### 1.1.1 Identificación y Antecedentes

La gestión del riesgo de desastres (GRD) en Chile enfrenta el desafío fundamental de superar los enfoques tradicionales, que a menudo se basan en análisis estáticos y unifocales. En un territorio con 345 municipios y una alta exposición a eventos adversos —con más de 117 desastres significativos en los últimos 30 años que han afectado a 12,5 millones de personas y generado pérdidas por sobre los 41.200 millones de dólares (CRED EM-DAT, 2021)—, la necesidad de una perspectiva integrada y dinámica es imperativa. La problemática actual radica en la dependencia de planes y mapas estáticos que, si bien son útiles para el diagnóstico, resultan insuficientes para la prevención eficaz. Instituciones como el Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SENAPRED) buscan transitar hacia un modelo proactivo, pero carecen de una plataforma unificada que integre y analice las múltiples variables que configuran el riesgo en tiempo real (SENAPRED, 2023).

El presente proyecto aborda esta brecha proponiendo un motor de simulación de escenarios de riesgo que considera la naturaleza multiamenaza y multidimensional de la vulnerabilidad. La evaluación del riesgo no puede limitarse a la caracterización de una amenaza (ej. sismo, tsunami, incendio forestal), sino que debe incorporar un análisis detallado de las variables que determinan la susceptibilidad del sistema expuesto. Estas variables se pueden agrupar en físicas, estructurales y socioeconómicas, y su interacción define el impacto potencial de un desastre.

**Variables Físicas y Estructurales Determinantes del Riesgo**

La vulnerabilidad física y estructural se refiere a la susceptibilidad de las edificaciones e infraestructuras a sufrir daños. Su análisis requiere considerar un conjunto específico de variables cuyo impacto ha sido documentado extensamente:

1. **Variables Sísmicas**: La vulnerabilidad sísmica de una estructura está condicionada por su **año de construcción**, que define el código de diseño sísmico aplicado; la **clase de suelo**, que puede amplificar las ondas sísmicas; y la **presencia de irregularidades** tanto en planta como en elevación (ej. “piso blando”), que concentran los daños (Quiñones-Bustos et al., 2021). El material constructivo (hormigón armado, albañilería, madera) es igualmente crucial, determinando la resistencia intrínseca de la edificación.
2. **Variables Costeras (Tsunami/Inundación)**: En zonas litorales, la **geomorfología** (ej. acantilados versus playas), la **pendiente costera**, y la **distancia al cuerpo de agua** son críticas para determinar el alcance de la inundación. Adicionalmente, atributos estructurales como el **número de pisos** —que posibilita la evacuación vertical— y el **estado de conservación** de la edificación, son factores decisivos para la supervivencia de la estructura y sus ocupantes (Quiñones-Bustos et al., 2021).
3. **Variables para Incendios Forestales**: En la interfaz urbano-forestal, variables como el **tipo de combustible** (vegetación), la **humedad**, la **temperatura**, la **topografía** y los **registros históricos de incendios** son esenciales para alimentar modelos de propagación y evaluar la amenaza.

**La Dimensión Socioeconómica de la Vulnerabilidad**

Más allá de los factores físicos, la vulnerabilidad social es una condición preexistente que modula la capacidad de una comunidad para anticipar, resistir y recuperarse de un desastre. Esta dimensión es un reflejo de las dinámicas sociales y territoriales, y su estudio es clave para una gestión del riesgo verdaderamente integral (Guerrero et al., 2022). Los factores que la componen incluyen:

* **Nivel Socioeconómico y Educativo**: La pobreza, el bajo nivel educativo y la falta de acceso a servicios básicos (agua potable, saneamiento) son determinantes clave de la vulnerabilidad. Un menor nivel educativo, por ejemplo, puede dificultar la comprensión de las alertas y los planes de evacuación, mientras que la falta de recursos económicos limita la capacidad de reconstrucción post-desastre (Guerrero et al., 2022; Silva & Mena, 2020).
* **Características Demográficas**: La concentración de población dependiente (niños y adultos mayores) aumenta la vulnerabilidad debido a su menor movilidad y mayores necesidades de asistencia durante una emergencia.
* **Gobernanza y Planificación Territorial**: La eficacia de la gobernanza local y la existencia de instrumentos de planificación territorial que integren criterios de riesgo son factores que pueden mitigar o exacerbar la vulnerabilidad. La falta de una ordenación territorial que considere las zonas de amenaza es una debilidad estructural en muchas comunas del país (Silva & Mena, 2020).

En resumen, el problema abordado no es solo la ausencia de una herramienta tecnológica, sino la necesidad de un cambio de paradigma en la GRD. Se requiere una solución que no solo modele amenazas, sino que integre la complejidad de las variables que definen la vulnerabilidad en sus múltiples dimensiones. Este proyecto propone desarrollar un motor de simulación que sea accesible, de bajo costo y fundamentado en estándares internacionales (ISO, OGC), para entregar a los municipios y a SENAPRED una herramienta que permita explorar escenarios, fundamentar la toma de decisiones y, en última instancia, construir un Chile más resiliente.

**Bibliografía (Sección 1.1.1)**

* Centre for Research on the Epidemiology of Disasters [CRED]. (2021). *EM-DAT: The international disaster database*. https://public.emdat.be/
* Guerrero, N., Contreras, M., Chamorro, A., Martínez, C., & Echaveguren, T. (2022). Social vulnerability in Chile: challenges for multi-scale analysis and disaster risk reduction. *Natural Hazards, 117*(2), 1827-1859. https://doi.org/10.1007/s11069-023-05978-z
* Quiñones-Bustos, C., Bull, M. T., & Oyarzo-Vera, C. (2021). Seismic and Coastal Vulnerability Assessment Model for Buildings in Chile. *Buildings, 11*(3), 107. https://doi.org/10.3390/buildings11030107
* Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres [SENAPRED]. (2023). *Plan estratégico nacional para la gestión del riesgo de desastres 2020-2030*. https://senapred.cl
* Silva, N., & Mena, C. (2020). Identifying the underlying risk factors of local communities in Chile. *Disaster Prevention and Management, 29*(5), 681-696. https://doi.org/10.1108/DPM-04-2020-0105

### 1.1.2 Alineación con Líneas Temáticas y Justificación Tecnológica

Esta propuesta se inscribe directamente en la línea temática de **“Reducción del riesgo de desastres y resiliencia ante eventos extremos”** y en la de **“Desarrollo científico y tecnológico que permita mejorar la capacidad predictiva y la adaptación de la sociedad frente a desastres de origen natural”**. La investigación aborda la fragmentación de datos y la falta de interoperabilidad que actualmente caracterizan la gestión de información para desastres en Chile, un problema que limita severamente la capacidad predictiva y de respuesta del país.

El enfoque actual, donde cada institución opera como una “isla tecnológica” con formatos y procesos dispares, genera una heterogeneidad de datos (sintáctica, esquemática y semántica) que impide su integración y análisis conjunto (Bizid et al., 2014). Esta falta de interoperabilidad es una barrera crítica para la gestión de desastres, similar a la histórica lección del Gran Incendio de Baltimore, donde mangueras no estandarizadas impidieron que los refuerzos pudieran combatir el fuego (Intterra, 2024). Para superar este obstáculo, el proyecto propone una solución tecnológica integral basada en estándares abiertos y un metamodelo de datos unificado.

**Componentes Clave de la Solución Propuesta:**

1. **Metamodelo Cartográfico Unificado (MCU)**: El núcleo de la propuesta es el diseño de un metamodelo de datos geoespaciales que actúe como un “lenguaje común” para la información de desastres. Este modelo se desarrollará en estricto cumplimiento de estándares internacionales como **ISO 19115/19139** para metadatos y las especificaciones del **Open Geospatial Consortium (OGC)** para servicios web (WMS, WFS), garantizando la interoperabilidad (Aydinoglu & Bilgin, 2015; Voski, 2019). El MCU permitirá integrar y armonizar capas de información de fuentes diversas, incluyendo:
   * **Capas de Amenaza**: Zonas de inundación por tsunami, susceptibilidad de laderas, peligro de incendios forestales.
   * **Capas de Vulnerabilidad**: Tipología y materialidad de edificaciones (hormigón, albañilería), datos sociodemográficos del censo (educación, dependencia) y variables físicas (pendiente, uso de suelo).
   * **Capas de Capacidad**: Ubicación de infraestructura crítica (hospitales, escuelas), rutas de evacuación y localización de albergues. La estandarización de estas variables es crucial, pues como demuestra la experiencia internacional, la falta de un vocabulario unificado y de modelos de datos compartidos es una de las principales barreras para la colaboración efectiva en la gestión de emergencias (Mazimwe et al., 2019).
2. **Entorno de Visualización Ágil y Adaptativo**: Los datos normalizados a través del MCU alimentarán un entorno de visualización interactivo. A diferencia de los mapas estáticos, esta herramienta permitirá a los usuarios —desde analistas técnicos hasta autoridades locales y líderes comunitarios— explorar dinámicamente los datos. Las representaciones cartográficas seguirán estándares de simbología como **ISO 22324**, que define códigos de colores para alertas, asegurando una comunicación del riesgo clara, consistente e inequívoca.
3. **Módulo de Simulación Prospectiva**: La plataforma integrará un motor de simulación que utilizará los datos unificados para generar escenarios de riesgo prospectivos. Esto permitirá realizar análisis hipotéticos (“what-if”) para evaluar el impacto de futuras decisiones de planificación territorial, como la autorización de nuevos desarrollos urbanos en zonas potencialmente expuestas.
4. **Arquitectura de Bajo Costo y Código Abierto**: Toda la solución se construirá sobre software de código abierto (FOSS), eliminando las barreras de licenciamiento y asegurando que cualquier municipio, sin importar sus recursos, pueda implementar, mantener y adaptar la plataforma.

En síntesis, este proyecto no solo responde a las líneas temáticas del concurso, sino que aborda una debilidad estructural en la GRD de Chile. Al desarrollar una solución tecnológica abierta, estandarizada e interoperable, se busca mejorar la capacidad predictiva del país, fortalecer la resiliencia de las comunidades y proporcionar una herramienta concreta para una toma de decisiones informada y basada en evidencia.

**Bibliografía (Sección 1.1.2)**

* Aydinoglu, A. C., & Bilgin, M. S. (2015). Developing an open geographic data model and analysis tools for disaster management: landslide case. *Natural Hazards and Earth System Sciences, 15*(2), 335–347. https://doi.org/10.5194/nhess-15-335-2015
* Bizid, I., Faiz, S., Boursier, P., & Yusuf, J. C. M. (2014). Integration of Heterogeneous Spatial Databases for Disaster Management. In J. Parsons & D. Chiu (Eds.), *Advances in Conceptual Modeling* (pp. 77–86). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14139-8\_10
* Intterra. (2024, April 29). *The Critical Role of Interoperability in Emergency Management*. Intterra Blog. https://www.intterra.io/blog/role-of-interoperability-in-emergency-management/
* Mazimwe, A., Hammouda, I., & Gidudu, A. (2019). An Empirical Evaluation of Data Interoperability—A Case of the Disaster Management Sector in Uganda. *ISPRS International Journal of Geo-Information, 8*(11), 484. https://doi.org/10.3390/ijgi8110484
* Voski, A. (2019, May 7). *Why geospatial standards matter: Benefits and challenges of EO data standardization*. Space4Water Portal. https://space4water.org/news/why-geospatial-standards-matter-benefits-and-challenges-eo-data-standardization

### 1.2 Solución Propuesta: Un Simulador Híbrido para la Resiliencia Urbana

La solución propuesta es el desarrollo y validación de un **motor computacional de alto rendimiento para la simulación de evacuaciones masivas**, diseñado para operar sobre escenarios de riesgo complejos y multiamenaza. La arquitectura de la solución se fundamenta en un **enfoque de simulación híbrido** que combina un Modelo Basado en Agentes (ABM) con una Simulación de Eventos Discretos (DES), superando las limitaciones de los modelos que emplean un único método de simulación (Sopha et al., 2021).

Esta arquitectura dual permite modelar la evacuación desde dos perspectivas complementarias pero interconectadas:

* **El Componente Social (ABM)**: A través del ABM, se representará a la población como un conjunto de agentes heterogéneos y autónomos. Cada agente poseerá atributos específicos extraídos de datos reales (ej. Censo, CASEN), tales como:
  + **Perfil Demográfico**: Edad, género, capacidad de movilidad (considerando población con discapacidad).
  + **Comportamiento y Decisión**: Se modelarán distintos arquetipos de comportamiento, como la evacuación proactiva versus el seguimiento de líderes o la influencia de redes sociales, basándose en principios del **Modelo de Fuerza Social (SFM)**. Este modelo calcula el movimiento de cada agente en función de su deseo de alcanzar un destino (fuerza atractiva) y de evitar colisiones con otros agentes y obstáculos (fuerzas repulsivas) (Chen et al., 2012).
* **El Componente Operacional (DES)**: El flujo de la evacuación se modelará como un proceso de eventos discretos. Aquí, los agentes (evacuados) se convierten en “entidades” que avanzan a través de una secuencia de actividades (ej. caminar\_a\_punto\_de\_encuentro, esperar\_transporte, viajar\_a\_albergue). Este componente gestionará los **recursos limitados** del sistema, como la capacidad de las vías, la disponibilidad de vehículos de evacuación y el aforo de los albergues, permitiendo identificar y analizar cuellos de botella y tiempos de espera (Sopha et al., 2021).

**Nivel de Madurez Tecnológica (TRL) y Propiedad Intelectual:**

El proyecto partirá de un nivel **TRL 3** (prueba de concepto de los algoritmos de ABM y DES) y se espera alcanzar un **TRL 6** al final de los dos años, con un prototipo validado en un entorno relevante junto a usuarios finales de municipalidades y SENAPRED.

La solución se desarrollará íntegramente con herramientas de código abierto y se basará en modelos de dominio público (ABM, DES, SFM), por lo que no infringe patentes de terceros. El código fuente generado, particularmente los algoritmos de optimización para cómputo paralelo (C++/OpenMP), constituirá propiedad intelectual original del proyecto, cuya estrategia de protección se definirá en función de los resultados (ej. licenciamiento open-source o registro en INAPI).

**Flujo de Trabajo del Simulador y Aporte al Logro de la Solución:**

La operación del simulador seguirá un proceso estructurado en cuatro etapas, que constituyen el núcleo metodológico para la validación de la hipótesis:

1. **Etapa 1: Configuración del Escenario.** El usuario define las variables de entrada del escenario a simular:
   * **Parámetros de la Amenaza**: Intensidad del sismo (escala de Mercalli Modificada), altura de la ola de tsunami, velocidad de propagación del incendio forestal, etc.
   * **Variables de Exposición y Vulnerabilidad**: Se carga la distribución espacial de la población (agentes), la tipología constructiva de las edificaciones (ej. % de albañilería vs. hormigón), y la ubicación de infraestructura crítica.
   * **Variables de Capacidad**: Se define la capacidad de las rutas de evacuación, el número de vehículos disponibles y el aforo de los albergues.
2. **Etapa 2: Ejecución de la Simulación.** El motor computacional procesa la interacción de millones de agentes en paralelo, calculando sus trayectorias, tiempos de desplazamiento y la utilización de recursos en cada intervalo de tiempo.
3. **Etapa 3: Análisis de Resultados.** La plataforma genera un conjunto de productos de análisis para la toma de decisiones:
   * **Métricas de Desempeño**: Tiempo total de evacuación, porcentaje de población evacuada por tramos de tiempo, y tasa de utilización de los albergues.
   * **Mapas de Congestión**: Visualizaciones geoespaciales (heatmaps) que identifican cuellos de botella en la red vial y puntos de aglomeración.
   * **Indicadores de Sostenibilidad**: Estimación de la huella de carbono (emisiones de CO2) asociada al plan de evacuación vehicular (Sopha et al., 2021).
4. **Etapa 4: Visualización y Reporte.** Se genera un reporte analítico y una repetición visual de la simulación que permite a los planificadores entender la dinámica del proceso y justificar cambios en los planes de emergencia.

Este enfoque no solo responde a las normativas nacionales de GRD (Ley 21.364) y al Marco de Sendai, sino que entrega una herramienta tangible y validada para fortalecer la resiliencia urbana, permitiendo pasar de una planificación estática a una gestión de emergencias dinámica y adaptativa.

**Bibliografía (Sección 1.2)**

* 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
* 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
* 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)*.

### 1.3 a) Soluciones Alternativas que se Encuentren en Etapas de Desarrollo

El panorama actual de la gestión de desastres está experimentando una transformación significativa, impulsada por el desarrollo de plataformas tecnológicas avanzadas que integran inteligencia artificial, modelado de riesgos y análisis geoespacial. Estas soluciones alternativas, que se encuentran en diversas etapas de desarrollo, representan el estado del arte en la materia y proporcionan un contexto esencial para posicionar nuestra propuesta.

**1. Plataformas de Inteligencia Artificial para Gestión Integral de Desastres**

La incorporación de IA en todas las fases del ciclo de gestión de desastres está siendo liderada por instituciones académicas de primer nivel. El equipo de investigación de la Universidad Texas A&M, dirigido por el Dr. Ali Mostafavi, ha desarrollado un conjunto de herramientas de IA que abordan desde la mitigación hasta la recuperación (Agan, 2024). Sus desarrollos incluyen:

* **Flood Genome**: Un modelo de aprendizaje automático que determina el riesgo de inundación basándose en variables hidrológicas, topográficas y del entorno construido. Este sistema utiliza datos históricos del Programa Nacional de Seguros contra Inundaciones para validar sus predicciones, logrando una precisión notable en la identificación de áreas de alto riesgo.
* **Elev-Vision**: Una herramienta de IA que determina la elevación del piso más bajo de las estructuras utilizando imágenes de Google Street View. Para ciudades como Houston, con cientos de miles de propiedades, esta tecnología reduce significativamente los costos de levantamiento y proporciona información vital actualizada sobre el riesgo de inundación.
* **Sistemas de Monitoreo de Evacuación**: Utilizan datos de ubicación y métodos de análisis de grafos para determinar los patrones de preparación y evacuación de las comunidades antes de que llegue un huracán, proporcionando información en tiempo casi real a los tomadores de decisiones.

**2. Plataformas de Código Abierto para Evaluación de Riesgos Multiamenaza**

**InaSAFE (Indonesia Scenario Assessment for Emergencies)** es una plataforma madura de código abierto desarrollada conjuntamente por Indonesia (BNPB), Australia y el Banco Mundial. Esta herramienta, que opera como plugin de QGIS, permite generar escenarios realistas de impacto de amenazas naturales para mejorar la planificación, preparación y respuesta (InaSAFE, 2024). Sus variables clave incluyen:

* **Variables de Amenaza**: Intensidad sísmica, altura de tsunami, velocidad del viento, profundidad de inundación.
* **Variables de Exposición**: Distribución poblacional, tipología constructiva, infraestructura crítica.
* **Variables de Vulnerabilidad**: Curvas de fragilidad específicas por tipo de construcción y amenaza.

**RiskChanges** es una herramienta de soporte a decisiones espaciales (SDSS) de código abierto que permite el análisis de riesgo multiamenaza dinámico. Su enfoque se centra en la comparación de escenarios actuales con proyecciones futuras bajo diferentes alternativas de planificación (RiskChanges, 2024). Las variables que maneja incluyen:

* **Variables Temporales**: Proyecciones climáticas, cambios de uso de suelo, crecimiento demográfico.
* **Variables de Mitigación**: Alternativas de reducción de riesgo (soluciones ingenieriles vs. ecológicas).
* **Variables de Frecuencia**: Períodos de retorno de 20 a 200 años para diferentes amenazas.

**RiskScape**, desarrollado por los institutos de investigación de Nueva Zelanda GNS Science y NIWA, es un modelo de riesgo de código abierto que permite una evaluación rápida y precisa del riesgo para personas, edificios e infraestructura (RiskScape, 2024). Su fortaleza radica en la modelación de amenazas volcánicas, sísmicas y de deslizamientos, utilizando variables específicas como:

* **Variables Volcánicas**: Espesor de ceniza, carga de ceniza, velocidad de flujos piroclásticos.
* **Variables Sísmicas**: Aceleración máxima del suelo (PGA), intensidad de Mercalli Modificada.
* **Variables de Deslizamiento**: Susceptibilidad de laderas, precipitación acumulada, pendiente.

**3. Soluciones Comerciales Emergentes con Enfoque en IA**

**Resilitix**, fundada por el Dr. Ali Mostafavi, es una startup que comercializa tecnologías de IA para la resiliencia ante desastres. Sus productos incluyen análisis de vulnerabilidad funcional, monitoreo de evacuación en tiempo casi real y evaluación de daños mediante visión computacional (Resilitix, 2024). Sus variables operacionales incluyen:

* **Variables de Movilidad**: Patrones de desplazamiento poblacional, utilización de rutas de evacuación.
* **Variables de Criticidad**: Índices de importancia funcional de infraestructura crítica.
* **Variables de Equidad**: Métricas de vulnerabilidad social para comunidades desatendidas.

**Drangue**, una startup GeoAI fundada en 2024, se enfoca en la anticipación y mitigación de desastres naturales mediante tecnologías de IA y percepción remota. Su enfoque se centra en el mapeo, modelado y predicción de desastres naturales, utilizando variables derivadas de:

* **Variables de Percepción Remota**: Índices espectrales de vegetación, temperatura superficial, humedad del suelo.
* **Variables Climatológicas**: Patrones de precipitación, temperatura, velocidad del viento.
* **Variables Geomorfológicas**: Modelos digitales de elevación, pendiente, orientación de laderas.

**4. Limitaciones y Oportunidades de Mejora**

A pesar de los avances significativos, las soluciones actuales presentan limitaciones importantes:

* **Fragmentación Tecnológica**: La mayoría de las plataformas se especializan en amenazas específicas o fases particulares del ciclo de gestión, sin ofrecer una visión integral.
* **Barreras de Acceso**: Las soluciones comerciales más avanzadas requieren recursos financieros significativos, limitando su adopción en municipios con recursos limitados.
* **Complejidad de Implementación**: Herramientas como InaSAFE requieren conocimientos técnicos especializados en SIG, lo que puede ser una barrera para usuarios no técnicos.
* **Falta de Contextualización Local**: Muchas soluciones han sido desarrolladas para contextos específicos (Indonesia, Nueva Zelanda, Estados Unidos) y requieren adaptación significativa para el contexto chileno.

**5. Posicionamiento de Nuestra Propuesta**

Nuestra propuesta se diferencia de las soluciones existentes al ofrecer:

* **Integración Multiamenaza Nativa**: Desde su diseño, contempla la interacción entre múltiples amenazas simultáneas.
* **Simulación de Evacuación Híbrida**: Combina ABM y DES para modelar tanto el comportamiento humano como las restricciones operacionales.
* **Accesibilidad Garantizada**: Arquitectura de código abierto y bajo costo, específicamente diseñada para municipios con recursos limitados.
* **Contextualización Chilena**: Desarrollo específico para las amenazas, vulnerabilidades y capacidades del contexto nacional.

En síntesis, aunque existen múltiples iniciativas en desarrollo, ninguna ofrece la combinación específica de características que nuestra propuesta plantea: un simulador híbrido, multiamenaza, de código abierto y contextualizado para Chile, que integre la complejidad del comportamiento humano con las restricciones operacionales del entorno.

**Bibliografía (Sección 1.3a)**

* Agan, J. (2024, July 22). Researchers propose using AI for all phases of disaster management. *Phys.org*. https://phys.org/news/2024-07-ai-phases-disaster.html
* Drangue. (2024). *AI-powered insights for faster disaster response*. LinkedIn. https://www.linkedin.com/company/drangue.ai
* InaSAFE. (2024). *InaSAFE - Free software for realistic natural hazard impact scenarios*. InaSAFE.org. https://inasafe.org/
* Resilitix. (2024). *Disrupting disasters with intelligence*. Resilitix Intelligence. https://www.resilitix.ai/
* RiskChanges. (2024). *An open-source Spatial Decision Support tool for the analysis of Dynamic Multi-Hazard risk*. RiskChanges.org. https://riskchanges.org/
* RiskScape. (2024). *Advanced risk software—modelling the risks we face from our natural hazards*. RiskScape.org. https://riskscape.org.nz/

### 1.3 b) Soluciones Comerciales Disponibles

El mercado comercial de software para gestión de desastres se encuentra dominado por soluciones consolidadas que han sido adoptadas ampliamente por agencias gubernamentales y organizaciones de respuesta a emergencias a nivel internacional. Estas plataformas comerciales representan el estándar de la industria en términos de funcionalidad, robustez y soporte técnico, aunque también presentan barreras significativas en términos de costo y accesibilidad.

**1. HAZUS-MH (Hazards U.S. Multi-Hazard): El Estándar Nacional Estadounidense**

HAZUS-MH, desarrollado por FEMA bajo contrato con el National Institute of Building Sciences, representa la plataforma de evaluación de riesgos más utilizada en Estados Unidos. Aunque técnicamente es gratuita, requiere licencias de ArcGIS Desktop (ahora ArcGIS Pro) de Esri, lo que la convierte en una solución de facto comercial (FEMA, 2024).

**Capacidades y Variables Principales:**

* **Modelado Multiamenaza**: Terremotos, huracanes, inundaciones y tsunamis, con variables específicas como:
  + **Sísmicas**: Aceleración máxima del suelo (PGA), datos de ShakeMap del USGS, análisis de falla del terreno.
  + **Huracánicas**: Velocidad del viento, rugosidad del terreno, cobertura arbórea, oleaje de tormenta.
  + **Inundación**: Profundidad y tipo de inundación (costera/fluvial), funciones de daño por categoría de edificación.
  + **Tsunami**: Profundidad y fuerza de las ondas de tsunami en cinco estados de alto riesgo.
* **Variables de Inventario**: Inventarios estatales de línea base para edificaciones, instalaciones esenciales e infraestructura, con la capacidad de reemplazar datos generalizados con información local más precisa.
* **Análisis de Pérdidas**: Estimaciones de daño físico, pérdida económica, impactos sociales (hogares desplazados, requisitos de refugio), efectividad de costos de estrategias de mitigación.

**Limitaciones Identificadas:**

* **Dependencia Tecnológica**: Requiere ArcGIS Desktop/Pro (costo aproximado de $7,000 USD anuales por licencia avanzada).
* **Complejidad de Implementación**: Los análisis avanzados (Nivel 2 y 3) requieren expertise especializado en SIG y ingeniería.
* **Orientación Geográfica**: Optimizado para el contexto estadounidense, requiere adaptación significativa para otros países.
* **Limitaciones en Simulación**: No incluye modelado de comportamiento humano o simulación de evacuación.

**2. Esri ArcGIS Emergency Management Operations: La Suite Integral**

Esri ofrece una suite completa de soluciones para gestión de emergencias que incluye software, aplicaciones, contenido y servicios. Su propuesta de valor se centra en proporcionar “consciencia situacional compartida” y operaciones de centro de emergencias modernizadas (Esri, 2024).

**Componentes y Variables Principales:**

* **Consciencia Situacional**: Dashboards en tiempo real que integran múltiples fuentes de datos:
  + **Variables Meteorológicas**: Feeds en vivo de clima, radar, pronósticos.
  + **Variables de Tráfico**: Condiciones viales en tiempo real, cierres de carreteras.
  + **Variables Sociales**: Actividad en redes sociales, datos de IoT (Internet de las Cosas).
  + **Variables Demográficas**: Población en riesgo, infraestructura crítica.
* **Análisis de Impacto**: Evaluación de impacto potencial con análisis demográfico e infraestructural que podría verse afectado durante y después de un incidente.
* **Información Pública**: Mapas escalables orientados al público que proporcionan información vital sobre incidentes para ayudar a las comunidades a entender su riesgo.
* **Briefing de Incidentes**: Briefings integrales en tiempo real que combinan información crítica para la toma de decisiones ejecutivas.

**Modelo de Precios y Accesibilidad:**

* **ArcGIS Pro**: $7,000 USD anuales (licencia avanzada).
* **ArcGIS Online**: $1,500-$15,000 USD anuales (dependiendo del nivel de servicio).
* **Extensiones Especializadas**: $3,000-$5,000 USD adicionales por extensión.
* **Servicios de Implementación**: $50,000-$200,000 USD (dependiendo de la complejidad).

**Fortalezas Identificadas:**

* **Ecosistema Completo**: Integración nativa entre todas las herramientas y servicios.
* **Escalabilidad en la Nube**: Capacidad para manejar cargas altas durante emergencias virales.
* **Soporte Técnico**: Soporte premium 24/7 y servicios de consultoría especializada.
* **Estándares de la Industria**: Cumplimiento con estándares OGC e interoperabilidad garantizada.

**Limitaciones Identificadas:**

* **Costo Prohibitivo**: El costo total de propiedad puede superar los $100,000 USD anuales para implementaciones completas.
* **Complejidad de Configuración**: Requiere personal técnico especializado para configuración y mantenimiento.
* **Dependencia del Proveedor**: Ecosistema cerrado que genera dependencia tecnológica a largo plazo.

**3. Otras Soluciones Comerciales Establecidas**

**WebEOC (Juvare)**: Plataforma de gestión de crisis basada en web que se enfoca en la coordinación y comunicación durante emergencias. Su modelo de precios oscila entre $15,000-$100,000 USD anuales dependiendo del número de usuarios y módulos.

**DisasterLAN (Intermedix)**: Sistema de gestión de emergencias que integra comunicaciones, recursos y operaciones. Costo estimado de $25,000-$150,000 USD anuales.

**CAPRA (Comprehensive Approach to Probabilistic Risk Assessment)**: Plataforma desarrollada por el Banco Mundial para evaluación probabilística de riesgos. Aunque técnicamente gratuita, requiere capacitación especializada y soporte técnico que puede costar $50,000-$200,000 USD.

**4. Análisis Comparativo: Barreras de Acceso y Oportunidades**

Las soluciones comerciales actuales presentan patrones consistentes que limitan su adopción en contextos de recursos limitados:

**Barreras Económicas:**

* **Costo Inicial Alto**: Las implementaciones básicas oscilan entre $25,000-$100,000 USD.
* **Costos Recurrentes**: Licencias anuales, mantenimiento y soporte pueden representar 20-30% del costo inicial anualmente.
* **Costos Ocultos**: Capacitación, consultoría e integración pueden duplicar el costo inicial.

**Barreras Técnicas:**

* **Curva de Aprendizaje Pronunciada**: Requieren personal especializado en SIG, bases de datos y administración de sistemas.
* **Dependencia de Infraestructura**: Necesitan infraestructura de TI robusta y conectividad confiable.
* **Integración Compleja**: La integración con sistemas existentes puede requerir desarrollo personalizado costoso.

**Barreras Geográficas y Culturales:**

* **Orientación a Mercados Desarrollados**: Optimizadas para contextos de países desarrollados con recursos abundantes.
* **Falta de Localización**: Interfaces, documentación y soporte técnico principalmente en inglés.
* **Modelos de Datos Inadecuados**: Estructuras de datos diseñadas para contextos específicos (ej. códigos postales estadounidenses).

**5. Posicionamiento Estratégico de Nuestra Propuesta**

Frente a este panorama comercial, nuestra propuesta se posiciona como una alternativa disruptiva que aborda directamente las limitaciones identificadas:

**Ventajas Competitivas:**

* **Accesibilidad Económica**: Arquitectura de código abierto elimina costos de licenciamiento.
* **Simplicidad de Implementación**: Interfaz intuitiva diseñada para usuarios no técnicos.
* **Contextualización Regional**: Desarrollo específico para amenazas, vulnerabilidades y capacidades chilenas.
* **Innovación Tecnológica**: Simulación híbrida ABM+DES no disponible en soluciones comerciales actuales.
* **Sostenibilidad a Largo Plazo**: Modelo de desarrollo comunitario que garantiza evolución continua.

**Diferenciación Clave:**

Mientras las soluciones comerciales se enfocan en la gestión de información y visualización de datos, nuestra propuesta introduce capacidades de simulación prospectiva que permiten evaluar escenarios hipotéticos y optimizar planes de evacuación antes de que ocurran los desastres.

En síntesis, aunque las soluciones comerciales ofrecen funcionalidades robustas y soporte técnico profesional, sus altos costos y complejidad las hacen inaccesibles para muchos municipios. Nuestra propuesta busca democratizar el acceso a herramientas avanzadas de gestión de desastres, manteniendo la calidad y funcionalidad esperadas pero eliminando las barreras económicas y técnicas que limitan su adopción.

**Bibliografía (Sección 1.3b)**

* Esri. (2024). *Emergency Management Operations: Real-time solutions to modernize your response operations*. Esri.com. https://www.esri.com/en-us/c/industry/public-safety/emergency-management-operations-solution
* Federal Emergency Management Agency [FEMA]. (2024). *Hazus: FEMA’s GIS software and data for estimating potential losses from disasters*. FEMA Flood Map Service Center. https://msc.fema.gov/portal/resources/hazus
* Federal Emergency Management Agency [FEMA]. (2024). *What is Hazus?* FEMA.gov. https://www.fema.gov/flood-maps/tools-resources/flood-map-products/hazus/about
* Federal Emergency Management Agency [FEMA]. (2024). *Hazus Software*. FEMA.gov. https://www.fema.gov/flood-maps/tools-resources/flood-map-products/hazus/software

### 1.3 c) Análisis de Brechas y Oportunidades de Mejora

El análisis comparativo de las soluciones en desarrollo y comerciales disponibles revela un panorama de oportunidades significativas para la innovación en gestión de desastres. A pesar de los avances tecnológicos considerables, persisten brechas fundamentales que limitan la efectividad de las herramientas actuales, particularmente en contextos de recursos limitados y para la simulación prospectiva de evacuaciones. Esta sección sintetiza las principales brechas identificadas y articula las oportunidades de mejora que justifican el desarrollo de nuestra propuesta.

**1. Brechas Tecnológicas Fundamentales**

**Ausencia de Simulación de Comportamiento Humano Integrada**

La brecha más significativa identificada es la falta de capacidades de simulación de comportamiento humano en las plataformas existentes. Tanto HAZUS como las soluciones de Esri se enfocan en la modelación de amenazas físicas y la estimación de daños a infraestructura, pero no incorporan la complejidad del comportamiento humano durante evacuaciones. Esta limitación es crítica porque:

* Las decisiones de evacuación no son puramente racionales y están influenciadas por factores psicológicos, sociales y culturales.
* Los cuellos de botella en evacuaciones masivas dependen más del comportamiento colectivo que de las características físicas de la infraestructura.
* Los planes de evacuación actuales se basan en supuestos simplificados que no reflejan la realidad del comportamiento humano bajo estrés.

**Limitaciones en Modelado de Interacciones Multiamenaza**

Las soluciones actuales tratan las amenazas de manera independiente o con interacciones limitadas. Por ejemplo, HAZUS puede combinar análisis sísmicos con tsunami, pero no modela adecuadamente:

* Efectos en cascada donde un evento principal (ej. terremoto) desencadena múltiples amenazas secundarias.
* Interacciones dinámicas entre amenazas que evolucionan en tiempo real.
* Impactos acumulativos de múltiples amenazas simultáneas sobre la capacidad de respuesta del sistema.

**Carencia de Capacidades de Simulación Prospectiva**

Las herramientas existentes son fundamentalmente reactivas o, en el mejor de los casos, permiten análisis de escenarios estáticos. No ofrecen capacidades para:

* Simular dinámicamente el proceso de evacuación bajo diferentes condiciones.
* Evaluar la efectividad de diferentes estrategias de evacuación antes de su implementación.
* Optimizar rutas y recursos en tiempo real durante el desarrollo de la evacuación.

**2. Brechas Metodológicas**

**Falta de Integración entre Modelado Físico y Social**

Existe una desconexión fundamental entre los modelos físicos de amenazas (que son relativamente sofisticados) y los modelos sociales de vulnerabilidad y respuesta (que permanecen simplificados). Esta brecha se manifiesta en:

* Variables sociales tratadas como datos estáticos en lugar de procesos dinámicos.
* Ausencia de retroalimentación entre el comportamiento humano y la evolución de la amenaza.
* Modelos de vulnerabilidad social que no capturan la heterogeneidad intracomunitaria.

**Limitaciones en Validación y Calibración**

Las soluciones existentes presentan debilidades en sus procesos de validación:

* Validación limitada con datos de evacuaciones reales debido a la escasez de información detallada sobre comportamiento durante emergencias.
* Falta de marcos estandarizados para calibrar parámetros de comportamiento humano.
* Ausencia de mecanismos de aprendizaje adaptativo que permitan mejorar los modelos con base en experiencias reales.

**3. Brechas Económicas y de Accesibilidad**

**Barrera de Costo para Municipios con Recursos Limitados**

El análisis de costos revela que las soluciones comerciales existentes presentan barreras económicas insuperables para muchos municipios:

* Costos iniciales de implementación que oscilan entre $25,000-$200,000 USD.
* Costos recurrentes anuales que representan 20-30% de la inversión inicial.
* Costos ocultos de capacitación, consultoría e integración que pueden duplicar la inversión.

**Modelo de Licenciamiento Restrictivo**

Las soluciones comerciales utilizan modelos de licenciamiento que:

* Limitan el número de usuarios simultáneos, restringiendo el acceso durante emergencias cuando más se necesita.
* Requieren conectividad constante a servidores de licencias, problemática en situaciones de desastre.
* Generan dependencia tecnológica a largo plazo con costos crecientes.

**4. Brechas Contextuales y Geográficas**

**Inadecuación para Contextos Latinoamericanos**

Las soluciones existentes han sido desarrolladas principalmente para contextos de países desarrollados, presentando limitaciones para su aplicación en Chile:

* Modelos de datos optimizados para estructuras administrativas y geográficas específicas (ej. códigos postales estadounidenses).
* Variables de vulnerabilidad social calibradas para contextos socioeconómicos diferentes.
* Interfaces y documentación principalmente en inglés, limitando la adopción local.

**Falta de Consideración de Amenazas Específicas Regionales**

Las plataformas globales no capturan adecuadamente las especificidades de las amenazas chilenas:

* Características sísmicas únicas de la zona de subducción.
* Patrones específicos de tsunami en la costa del Pacífico.
* Interacciones particulares entre amenazas volcánicas, sísmicas y climáticas.

**5. Oportunidades de Mejora Identificadas**

**Oportunidad 1: Innovación en Simulación Híbrida**

El desarrollo de un enfoque híbrido que combine Modelos Basados en Agentes (ABM) con Simulación de Eventos Discretos (DES) representa una oportunidad única para:

* Capturar tanto el comportamiento individual heterogéneo como las restricciones operacionales del sistema.
* Modelar interacciones complejas entre decisiones humanas y limitaciones físicas.
* Proporcionar insights accionables para la optimización de planes de evacuación.

**Oportunidad 2: Democratización del Acceso**

El desarrollo de una solución de código abierto presenta la oportunidad de:

* Eliminar barreras económicas que limitan el acceso a herramientas avanzadas.
* Crear un ecosistema de desarrollo colaborativo que acelere la innovación.
* Establecer estándares abiertos que promuevan la interoperabilidad.

**Oportunidad 3: Contextualización Regional**

El desarrollo específico para el contexto chileno permite:

* Incorporar conocimiento local sobre amenazas, vulnerabilidades y capacidades.
* Validar modelos con datos y experiencias específicas del país.
* Crear una solución que pueda servir como modelo para otros países de la región.

**Oportunidad 4: Integración de Múltiples Escalas Temporales**

La oportunidad de desarrollar una herramienta que integre:

* Planificación estratégica a largo plazo (años).
* Preparación táctica a mediano plazo (meses).
* Respuesta operacional a corto plazo (horas/días).

**6. Justificación de la Propuesta**

El análisis de brechas demuestra que existe un espacio de innovación significativo para una solución que:

* **Combine lo mejor de ambos mundos**: La robustez técnica de las soluciones comerciales con la accesibilidad de las iniciativas de código abierto.
* **Introduzca capacidades únicas**: Simulación híbrida de evacuación que no está disponible en ninguna solución existente.
* **Aborde barreras sistémicas**: Costos, complejidad y falta de contextualización que limitan la adopción actual.
* **Proporcione valor diferenciado**: Capacidades de simulación prospectiva que permitan optimizar planes antes de que ocurran los desastres.

En conclusión, las brechas identificadas no son meramente técnicas, sino que representan limitaciones fundamentales en el paradigma actual de gestión de desastres. Nuestra propuesta no busca simplemente crear otra herramienta, sino desarrollar una nueva clase de solución que integre simulación de comportamiento humano, accesibilidad económica y contextualización regional en una plataforma unificada. Esta convergencia de características representa una oportunidad única para transformar la gestión de desastres en Chile y potencialmente en la región.

**Bibliografía (Sección 1.3c)**

* Chen, X., & Zhan, F. B. (2008). Agent-based modelling and simulation of urban evacuation: Relative effectiveness of simultaneous and staged evacuation strategies. *Journal of the Operational Research Society, 59*(1), 25-33. https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602321
* Dawson, R. J., Peppe, R., & Wang, M. (2011). An agent-based model for risk-based flood incident management. *Natural Hazards, 59*(1), 167-189. https://doi.org/10.1007/s11069-011-9745-4
* Mas, E., Suppasri, A., Imamura, F., & Koshimura, S. (2012). Agent-based simulation of the 2011 great east Japan earthquake/tsunami evacuation: An integrated model of tsunami inundation and evacuation. *Journal of Natural Disaster Science, 34*(1), 41-57. https://doi.org/10.2328/jnds.34.41

### 1.5 Hipótesis y Componente de Investigación

La presente investigación se fundamenta en dos hipótesis centrales que abordan tanto los desafíos tecnológicos como metodológicos inherentes a la gestión del riesgo de desastres en contextos multiamenaza. Estas hipótesis emergen de la identificación de brechas críticas en las capacidades actuales de simulación y visualización de escenarios de riesgo, y se sustentan en los resultados previos obtenidos por el equipo de investigación.

**Hipótesis Principal (H1): Hipótesis de Simulación Integrada**

La implementación de un motor de simulación híbrido que combine Modelos Basados en Agentes (ABM) con Simulación de Eventos Discretos (DES), integrado con datos geoespaciales de alta resolución y variables sociodemográficas dinámicas, mejorará significativamente la precisión predictiva y la eficiencia computacional en la modelación de evacuaciones masivas ante multiamenazas, comparado con los métodos tradicionales de simulación unifocal.

**Fundamentación de H1:**

Los resultados previos del equipo proporcionan evidencia sólida para sustentar esta hipótesis. El prototipo de simulación basada en agentes desarrollado (TRL 3) demostró una precisión del 75-80% al comparar con datos reales de simulacros en Talcahuano y Valparaíso (2023), incorporando variables conductuales como tiempos de reacción por grupo etario y restricciones geográficas mediante mapeo de quebradas con resolución de 0.5m. Adicionalmente, el algoritmo de optimización desarrollado en el marco del proyecto FONDECYT 1220890 (TRL 4) logró una reducción del 40% en tiempos de cálculo versus métodos tradicionales, manteniendo un error ≤12% en predicción de rutas utilizando el dataset de Iquique.

La literatura especializada respalda esta aproximación híbrida, donde estudios como los de Sopha et al. (2021) demuestran que la combinación de ABM y DES permite capturar tanto la heterogeneidad del comportamiento individual como las restricciones operacionales del sistema, resultando en predicciones más robustas y aplicables a contextos reales.

**Hipótesis Secundaria (H2): Hipótesis de Visualización Adaptativa**

El desarrollo de interfaces de visualización ágiles y adaptativas, fundamentadas en estándares internacionales de simbología (ISO 22324) y principios de diseño centrado en el usuario, incrementará significativamente la confianza y efectividad en la toma de decisiones de planificadores urbanos y equipos de emergencia, medida a través de métricas de usabilidad y tiempo de interpretación de escenarios de riesgo.

**Fundamentación de H2:**

Los resultados previos del proyecto FIC Los Lagos (2020-2022) validaron la implementación de simbología conforme a ISO 22324 para niveles de alerta costeros, demostrando su efectividad en contextos operacionales reales con SERNAPESCA. La transferencia tecnológica exitosa realizada a Ecuador (2022) confirmó la replicabilidad de estos componentes de visualización en contextos normativos diversos, validando la viabilidad de interfaces adaptativas.

La evidencia empírica de proyectos como el Sistema de Gestión del Riesgo para Municipalidades Cordilleranas (GORE RM, 2019-2020) demostró que las interfaces intuitivas basadas en semáforos de colores mejoraron significativamente la comprensión y respuesta de equipos municipales ante alertas tempranas.

**Componente Principal de Investigación Científica**

El desafío científico central del proyecto reside en la **formalización semántica y la integración interoperable de datos heterogéneos** para la simulación de escenarios multiamenaza en tiempo real. Este componente trasciende el desarrollo tecnológico convencional al abordar tres problemas fundamentales de la ciencia de datos geoespaciales:

1. **Heterogeneidad Semántica**: La diversidad de fuentes de datos geoespaciales (SERNAGEOMIN, INE, SHOA, sensores IoT) genera inconsistencias semánticas que requieren algoritmos avanzados de detección y corrección automática de metadatos.
2. **Escalabilidad Computacional**: La simulación de evacuaciones masivas con millones de agentes requiere algoritmos de optimización que mantengan la precisión científica mientras operan en tiempos computacionales aceptables para la toma de decisiones.
3. **Validación Empírica**: La ausencia de datasets completos de evacuaciones reales exige el desarrollo de metodologías híbridas que combinen validación con datos sintéticos, simulacros históricos y juicio experto.

**Contribución Científica Esperada**

La investigación contribuirá al avance del conocimiento en múltiples dominios:

* **Ciencias de la Computación**: Desarrollo de algoritmos híbridos ABM-DES optimizados para simulación masiva en tiempo real.
* **Ciencias de la Información Geográfica**: Formalización de metamodelos semánticos para la integración automática de datos geoespaciales heterogéneos.
* **Ciencias del Comportamiento**: Modelación empírica del comportamiento humano en evacuaciones masivas considerando variables sociodemográficas y psicológicas.
* **Ingeniería de Sistemas**: Arquitecturas de software escalables para la gestión de riesgos en contextos de recursos limitados.

La naturaleza interdisciplinaria del proyecto requiere investigación aplicada y desarrollo experimental para validar hipótesis complejas que no pueden ser abordadas mediante métodos teóricos únicamente. La integración de múltiples dominios científicos y la necesidad de validación empírica en contextos operacionales reales justifican plenamente su categorización como proyecto de investigación científica-tecnológica.

**Metodología de Validación de Hipótesis**

La comprobación de las hipótesis se realizará mediante un diseño experimental multi-fase que incluye:

* **Experimentos controlados** para medir precisión predictiva y eficiencia computacional del motor híbrido.
* **Estudios de usabilidad** con usuarios reales para validar interfaces adaptativas.
* **Validación cruzada** con datos históricos de evacuaciones y simulacros nacionales.
* **Análisis comparativo** con herramientas internacionales de referencia (InaSAFE, HAZUS).

La robustez metodológica garantizará que los resultados sean estadísticamente significativos y transferibles a contextos operacionales diversos.

**Bibliografía (Sección 1.5)**

* 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
* 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
* 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)*.

### 1.6 Objetivos

#### 1.6.1 Objetivo General

Desarrollar, validar e implementar la **Plataforma Integral de Gestión de Evacuaciones Multiamenaza (PIGEM)** como un ecosistema tecnológico completo que integre simulación híbrida avanzada, gestión inteligente de datos geoespaciales, interfaces adaptativas y computación de alto rendimiento, para transformar la capacidad nacional de planificación, simulación y ejecución de evacuaciones masivas ante desastres naturales complejos, estableciendo un nuevo paradigma en la gestión del riesgo de desastres en Chile y la región.

#### 1.6.2 Objetivos Específicos

**OE1: Desarrollar una arquitectura de sistema distribuida e interoperable**

Diseñar e implementar una arquitectura de microservicios basada en Domain-Driven Design que integre todos los componentes de PIGEM, garantizando interoperabilidad con sistemas existentes (SENAPRED, SHOA, SERNAGEOMIN), escalabilidad horizontal para manejo de cargas variables (0-100K usuarios concurrentes), y disponibilidad operacional superior al 99.9% mediante patrones de redundancia y failover automático.

**OE2: Implementar un Metamodelo Cartográfico Unificado (MCU) y sistema de integración de datos**

Crear un marco semántico estandarizado conforme a ISO 19115/19139 y servicios OGC que permita la ingesta, normalización y distribución automática de datos geoespaciales heterogéneos de múltiples fuentes institucionales, incluyendo variables demográficas, de vulnerabilidad, amenazas y recursos, con capacidad de procesamiento en tiempo real y validación semántica automática.

**OE3: Desarrollar un motor de simulación híbrida ABM-DES con capacidades HPC**

Implementar algoritmos de simulación que combinen Modelos Basados en Agentes con Simulación de Eventos Discretos, optimizados para arquitecturas híbridas CPU-GPU mediante estrategias de paralelización avanzadas, capaces de simular evacuaciones masivas de hasta 1 millón de agentes manteniendo precisión superior al 85% y tiempos de ejecución inferiores a 30 minutos para escenarios de 100,000 agentes.

**OE4: Crear interfaces de visualización adaptativas y sistemas de comunicación multicanal**

Diseñar e implementar dashboards interactivos que se adapten automáticamente a diferentes perfiles de usuario (técnicos, autoridades, ciudadanos) mediante principios de teoría de carga cognitiva, integrados con sistemas de alerta temprana y comunicación multicanal (web, móvil, SMS, redes sociales) que cumplan estándares ISO 22324 y garanticen usabilidad superior a 80 puntos SUS.

**OE5: Establecer el Marco de Validación FMVSE y protocolos de certificación**

Desarrollar un protocolo estandarizado para calibración, validación y certificación de sistemas de simulación de evacuación, incluyendo métricas cuantitativas reproducibles, base de datos de referencia con casos validados, y procedimientos de benchmarking que permitan certificar herramientas como “aptas para uso operacional” en contextos de emergencia real.

**OE6: Validar el sistema integral mediante estudios empíricos y casos piloto**

Realizar validaciones comprehensivas del ecosistema PIGEM completo en al menos dos ciudades costeras chilenas (Valparaíso y Talcahuano), midiendo indicadores de precisión predictiva (>85%), eficiencia computacional (>40% mejora vs métodos tradicionales), usabilidad (>80 puntos SUS) y confianza en toma de decisiones (>4.0/5.0), mediante comparación controlada con herramientas de referencia internacional.

**OE7: Implementar estrategia de transferencia tecnológica y sostenibilidad**

Diseñar y ejecutar un modelo de transferencia tecnológica escalable que incluya capacitación diferenciada por perfil de usuario, documentación técnica completa, licenciamiento open source (GPL v3.0), y establecimiento de centros regionales de soporte técnico que garanticen la adopción sostenible en al menos 50 municipalidades de alto riesgo y la expansión regional a 3 países andinos.

**OE8: Generar conocimiento científico-tecnológico transferible**

Contribuir al avance del estado del arte mediante la formalización de metodologías innovadoras en simulación híbrida multiamenaza, publicación de al menos 4 artículos en revistas indexadas de alto impacto, desarrollo de 2 tesis de postgrado, y establecimiento de estándares técnicos nacionales que posicionen a Chile como referente regional en tecnologías de gestión de riesgos.

### 1.7 Metodologías de Investigación y Desarrollo

La metodología del proyecto se estructura en un enfoque de investigación aplicada y desarrollo experimental, articulado en cinco fases interconectadas que progresan desde la conceptualización teórica hasta la validación operacional y transferencia tecnológica. Este diseño metodológico responde a la naturaleza interdisciplinaria del problema y garantiza la validación empírica de las hipótesis planteadas.

**Fase 1: Fundamentación Teórica y Diseño del Marco Metodológico (Meses 1-6)**

Esta fase inicial establece los fundamentos científicos y tecnológicos del proyecto mediante investigación documental y análisis comparativo. Las actividades incluyen:

* **Revisión Sistemática de Literatura**: Análisis bibliométrico de publicaciones científicas en simulación de evacuaciones, modelos basados en agentes y gestión de riesgos multiamenaza, utilizando bases de datos especializadas (Web of Science, Scopus, IEEE Xplore).
* **Benchmarking Internacional**: Evaluación comparativa de herramientas existentes (InaSAFE, HAZUS, RiskScape) mediante análisis de funcionalidades, limitaciones y brechas tecnológicas.
* **Diseño del Marco Conceptual**: Formalización del metamodelo híbrido ABM-DES mediante diagramas UML y especificaciones técnicas detalladas.

**Criterios de Validación**: Documento técnico peer-reviewed que establezca el estado del arte y justifique la aproximación metodológica propuesta.

**Fase 2: Desarrollo e Implementación del Motor de Simulación (Meses 4-12)**

El desarrollo del motor híbrido constituye el núcleo tecnológico del proyecto, implementando algoritmos avanzados de simulación optimizados para procesamiento paralelo.

* **Arquitectura de Software**: Diseño de arquitectura modular basada en microservicios, utilizando patrones de diseño para garantizar escalabilidad y mantenibilidad.
* **Implementación de Algoritmos ABM**: Desarrollo de modelos de agentes heterogéneos con atributos sociodemográficos, capacidades de movilidad y patrones de comportamiento basados en el Modelo de Fuerza Social (SFM).
* **Integración de Simulación de Eventos Discretos**: Implementación de la gestión de recursos limitados (capacidad de rutas, vehículos, albergues) mediante técnicas de optimización heurística.
* **Optimización para Cómputo Paralelo**: Implementación de algoritmos paralelos utilizando OpenMP y CUDA para procesamiento en CPU y GPU respectivamente.

**Criterios de Validación**: Prototipo funcional capaz de simular al menos 50,000 agentes con tiempo de ejecución inferior a 30 minutos en hardware estándar.

**Fase 3: Desarrollo de Interfaces de Visualización Adaptativas (Meses 8-16)**

Esta fase se enfoca en la creación de interfaces de usuario que transformen datos complejos de simulación en visualizaciones comprensibles y accionables.

* **Diseño de Experiencia de Usuario (UX)**: Aplicación de metodologías de Design Thinking y User-Centered Design para identificar necesidades específicas de diferentes perfiles de usuario.
* **Implementación de Visualizaciones Dinámicas**: Desarrollo de dashboards interactivos utilizando tecnologías web modernas (D3.js, React, WebGL) para rendering eficiente de datos geoespaciales.
* **Estandarización de Simbología**: Implementación de bibliotecas de símbolos conforme a ISO 22324 y OGC Styled Layer Descriptor (SLD) para garantizar interoperabilidad.
* **Generación Automática de Reportes**: Desarrollo de módulos de generación automática de informes técnicos y ejecutivos en formatos estándar (PDF, HTML, JSON).

**Criterios de Validación**: Evaluación de usabilidad con métricas del System Usability Scale (SUS) superiores a 80 puntos y tiempo de interpretación de escenarios inferior a 5 minutos.

**Fase 4: Validación Empírica y Estudios de Caso (Meses 12-20)**

La validación empírica constituye el elemento crítico para comprobar las hipótesis del proyecto mediante estudios controlados y casos de aplicación real.

* **Selección de Casos de Estudio**: Identificación de al menos dos ciudades costeras chilenas con características demográficas, geográficas y de riesgo contrastantes (e.g., Valparaíso y Talcahuano).
* **Recolección de Datos Empíricos**: Obtención de datos geoespaciales de alta resolución (LiDAR, ortofotografías), información demográfica censal y registros históricos de evacuaciones.
* **Calibración de Modelos**: Ajuste de parámetros de simulación mediante técnicas de optimización bayesiana, utilizando datos históricos como referencia.
* **Experimentos Controlados**: Ejecución de baterías de simulaciones comparativas entre el sistema propuesto y herramientas de referencia, midiendo precisión, eficiencia computacional y calidad de resultados.
* **Validación con Usuarios Finales**: Sesiones de evaluación con planificadores urbanos, equipos de emergencia y autoridades municipales, documentando feedback cualitativo y cuantitativo.

**Criterios de Validación**: Métricas de precisión predictiva superiores al 85% comparado con datos reales, reducción del 40% en tiempo computacional respecto a métodos tradicionales, y puntajes de confianza del usuario superiores a 4.0/5.0 en escala Likert.

**Fase 5: Transferencia Tecnológica y Escalabilidad (Meses 16-24)**

La fase final garantiza la sostenibilidad y adopción operacional del sistema mediante estrategias de transferencia tecnológica estructuradas.

* **Documentación Técnica Comprehensive**: Elaboración de manuales técnicos, guías de instalación, documentación de APIs y materiales de capacitación.
* **Capacitación de Usuarios**: Diseño e implementación de programas de capacitación diferenciados por perfil de usuario, incluyendo talleres presenciales y recursos de e-learning.
* **Pilotaje Institucional**: Implementación piloto del sistema en instituciones colaboradoras (municipalidades, SENAPRED) con monitoreo y soporte técnico continuo.
* **Estrategia de Sostenibilidad**: Desarrollo de modelos de governanza, mantenimiento y actualización tecnológica que garanticen la operación a largo plazo.

**Criterios de Validación**: Implementación exitosa en al menos tres instituciones públicas, con protocolos de mantenimiento documentados y equipos locales capacitados.

**Metodología de Validación de Hipótesis**

La comprobación de las hipótesis se realizará mediante un diseño experimental robusto que incluye:

* **Validación Cuantitativa**: Análisis estadístico de métricas de precisión, eficiencia y usabilidad mediante pruebas t-Student y análisis de varianza (ANOVA).
* **Validación Cualitativa**: Análisis temático de entrevistas semiestructuradas con usuarios finales, utilizando técnicas de codificación cualitativa.
* **Validación Cruzada**: Comparación sistemática con herramientas de referencia internacional mediante benchmarking controlado.

**Consideraciones Éticas y Regulatorias**

El proyecto cumplirá con todas las normativas aplicables, incluyendo:

* Protección de datos personales conforme a la Ley N° 19.628
* Uso responsable de información geoespacial sensible
* Protocolos de consentimiento informado para participantes en estudios de usabilidad

**Participación de Entidades Asociadas**

Las entidades asociadas participarán activamente en:

* **Municipalidades**: Provisión de datos reales, validación de casos de uso, feedback de usuarios finales
* **SENAPRED**: Validación técnica, definición de requerimientos operacionales, facilitación de transferencia tecnológica
* **Universidades Colaboradoras**: Apoyo en validación científica, análisis de datos y publicación de resultados

Esta metodología garantiza un enfoque sistemático y riguroso que permita alcanzar los objetivos propuestos mientras genera conocimiento científico transferible y productos tecnológicos de alto impacto.

**Bibliografía (Sección 1.7)**

* 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*.
* 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
* Nielsen, J., & Landauer, T. K. (1993). A mathematical model of the finding of usability problems. *Proceedings of the INTERACT’93 and CHI’93 Conference on Human Factors in Computing Systems*, 206-213.

### 1.8 Resultados Comprometidos

#### 1.8.1 Resultado Tecnológico e Hitos

**Resultado Tecnológico Principal: Sistema Integrado de Simulación y Visualización de Evacuaciones Multiamenaza (SISVEM)**

El resultado tecnológico comprometido es el desarrollo de un **Sistema Integrado de Simulación y Visualización de Evacuaciones Multiamenaza (SISVEM)**, una plataforma computacional de código abierto que combina un motor de simulación híbrido (ABM-DES) con interfaces de visualización adaptativas para la gestión avanzada de evacuaciones masivas en contextos urbanos costeros.

**Descripción Detallada del Prototipo:**

El SISVEM estará compuesto por cuatro módulos integrados:

1. **Motor de Simulación Híbrido**: Algoritmos ABM-DES optimizados para procesamiento paralelo, capaces de simular hasta 100,000 agentes heterogéneos con variables sociodemográficas, comportamentales y de movilidad.
2. **Módulo de Integración de Datos**: Sistema de ingesta automática de datos geoespaciales heterogéneos (shapefiles, rasters, CSV) con validación semántica conforme a estándares ISO 19115/19139.
3. **Interfaces de Visualización Adaptativas**: Dashboards interactivos con simbología estandarizada (ISO 22324) y capacidades de personalización según perfil de usuario (técnico, autoridad, comunidad).
4. **Sistema de Reportes Automáticos**: Generador de informes técnicos y ejecutivos en tiempo real con métricas de desempeño, análisis de cuellos de botella y recomendaciones operacionales.

**Nivel de Madurez Tecnológica:** - TRL Inicial: 3 (prueba de concepto validada en laboratorio) - TRL Final: 6 (prototipo validado en entorno operacional relevante)

**Protección Intelectual:** El desarrollo se basará exclusivamente en software libre y estándares abiertos, sin dependencia de tecnologías propietarias. Los algoritmos originales serán licenciados bajo GPL v3.0 para garantizar acceso público y sostenibilidad.

**Validaciones del Prototipo Final:**

Las validaciones comprenderán estudios comparativos controlados con herramientas de referencia (InaSAFE, HAZUS) en dos ciudades costeras chilenas, midiendo: - Precisión predictiva mediante comparación con datos históricos de evacuaciones - Eficiencia computacional en términos de tiempo de ejecución y uso de recursos - Usabilidad mediante métricas del System Usability Scale (SUS) - Confianza del usuario a través de escalas Likert validadas

**Indicadores de Desempeño:**

Los principales indicadores cuantitativos que demostrarán el éxito del prototipo incluyen: - **Precisión Predictiva**: ≥85% de correlación con datos reales de evacuaciones - **Eficiencia Computacional**: ≤30 minutos para simular 100,000 agentes en hardware estándar - **Usabilidad**: Puntaje SUS ≥80 puntos - **Reducción de Tiempo de Análisis**: ≥40% comparado con métodos tradicionales - **Escalabilidad**: Capacidad para operar en municipalidades con infraestructura TI básica

**Hitos de Desarrollo:**

| **Hito** | **Descripción** | **Mes** | **Criterios de Validación** | **Entregables** |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **H1: Motor de Simulación Básico** | Implementación funcional del motor ABM-DES con capacidad para 10,000 agentes | 10 | - Tiempo de ejecución <10 min- Precisión >70% vs datos sintéticos- Documentación técnica completa | - Código fuente documentado- Reporte de pruebas- Manual técnico |
| **H2: Interfaces de Visualización** | Desarrollo de dashboards adaptativos con simbología ISO 22324 | 16 | - Puntaje SUS >75- Tiempo de interpretación <5 min- Compatibilidad multi-dispositivo | - Prototipos funcionales- Estudios de usabilidad- Guías de usuario |
| **H3: Integración y Escalabilidad** | Sistema completo validado con datos reales en casos piloto | 22 | - Simulación 100,000 agentes- Precisión >85%- Validación en 2 ciudades | - Sistema integrado- Reportes de validación- Documentación completa |

**Ventajas Competitivas:**

El SISVEM proporcionará ventajas significativas respecto a competidores existentes: - **Accesibilidad**: Eliminación de costos de licenciamiento (vs $25,000-100,000 USD anuales de soluciones comerciales) - **Adaptabilidad**: Interfaces configurables vs visualizaciones estáticas de herramientas actuales - **Integración**: Simulación híbrida ABM-DES vs enfoques unifocales - **Localización**: Optimizado para amenazas y vulnerabilidades específicas chilenas

#### 1.8.2 Segundo Resultado Tecnológico: Marco Metodológico para Validación de Simulaciones de Evacuación (FMVSE)

**Descripción:**

El **Marco Metodológico para Validación de Simulaciones de Evacuación (FMVSE)** constituye un protocolo estandarizado para la calibración, validación y certificación de sistemas de simulación de evacuaciones masivas, basado en métricas cuantitativas y procedimientos reproducibles.

**Componentes del FMVSE:**

1. **Protocolo de Calibración**: Metodología sistemática para ajustar parámetros de simulación utilizando datos históricos y técnicas de optimización bayesiana.
2. **Métricas de Validación**: Conjunto estandarizado de indicadores de desempeño para evaluar precisión, robustez y confiabilidad de simulaciones.
3. **Procedimientos de Certificación**: Criterios objetivos para certificar sistemas de simulación como “aptos para uso operacional” en contextos de emergencia.
4. **Base de Datos de Referencia**: Repositorio de casos de estudio validados para benchmarking y comparación entre herramientas.

**Nivel de Madurez:** - TRL Inicial: 2 (concepto formulado) - TRL Final: 5 (validado en entorno relevante)

**Hitos Específicos:**

| **Hito** | **Descripción** | **Mes** | **Entregables** |
| --- | --- | --- | --- |
| **H4: Protocolo de Calibración** | Metodología documentada y validada con casos históricos | 14 | - Protocolo técnico- Software de calibración- Casos de estudio |
| **H5: Sistema de Certificación** | Framework completo para certificación de herramientas | 20 | - Estándar de certificación- Herramientas de evaluación- Casos piloto |

#### 1.8.3 Otros Resultados Esperados

**Resultados de Producción Científica:**

1. **Publicaciones en Revistas Indexadas** (3-4 artículos):
   * “Hybrid ABM-DES Framework for Large-Scale Evacuation Simulation” (*Computers & Geosciences*)
   * “Adaptive Visualization Interfaces for Emergency Management” (*International Journal of Human-Computer Studies*)
   * “Validation Methodologies for Evacuation Simulation Systems” (*Safety Science*)
2. **Presentaciones en Congresos Internacionales** (2-3 presentaciones):
   * International Conference on Disaster Risk Reduction
   * IEEE Conference on Emergency Management and Technologies

**Resultados de Formación de Capacidades:**

1. **Tesis de Postgrado** (2 tesis):
   * Tesis doctoral: “Algoritmos de optimización para simulación masiva de evacuaciones”
   * Tesis de magíster: “Interfaces adaptativas para visualización de riesgos geoespaciales”
2. **Capacitación de Personal Técnico**:
   * 3 profesionales de entidades asociadas capacitados en uso del sistema
   * 2 técnicos especializados en mantenimiento y soporte

**Resultados de Transferencia Tecnológica:**

1. **Acuerdos de Transferencia**: Convenios firmados con al menos 3 municipalidades para implementación piloto
2. **Licenciamiento de Software**: Licencia GPL v3.0 registrada y repositorio público disponible
3. **Capacitación Institucional**: Programas de entrenamiento implementados en SENAPRED y entidades asociadas

**Indicadores de Impacto:**

* **Adopción Institucional**: Implementación operacional en ≥3 organizaciones públicas
* **Uso Académico**: Citaciones y uso del sistema en ≥5 instituciones de investigación
* **Impacto Social**: Mejora demostrable en tiempo de respuesta ante emergencias en municipalidades piloto
* **Sostenibilidad**: Modelo de mantenimiento operativo por 5 años post-proyecto

Los resultados comprometidos representan contribuciones significativas tanto al avance del conocimiento científico como al fortalecimiento de capacidades nacionales en gestión de riesgos, garantizando impacto tangible y sostenible en la seguridad de comunidades urbanas costeras.

### 1.9 Planificación de Actividades (Carta Gantt)

La planificación del proyecto se estructura en 24 meses de ejecución, organizados en cinco fases principales que garantizan el cumplimiento de objetivos específicos y la entrega oportuna de hitos críticos. La secuenciación de actividades considera dependencias técnicas, disponibilidad de recursos y participación coordinada de entidades asociadas.

**Estructura Temporal del Proyecto:**

| **Fase** | **Duración** | **Objetivos Principales** | **Entidades Participantes** |
| --- | --- | --- | --- |
| **Fase 1: Fundamentación** | Meses 1-6 | Revisión estado del arte, diseño conceptual | USACH, Universidades colaboradoras |
| **Fase 2: Desarrollo** | Meses 4-12 | Implementación motor simulación | USACH, soporte técnico municipalidades |
| **Fase 3: Visualización** | Meses 8-16 | Desarrollo interfaces adaptativas | USACH, SENAPRED, municipalidades |
| **Fase 4: Validación** | Meses 12-20 | Estudios empíricos y pilotos | Todas las entidades asociadas |
| **Fase 5: Transferencia** | Meses 16-24 | Escalabilidad y sostenibilidad | SENAPRED, municipalidades, USACH |

**Cronograma Detallado de Actividades:**

| **Actividad** | **Mes Inicio** | **Mes Fin** | **Hito Asociado** | **Entidades Responsables** |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **1.1** Revisión sistemática literatura | 1 | 4 | - | USACH |
| **1.2** Benchmarking herramientas existentes | 2 | 5 | - | USACH, Univ. colaboradoras |
| **1.3** Diseño arquitectura sistema | 3 | 6 | - | USACH |
| **2.1** Implementación algoritmos ABM | 4 | 8 | H1 | USACH |
| **2.2** Desarrollo módulo DES | 6 | 10 | H1 | USACH |
| **2.3** Optimización procesamiento paralelo | 8 | 12 | H1 | USACH |
| **3.1** Diseño interfaces UX/UI | 8 | 12 | H2 | USACH, SENAPRED |
| **3.2** Implementación dashboards | 10 | 14 | H2 | USACH |
| **3.3** Estandarización simbología | 12 | 16 | H2 | USACH, municipalidades |
| **4.1** Recolección datos empíricos | 12 | 16 | - | Municipalidades, SENAPRED |
| **4.2** Calibración modelos | 14 | 18 | H4 | USACH, municipalidades |
| **4.3** Validación casos piloto | 16 | 20 | H3 | Todas las entidades |
| **5.1** Documentación técnica | 16 | 22 | H5 | USACH |
| **5.2** Capacitación usuarios | 18 | 23 | H5 | SENAPRED, municipalidades |
| **5.3** Transferencia tecnológica | 20 | 24 | H5 | Todas las entidades |

**Hitos Críticos y Entregables:**

**Hito 1 (Mes 10): Motor de Simulación Básico** - Prototipo funcional ABM-DES para 10,000 agentes - Documentación técnica de algoritmos - Reporte de pruebas de rendimiento - **Criterio crítico**: Simulación completada en <10 minutos

**Hito 2 (Mes 16): Interfaces de Visualización** - Dashboards interactivos implementados - Estudios de usabilidad con usuarios finales - Simbología estandarizada validada - **Criterio crítico**: Puntaje SUS >75 puntos

**Hito 3 (Mes 20): Sistema Integrado Validado** - Plataforma completa operacional - Validación en 2 ciudades costeras - Precisión >85% vs datos reales - **Criterio crítico**: Capacidad 100,000 agentes

**Hito 4 (Mes 18): Protocolo de Calibración** - Metodología FMVSE documentada - Software de calibración automática - Base de datos de referencia - **Criterio crítico**: Reproducibilidad validada

**Hito 5 (Mes 22): Transferencia Completada** - Sistema transferido a 3 instituciones - Personal capacitado operacionalmente - Modelo de sostenibilidad implementado - **Criterio crítico**: Autonomía operacional demostrada

**Participación de Entidades Asociadas por Actividad:**

**Municipalidades Piloto (Valparaíso, Talcahuano):** - Provisión de datos geoespaciales y demográficos (Actividades 4.1, 4.2) - Participación en estudios de usabilidad (Actividad 3.3) - Validación de casos de uso reales (Actividad 4.3) - Capacitación de equipos técnicos (Actividad 5.2)

**SENAPRED:** - Definición de requerimientos técnicos (Actividades 1.3, 3.1) - Validación de interfaces y protocolos (Actividades 3.2, 4.3) - Facilitación de transferencia tecnológica (Actividad 5.3) - Supervisión de estándares nacionales (Actividades 3.3, 5.1)

**Universidades Colaboradoras:** - Apoyo en revisión bibliográfica (Actividad 1.2) - Validación científica de metodologías (Actividades 2.1, 4.2) - Contribución a publicaciones científicas (transversal)

**Gestión de Riesgos y Contingencias:**

La planificación incorpora buffers temporales del 15% para actividades críticas y estrategias de mitigación: - **Retrasos en datos**: Acuerdos previos con entidades para acceso garantizado - **Problemas técnicos**: Desarrollo iterativo con pruebas continuas - **Disponibilidad usuarios**: Múltiples ventanas de validación programadas - **Cambios normativos**: Monitoreo continuo y flexibilidad en diseño

**Recursos Críticos por Fase:**

* **Meses 1-6**: Personal investigador senior, acceso a bases de datos especializadas
* **Meses 7-12**: Infraestructura computacional, desarrolladores especializados
* **Meses 13-18**: Colaboración intensa con usuarios finales, datos reales
* **Meses 19-24**: Recursos para transferencia, capacitación y documentación

Esta planificación garantiza la entrega oportuna de resultados mientras mantiene la calidad científica y la viabilidad operacional del sistema desarrollado.

## 2. Estrategia de Desarrollo y de Transferencia Tecnológica y Estimación del Impacto Económico y Social

### 2.1 Producto, Proceso y/o Servicio a Desarrollar

El producto final que se buscará alcanzar a partir de los resultados de este proyecto es una **Plataforma Integral de Gestión de Evacuaciones Multiamenaza (PIGEM)**, un sistema tecnológico completo que transformará la capacidad nacional para planificar, simular y ejecutar evacuaciones masivas ante desastres naturales complejos.

**Descripción Integral del Producto Final:**

La PIGEM constituirá un ecosistema tecnológico integrado compuesto por cuatro componentes principales interoperables:

**1. Núcleo de Simulación Avanzada:** - Motor híbrido ABM-DES escalable hasta 1 millón de agentes - Biblioteca de modelos de comportamiento humano validados empíricamente - Algoritmos de optimización en tiempo real para rutas de evacuación - Capacidades de simulación de escenarios multiamenaza simultáneos

**2. Plataforma de Datos Geoespaciales:** - Sistema de ingesta automática de datos heterogéneos en tiempo real - Base de datos geoespacial nacional estandarizada (ISO 19115/19139) - Servicios web interoperables (WMS, WFS, WCS) conforme a estándares OGC - Integración con sensores IoT y sistemas de monitoreo existentes

**3. Interfaces de Usuario Multimodales:** - Aplicación web responsive para planificadores y autoridades - Aplicación móvil para equipos de campo y ciudadanía - Dashboards ejecutivos para toma de decisiones estratégicas - APIs públicas para desarrolladores de terceros

**4. Sistema de Alerta y Respuesta Automática:** - Módulo de generación automática de alertas tempranas - Integración con Sistema de Alerta de Emergencia (SAE) nacional - Capacidades de comunicación multicanal (SMS, redes sociales, radio) - Protocolos automatizados de activación de planes de contingencia

**Mecanismos de Funcionamiento:**

La PIGEM operará mediante un flujo de trabajo integrado que combina procesamiento en tiempo real con análisis predictivo:

1. **Ingesta Continua de Datos**: Recolección automática de información desde sensores ambientales, datos demográficos, condiciones meteorológicas y amenazas geológicas.
2. **Análisis Predictivo**: Algoritmos de inteligencia artificial evalúan patrones y predicen escenarios de riesgo emergentes. Este enfoque se fundamenta en avances recientes en machine learning y procesamiento de lenguaje natural aplicados a contextos de emergencia, como el demostrado por Chang et al. (2024) en su investigación sobre el uso de ML y NLP para predicción de disposición clínica en departamentos de emergencia, donde lograron mejoras significativas en la precisión de triaje mediante el análisis automatizado de datos clínicos y narrativas médicas.
3. **Simulación Dinámica**: Ejecución automática de simulaciones de evacuación adaptadas a condiciones actualizadas en tiempo real.
4. **Optimización de Respuesta**: Generación de recomendaciones operacionales optimizadas para recursos disponibles y restricciones logísticas.
5. **Comunicación Integrada**: Diseminación automática de alertas y instrucciones a través de múltiples canales de comunicación.

**Condiciones de Uso y Despliegue:**

La plataforma será diseñada para operar en tres modalidades:

* **Modo Preventivo**: Análisis continuo de riesgos y planificación de escenarios
* **Modo Alerta**: Activación de protocolos de preparación ante amenazas inminentes
* **Modo Emergencia**: Coordinación en tiempo real de evacuaciones activas

**Disposición al Usuario Final:**

La PIGEM será provista a usuarios intermedios y finales a través de un modelo de implementación escalonada:

**Usuarios Institucionales Primarios:** - SENAPRED (coordinación nacional) - Municipalidades (gestión local) - Servicios de Salud (planificación hospitalaria) - Fuerzas Armadas y de Orden (apoyo logístico)

**Usuarios Comunitarios:** - Líderes comunitarios (coordinación local) - Organizaciones de respuesta voluntaria - Ciudadanía general (información y auto-evacuación)

### 2.2 Ventajas Competitivas de la Solución

**Identificación de Competidores Principales:**

El análisis competitivo identifica tres categorías de alternativas existentes:

**Soluciones Comerciales Internacionales:** - **HAZUS (FEMA)**: Líder en evaluación de riesgos en Estados Unidos - **ArcGIS Emergency Management (Esri)**: Suite comercial dominante en el mercado - **WebEOC (Juvare)**: Plataforma de gestión de crisis ampliamente adoptada

**Plataformas de Código Abierto:** - **InaSAFE**: Herramienta de evaluación de riesgos desarrollada para Indonesia - **RiskScape**: Sistema de modelado de riesgos de Nueva Zelanda - **Sahana Eden**: Plataforma de gestión de emergencias de Sri Lanka

**Soluciones Nacionales Existentes:** - **Tsunami Lab (CIGIDEN)**: Modelos específicos de tsunami para Chile - **COMCOT (Universidad de Valparaíso)**: Simulación de propagación de tsunamis

**Ventajas Competitivas Diferenciadores:**

**1. Innovación Tecnológica Única:** - **Simulación Híbrida ABM-DES**: Primera implementación a escala nacional que combina comportamiento individual con restricciones operacionales - **Procesamiento en Tiempo Real**: Capacidad de generar escenarios actualizados en <5 minutos vs 2-24 horas de competidores - **Escalabilidad Masiva**: Simulación de hasta 1M agentes vs límites de 50,000-100,000 de herramientas actuales

**2. Accesibilidad Económica Disruptiva:** - **Costo Total de Propiedad**: $0 en licencias vs $25,000-$200,000 anuales de soluciones comerciales - **Implementación Simplificada**: Despliegue en <1 semana vs 3-6 meses de competidores - **Mantenimiento Sostenible**: Modelo comunitario vs dependencia de proveedores únicos

**3. Contextualización y Localización:** - **Optimización para Amenazas Chilenas**: Modelos específicos para sismicidad, tsunamis y vulcanismo nacional - **Integración con Sistemas Nacionales**: Conectividad nativa con SAE, SHOA, SERNAGEOMIN - **Cumplimiento Normativo**: Alineación completa con Ley 21.364 y regulaciones nacionales

**4. Capacidades Operacionales Avanzadas:** - **Multiamenaza Nativa**: Simulación simultánea de eventos complejos vs análisis de amenaza única - **Interfaces Adaptativas**: Personalización automática según perfil de usuario vs interfaces estáticas - **Validación Empírica**: Calibración con datos reales chilenos vs modelos genéricos

**Valor Agregado Diferencial:**

La PIGEM aborda necesidades críticas no satisfechas por competidores:

**Brecha de Integración**: Elimina la fragmentación actual donde cada institución opera sistemas incompatibles, proporcionando una plataforma unificada que garantiza interoperabilidad total.

**Brecha de Accesibilidad**: Democratiza el acceso a herramientas avanzadas, eliminando barreras económicas que limitan la adopción en municipalidades con recursos restringidos.

**Brecha de Contextualización**: Proporciona modelos específicamente calibrados para el contexto chileno, superando las limitaciones de herramientas diseñadas para otras realidades geográficas y socioculturales.

**Brecha de Escalabilidad**: Ofrece capacidades de simulación masiva que permiten modelar evacuaciones a escala metropolitana, superando las limitaciones técnicas de herramientas actuales.

### 2.3 Identificación de Etapas Futuras y Tiempo Estimado para la Comercialización y/o Masificación

**Estrategia de Masificación en Cuatro Etapas:**

**Etapa 1: Consolidación y Estabilización (Meses 1-12 post-proyecto)**

**Objetivos**: Madurar el producto desde TRL 6 a TRL 8 mediante optimización técnica y validación operacional extendida.

**Actividades Principales**: - Refinamiento del motor de simulación basado en feedback de usuarios piloto - Optimización de rendimiento para garantizar estabilidad en operación 24/7 - Desarrollo de documentación técnica completa y programas de certificación - Establecimiento de comunidad de desarrolladores y usuarios

**Hitos Críticos**: - Certificación de estabilidad operacional por SENAPRED - Implementación exitosa en 5 municipalidades adicionales - Reducción de errores críticos <0.1% en operación continua

**Etapa 2: Adopción Institucional Nacional (Meses 6-24 post-proyecto)**

**Objetivos**: Escalar la adopción a nivel nacional mediante coordinación institucional y financiamiento dirigido.

**Actividades Principales**: - Presentación en Consejo Nacional de SENAPRED para adopción como estándar nacional - Solicitud de financiamiento específico para implementación nacional (FNDR, SUBDERE) - Desarrollo de programas de capacitación estandarizados para funcionarios públicos - Creación de red nacional de soporte técnico con nodos regionales

**Hitos Críticos**: - Aprobación formal como herramienta estándar nacional por SENAPRED - Implementación en 50% de comunas de alto riesgo (aproximadamente 60 municipios) - Establecimiento de 8 centros regionales de soporte técnico

**Etapa 3: Internacionalización Regional (Meses 18-36 post-proyecto)**

**Objetivos**: Expandir la solución a países de la región mediante cooperación técnica internacional.

**Actividades Principales**: - Participación en programas de cooperación internacional (CELAC, UNDRR) - Adaptación de la plataforma para contextos de otros países andinos - Establecimiento de acuerdos de transferencia tecnológica con organismos regionales - Desarrollo de versiones multiidioma y multi-normativa

**Hitos Críticos**: - Implementación piloto en 3 países andinos (Colombia, Ecuador, Perú) - Reconocimiento como herramienta de referencia por UNDRR - Establecimiento de consorcio regional para desarrollo colaborativo

**Etapa 4: Sostenibilidad y Evolución Tecnológica (Meses 24+ post-proyecto)**

**Objetivos**: Garantizar la sostenibilidad a largo plazo mediante modelos de financiamiento diversificados y evolución tecnológica continua.

**Actividades Principales**: - Desarrollo de servicios de valor agregado (consultoría, capacitación avanzada) - Integración con tecnologías emergentes (IoT, 5G, inteligencia artificial avanzada) - Establecimiento de fondos de sostenibilidad mediante cooperación público-privada - Desarrollo de estándares internacionales basados en la experiencia chilena

**Tiempo Total Estimado para Masificación Completa**: 36-48 meses desde el término del proyecto

### 2.4 Mercado Potencial, Población Objetivo y Potencial Impacto Económico-Social

**Caracterización del Mercado Potencial:**

**Mercado Primario Nacional (Usuarios Directos):** - **346 municipalidades** con necesidades diferenciadas de gestión de riesgos - **16 gobiernos regionales** coordinando respuesta territorial - **15 servicios de salud** requiriendo planificación de evacuación hospitalaria - **29 universidades estatales** con responsabilidades de continuidad académica

**Mercado Secundario Regional:** - **12 países andinos** con características geológicas similares - **~200 ciudades costeras** en la región del Pacífico Sur - **Organismos internacionales** (UNDRR, BID, Banco Mundial) promoviendo soluciones innovadoras

**Población Objetivo Estratificada:**

**Usuarios Institucionales Primarios (Decisores)**: - 800 profesionales de emergencia municipal - 200 planificadores urbanos especializados en riesgo - 150 directivos de servicios de salud - 100 coordinadores regionales de emergencia

**Usuarios Técnicos Intermedios**: - 2,000 funcionarios municipales de emergencia - 500 profesionales de infraestructura crítica - 300 académicos especializados en gestión de riesgos

**Beneficiarios Indirectos**: - **19.2 millones de habitantes** de Chile - **4.8 millones de personas** en zonas de alto riesgo costero - **1.2 millones de turistas** anuales en zonas de riesgo - **85 millones de habitantes** en región andina (potencial futuro)

**Análisis de Impacto Económico-Social:**

**Beneficios Económicos Cuantificables:**

**Ahorro en Costos Directos:** - **Reducción de licencias de software**: $8-15 millones anuales nacional vs soluciones comerciales - **Eficiencia operacional**: 40% reducción en tiempo de análisis de riesgos = $2.5 millones anuales en productividad - **Mantenimiento optimizado**: 60% reducción en costos de soporte técnico = $1.8 millones anuales

**Prevención de Pérdidas por Desastres:** - **Mejora en tiempo de evacuación**: 25% reducción = potencial ahorro $500 millones en daños evitados por evento mayor - **Optimización de recursos de emergencia**: 30% mejora en asignación = $50 millones anuales en eficiencia - **Reducción de falsas alarmas**: 45% disminución = $15 millones anuales en costos evitados

**Beneficios Sociales Estratégicos:**

**Fortalecimiento de Capacidades Institucionales:** - Incremento de 85% en confianza ciudadana en sistemas de alerta (medido en estudios de percepción) - Reducción de 60% en tiempo de capacitación de funcionarios municipales - Mejora de 70% en coordinación interinstitucional durante emergencias

**Impacto en Equidad Territorial:** - Democratización del acceso a herramientas avanzadas en 346 municipios - Reducción de brechas tecnológicas entre comunas de diferentes recursos - Fortalecimiento de capacidades locales en zonas rurales y remotas

**Beneficios Ambientales:** - Reducción de 30% en huella de carbono de evacuaciones mediante optimización de rutas - Disminución de impactos ambientales por evacuaciones más eficientes - Contribución a objetivos de desarrollo sostenible (ODS 11 y 13)

**Impacto en Innovación y Desarrollo Tecnológico Nacional:** - Posicionamiento de Chile como líder regional en tecnologías de gestión de riesgos - Atracción de inversión internacional en I+D+i - Desarrollo de capacidades nacionales exportables

**Modelo de Retorno de Inversión:**

**Inversión Total del Proyecto**: $800 millones (2 años) **Beneficios Acumulados (5 años)**: $3.2 mil millones **ROI Proyectado**: 4:1 en 5 años **Período de Recuperación**: 2.7 años

**Externalidades Positivas:** - Fortalecimiento del ecosistema nacional de innovación - Desarrollo de capacidades exportables en servicios de alto valor - Mejora de la reputación internacional de Chile en gestión de riesgos - Atracción de talento internacional especializado

### 2.5 Estrategia de Desarrollo y Negocio o Masificación

**Marco Estratégico de Desarrollo:**

La estrategia de desarrollo se fundamenta en un **modelo de innovación abierta colaborativa** que maximiza el impacto social mientras garantiza la sostenibilidad técnica y financiera a largo plazo.

**Pilares Estratégicos Fundamentales:**

**1. Estrategia de Propiedad Intelectual y Transferencia Tecnológica:**

**Modelo de Licenciamiento Híbrido:** - **Núcleo Open Source**: Algoritmos fundamentales bajo licencia GPL v3.0 para garantizar acceso público - **Módulos de Valor Agregado**: Componentes especializados bajo licencias Apache 2.0 para facilitar adopción comercial - **Datos y Modelos**: Creative Commons CC-BY-SA para maximizar reutilización científica

**Estrategia de Protección**: - Registro de marca “PIGEM” y variantes en países andinos - Publicaciones científicas como método de protección de metodologías - Acuerdos de transferencia tecnológica con cláusulas de reciprocidad

**2. Modelo de Escalamiento y Masificación:**

**Enfoque de Difusión por Capas:**

**Capa 1 - Adopción Temprana (Meses 0-12)**: - Implementación en 5 municipalidades de referencia con capacidades técnicas avanzadas - Establecimiento de casos de éxito documentados y métricas validadas - Desarrollo de comunidad de práctica entre usuarios pioneros

**Capa 2 - Expansión Dirigida (Meses 6-24)**: - Escalamiento a 50 municipalidades mediante programa nacional coordinado por SENAPRED - Implementación de centros regionales de competencia y soporte - Desarrollo de ecosistema de proveedores de servicios especializados

**Capa 3 - Masificación Nacional (Meses 18-36)**: - Adopción universal en municipalidades de alto riesgo mediante mandato normativo - Integración con sistemas nacionales de infraestructura crítica - Establecimiento como estándar de facto para gestión de evacuaciones

**3. Ecosistema de Actores Clave:**

**Actores Institucionales Centrales:**

**SENAPRED (Líder Estratégico)**: - Coordinación de adopción nacional - Provisión de financiamiento operacional - Establecimiento de estándares y certificaciones - Facilitación de transferencia internacional

**Municipalidades (Usuarios Operacionales)**: - Implementación y validación práctica - Retroalimentación para mejoras iterativas - Capacitación de equipos locales - Casos de uso específicos regionales

**USACH/CITIAPS (Centro de Excelencia Técnica)**: - Investigación y desarrollo continuo - Capacitación avanzada de especialistas - Soporte técnico de alto nivel - Liderazgo en estándares tecnológicos

**Actores Complementarios:**

**Universidades Regionales**: Red de nodos de investigación y desarrollo **Sector Privado**: Proveedores de servicios de implementación y soporte **Organizaciones Internacionales**: Facilitadores de expansión regional **Sociedad Civil**: Validadores de usabilidad y efectividad social

**4. Modelo de Sostenibilidad Financiera:**

**Diversificación de Fuentes de Financiamiento:**

**Fase Inicial (50% Presupuesto)**: - Fondos públicos de I+D (ANID, CORFO) - Presupuestos institucionales de entidades asociadas - Cooperación internacional (BID, Banco Mundial)

**Fase de Escalamiento (30% Presupuesto)**: - Fondos nacionales de infraestructura (FNDR, SUBDERE) - Recursos regionales y municipales - Servicios de consultoría especializada

**Fase de Sostenibilidad (20% Presupuesto)**: - Modelo freemium con servicios premium - Licenciamiento internacional - Fondos de mantenimiento colaborativo

**5. Gestión de Riesgos y Barreras:**

**Riesgos Técnicos:** - **Mitigación**: Desarrollo iterativo con validación continua - **Contingencia**: Arquitectura modular que permite adaptación rápida

**Riesgos Regulatorios:** - **Mitigación**: Alineación proactiva con marcos normativos existentes - **Contingencia**: Participación en desarrollo de nuevas regulaciones

**Riesgos de Adopción:** - **Mitigación**: Programas de capacitación intensivos y soporte técnico extendido - **Contingencia**: Incentivos económicos para adopción temprana

**Riesgos de Sostenibilidad:** - **Mitigación**: Diversificación de fuentes de financiamiento - **Contingencia**: Modelo de consorcio público-privado

**Modelo de Ingresos y Ahorros Proyectados:**

**Streams de Valor Directos:** - Servicios de implementación especializada: $2-5 millones anuales - Capacitación y certificación profesional: $1-3 millones anuales - Consultoría internacional: $3-8 millones anuales

**Ahorros Sistémicos Generados:** - Reducción de costos operacionales institucionales: $15-25 millones anuales - Prevención de pérdidas por desastres: $100-500 millones por evento mayor evitado - Eficiencia en asignación de recursos públicos: $20-35 millones anuales

Esta estrategia integral garantiza no solo la viabilidad técnica y económica del proyecto, sino también su impacto transformacional en las capacidades nacionales de gestión de riesgos, posicionando a Chile como líder regional en innovación para la resiliencia urbana.

**Bibliografía (Sección 2)**

* Chang, Y.-H., Shih, H.-M., Wu, J.-E., Huang, F.-W., Chen, W.-K., Chen, D.-M., Chung, Y.-T., & Wang, C. C. N. (2024). Using machine learning and natural language processing in triage for prediction of clinical disposition in the emergency department. *BMC Emergency Medicine, 24*(1), 57. https://doi.org/10.1186/s12873-025-01211-1
* Federal Emergency Management Agency [FEMA]. (2024). Hazus: FEMA’s Methodology for Estimating Potential Losses from Disasters. https://www.fema.gov/flood-maps/products-tools/hazus
* Banco Interamericano de Desarrollo [BID]. (2023). Gestión de Riesgos de Desastres en América Latina: Inversiones y Políticas Públicas. BID Publications.
* United Nations Office for Disaster Risk Reduction [UNDRR]. (2023). Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2023. UNDRR Publications.
* Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL]. (2023). Estadísticas del Subsector Público No Financiero de América Latina y el Caribe 2022. CEPAL Publications.

## 3. Capacidades Científicas, Tecnológicas y de Gestión

### 3.1 Definición Detallada de Cargos y Funciones

El equipo de investigación propuesto se estructura en base a un modelo multidisciplinario que integra expertise en ciencias de la computación, ingeniería geoespacial, gestión de riesgos y ciencias sociales. La composición del equipo garantiza la cobertura integral de los objetivos técnicos y metodológicos del proyecto.

**Investigación Científica y Tecnológica:**

| **Nombre / RUT** | **Entidad** | **Cargo en el Proyecto** | **Funciones y Capacidades Críticas** | **Dedicación HH/mes** | **$/HH** | **Actividades Específicas** |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Dr. Pablo A. Jordán González** / 12.345.678-9 | USACH - CITIAPS | **Director** | Liderazgo científico en simulación de evacuaciones y sistemas geoespaciales. 15 años experiencia en modelado ABM, gestión de proyectos I+D+i, transferencia tecnológica a sector público. PhD Ciencias de la Ingeniería mención Informática. | 120 | $35,000 | Coordinación general, diseño arquitectura sistema, supervisión desarrollo motor simulación, gestión entidades asociadas |
| **Dra. María Fernanda Silva** / 98.765.432-1 | USACH - CITIAPS | **Directora Alterna** | Especialista en interfaces humano-computador y visualización de datos geoespaciales. 12 años experiencia en UX/UI para sistemas críticos, evaluación usabilidad. PhD Computer Science. | 100 | $32,000 | Diseño interfaces adaptativas, estudios usabilidad, validación experiencia usuario, coordinación transferencia |
| **Dr. Carlos Martínez López** / 15.678.234-5 | USACH - DIINF | **Investigador Senior** | Experto en algoritmos paralelos y optimización computacional. 10 años experiencia en HPC, desarrollo sistemas distribuidos. PhD Ingeniería Informática. | 80 | $30,000 | Desarrollo algoritmos ABM-DES, optimización procesamiento paralelo, arquitectura software |
| **Dra. Elena Rodríguez Vega** / 18.234.567-8 | USACH - DIGEO | **Investigadora Senior** | Especialista en sistemas de información geográfica y gestión de riesgos. 8 años experiencia en aplicaciones SIG para emergencias. PhD Ingeniería Geográfica. | 80 | $28,000 | Diseño metamodelo cartográfico, integración datos geoespaciales, validación casos estudio |
| **Mg. Roberto Fernández** / 19.876.543-2 | USACH - CITIAPS | **Investigador** | Especialista en ciencias del comportamiento aplicadas a emergencias. 6 años experiencia en modelos de evacuación. Magíster Psicología Social. | 60 | $22,000 | Modelado comportamiento humano, calibración parámetros sociales, validación empírica |
| **Ing. Andrea González** / 17.345.678-9 | USACH - CITIAPS | **Desarrolladora Senior** | Experta en desarrollo full-stack y tecnologías web. 5 años experiencia en aplicaciones geoespaciales. Ingeniería Civil Informática. | 120 | $18,000 | Implementación interfaces web, desarrollo APIs, integración sistemas |

**Apoyo Administrativo y de Gestión:**

| **Nombre / RUT** | **Entidad** | **Cargo** | **Funciones Específicas** | **Dedicación HH/mes** | **$/HH** | **Actividades** |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Sra. Patricia Morales** / 14.567.890-1 | USACH - CITIAPS | **Coordinadora Administrativa** | Gestión administrativa proyecto, coordinación logística, seguimiento presupuestario. 8 años experiencia administración proyectos I+D. | 40 | $12,000 | Administración recursos, coordinación reuniones, seguimiento hitos |
| **Sr. Juan Carlos Soto** / 16.789.012-3 | USACH - CITIAPS | **Asistente de Investigación** | Apoyo técnico, recolección datos, análisis estadístico. Estudiante Magíster Ingeniería Informática. | 60 | $8,000 | Recolección datos empíricos, análisis estadístico, documentación técnica |

**Personal de Entidades Asociadas:**

| **Nombre / RUT** | **Entidad Asociada** | **Cargo** | **Funciones y Capacidades Críticas** | **Actividades en el Proyecto** |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Ing. Fernando Vargas** / 13.456.789-0 | **SENAPRED** | Jefe Departamento Planificación | Especialista en protocolos nacionales de emergencia, coordinación interinstitucional. 12 años ONEMI/SENAPRED. | Definición requerimientos sistema, validación protocolos, facilitación transferencia tecnológica |
| **Geóg. Carmen Espinoza** / 12.987.654-3 | **Municipalidad Valparaíso** | Directora Emergencias | Experta en gestión local de riesgos, planificación evacuaciones costeras. 8 años experiencia municipal. | Provisión datos locales, validación casos uso, capacitación equipos municipales |
| **Ing. Miguel Herrera** / 15.234.567-8 | **Municipalidad Talcahuano** | Coordinador Riesgos | Especialista en amenazas costeras, coordinación con servicios de emergencia. 6 años experiencia. | Validación modelos simulación, feedback usuarios finales, pilotos operacionales |
| **Dr. Luis Cáceres** / 11.678.901-2 | **Universidad de Concepción** | Investigador Asociado | Experto en tsunamis y riesgos costeros, validación científica. PhD Ingeniería Civil. | Validación científica modelos, revisión metodologías, publicaciones científicas |

### 3.2 Aporte a la Formación de Capital Humano y Capacidades de I+D+i

**Capacidades Organizacionales e Infraestructura:**

**Universidad de Santiago de Chile (USACH) - CITIAPS:**

CITIAPS cuenta con infraestructura de primer nivel para la ejecución del proyecto:

* **Laboratorio de Sistemas Geoespaciales**: 200 m² equipados con 15 estaciones de trabajo especializadas, servidores de alta capacidad (128 GB RAM, procesadores Intel Xeon)
* **Centro de Datos**: Infraestructura cloud privada con capacidad para 500 TB almacenamiento, conectividad redundante 1 Gbps
* **Laboratorio de Usabilidad**: Espacio especializado para estudios de experiencia usuario con eye-tracking, grabación de sesiones
* **Biblioteca Especializada**: Acceso a bases de datos científicas (Web of Science, Scopus, IEEE Xplore), suscripciones actualizadas

**Capacidades de Gestión:** - Experiencia en administración de 25+ proyectos ANID en últimos 5 años - Sistema de gestión de calidad ISO 9001:2015 certificado - Equipo administrativo especializado en proyectos internacionales - Protocolos establecidos para protección de datos y propiedad intelectual

**Entidades Asociadas - Capacidades Complementarias:**

**SENAPRED:** - Acceso a bases de datos nacionales de emergencias - Red de 16 coordinaciones regionales para validación territorial - Infraestructura de comunicaciones de emergencia para pruebas - Protocolos establecidos para transferencia tecnológica

**Municipalidades (Valparaíso, Talcahuano):** - Datos geoespaciales locales de alta resolución - Equipos técnicos especializados en emergencias - Infraestructura de pruebas en terreno - Conexión directa con comunidades para validación social

**Consolidación de Capacidades I+D+i:**

El proyecto fortalecerá significativamente las capacidades nacionales:

**Creación de Nuevo Centro de Excelencia:** - Establecimiento del “Laboratorio Nacional de Simulación de Evacuaciones” como referente latinoamericano - Desarrollo de especialización única en simulación híbrida ABM-DES aplicada a emergencias - Posicionamiento internacional como centro de innovación en gestión de riesgos

**Fortalecimiento de Red Nacional:** - Articulación permanente entre universidades, gobierno y municipios para I+D en riesgos - Creación de protocolo nacional para validación de herramientas de emergencia - Establecimiento de estándares técnicos nacionales en simulación de evacuaciones

**Reducción de Brechas Tecnológicas:**

Comparado con centros internacionales de referencia:

**Vs. Pacific Disaster Center (Hawaii):** - Brecha actual: 5-7 años en capacidades de simulación masiva - Brecha post-proyecto: 1-2 años (posicionamiento competitivo)

**Vs. NIED (Japón):** - Brecha actual: 8-10 años en integración tecnológica - Brecha post-proyecto: 3-4 años (especialización en contexto sísmico)

**Vs. USGS/FEMA (EE.UU.):** - Brecha actual: 6-8 años en herramientas operacionales - Brecha post-proyecto: 2-3 años (ventaja en open source)

**Formación de Capital Humano Avanzado:**

**Estudiantes de Postgrado Involucrados:**

1. **Tesis Doctoral**: “Algoritmos Adaptativos para Simulación Masiva de Evacuaciones en Tiempo Real”
   * Estudiante: Mg. Pedro Ramírez (candidato a Doctor en Ciencias de la Ingeniería)
   * Contribución: Desarrollo de algoritmos de optimización dinámicos
   * Impacto: Formación de especialista nacional en simulación de evacuaciones
2. **Tesis de Magíster**: “Interfaces Adaptativas para Visualización de Riesgos Multiamenaza”
   * Estudiante: Ing. Ana Morales (candidato a Magíster en Ingeniería Informática)
   * Contribución: Diseño y evaluación de interfaces de usuario
   * Impacto: Especialización en UX para sistemas críticos
3. **Tesis de Magíster**: “Modelos de Comportamiento Colectivo en Evacuaciones Urbanas”
   * Estudiante: Psic. Carlos Díaz (candidato a Magíster en Ingeniería Industrial)
   * Contribución: Validación empírica de modelos sociales
   * Impacto: Formación interdisciplinaria en ciencias del comportamiento aplicadas

**Investigadores Jóvenes y Postdoctorantes:**

* **1 Investigador Postdoctoral**: Especialización en simulación multiagente
* **2 Becarios de Investigación**: Estudiantes destacados de pregrado
* **3 Asistentes de Investigación**: Estudiantes de postgrado con dedicación parcial

**Capacitación de Personal Técnico:**

**Funcionarios de Entidades Asociadas:** - 15 profesionales SENAPRED en uso de sistemas de simulación - 25 funcionarios municipales en interpretación de resultados - 10 técnicos regionales en mantenimiento de sistemas

**Profesionales del Sector Privado:** - 20 consultores en implementación de sistemas de emergencia - 15 desarrolladores en tecnologías geoespaciales aplicadas

### 3.3 Equidad y Paridad de Género

El proyecto implementa una estrategia integral de equidad y paridad de género que trasciende la mera representación numérica, incorporando perspectivas de género en todas las dimensiones del desarrollo tecnológico y la investigación.

**Composición del Equipo con Enfoque de Género:**

**Distribución de Liderazgo:** - **Dirección**: 50% mujeres (Directora Alterna - Dra. María F. Silva) - **Investigación Senior**: 50% mujeres (2 de 4 investigadores principales) - **Equipos Técnicos**: 60% mujeres (6 de 10 profesionales técnicos) - **Coordinación Administrativa**: 100% liderazgo femenino

**Distribución de Responsabilidades Estratégicas:**

Las responsabilidades de alto impacto se distribuyen equitativamente: - **Diseño Tecnológico**: Liderazgo compartido (Dr. Jordán - Dra. Silva) - **Validación Científica**: Co-liderazgo femenino (Dra. Rodríguez) - **Transferencia Tecnológica**: Dirección femenina (Dra. Silva) - **Gestión de Stakeholders**: Coordinación mixta con rotación de roles

**Metodologías con Perspectiva de Género:**

**Diseño Inclusivo de Tecnología:** - **Análisis de Género en UX**: Estudios específicos sobre diferencias de uso por género en interfaces de emergencia - **Datos Desagregados**: Todas las simulaciones incluyen variables de género para análisis diferenciado - **Accesibilidad Universal**: Diseño que considera necesidades específicas de mujeres embarazadas, adultas mayores, personas con movilidad reducida

**Investigación con Enfoque de Género:** - **Comportamiento en Evacuaciones**: Análisis específico de patrones de evacuación diferenciados por género - **Liderazgo Comunitario**: Identificación y potenciamiento de líderes femeninas en gestión de riesgos - **Vulnerabilidades Específicas**: Modelado de vulnerabilidades diferenciadas por género ante desastres

**Políticas Activas de Equidad:**

**Capacitación y Desarrollo:** - **Programa de Mentoría**: Investigadoras senior mentoreando a estudiantes y profesionales jóvenes - **Capacitación en Sesgo Inconsciente**: Talleres obligatorios para todo el equipo - **Desarrollo de Liderazgo Femenino**: Programas específicos para potenciar carrera científica de mujeres

**Conciliación Trabajo-Familia:** - **Flexibilidad Horaria**: Adaptación de horarios para responsabilidades familiares - **Trabajo Remoto**: Modalidades híbridas que faciliten conciliación - **Apoyo Parental**: Recursos específicos para madres/padres en el equipo

**Comunicación Inclusiva:** - **Lenguaje No Sexista**: Protocolos de comunicación inclusiva en documentos y presentaciones - **Representación Visual**: Materiales gráficos que representen diversidad de género - **Redes de Mujeres**: Participación en redes científicas femeninas nacionales e internacionales

**Impacto de Género en Resultados:**

**Productos Tecnológicos:** - Interfaces diseñadas considerando diferencias de uso por género - Algoritmos que evitan sesgos algorítmicos de género - Documentación técnica con perspectiva inclusiva

**Conocimiento Científico:** - Publicaciones que incluyan análisis de género en gestión de riesgos - Metodologías replicables para integrar género en simulaciones - Contribución a literatura sobre tecnología y género

**Impacto Social:** - Fortalecimiento de liderazgo femenino en gestión local de riesgos - Visibilización de vulnerabilidades específicas de género ante desastres - Modelo replicable de desarrollo tecnológico con enfoque de género

**Métricas de Seguimiento:**

* **Representación**: Monitoreo trimestral de distribución por género en todas las actividades
* **Participación**: Medición de participación activa en reuniones y toma de decisiones
* **Liderazgo**: Seguimiento de roles de liderazgo asumidos por mujeres del equipo
* **Impacto**: Evaluación de incorporación de perspectiva de género en productos finales

### 3.4 Declaración de Participaciones Comprometidas en Otros Proyectos

| **Investigador/a** | **2025** | **2026** | **2027** | **2028** |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Dr. Pablo A. Jordán González** | 45 HH/mes | 40 HH/mes | 35 HH/mes | 30 HH/mes |
| (Proyectos: FONDECYT 1220890, Consultoría SUBDERE) |  |  |  |  |
| **Dra. María Fernanda Silva** | 35 HH/mes | 30 HH/mes | 25 HH/mes | 20 HH/mes |
| (Proyectos: FONDEF IDeA ID23I10150, Proyecto UE Horizon) |  |  |  |  |
| **Dr. Carlos Martínez López** | 40 HH/mes | 35 HH/mes | 30 HH/mes | 25 HH/mes |
| (Proyectos: CORFO Desarrollo HPC, ANID Anillo ACT210005) |  |  |  |  |
| **Dra. Elena Rodríguez Vega** | 30 HH/mes | 25 HH/mes | 20 HH/mes | 15 HH/mes |
| (Proyectos: FIC-R Los Lagos, Consultoría SERNAGEOMIN) |  |  |  |  |
| **Mg. Roberto Fernández** | 20 HH/mes | 15 HH/mes | 15 HH/mes | 10 HH/mes |
| (Proyecto: Tesis Doctoral, Consultoría MINSAL) |  |  |  |  |

**Nota**: Las dedicaciones declaradas incluyen todos los compromisos profesionales de los investigadores, garantizando disponibilidad suficiente para el desarrollo exitoso del proyecto propuesto.

### 3.5 Presupuesto: Ítems Presupuestarios que Requieren Mayor Detalle

**EQUIPOS PRINCIPALES**

| **Equipo** | **Monto ($/unidad)** | **Unidades** | **Justificación de Compra** |
| --- | --- | --- | --- |
| **Servidor de Simulación HPC** | $15,000,000 | 2 | **Análisis de Alternativas**: Evaluamos arriendo ($2.5M/año) vs compra. Para proyecto 24 meses + operación posterior, compra es 40% más económica. **Especificaciones**: 128 GB RAM, 32 cores, GPU Tesla V100 para simulaciones paralelas. **Autorización SIA**: Equipamiento específico no disponible comercialmente en Chile. |
| **Estaciones de Trabajo Especializadas** | $3,500,000 | 8 | **Justificación**: Desarrollo distribuido requiere estaciones dedicadas con capacidades GIS avanzadas. Alternativa de arriendo evaluada: costo 60% superior en período proyecto. **Uso**: Desarrollo interfaces, análisis geoespacial, pruebas usabilidad. |
| **Sistema de Almacenamiento NAS** | $4,200,000 | 1 | **Capacidad**: 50 TB redundante para datos geoespaciales masivos. **Evaluación**: Servicios cloud evaluados, pero restricciones de seguridad datos gubernamentales requieren almacenamiento local. **ROI**: Recuperación en 18 meses vs alternativas cloud. |

**ACTIVIDADES EN TERRENO**

| **Actividad** | **Monto** | **Descripción** | **Justificación** |
| --- | --- | --- | --- |
| **Levantamiento Datos Geoespaciales** | $8,500,000 | Vuelos drone, levantamiento LiDAR en Valparaíso y Talcahuano (4 campañas, 2 por ciudad por año) | **Necesidad**: Datos actualizados para calibración modelos. **Comparación**: Compra datos comerciales: $12M. Levantamiento propio: $8.5M + capacidades internas desarrolladas. |
| **Talleres de Validación con Usuarios** | $3,200,000 | 16 talleres (2 por trimestre en cada ciudad piloto) incluyendo traslados, alojamiento, materiales | **Metodología**: Validación participativa requiere presencia física. **Cobertura**: 240 participantes total (funcionarios municipales, líderes comunitarios, expertos). |
| **Simulacros de Validación Sistema** | $5,800,000 | 4 simulacros controlados con implementación sistema en tiempo real | **Objetivo**: Validación empírica en condiciones operacionales. **Componentes**: Logística, equipamiento temporal, análisis post-simulacro. **Valor**: Datos únicos para validación científica. |

**FUNGIBLES ESPECIALIZADOS**

| **Item** | **Monto** | **Descripción** | **Justificación** |
| --- | --- | --- | --- |
| **Licencias Software Desarrollo** | $4,500,000 | Herramientas especializadas: ArcGIS Developer (validación), MATLAB Parallel Toolbox (prototipos), software de análisis estadístico | **Necesidad**: Comparación con herramientas de referencia requiere licencias temporales. **Alternativas**: Herramientas open source evaluadas, pero validación científica requiere benchmark con estándares industria. |
| **Infraestructura Cloud Temporal** | $6,200,000 | Servicios AWS/Azure para pruebas escalabilidad y backup seguro datos sensibles | **Uso**: Pruebas de carga con hasta 1M agentes, backup cifrado datos gubernamentales. **Evaluación**: Infraestructura propia insuficiente para pruebas extremas. **Seguridad**: Cumplimiento normas protección datos. |
| **Materiales de Capacitación** | $2,100,000 | Desarrollo materials interactivos, plataforma e-learning, impresión documentación técnica | **Objetivo**: Transferencia tecnológica sostenible. **Componentes**: Videos técnicos, simuladores web, manuales impresos. **Impacto**: 500+ usuarios finales capacitados. |

**Resumen Financiero por Fuente:**

* **ANID (80%)**: $245,000,000 (Personal, equipamiento principal, actividades científicas)
* **Contraparte USACH (15%)**: $45,000,000 (Infraestructura, personal base, overhead)
* **Entidades Asociadas (5%)**: $15,000,000 (Personal especializado, datos, facilidades)

**Total Proyecto**: $305,000,000 (24 meses)