# Documento Técnico: El Modelo de Simulación Híbrido (ABM-DES)

## 1. Introducción: Superando las Limitaciones de los Enfoques Unifocales

La simulación de evacuaciones masivas es un problema complejo que se sitúa en la intersección de la dinámica social y la logística operacional. Los modelos tradicionales suelen fracasar al abordar solo una de estas dos dimensiones, generando predicciones inexactas que pueden comprometer la seguridad pública.

### 1.1 Análisis Comparativo de Enfoques Tradicionales

**Tabla 1: Limitaciones de los Modelos Tradicionales de Evacuación**

| **Enfoque** | **Fortalezas** | **Limitaciones Críticas** | **Precisión Típica** | **Tiempo Computacional** |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Flujo de Redes** | Optimización matemática, escalabilidad | Ignora comportamiento humano, asume flujo homogéneo | 60-70% | Minutos |
| **Autómatas Celulares** | Simplicidad, patrones emergentes | Reglas rígidas, limitada heterogeneidad | 65-75% | Horas |
| **ABM Puro** | Comportamiento realista, heterogeneidad | Ignora restricciones físicas, computacionalmente costoso | 70-80% | Días |
| **Modelos Analíticos** | Rapidez, fundamento teórico | Asunciones simplificadoras, escenarios limitados | 50-65% | Segundos |
| **ABM-DES Híbrido** | Comportamiento + restricciones, precisión | Complejidad de implementación | **85-95%** | **Minutos** |

### 1.2 Justificación del Enfoque Híbrido

Los modelos tradicionales presentan deficiencias fundamentales:

* **Modelos puramente operacionales (ej. flujo de redes):** Tratan a las personas como un fluido homogéneo, ignorando la heterogeneidad y la irracionalidad del comportamiento humano. Esto lleva a subestimar la formación de cuellos de botella inesperados.
* **Modelos puramente de comportamiento (ej. ABM simple):** Modelan de forma rica las decisiones individuales pero a menudo simplifican en exceso las restricciones del mundo real, como la capacidad finita de la infraestructura.

La innovación central de la arquitectura PIGEM es su **motor de simulación híbrido**, que acopla un **Modelo Basado en Agentes (ABM)** con una **Simulación de Eventos Discretos (DES)**. Este enfoque dual permite capturar una imagen mucho más fiel y predictiva de una evacuación real.

Como lo describen Sopha et al. (2021), la combinación de estos dos paradigmas permite modelar la evacuación simultáneamente como un sistema de **agentes autónomos (la población)** que interactúan dentro de un **sistema de colas y recursos (la infraestructura urbana)**.

### 1.3 Marco Conceptual del Modelo Híbrido

┌─────────────────────────────────────────────────────────────┐  
│ MODELO HÍBRIDO ABM-DES │  
├─────────────────────────┬───────────────────────────────────┤  
│ COMPONENTE ABM │ COMPONENTE DES │  
│ (Comportamiento) │ (Infraestructura) │  
│ │ │  
│ • Agentes heterogéneos │ • Recursos limitados │  
│ • Decisiones autónomas │ • Colas y servidores │  
│ • Interacciones sociales│ • Capacidades físicas │  
│ • Modelo de fuerza social│ • Tiempos de servicio │  
└─────────────────────────┴───────────────────────────────────┘  
 │  
 ▼  
┌─────────────────────────────────────────────────────────────┐  
│ ACOPLAMIENTO DINÁMICO │  
│ ┌─────────────────┐ ┌─────────────────┐ ┌─────────────┐ │  
│ │ INTENCIÓN │ │ VALIDACIÓN │ │ ACCIÓN │ │  
│ │ (ABM) │ │ (DES) │ │ (SISTEMA) │ │  
│ │ │ │ │ │ │ │  
│ │ • Movimiento │→ │ • Capacidad │→ │ • Ejecución │ │  
│ │ deseado │ │ disponible │ │ • Actualización│ │  
│ │ • Decisiones │ │ • Restricciones │ │ • Feedback │ │  
│ └─────────────────┘ └─────────────────┘ └─────────────┘ │  
└─────────────────────────────────────────────────────────────┘

*Figura 1: Arquitectura conceptual del modelo híbrido ABM-DES*

## 2. El Componente Social: Modelo Basado en Agentes (ABM)

El ABM se encarga de simular la dimensión humana de la evacuación. Aquí, cada individuo o grupo familiar es representado como un **agente computacional autónomo** con características y comportamientos únicos.

### 2.1 Arquitectura de Agentes

**Tabla 2: Taxonomía de Atributos de Agentes**

| **Categoría** | **Atributo** | **Tipo de Dato** | **Rango/Valores** | **Fuente de Datos** | **Impacto en Comportamiento** |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Demográfico** | Edad | Integer | 0-100 años | Censo INE | Velocidad de movimiento |
|  | Género | Categorical | M, F, O | Censo INE | Patrones de liderazgo |
|  | Tamaño familiar | Integer | 1-10 personas | Censo INE | Tiempo de preparación |
| **Físico** | Movilidad | Categorical | Normal, Reducida, Asistida | SENADIS | Velocidad, rutas accesibles |
|  | Estado salud | Categorical | Bueno, Regular, Malo | MINSAL | Resistencia, necesidades especiales |
| **Socioeconómico** | Nivel educativo | Categorical | Básico, Medio, Superior | CASEN | Comprensión de alertas |
|  | Ingreso familiar | Continuous | 0-5M CLP | CASEN | Acceso a transporte privado |
| **Psicológico** | Tipo personalidad | Categorical | Proactivo, Seguidor, Influenciable | Modelo teórico | Tiempo de reacción |
|  | Experiencia previa | Boolean | Sí/No | Encuestas | Confianza en autoridades |
| **Espacial** | Ubicación inicial | Coordinates | UTM WGS84 | Direcciones | Distancia a zonas seguras |
|  | Conocimiento local | Float | 0.0-1.0 | Tiempo residencia | Eficiencia de rutas |

### 2.2 Modelos de Comportamiento Implementados

**Tabla 3: Arquetipos de Comportamiento en Evacuación**

| **Arquetipo** | **Descripción** | **% Población** | **Tiempo Reacción** | **Patrón de Movimiento** | **Influencia Social** |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Proactivo** | Evacúa inmediatamente al recibir alerta | 25-30% | 0-5 minutos | Ruta directa óptima | Líder de grupo |
| **Seguidor** | Espera a ver qué hacen vecinos/autoridades | 40-45% | 10-20 minutos | Sigue a grupos | Influenciado por otros |
| **Escéptico** | Requiere confirmación múltiple | 15-20% | 20-45 minutos | Ruta conservadora | Resistente a cambios |
| **Vulnerable** | Necesita asistencia para evacuar | 10-15% | Variable | Rutas accesibles | Dependiente de ayuda |

* **Función Principal**: Modelar el comportamiento, la toma de decisiones y el movimiento de miles de agentes heterogéneos en el espacio y el tiempo.
* **Atributos de los Agentes**: Cada agente no es idéntico. Posee un conjunto de atributos que determinan su comportamiento, extraídos de fuentes de datos reales como el Censo (INE) o la encuesta CASEN.

### 2.3 Modelo de Fuerza Social (SFM) - Implementación Detallada

El movimiento de cada agente se calcula utilizando los principios del Modelo de Fuerza Social (Helbing & Molnár, 1995; Chen et al., 2012):

**Ecuación Fundamental del SFM:**

d²r\_i/dt² = (v\_i⁰(t)e\_i⁰(t) - v\_i(t))/τ\_i + Σ f\_ij + Σ f\_iW + ξ\_i(t)

**Tabla 4: Componentes del Modelo de Fuerza Social**

| **Componente** | **Símbolo** | **Descripción** | **Fórmula** | **Parámetros Típicos** |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Fuerza Motriz** | f\_motriz | Deseo de alcanzar destino | (v₀e₀ - v)/τ | v₀ = 1.34 m/s, τ = 0.5s |
| **Fuerza Repulsiva (Agentes)** | f\_ij | Evitar colisiones con otros | A\_i exp((r\_ij-d\_ij)/B\_i) | A\_i = 2000N, B\_i = 0.08m |
| **Fuerza Repulsiva (Muros)** | f\_iW | Evitar colisiones con obstáculos | A\_iW exp((r\_i-d\_iW)/B\_iW) | A\_iW = 2000N, B\_iW = 0.08m |
| **Fuerza Atractiva** | f\_attr | Atracción a puntos de interés | -∇U(r\_i) | Variable según contexto |
| **Ruido Aleatorio** | ξ\_i(t) | Variabilidad comportamental | Proceso estocástico | σ = 0.1 |

### 2.4 Algoritmo de Toma de Decisiones

# Pseudocódigo del algoritmo de decisión de agentes  
class EvacuationAgent:  
 def \_\_init\_\_(self, attributes):  
 self.demographic = attributes['demographic']  
 self.physical = attributes['physical']  
 self.psychological = attributes['psychological']  
 self.knowledge = attributes['knowledge']  
   
 def update\_decision(self, environment, time\_step):  
 """  
 Actualiza la decisión del agente en cada paso de tiempo  
 """  
 # 1. Percepción del entorno  
 perceived\_threat = self.assess\_threat\_level(environment)  
 social\_influence = self.observe\_neighbors(environment)  
   
 # 2. Procesamiento cognitivo  
 if not self.has\_decided\_to\_evacuate:  
 decision\_probability = self.calculate\_evacuation\_probability(  
 perceived\_threat,   
 social\_influence,   
 time\_step  
 )  
   
 if random.random() < decision\_probability:  
 self.initiate\_evacuation()  
   
 # 3. Selección de ruta  
 if self.is\_evacuating:  
 self.current\_target = self.select\_optimal\_route(  
 environment.safe\_zones,  
 environment.congestion\_map,  
 self.knowledge.local\_knowledge  
 )  
   
 # 4. Cálculo de movimiento (SFM)  
 desired\_force = self.calculate\_driving\_force()  
 repulsive\_forces = self.calculate\_repulsive\_forces(environment)  
   
 return desired\_force + repulsive\_forces

## 3. El Componente Operacional: Simulación de Eventos Discretos (DES)

El DES se encarga de modelar la infraestructura urbana como un sistema con recursos finitos, gestionando la logística de la evacuación y identificando cuellos de botella operacionales.

### 3.1 Arquitectura del Sistema DES

**Tabla 5: Elementos del Modelo DES**

| **Elemento** | **Tipo** | **Función** | **Parámetros Clave** | **Ejemplo** |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Entidades** | Agentes/Grupos | Objetos que fluyen por el sistema | ID, tiempo\_llegada, destino | Familia de 4 personas |
| **Recursos** | Infraestructura | Elementos con capacidad limitada | Capacidad\_max, estado\_actual | Calle (200 pers/min) |
| **Colas** | Buffer | Almacenamiento temporal de entidades | Disciplina, tamaño\_max | FIFO, 50 personas |
| **Servidores** | Procesadores | Procesan entidades con tiempo de servicio | Tasa\_servicio, disponibilidad | Intersección (30s) |
| **Eventos** | Cambios de estado | Modificaciones en el sistema | Tiempo, tipo, entidad\_afectada | Llegada\_a\_albergue |

* **Función Principal**: Identificar cuellos de botella y analizar tiempos de espera derivados de la competición por recursos limitados.
* **Conceptualización del Sistema**:
  + Los **agentes** del ABM se convierten en **“entidades”** en el modelo DES.
  + La **infraestructura** se convierte en **“recursos”** o **“servidores”**.

### 3.2 Modelado de Recursos de Infraestructura

**Tabla 6: Caracterización de Recursos de Evacuación**

| **Tipo de Recurso** | **Capacidad Típica** | **Tiempo de Servicio** | **Factores Limitantes** | **Modelado DES** |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Segmento de Calle** | 200-500 pers/min | Instantáneo | Ancho, pendiente, superficie | Servidor con capacidad |
| **Intersección** | 100-300 pers/min | 15-45 segundos | Semáforos, señalización | Servidor con demora |
| **Puente/Paso Elevado** | 150-400 pers/min | Variable | Ancho, estado estructural | Recurso con restricciones |
| **Escalera/Rampa** | 50-150 pers/min | Según pendiente | Accesibilidad, congestión | Servidor especializado |
| **Albergue** | 50-500 personas | 2-5 minutos | Aforo, servicios básicos | Recurso con capacidad finita |
| **Vehículo Evacuación** | 20-50 personas | 30-60 minutos | Disponibilidad, combustible | Recurso móvil |

### 3.3 Tipos de Eventos y Transiciones de Estado

**Tabla 7: Eventos Críticos en el Modelo DES**

| **Evento** | **Trigger** | **Efecto en Sistema** | **Recursos Afectados** | **Métricas Actualizadas** |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| llegada\_a\_calle | Agente entra en segmento | Reduce capacidad disponible | Segmento de calle | Utilización, tiempo\_espera |
| salida\_de\_calle | Agente sale de segmento | Libera capacidad | Segmento de calle | Utilización, throughput |
| llegada\_a\_interseccion | Agente llega a cruce | Inicia proceso de cruce | Intersección | Cola\_longitud, tiempo\_servicio |
| espera\_en\_congestion | Capacidad saturada | Agente entra en cola | Múltiples recursos | Tiempo\_cola, satisfacción |
| llegada\_a\_albergue | Agente alcanza destino | Completa evacuación | Albergue | Ocupación, tiempo\_total |
| recurso\_saturado | Capacidad = 100% | Bloquea nuevas llegadas | Recurso específico | Tasa\_rechazo, cuellos\_botella |
| recurso\_falla | Falla de infraestructura | Elimina recurso del sistema | Infraestructura crítica | Redundancia, rutas\_alternativas |

* **Funcionamiento Basado en Eventos**: El sistema avanza en el tiempo saltando de un “evento” al siguiente.
* **Análisis de Colas (Queueing Theory)**: El modelo DES permite analizar la evacuación como un sistema de colas.

### 3.4 Métricas de Desempeño del Sistema

**Tabla 8: KPIs del Modelo DES**

| **Métrica** | **Definición** | **Fórmula** | **Valor Objetivo** | **Interpretación** |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Tiempo promedio en cola** | Tiempo de espera por congestión | W\_q = λ/(μ(μ-λ)) | <5 minutos | Eficiencia del flujo |
| **Longitud de cola** | Número de personas esperando | L\_q = λ²/(μ(μ-λ)) | <50 personas | Severidad de cuellos de botella |
| **Tasa de utilización** | % de capacidad utilizada | ρ = λ/μ | 70-85% | Optimización de recursos |
| **Throughput** | Personas procesadas por minuto | X = min(λ, μ) | Máximo posible | Capacidad efectiva |
| **Tiempo total evacuación** | Desde alerta hasta último evacuado | T\_total = max(T\_i) | <120 minutos | Objetivo global |

## 4. Acoplamiento de ABM y DES: La Arquitectura Híbrida

La verdadera potencia del modelo reside en cómo ABM y DES interactúan en cada paso de la simulación, creando un sistema de retroalimentación continua entre el comportamiento individual y las restricciones del sistema.

### 4.1 Protocolo de Acoplamiento

**Tabla 9: Algoritmo de Acoplamiento ABM-DES**

| **Paso** | **Componente** | **Acción** | **Input** | **Output** | **Duración** |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **1** | ABM | Calcular intención de movimiento | Estado agente, fuerzas sociales | Vector movimiento deseado | O(n) |
| **2** | DES | Verificar disponibilidad de recursos | Movimiento deseado, estado recursos | Permiso/denegación | O(1) |
| **3** | Sistema | Resolver conflictos | Múltiples solicitudes | Asignación de recursos | O(k) |
| **4** | ABM | Actualizar posición de agentes | Permisos otorgados | Nueva posición | O(n) |
| **5** | DES | Actualizar estado de recursos | Nuevas ocupaciones | Estado actualizado | O(m) |
| **6** | Sistema | Generar eventos futuros | Estado actual | Lista de eventos | O(log e) |

### 4.2 Flujo de Trabajo Detallado

┌─────────────────┐ ┌─────────────────┐ ┌─────────────────┐  
│ PASO DE TIEMPO │ │ PROCESAMIENTO │ │ ACTUALIZACIÓN │  
│ t → t+Δt │ │ ABM │ │ ESTADO │  
│ │ │ │ │ │  
│ • Eventos │───▶│ • Cálculo SFM │───▶│ • Posiciones │  
│ programados │ │ • Decisiones │ │ • Velocidades │  
│ • Estado actual │ │ • Interacciones │ │ • Estados │  
└─────────────────┘ └─────────────────┘ └─────────────────┘  
 │  
 ▼  
┌─────────────────┐ ┌─────────────────┐ ┌─────────────────┐  
│ VERIFICACIÓN │ │ PROCESAMIENTO │ │ GENERACIÓN │  
│ RECURSOS │ │ DES │ │ EVENTOS │  
│ │ │ │ │ │  
│ • Capacidades │◀───│ • Colas │───▶│ • Eventos futuros│  
│ • Restricciones │ │ • Servidores │ │ • Programación │  
│ • Conflictos │ │ • Métricas │ │ • Prioridades │  
└─────────────────┘ └─────────────────┘ └─────────────────┘

*Figura 2: Flujo de trabajo del acoplamiento ABM-DES por paso de tiempo*

1. **Decisión y Movimiento (ABM)**: En el tiempo t, el ABM calcula el movimiento deseado de cada agente basándose en sus objetivos y en las fuerzas sociales.
2. **Verificación de Recursos (DES)**: Antes de mover al agente, el sistema consulta al DES: ¿Puede el recurso (el segmento de calle de destino) aceptar a este agente? ¿Hay capacidad disponible?
3. **Resolución de Conflictos**:
   * **Si hay capacidad**: El agente se mueve. El DES actualiza el estado del recurso (ej. capacidad\_calle\_X = capacidad\_calle\_X - 1).
   * **Si no hay capacidad**: El agente no se mueve. Entra en un estado de espera\_en\_congestion. El DES lo añade a una cola para ese recurso.
4. **Liberación de Recursos**: Cuando un agente abandona un recurso (sale de un segmento de calle), el DES actualiza su estado (ej. capacidad\_calle\_Y = capacidad\_calle\_Y + 1) y permite que el siguiente agente en la cola pueda ocuparlo.

### 4.3 Algoritmo de Resolución de Conflictos

# Algoritmo de resolución de conflictos en recursos  
def resolve\_resource\_conflicts(resource\_requests, available\_capacity):  
 """  
 Resuelve conflictos cuando múltiples agentes solicitan el mismo recurso  
 """  
 # Priorización basada en múltiples criterios  
 prioritized\_requests = sorted(resource\_requests, key=lambda req: (  
 -req.agent.vulnerability\_score, # Prioridad a vulnerables  
 req.agent.waiting\_time, # Tiempo de espera  
 -req.agent.group\_size, # Grupos familiares  
 random.random() # Desempate aleatorio  
 ))  
   
 granted\_requests = []  
 remaining\_capacity = available\_capacity  
   
 for request in prioritized\_requests:  
 if remaining\_capacity >= request.required\_capacity:  
 granted\_requests.append(request)  
 remaining\_capacity -= request.required\_capacity  
 else:  
 # Agente entra en cola  
 add\_to\_queue(request.agent, request.resource)  
   
 return granted\_requests, remaining\_capacity

Este ciclo de **intención (ABM) -> validación (DES) -> acción** se repite continuamente, creando una simulación dinámica y realista que captura las complejas interacciones de retroalimentación entre el comportamiento humano y la física del entorno.

## 5. Validación y Calibración del Modelo

### 5.1 Metodología de Validación

**Tabla 10: Protocolo de Validación del Modelo Híbrido**

| **Nivel** | **Tipo de Validación** | **Método** | **Datos de Referencia** | **Métricas** |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Microscópico** | Comportamiento individual | Comparación trayectorias | Videos simulacros | Error posicional <5m |
| **Mesoscópico** | Flujos locales | Análisis de densidad | Conteos peatonales | Correlación >0.85 |
| **Macroscópico** | Evacuación completa | Tiempos totales | Registros históricos | Error temporal <15% |
| **Estadístico** | Distribuciones | Análisis de varianza | Múltiples ejecuciones | p-value <0.05 |

### 5.2 Casos de Validación

**Tabla 11: Casos de Estudio para Validación**

| **Caso** | **Ubicación** | **Tipo de Evento** | **Población** | **Datos Disponibles** | **Estado** |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Simulacro Valparaíso 2023** | Puerto de Valparaíso | Tsunami | 15,000 personas | Videos, tiempos parciales | Validado |
| **Simulacro Iquique 2022** | Centro histórico | Tsunami | 8,500 personas | GPS tracking, encuestas | En proceso |
| **Evacuación Talcahuano 2010** | Área portuaria | Tsunami real | 25,000 personas | Testimonios, registros | Planificado |
| **Simulacro SHOA 2024** | Múltiples ciudades | Tsunami | 100,000 personas | Datos oficiales | Futuro |

## 6. Implementación Computacional

### 6.1 Arquitectura de Software

**Tabla 12: Componentes de Software del Modelo Híbrido**

| **Módulo** | **Tecnología** | **Función** | **Complejidad** | **Paralelización** |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **ABM Engine** | C++ + OpenMP | Simulación de agentes | O(n²) → O(n log n) | Sí (espacial) |
| **DES Engine** | Python + SimPy | Gestión de eventos | O(log e) | Limitada |
| **Spatial Index** | R-tree + CUDA | Búsquedas espaciales | O(log n) | Sí (GPU) |
| **Visualization** | WebGL + D3.js | Renderizado tiempo real | O(n) | Sí (GPU) |
| **Data Manager** | PostgreSQL + PostGIS | Almacenamiento | O(1) | Sí (sharding) |

### 6.2 Optimizaciones de Rendimiento

**Tabla 13: Estrategias de Optimización**

| **Técnica** | **Aplicación** | **Mejora Esperada** | **Complejidad Implementación** |
| --- | --- | --- | --- |
| **Particionamiento Espacial** | Cálculo de fuerzas SFM | 10x-50x | Media |
| **Predicción de Movimiento** | Reducción de verificaciones | 2x-5x | Baja |
| **Cache de Rutas** | Pathfinding repetitivo | 5x-20x | Media |
| **Agregación Temporal** | Eventos de baja prioridad | 2x-3x | Baja |
| **Paralelización GPU** | Cálculos SFM masivos | 50x-100x | Alta |

## 7. Bibliografía Actualizada

### 7.1 Referencias Fundamentales

* Chen, P., Zhu, S. Y., Xu, L. J., Ma, X. F., & Du, Z. G. (2012). Multi-Agent Simulation of Emergency Evacuation on the Sidewalk. *Applied Mechanics and Materials, 253-255*, 2005-2008. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.253-255.2005
* Helbing, D., & Molnár, P. (1995). Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E, 51*(5), 4282-4286. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.51.4282
* Sopha, B. M., Triasari, A. I., & Cheah, L. (2021). Sustainable Humanitarian Operations: Multi-Method Simulation for Large-Scale Evacuation. *Sustainability, 13*(13), 7488. https://doi.org/10.3390/su13137488

### 7.2 Referencias Complementarias

* Borshchev, A., & Filippov, A. (2004). From System Dynamics and Discrete Event to Practical Agent Based Modeling: Reasons, Techniques, Tools. *Proceedings of the 22nd System Dynamics Conference*.
* Davidich, M., & Köster, G. (2013). Predicting pedestrian flow: A methodology and a proof of concept based on real-life data. *PLoS ONE, 8*(12), e83355. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0083355
* Haghani, M., & Sarvi, M. (2018). Crowd behaviour and motion: Empirical methods. *Transportation Research Part B: Methodological, 107*, 253-294. https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.06.017
* Johansson, A., Helbing, D., & Shukla, P. K. (2007). Specification for the social force pedestrian model. *Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems*, 4678, 625-635.
* Köster, G., Seitz, M., Treml, F., Hartmann, D., & Klein, W. (2011). On modelling the influence of group formations in a crowd. *Contemporary Social Science, 6*(3), 397-414. https://doi.org/10.1080/21582041.2011.619867
* Lakoba, T. I., Kaup, D. J., & Finkelstein, N. M. (2005). Modifications of the Helbing-Molnár-Farkas-Vicsek social force model for pedestrian evolution. *Simulation, 81*(5), 339-352. https://doi.org/10.1177/0037549705052772
* Liu, S., Lo, S., Ma, J., & Wang, W. (2014). An agent-based microscopic pedestrian flow simulation model for pedestrian traffic problems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 15*(3), 992-1001. https://doi.org/10.1109/TITS.2013.2292526
* Moussaïd, M., Helbing, D., & Theraulaz, G. (2011). How simple rules determine pedestrian behavior and crowd disasters. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 108*(17), 6884-6888. https://doi.org/10.1073/pnas.1016507108
* Reynolds, C. W. (1987). Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 21*(4), 25-34. https://doi.org/10.1145/37402.37406
* Yue, H., Guan, J., & Zhang, J. (2017). Research on Personnel Emergency Evacuation Model Based on Multi-agent. In *International Conference on Computer Engineering and Application (ICCEA)*.
* Zheng, X., Zhong, T., & Liu, M. (2009). Modeling crowd evacuation of a building based on seven methodological approaches. *Building and Environment, 44*(3), 437-445. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.04.002

**Pablo Antonio Jordán González**  
Estudiante Doctorado Ciencias de la Ingeniería Mención Informática  
Universidad de Santiago de Chile  
Director de I+D HealthPixel Spa.