

Design of a Last-Mile Logistics Information System to Improve Food Distribution Management in Natural Disaster Scenarios

Gloria Valdivia¹; Miguel Lescano²; Haziel Sánchez³; Sergio Moreno⁴; Edison Rosales⁵

¹Facultad de ingeniería Industrial y de Sistemas, Lima, gvaldivia@uni.edu.pe

²Facultad de ingeniería Industrial y de Sistemas, Lima, mlescano@uni.pe

³Facultad de ingeniería Industrial y de Sistemas, Lima, haziel.sanchez.h@uni.pe

⁴Facultad de ingeniería Industrial y de Sistemas, Lima, sergio.moreno.h@uni.pe

⁵Facultad de ingeniería Industrial y de Sistemas, Lima, edison.rosales.a@uni.pe

Abstract—This paper presents the design of a Last-Mile Logistics Information System (SILUM), an operational prototype aimed at optimizing the distribution of food supplies in natural disaster scenarios. The research is quantitative and descriptive-explanatory in scope. The research design is pre-experimental, as the SCMA Information System (IS) is introduced as a treatment or condition in the sampled municipalities and subsequently measured to determine whether any effect occurred, allowing the estimation of the impacts of the proposed IS. Through comprehensive modeling using UML diagrams, a four-layer modular architecture was developed, integrating six functional modules: planning, distribution center management, route tracking, delivery confirmation, needs management, and data monitoring.

The research was conducted in two representative districts, La Molina and Lurín, where in both cases it constituted an important innovation in humanitarian logistics.

The SILUM was successfully designed and is characterized by its operational resilience, employing an offline-first approach and VHF radio communication to ensure data synchronization in low-connectivity areas. This enables full traceability through RBAC controls and encryption, reducing response times and maximizing equity in the delivery of essential resources.

Keywords—Last-mile logistics, humanitarian logistics, disaster management, systems architecture, operational resilience.

I. INTRODUCCIÓN

A nivel global, la frecuencia y severidad de los desastres naturales han transformado la gestión de emergencias en un desafío crítico para la estabilidad social, impactando de manera desproporcionada a las poblaciones vulnerables. Ante esta realidad, la investigación académica ha propuesto modelos de localización-inventario-ruteo (LIRP) para optimizar la distribución de suministros de emergencia [1]. No obstante, persiste la necesidad de desarrollar redes de alivio que sean no solo eficientes, sino también sostenibles y robustas mediante modelos multiobjetivo [2], empleando la optimización estocástica para mitigar la incertidumbre inherente a la demanda en escenarios de post-desastre [3].

En el contexto peruano, la ineficacia en la respuesta estatal subraya la urgencia de planes con trazabilidad y coordinación territorial, especialmente para alcanzar a beneficiarios dependientes de Organizaciones Sociales de Base (OSB) [4]. Para fortalecer esta resiliencia, se ha explorado la integración de tecnologías disruptivas como vehículos aéreos no tripulados o drones [5]. Sin embargo, el éxito de estas intervenciones se ve condicionado por el entorno operativo; según el reporte *Global Traffic Scorecard* de TANTUM TRAFFIC, Lima presenta niveles de congestión que figuran entre los más altos del mundo [6], lo que dificulta la transición de la logística humanitaria hacia una operación de "marcha alta" (*high gear*) donde la velocidad y adaptabilidad son determinantes para la supervivencia [7].

La logística post-desastre posee características únicas que la distinguen de la logística comercial convencional, requiriendo un enfoque especializado en el alivio inmediato y la gestión de la cadena de suministro en condiciones de crisis [8]. Estos enfoques deben permitir una respuesta rápida ante demandas urgentes mediante sistemas de distribución de emergencia eficaces que prioricen la vida humana [9]. A pesar de los avances técnicos, las organizaciones enfrentan desafíos cualitativos significativos en la ejecución de estas tareas, desde la coordinación hasta la infraestructura limitada [10].

Entre las estrategias para superar estas limitaciones se encuentra la formulación y solución del problema de ruteo de convoyes para garantizar flujos coordinados y seguros [11], así como el uso de metaheurísticas avanzadas como la optimización por colonia de hormigas para la gestión de rutas en entornos de alta incertidumbre [12]. Finalmente, es imperativo analizar las barreras que impiden una distribución fluida tanto en situaciones previas como posteriores al desastre para asegurar la continuidad operativa del sistema logístico [13].

Bajo este panorama, la presente investigación propone el diseño y desarrollo del Sistema de Información de Logística de Última Milla (SILUM), una solución tecnológica modular orientada a operar en escenarios de alta incertidumbre y baja conectividad. El SILUM integra una arquitectura de cuatro

capas con enfoque offline-first y comunicación VHF, con el propósito de mejorar la trazabilidad, la equidad y la coordinación en la distribución de ayuda humanitaria en los distritos de La Molina y Lurín.

II. METODOLOGÍA

Esta investigación es de tipo aplicada con un enfoque cuantitativo y alcance descriptivo-explicativo bajo un diseño preexperimental. El estudio se centró en funcionarios municipales y responsables de organizaciones sociales de base en La Molina y Lurín, seleccionados mediante un muestreo intencional debido a su vulnerabilidad y características geográficas contrastantes. La validación técnica del prototipo contó con una muestra de 11 especialistas. Para la recolección y análisis de datos se utilizaron los siguientes elementos:

1. Un cuestionario estructurado en base a la operacionalización de las variables y medido con la escala Likert de 5 puntos validado por juicio de expertos.
2. Software de modelado Enterprise Architect, base de datos PostgreSQL y herramientas de mapeo Leaflet.
3. Equipos de radio VHF con terminales TNC AX.25 para comunicaciones en entornos sin red convencional.
4. Programas estadísticos para el cálculo de fiabilidad y validez.

El procedimiento se ejecutó en cuatro etapas principales:

1. Diagnóstico de procesos actuales y brechas tecnológicas en los distritos seleccionados.
2. Diseño arquitectónico basado en el marco TOGAF para las capas de negocio y tecnología.
3. Desarrollo de los módulos funcionales del prototipo SILUM.
4. Validación mediante simulaciones operativas y pruebas de integridad.

El procesamiento de la información se realizó empleando el coeficiente V de Aiken para la validez de contenido y el Alfa de Cronbach para la consistencia interna, considerando un nivel de significancia de p menor a 0.05.

III. MARCO DE LA INVESTIGACIÓN

La gestión de la cadena de suministro alimentaria en situaciones de desastre presenta una desconexión crítica entre los centros de acopio y los beneficiarios finales. Actualmente, la falta de un sistema de información integrado provoca que la distribución se realice de manera empírica, sin visibilidad en tiempo real de las necesidades ni de la ubicación de los recursos. Este problema se agrava en Lima Metropolitana, donde la infraestructura vial es limitada y el tráfico, catalogado como uno de los peores del mundo [6], eleva exponencialmente los tiempos de respuesta. Este proceso

fragmentado, con múltiples puntos de quiebre en la información, se ilustra en la Fig. 1.

El problema general que aborda esta investigación se formula de la siguiente manera: ¿De qué manera el diseño de un Sistema de Información de Logística de Última Milla (SILUM) mejorará la eficiencia del tiempo en la entrega de recursos esenciales y disminuirá los costos operativos en la distribución humanitaria? Específicamente, se busca resolver la incapacidad de las Organizaciones Sociales de Base (OSB) para comunicar sus necesidades urgentes y la falta de trazabilidad que a menudo deriva en pérdidas o desvíos de la ayuda.

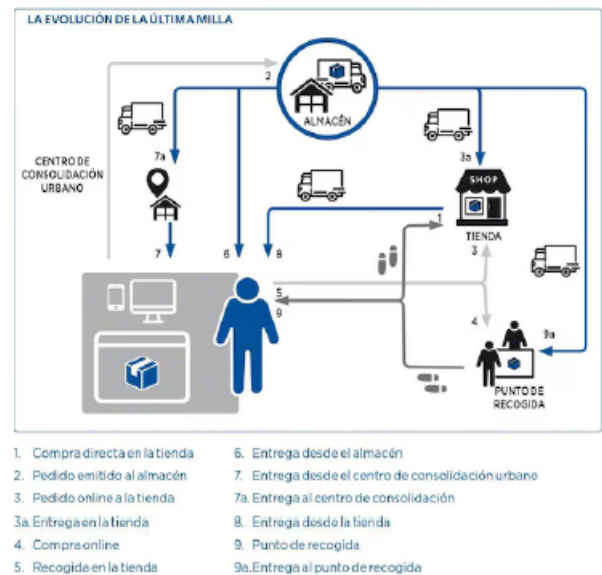


Fig. 1 Proceso fragmentado de la logística de última milla con múltiples puntos de quiebre en la información.

Fuente: MECALUX (2022).

La implementación del SILUM se justifica desde múltiples dimensiones que impactan directamente en la capacidad de resiliencia de la ciudad:

Aporte Social: Contribuye a mejorar la eficacia de los programas de ayuda humanitaria del gobierno, asegurando que el apoyo llegue realmente a quienes lo necesitan, reduciendo la vulnerabilidad de las familias afectadas.

Reducción del Tiempo de Respuesta: En situaciones de supervivencia, el tiempo es el recurso más valioso. El sistema permite planificar rutas y ejecutar entregas de manera dinámica, mitigando el impacto de la crisis.

Información Basada en Necesidades: A diferencia de los modelos push tradicionales, el SILUM permite recopilar y analizar datos sobre la magnitud real del desastre por zona, priorizando las entregas según la urgencia específica.

Trazabilidad y Transparencia: El sistema registra cada etapa del proceso, desde el despacho hasta la confirmación de

entrega, previniendo pérdidas y permitiendo auditorías posteriores. La Fig. 2 sintetiza la cadena de valor propuesta para el SILUM, identificando las actividades primarias y de soporte que estructuran su operación.



Fig. 2 Cadena de Valor de Logística de Última Milla propuesta
Fuente: Elaboración propia.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

La logística humanitaria se fundamenta en principios radicalmente distintos a los de la cadena de suministro comercial. Mientras que la logística empresarial busca la maximización de beneficios y la eficiencia de costos, la logística humanitaria tiene como objetivo primordial la minimización del sufrimiento humano y la preservación de la vida, operando a menudo en entornos de infraestructura degradada y alta inseguridad. Este campo se caracteriza por la incertidumbre extrema en la demanda, la urgencia temporal de los envíos y la necesidad de gestionar flujos de información complejos entre múltiples actores como ONGs, gobierno y fuerzas armadas [2].

Dentro de esta cadena de suministro, la última milla se define como el tramo final y más costoso del proceso de distribución, donde los suministros deben ser transportados desde los centros de distribución locales hasta los beneficiarios finales en las zonas de desastre. En el contexto urbano de Lima Metropolitana, este segmento enfrenta desafíos únicos derivados de la congestión vehicular extrema y la vulnerabilidad sísmica de las vías. La interrupción de carreteras y puentes exige un enfoque de distribución flexible y descentralizado, que priorice la equidad en el acceso a los recursos sobre la optimización pura de distancias [5]. El sistema propuesto aborda esta problemática integrando variables de vulnerabilidad social en los algoritmos de asignación, asegurando que la ayuda llegue primero a quienes más lo necesitan.

Arquitectura Empresarial Orientada a Servicios (TOGAF)
Para garantizar que la solución tecnológica esté alineada con los objetivos estratégicos de la gestión de desastres, se adoptó

el marco de trabajo TOGAF (The Open Group Architecture Framework). Esta metodología proporciona un enfoque estructurado para el desarrollo de sistemas de información complejos, asegurando la interoperabilidad, la escalabilidad y la estandarización de procesos. El uso de TOGAF permite descomponer la complejidad del sistema SILUM en cuatro dominios arquitectónicos interrelacionados, facilitando la identificación de brechas entre el estado actual y el estado deseado de la gestión logística municipal:

1. Arquitectura de Negocio: Define la estrategia, la gobernanza, la organización y los procesos clave de la logística humanitaria. Modela los flujos de trabajo entre el Centro de Operaciones de Emergencia (COE), los almacenes y las brigadas de campo.
2. Arquitectura de Datos: Describe la estructura de los activos de datos lógicos y físicos de la organización. Para el SILUM, esto implica el diseño de esquemas de base de datos robustos que aseguren la integridad de la información sobre inventarios y beneficiarios.
3. Arquitectura de Aplicación: Provee un plano para los sistemas de aplicación individuales a desplegar, sus interacciones y sus relaciones con los procesos de negocio centrales.
4. Arquitectura Tecnológica: Describe las capacidades de software y hardware necesarias para soportar el despliegue de los servicios, incluyendo la infraestructura de red y los dispositivos móviles.

Tecnologías de Resiliencia: Offline-First y VHF

La resiliencia tecnológica se define como la capacidad de un sistema para mantener sus funciones críticas operativas ante la presencia de fallos, picos de carga o ataques maliciosos. En el contexto de un desastre natural de gran magnitud, la infraestructura de telecomunicaciones convencional, incluyendo redes celulares 4G/5G y fibra óptica, tiende a colapsar o saturarse rápidamente, dejando a los equipos de respuesta incomunicados. Para mitigar este riesgo, el diseño del SILUM incorpora dos paradigmas tecnológicos complementarios:

1. Enfoque Offline-First: A diferencia de las aplicaciones web tradicionales que requieren una conexión constante, este enfoque prioriza la operatividad local. El sistema utiliza bases de datos ligeras embebidas (SQLite) en los dispositivos móviles de las brigadas, permitiendo el registro completo de entregas, incidencias y actualizaciones de estado sin conexión a internet. Los datos se almacenan localmente y se sincronizan automáticamente con el servidor central una vez que se restablece la conectividad o mediante redes ad-hoc.
2. Comunicación vía Radio VHF (Protocolo AX.25): Como mecanismo de respaldo de última instancia, se

integra la transmisión de datos por radiofrecuencia en la banda de Muy Alta Frecuencia (VHF). Utilizando el protocolo de radiopaquete AX.25 y controladores de nodo terminal (TNC), el sistema puede encapsular datos digitales críticos (como coordenadas GPS y confirmaciones de entrega) en ondas de radio. Esto permite mantener un canal de comunicación vital de bajo ancho de banda pero alto alcance y fiabilidad, independiente de la red eléctrica comercial y de los proveedores de internet [7].

V. MODELO DE LOGÍSTICA DE ÚLTIMA MILLA

El modelo logístico propuesto se diseñó para operar en escenarios de alta incertidumbre y baja conectividad, característicos de desastres en distritos como La Molina y Lurín. Su propósito es garantizar que los suministros alimentarios lleguen de manera rápida, trazable y equitativa desde los centros de acopio hasta los puntos finales (albergues y comedores). El modelo completo se presenta en la Fig. 3, donde se visualizan los flujos entre actores, etapas y recursos a lo largo del proceso de distribución.

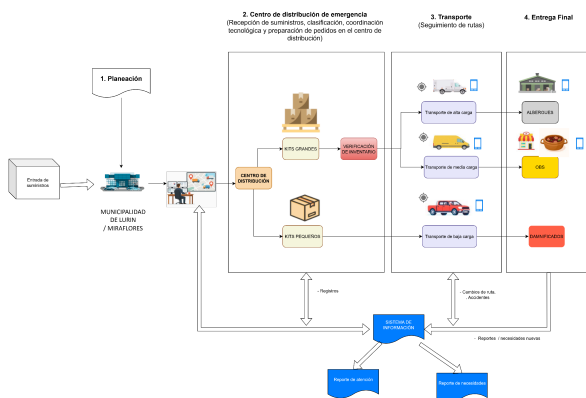


Fig. 3 Modelo de logística de última milla para casos de desastres naturales
Fuente: Elaboración propia.

A. Procesos Clave y Flujo Operativo

El modelo integra nueve procesos críticos, comenzando con la Recepción de Pedidos basada en necesidades reales y culminando con la Confirmación de Entrega y Logística Inversa. El flujo operativo se estructura en cuatro etapas secuenciales:

Planeación: Identificación de escenarios (mejor/medio/peor) y priorización de zonas vulnerables mediante un sistema de

puntaje que considera daños en vivienda, aislamiento vial y seguridad alimentaria.

Gestión en Centro de Distribución (CDE): Recepción y clasificación de suministros utilizando técnicas de cross-docking y kitting (kits estandarizados de 7 días/persona) para agilizar el despacho.

Transporte y Seguimiento: Uso de una flota multinivel (desde camiones hasta motos/drones) monitoreada en tiempo real. Se incluyen protocolos de replanificación dinámica ante bloqueos de vías.

Entrega Final: Distribución directa a damnificados o albergues con validación offline para asegurar la cadena de custodia y evitar duplicidades.

B. Priorización y Equidad

Para maximizar la equidad, el modelo asigna recursos basándose en un índice de vulnerabilidad calculado dinámicamente:

$$\text{Puntaje} = f(\text{daño vivienda, aislamiento, grupos vulnerables, acceso agua})$$

Esto asegura que la ayuda se dirija primero a los sectores con mayor riesgo crítico, optimizando el lead time (meta < 72h) y la cobertura.

VI. DISEÑO DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN

La estructura modular del SILUM se muestra en la Fig. 4, en la que cada módulo fue diseñado con sus interfaces de usuario, casos de uso, diagramas de secuencia y modelo de base de datos.

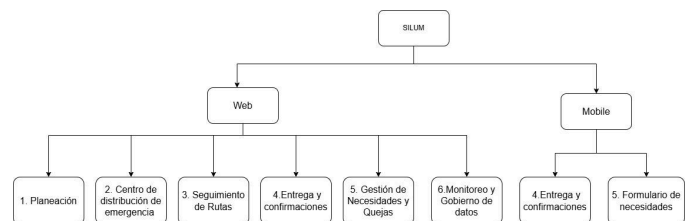


Fig. 4 Módulos del sistema de información SILUM

La Fig. 5 presenta las pantallas principales del módulo móvil, diseñado para las brigadas de campo y orientado al registro de entregas y formulario de necesidades en modo sin conexión.

logística para escenarios de desastre.

El coeficiente Alfa de Cronbach de 0.951 obtenido indica una muy alta consistencia interna, lo que significa que el instrumento es altamente confiable para medir la percepción de la gestión de distribución en el sistema propuesto, y que los ítems están fuertemente correlacionados entre sí, midiendo de forma coherente el mismo constructo.

VIII. CONCLUSIONES

Después de haber realizado la presente investigación podemos concluir en lo siguiente:

1. La aplicación de la metodología TOGAF permitió estructurar eficazmente la arquitectura empresarial en sus cuatro dominios esenciales (negocio, datos, aplicación y tecnología), facilitando mediante el modelado UML la identificación y resolución de brechas tecnológicas en los procesos logísticos y resultando en un sistema modular robusto que cubre el ciclo completo de la cadena de suministro.
2. La integración de tecnologías de resiliencia validó la viabilidad del sistema en escenarios críticos; específicamente, el enfoque offline-first con SQLite aseguró la captura de datos sin conexión a internet, mientras que el protocolo VHF demostró ser capaz de mantener la trazabilidad y sincronización de datos ante el colapso de redes móviles convencionales.
3. Los resultados de la validación estadística confirman la solidez técnica del prototipo, evidenciada por un Coeficiente V de Aiken de 0.83 que refleja un alto consenso de expertos sobre la validez del contenido, y un coeficiente Alfa de Cronbach de 0.951 que garantiza una excelente consistencia interna y fiabilidad de los datos recolectados.
4. El sistema SILUM se posiciona como una innovación significativa para distritos vulnerables como La Molina y Lurín, cuyo diseño modular y validación técnica por expertos demuestran su pertinencia para optimizar la asignación de recursos y favorecer la equidad y transparencia en la distribución de ayuda humanitaria. La reducción efectiva de tiempos de respuesta y costos operativos constituye una línea de trabajo futura, sujeta a validación mediante pruebas de campo en escenarios reales.

REFERENCIAS

- [1] Q. Wang and X. Nie, "A location-inventory-routing model for distributing emergency supplies," *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 175, p. 103156, May 2023, doi: 10.1016/j.tre.2023.103156.

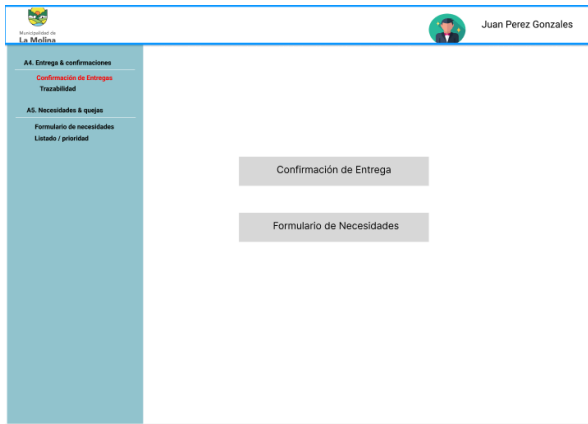


Fig. 5 Módulo Mobile sistema de información SILUM

Complementariamente, la Fig. 6 muestra el módulo web destinado a los operadores del Centro de Distribución de Emergencia, con acceso a planificación, inventarios, trazabilidad e identidad y gobierno del sistema.

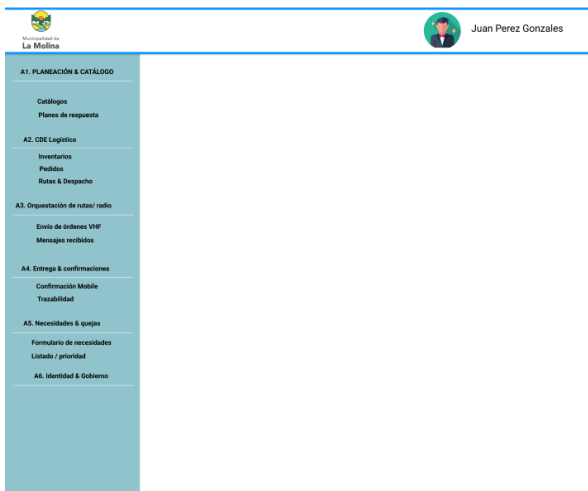


Fig. 6 Módulo Web sistema de información SILUM

VII. RESULTADOS

Se obtuvo un coeficiente V de Aiken global de 0.83. Dado que este valor supera el límite crítico de validez de 0.80, se concluye estadísticamente que existe un consenso válido y significativo entre los expertos para afirmar que el prototipo cumple satisfactoriamente con los requerimientos de gestión

- [2] P. Zhang, Y.-K. Liu, G. Yang, G. Yang, and G. Zhang, "A multi-objective distributionally robust model for sustainable last mile relief network design problem," *Ann. Oper. Res.*, pp. 1–42, 2020, doi: 10.1007/s10479-020-03813-3.
- [3] N. Noyan, B. Balcik, and S. Atakan, "A stochastic optimization model for designing last mile relief networks," *Transp. Sci.*, vol. 50, no. 3, pp. 1092–1113, 2016, doi: 10.1287/trsc.2015.0621.
- [4] R. G. Callalli Villalta, "Propuesta de plan de logística humanitario, en caso de terremotos. Caso piloto: distrito de Mariano Melgar," Tesis de grado, Univ. Católica de Santa María, Arequipa, Perú, 2020. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.ucsm.edu.pe/>
- [5] F. Andersson, "Drones in humanitarian logistics," Tesis, Yrkeshögskolan Novia, 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.theseus.fi/>
- [6] TANTUM TRAFFIC, "Global Traffic Scorecard," 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.tantumtraffic.com>
- [7] L. N. Van Wassenhove, "Humanitarian aid logistics: Supply chain management in high gear," *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 57, no. 5, pp. 475–489, May 2006, doi: 10.1057/palgrave.jors.2602125.
- [8] J. Holguín-Veras, M. Jaller, L. N. Van Wassenhove, N. Pérez, and T. Wachtendorf, "On the unique features of post-disaster humanitarian logistics," *Journal of Operations Management*, vol. 30, no. 7–8, pp. 494–506, 2012.
- [9] J. B. Sheu, "An emergency logistics distribution approach for quick response to urgent relief demand in disasters," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 43, no. 6, pp. 687–709, 2007.
- [10] C. Sandwell, "A qualitative study exploring the challenges of humanitarian organisations," *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, vol. 1, no. 2, pp. 129–144, 2011.
- [11] D. Goldstein, T. Shehab, J. Casse et al., "On the formulation and solution of the convoy routing problem," *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 46, no. 4, pp. 520–533, 2010.
- [12] J. M. Ferrer, M. T. Ortuño, and G. Tirado, "A new ant colony-based methodology for disaster relief," *Mathematics*, vol. 8, no. 4, p. 518, 2020.
- [13] P. K. Tarei, K. Gumte, J. Patnaik, and R. S. Oktari, "Analysing barriers to humanitarian logistics for distributing relief aid in pre- and post-disaster situations," *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 104, p. 104388, 2024.