

Como recomendación se sugiere la creación de una interfaz que permita la modificación de parámetros de la simulación en tiempo real para poder observar cómo estas alteraciones cambian el comportamiento de la simulación.

La implementación de lógica difusa dentro de programa especializado en la creación y análisis de modelos de simulación con la ayuda de componentes como el controlador de lógica difusa de jFuzzyLogic.

Y la creación de metodologías enfocadas en la obtención de información exacta de los fenómenos presentes al implementar la lógica difusa dentro de una simulación.

BIBLIOGRAFÍA

BURGOS GRANADOS, David Leonardo. «SIMULACIÓN Y VISUALIZACIÓN DE LA DINÁMICA DEL COMPORTAMIENTO DE MULTITUDES USANDO ACELERADORES GRÁFICOS», p. 106, 2015.

DE GYVES, Oriam y TOLEDO, Leonel. «Comportamientos en simulación de multitudes: revisión del estado del arte», *Research in Computing Science*, vol. 64, pp. 319-334, ene. 2013.

DE GYVES, Oriam, *et al.* «Simulación de Grandes Multitudes con Dinámica de Grupos», may 2014.

GILBERT, Nigel. *Agent-Based Models*, 1 edition. Los Angeles: SAGE Publications, Inc, 2007.

GONZÁLEZ, Elena. «Modelado de evacuación de multitudes mediante agentes y transcripción de comportamientos», ene. 2011.

HUHNS Michael N. y SINGH Munindar P. Eds., *Readings in Agents*, 1 edition. San Francisco, Calif: Morgan Kaufmann, 1997.

PARROT, ALEXNADER, *et al.* «Large interactive visualization of density functions on big data infrastructure», en *2015 IEEE 5th Symposium on Large Data Analysis and Visualization (LDAV)*, oct. 2015, pp. 99-106, doi: 10.1109/LDAV.2015.7348077.

RUSSELL, Stuart y NORVING, Peter *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, 2 edition. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall, 2002.

WANG, Dashun, *et al.* Human mobility, social ties, and link prediction. In *Proceedings of the 17th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, KDD'11*, sep. 2011, pp. 1100-1108, doi: 10.1145/2020408.2020581.

WOOLDRIDGE, Michael. «Agent-based software engineering», *IEE Proceedings - Software Engineering*, vol. 144, n.º 1, pp. 26-37, feb. 1997, doi: 10.1049/ip-sen:19971026.

WOOLDRIDGE, Michael y JENNINGS, Nicholas R. «Intelligent agents: theory and practice», *The Knowledge Engineering Review*, vol. 10, n.º 2, pp. 115-152, jun. 1995, doi: 10.1017/S0269888900008122.

ZADEH, Lotfi A. y ALIEV Rafik A. *Fuzzy Logic Theory and Applications: Part I and Part II*. New Jersey: WSPC, 2018.

ANEXOS

A. Video del primer caso de uso con lógica difusa del 0%:

<https://youtu.be/c-nFTZcGUOc>

B. Video del primer caso de uso con lógica difusa del 10%:

<https://youtu.be/KgeDa1dmzNs>.

C. Video del primer caso de uso con lógica difusa del 20%:

<https://youtu.be/P4wR203CKR8>.

D. Video del segundo caso de uso con lógica difusa del 0%:

<https://youtu.be/Qf8KSCslsTw>.

E. Video del segundo caso de uso con lógica difusa del 10%:

<https://youtu.be/2PGx3UF-5lo>.

F. Video del segundo caso de uso con lógica difusa del 20%:

https://youtu.be/Dj5_KI7Ijw8.

G. Video del tercer caso de uso con lógica difusa del 0%:

https://youtu.be/mx_tLLp47E.

H. Video del tercer caso de uso con lógica difusa del 10%:

<https://youtu.be/atWBC5Kggqs>.

I. Video del tercer caso de uso con lógica difusa del 20%:

<https://youtu.be/sVbg7HKgafE>.

J. HeatMaps

https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_map