



Mejores prácticas para la implementación de Fog Computing: Análisis de casos de éxito

Best Practices for Fog Computing Implementation: Analysis of Success Cases

Autores

* **Abraham Moises Echeverría Salazar**

✉ aecheverr2@utmachala.edu.ec

Mariuxi Paola Zea Ordoñez

✉ mzea@utmachala.edu.ec

Oscar Efrén Cárdenas Villavicencio

✉ oecardenas@utmachala.edu.ec

Universidad Técnica de Machala,
Facultad de Ingeniería Civil, Machala,
El Oro, Ecuador.

*Autor para correspondencia

Comó citar el artículo:

Echeverría Salazar, A.M., Zea Ordoñez, M.P. & Cárdenas Villavicencio, O.E. 2025. Mejores prácticas para la implementación de Fog Computing: Análisis de casos de éxito. *Informática y Sistemas*. 9(1), pp. 52-69. <https://doi.org/10.33936/isrtic.v9i1.7323>

Enviado: 10/02/2025

Aceptado: 24/04/2025

Publicado: 25/04/2025

Resumen

El Fog Computing se ha convertido en una tecnología clave para mejorar el procesamiento y almacenamiento de datos en la agricultura, la salud y las ciudades inteligentes, acercando la computación al punto de generación de datos. Este estudio lleva a cabo una revisión sistemática sobre la aplicación de esta tecnología en los sectores mencionados, con el propósito de identificar las mejores prácticas basándose en casos de éxito, empleando la metodología PRISMA. Se examinaron 43 investigaciones publicadas entre 2020 y 2024, evaluando aspectos como la seguridad, interoperabilidad, escalabilidad y eficiencia operativa. A partir del análisis, se identificaron beneficios clave y desafíos pendientes en la adopción del Fog Computing, lo que permitió proponer un conjunto de mejores prácticas que abordan aspectos críticos, como la interoperabilidad, la optimización del procesamiento distribuido y la integración con infraestructuras existentes. Esta propuesta tiene como objetivo ofrecer un marco de referencia para la adopción de Fog Computing en sectores clave, con el propósito de asistir a las organizaciones en la optimización de sus procesos y en el aprovechamiento más eficaz de los beneficios que brinda esta innovación.

Palabras clave: Fog Computing; agricultura; salud; ciudades inteligentes; mejores prácticas.

Abstract

Fog Computing has emerged as a key technology for enhancing data processing and storage in agriculture, healthcare, and smart cities by bringing computing closer to the data generation point. This study provides a systematic literature review on the adoption methodology. Studies published between 2020 and 2024 were analyzed, aspects such as interoperability, scalability security, and operational efficiency were evaluated. This analysis identifies the key benefits and challenges associated with the adoption of Fog Computing, allowing for the development of a set of best practices that tackle critical issues such as interoperability, optimization of distributed processing, and integration with existing infrastructures. This proposal is intended to provide a framework for the implementation of Fog Computing in key sectors, supporting organizations in enhancing their processes and optimizing the benefits that this innovation can offer more effectively.

Keywords: Fog Computing; agriculture; healthcare; smart cities; best practices.





1. Introducción

Para 2025, se estima que el número de dispositivos IoT conectados superará los 500 mil millones, generando volúmenes de datos sin precedentes (Alharbi et al., 2022). Este crecimiento exponencial plantea un desafío crítico en la gestión y procesamiento de datos en tiempo real, específicamente en sectores como la agricultura, la salud y las ciudades inteligentes. Para abordar esta problemática, el Fog Computing surge como una arquitectura innovadora que amplía las capacidades de la computación en la nube hasta los extremos de la red, acercando los recursos computacionales al origen de los datos (Kopras, et al., 2022). A medida que las redes 5G y el Internet de las cosas (IoT) continúan expandiéndose, el Fog Computing se posiciona como una solución clave para reducir la latencia, mejorar la seguridad y optimizar el consumo energético en entornos distribuidos, impulsando así una mayor eficiencia y sostenibilidad en sectores estratégicos como la agricultura (Wang et al. 2020).

El concepto de Fog Computing, introducido por Bonomi et al. (2012) en Cisco Systems, surgió como respuesta a las limitaciones de la computación en la nube, especialmente en aplicaciones donde la latencia, el ancho de banda y la privacidad son aspectos críticos. No obstante, a pesar de su creciente adopción, esta tecnología enfrenta importantes desafíos, como la falta de estandarización en su implementación, la seguridad de los datos y su integración con tecnologías complementarias como el Internet de las Cosas (IoT) y la inteligencia artificial (IA) (Al Yarubi, et al., 2025).

Diversos estudios han abordado los fundamentos y aplicaciones del Fog Computing. Por ejemplo, Kirsanova et al. (2021) analizaron el estado del arte de las plataformas de Fog Computing, estableciendo una clasificación que facilita el desarrollo de sistemas de computación distribuidos. Por su parte, Songhorabadi et al. (2021) ofrecieron un enfoque centrado en ciudades inteligentes, presentando una revisión exhaustiva de las aplicaciones y desafíos actuales. A pesar de estos avances, persiste una brecha en la literatura respecto a estrategias unificadas para abordar problemas de seguridad y escalabilidad en arquitecturas distribuidas.

El propósito de esta revisión bibliográfica es analizar de manera integral los desarrollos más recientes en el campo del Fog Computing, identificando tanto sus oportunidades como las limitaciones que aún enfrenta esta tecnología. A través de un enfoque sistemático, el artículo sintetiza las contribuciones clave de la literatura, proporcionando una visión crítica de los avances actuales y de las áreas que requieren una investigación más profunda.

Para ello, se ha llevado a cabo una revisión sistemática de

la literatura (RSL), consultando bases de datos académicas reconocidas como IEEE Xplore, ScienceDirect, MDPI entre otras. Se seleccionaron 43 artículos publicados entre 2020 y 2024 que abordan aplicaciones, arquitecturas y desafíos del Fog Computing, excluyendo aquellos de enfoque marginal o tangencial. Los estudios fueron evaluados en función de su relevancia, impacto y contribuciones al campo mediante técnicas de análisis cualitativo y cuantitativo.

Este análisis permitirá comprender los avances que han posicionado al Fog Computing como una solución prometedora, así como los retos que aún limitan su adopción a gran escala. La revisión busca una base sólida para investigadores y profesionales interesados en el desarrollo y aplicación de esta tecnología en entornos distribuidos, con un enfoque particular en sus aplicaciones en salud, agricultura y ciudades inteligentes.

2. Marco teórico

2.1 Definición de Fog Computing

Fog Computing es un paradigma de computación distribuida que extiende las capacidades de la computación en la nube al borde de la red. Fue introducido por Cisco en 2012 (Bonomi et al. 2012), como una solución para reducir la latencia y mejorar la eficiencia en el procesamiento de datos en tiempo real. En este modelo, los datos se procesan localmente en dispositivos intermedios llamados nodos niebla (fog nodes), en lugar de ser enviados a la nube para su procesamiento.

2.2 Arquitectura de Fog Computing

Según Rodríguez y Moreira (2025), en su obra la arquitectura de Fog Computing se organiza en tres niveles principales que trabajan de manera complementaria para ofrecer soluciones eficientes en entornos distribuidos y con requisitos de baja latencia:

Dispositivos de borde (Edge Devices): Son los sensores, cámaras y dispositivos IoT que se encuentran en el punto de captura de datos. Estos dispositivos generan grandes volúmenes de datos en tiempo real, y a menudo operan en el entorno físico cercano al usuario o al objeto monitoreado. Estos dispositivos pueden incluir, por ejemplo, sensores de temperatura, cámaras de seguridad o medidores inteligentes, que recopilan datos cruciales para procesos y operaciones inmediatas.

Nodos de niebla (Fog Nodes): Estos son servidores intermedios o gateways que se sitúan entre los dispositivos de borde y la nube. Su principal función es procesar y almacenar datos localmente, lo que reduce la carga de trabajo en la nube y disminuye la latencia al permitir que el procesamiento se realice más cerca de la fuente de datos. Los nodos de niebla

gestionan tareas como el filtrado, análisis preliminar y agregación de datos, optimizando la eficiencia y la velocidad del sistema, sin necesidad de enviar toda la información a la nube central para su procesamiento.

Nube central (Cloud): Es la infraestructura de almacenamiento y procesamiento a largo plazo. A pesar de que los dispositivos de borde y los nodos de niebla son responsables del procesamiento inmediato y local, la nube sigue siendo crucial para almacenar grandes volúmenes de datos históricos, realizar análisis complejos y proporcionar servicios avanzados de inteligencia artificial y aprendizaje automatizado. Además, la nube central coordina la comunicación y sincronización entre los nodos distribuidos y asegura la escalabilidad del sistema.

En la figura 4 se muestra la Arquitectura general con las capas, egde, fog y cloud.

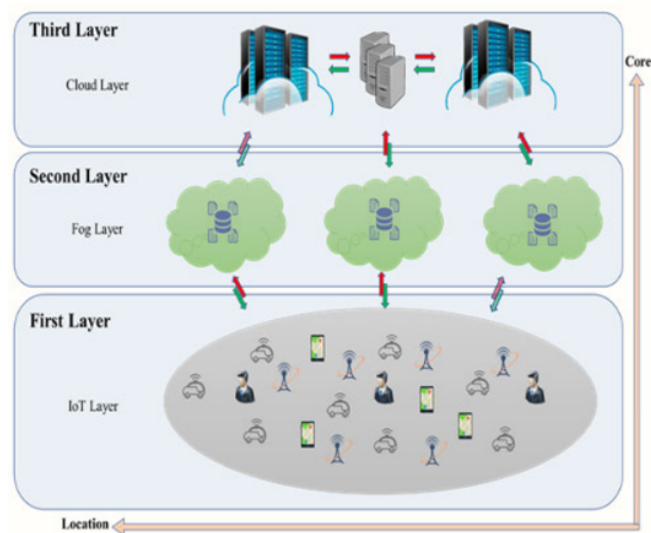


Figura 4. Fuente: Adaptado de Abdali et al. (2021).

2.3 Comparación entre Fog Computing, Edge Computing y Cloud Computing

Tabla 5. Tabla comparativa entre Edge, fog y cloud.

Característica	Cloud Computing	Edge Computing	Fog Computing
Latencia	Alta	Baja	Media
Procesamiento de datos	Centralizado	En el borde	Distribuido
Seguridad	Moderada	Alta	Alta
Costos operativos	Elevados	Moderados	Moderados
Aplicaciones	Big Data, AI	IoT local	IoT distribuido, Smart Cities

Mientras que Cloud Computing centraliza los recursos de procesamiento, Edge Computing los distribuye en los dispositivos de borde, y Fog Computing crea una capa intermedia para mejorar la eficiencia operativa y la seguridad en la transmisión de datos.

2.4 Ventajas y Desventajas de Fog Computing

Ventajas de Fog Computing

- **Reducción de latencia.** Fog Computing permite procesar los datos más cerca de su origen, lo que reduce considerablemente la latencia en comparación con la computación en la nube. Este enfoque es especialmente beneficioso en aplicaciones que requieren respuestas rápidas, ya que evita la necesidad de enviar grandes volúmenes de datos a servidores remotos para su procesamiento. Kopras et al. (2022) destacan que el procesamiento en nodos de niebla disminuye la latencia y optimiza el rendimiento de aplicaciones en tiempo real. Además, Oayyum et al. (2021) mencionan que Fog Computing mejora la calidad del servicio en entornos urbanos al reducir la latencia en aplicaciones de ciudades inteligentes.

- **Mayor seguridad.** Mantener los datos cerca de su origen minimiza el riesgo de ataques en la nube y mejora la privacidad. Nuñez-Gómez et al. (2021) enfatizan que la integración de Fog Computing con blockchain fortalece la seguridad y reduce vulnerabilidades en infraestructuras distribuidas.

- **Optimización del ancho de banda.** Fog Computing reduce la cantidad de datos transmitidos a la nube, disminuyendo los costos de red. Zhang et al. (2020) resaltan que esta tecnología disminuye la sobrecarga de la nube al procesar datos localmente en aplicaciones agrícolas, lo que mejora la eficiencia del sistema.

- **Mejor interoperabilidad.** Fog Computing facilita la integración con dispositivos IoT y otros sistemas inteligentes, Ouyyum et al. (2021) mencionan que esta tecnología mejora la interoperabilidad en entornos urbanos mediante el uso de arquitecturas colaborativas para compartir recursos.

Desventajas de Fog Computing

- **Costos de infraestructura.** La implementación de Fog Computing requiere inversión en hardware adicional, como servidores de borde y dispositivos IoT mejorados. Nuñez-Gómez et al. (2021) mencionan que los costos iniciales de infraestructura pueden ser una barrera para la adopción masiva de esta tecnología.

- **Complejidad en la gestión.** Administrar y mantener múltiples nodos niebla es más complicado que gestionar una infraestructura centralizada. Qayyum et al. (2021) destacan que la coordinación de nodos en entornos urbanos introduce desafíos adicionales en la administración y gestión de recursos.

- **Problemas de estandarización.** La falta de regulaciones universales dificulta la adopción generalizada de Fog Computing. Zhang et al. (2020) mencionan que la ausencia de

estándares unificados limita la interoperabilidad en entornos agrícolas, lo que representa un obstáculo para su integración efectiva.

2. Materiales y Métodos

3.1 Palabras Clave y Cadenas de Búsqueda

Este análisis sistemático de la literatura se enfoca en tres preguntas de investigación relacionadas con la implementación del Fog Computing en la agricultura, la salud y las ciudades inteligentes:

- RQ1: ¿Cuáles son los principales obstáculos tecnológicos para la adopción del Fog Computing en el sector agrícola? Esta pregunta busca identificar y analizar barreras tecnológicas que dificultan la adopción del Fog Computing en este sector. Comprender estos obstáculos es fundamental para desarrollar estrategias efectivas que superen los desafíos y promuevan la implementación del Fog Computing, mejorando así la eficiencia y competitividad en la agricultura mediante soluciones tecnológicas.
- RQ2: ¿Qué mejores prácticas pueden maximizar la seguridad en la implementación del Fog Computing en el sector de la salud? Esta pregunta tiene como objetivo investigar y definir mejores prácticas que puedan maximizar la seguridad en la implementación del Fog Computing en el sector de la salud. Dada la sensibilidad de los datos en este sector, es crucial asegurar la seguridad de la información.
- RQ3: ¿Cómo puede la implementación del Fog Computing mejorar la eficiencia operativa en infraestructuras de ciudades inteligentes? Esta pregunta se centra en analizar como la adopción del Fog Computing optimiza el rendimiento de los sistemas urbanos inteligentes, permitiendo el procesamiento de datos en tiempo real. El objetivo es demostrar que esta tecnología puede reducir la latencia, mejorar la capacidad de respuesta y optimizar la gestión de recursos en aplicaciones clave como la movilidad urbana, la gestión del tráfico, el monitoreo ambiental y la automatización de servicios públicos.

Se diseñaron cadenas de búsqueda utilizando palabras clave y operadores booleanos para responder a las preguntas de investigación.

- Para RQ1: (Adoption OR Implementation) AND (Fog Computing) AND (Agriculture).
- Para RQ2: (Integration) AND (Fog Computing) AND (Health).
- Para RQ3: (Operational efficiency) AND (Adoption OR Implementation) AND (Fog Computing) AND (Smart Cities).

El uso de combinaciones específicas de palabras clave y operadores booleanos permitió realizar búsquedas focalizadas en las bases de datos seleccionadas, facilitando la identificación de estudios relevantes para cada sector: agricultura, salud y

ciudades inteligentes. Estas estrategias optimizan la recuperación de artículos pertinentes, asegurando que estén alineados con los objetivos de la investigación. Al emplear términos como adoption, implementation, integration y operational efficiency junto con Fog Computing, se cubren tanto la adopción de la tecnología como su impacto en cada contexto particular.

Además, el diseño de estas cadenas de búsqueda, vinculado a las preguntas de investigación (RQ1, RQ2 y RQ3), contribuye a una revisión sistemática robusta y coherente. Esta práctica es fundamental en la literatura científica, ya que orienta el proceso de selección de estudios y permite identificar posibles brechas para futuras investigaciones en el ámbito del Fog Computing.

3.2 Criterios de Inclusión y Exclusión

Para delimitar el alcance de esta revisión sistemática, se determinaron los siguientes criterios de inclusión y exclusión.

3.3 Bases de Datos que fueron utilizadas

Tabla 1. Criterios para incluir y excluir trabajos.

Criterios	Inclusión	Exclusión
Tipo de documento	Artículos	Tesis
Año de publicación	Últimos cuatro años (2020-2024)	Antes de 2020
Tema relacionado con Fog Computing	Sí	No
Enfoque en sectores específicos	Sí (agricultura, salud, smart cities)	No
Artículos escritos en idioma accesible	Español, inglés	Otros idiomas
Acceso gratuito	Sí	No

Se consultaron cinco bases de datos para llevar a cabo la búsqueda de artículos relacionados con las mejores prácticas en la implementación de Fog Computing:

- IEEE XPLORE
- MDPI
- ScienceDirect
- DOAJ
- PubMed

Se seleccionaron estas bases de datos por su amplia cobertura y relevancia en el campo del Fog Computing, siguiendo la metodología de revisión sistemática de la literatura planteada por Sanguino Reyes (2020) para el ámbito de las tecnologías de la información. MDPI proporciona acceso abierto a investigaciones multidisciplinarias sobre tecnologías emergentes, mientras que ScienceDirect, es una fuente clave de la literatura científica de gran impacto en disciplinas como informática e ingeniería. DOAJ garantiza la incorporación de investigaciones de acceso abierto y revisadas por pares. Por último, PubMed, aunque se centra en ciencias de la salud, es fundamental para explorar aplicaciones del Fog Computing en el ámbito médico. IEEE Xplore, por su parte, es fundamental debido a su enfoque en publicaciones de ingeniería, informática y tecnologías emergentes, proporcionando acceso a artículos de conferencias y revistas de alto impacto que abordan directamente desarrollos técnicos y aplicaciones innovadoras en Fog Computing.

La elección de estas bases de datos se basa en las mejores prácticas para revisiones sistemáticas en ciencias de la computación, tal como se señala en el estudio de Bavaresco et. Al (2020). Siguiendo el enfoque de dicho estudio, se optó por combinar fuentes que proporcionan tanto investigaciones de gran impacto como literatura de acceso abierto además de fuentes específicas del campo, con el fin de obtener una visión integral y complementaria del estado del arte en Fog Computing.

3.4 Herramientas de Análisis y Graficación

Para el análisis de datos y la elaboración de gráficos en este estudio, se utilizó Python como lenguaje de programación principal, ejecutado en el entorno de Google Colab. Hao y colega (2019) manifiestan que esta plataforma facilita la ejecución de código en la nube, permitiendo un análisis eficiente y reproducible de los resultados. Las principales librerías empleados fueron:

- NumPy: Utilizada para el manejo de estructura de datos numéricos y la realización de cálculos matemáticos, lo cual resultó fundamental en el procesamiento de datos cuantitativos obtenidos de los estudios revisados.
- Matplotlib: Empleada para la visualización de datos a través de gráficos de barras, líneas y diagramas comparativos, lo que permitió ilustrar de manera clara la distribución de publicaciones, la evolución temporal de investigaciones y la comparación de resultados entre sectores.
- Graphviz: Utilizada para la creación de diagramas de flujo, específicamente en la elaboración del diagrama PRISMA, facilitando la representación visual del proceso de selección de estudios de forma estructurada y comprensible.

El uso de estas herramientas contribuyó significativamente al análisis de la información, permitiendo obtener visualizaciones precisas y apoyar la interpretación de los hallazgos de la revisión sistemática.

3.5 Metodología de PRISMA

Esta investigación se fundamenta en la metodología PRISMA (Page et al., 2021), un marco reconocido por su utilidad en la organización de revisiones sistemáticas de la literatura. Esta

metodología permite mantener la claridad y el orden en la exposición de los resultados (Lamar Peña et al., 2024). Por otro lado, otros estudios, como el de Cárdenas Villavicencio et al. (2024), subrayan la relevancia de PRISMA para llevar a cabo una identificación, selección y síntesis rigurosa y sistemática de la literatura relevante.

3.5.1 Resultados de PRISMA

La revisión sistemática de la literatura sobre Fog Computing, enfocada en aplicaciones en agricultura, salud y ciudades inteligentes, abarcó publicaciones en inglés y español entre 2020 y 2024, siguiendo la metodología PRISMA, representada en la Figura 1. El proceso se desarrolló en cuatro etapas: Identificación, Selección, Elegibilidad e Inclusión, descritas a continuación:

- **Identificación:** Se recopilaron un total de 560 registros mediante búsquedas exhaustivas en bases de datos académicas relevantes como IEEE Xplore, ScienceDirect, MDPI, DOAJ y PubMed. Además, se identificaron 5 registros adicionales a través de otras fuentes, como referencias bibliográficas y citas en estudios relacionados. Esta fase tuvo como objetivo reunir el mayor número posible de investigaciones relevantes sobre Fog Computing en los sectores de agricultura, salud y ciudades inteligentes, sin restricciones iniciales sobre el tipo de aplicación.
- **Selección:** Tras eliminar los registros duplicados, se obtuvieron 480 estudios únicos. A continuación, se aplicaron criterios de selección inicial, excluyendo 80 artículos que no cumplían con los requisitos básicos de año de publicación (anteriores a 2020) o idioma (no disponibles en inglés o español). De este modo, 400 artículos fueron considerados para la fase de elegibilidad.
- **Elegibilidad:** En esta etapa, se realizó una revisión del texto completo de 71 artículos, evaluando su pertinencia en función de criterios como el enfoque en Fog Computing, la calidad metodológica y la aplicación en casos concretos dentro de los sectores mencionados. Como resultado, se excluyeron 28 estudios que no cumplían con los criterios de elegibilidad debido a limitaciones en la metodología, falta de datos específicos o enfoques que se alejaban del objetivo principal de la investigación.
- **Inclusión:** Finalmente, se incluyeron 43 estudios en la síntesis cualitativa. Estos trabajos ofrecen evidencia relevante sobre la implementación de Fog Computing en contextos de agricultura inteligente, sistemas de salud y ciudades inteligentes, destacándose por su calidad metodológica, su contribución al análisis del impacto de esta tecnología y su relevancia para los sectores analizados.

Si bien las bases de datos consultadas abarcan una amplia cantidad de artículos relacionados con Fog Computing, el proceso de selección en esta revisión se llevó a cabo de manera rigurosa, siguiendo criterios específicos de inclusión. Estos criterios incluyeron la relevancia temática para los sectores de agricultura, salud y ciudades inteligentes, la calidad metodológica de los estudios, así como el periodo de publicación establecido entre 2020 y 2024. Como resultado, el número final de 43 artículos constituye una muestra representativa que refleja adecuadamente el estado del arte en los sectores analizados, garantizando la calidad, validez y pertinencia de los estudios seleccionados para esta revisión.





4. Discusión de resultados

4.1 Análisis sobre la Distribución de Publicaciones

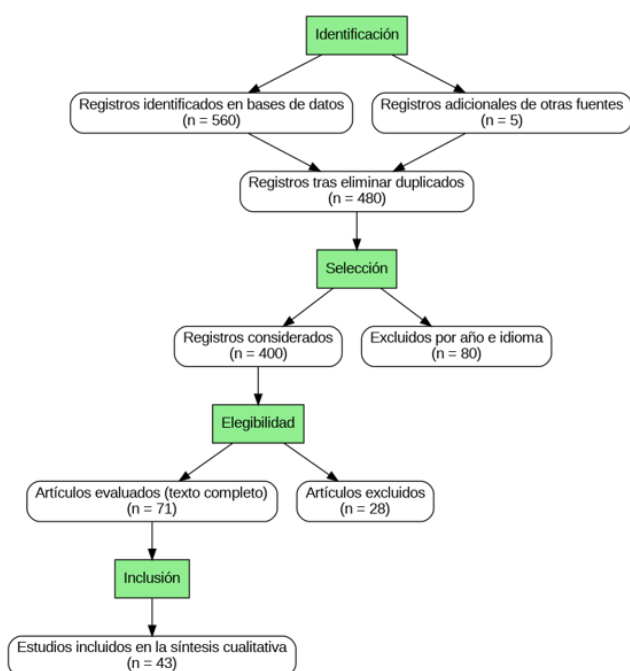


Figura 1. Proceso para la inclusión de artículos conforme a PRISMA.

La Figura 2 ilustra la distribución de las publicaciones según la base de datos y el sector (Agricultura, Salud, Ciudades Inteligentes).

La Figura 2 muestra la distribución de las 43 publicaciones por base de datos y sector, considerando las áreas de agricultura, salud, smart cities y otros. IEEE Xplore, destaca como la base de datos con el mayor número de publicaciones, abarcando de manera equilibrada los tres sectores principales, lo que refleja su

relevancia en el ámbito de la información y la ingeniería. Le sigue DOAJ, con una presencia significativa en artículos de acceso abierto, especialmente en los sectores de agricultura y salud.

ScienceDirect y PubMed presentan una distribución más equilibrada, aunque con un enfoque ligeramente mayor en el sector de salud, lo cual está en línea con el enfoque biomédico de PubMed. Sin embargo, es importante destacar que PubMed muestra una menor representación en el área de agricultura, lo cual podría deberse a su orientación hacia ciencias de la salud, más que a una falta de relevancia en el campo de Fog Computing.

Por su parte, MDPI contribuye con una cantidad considerable de publicaciones en agricultura y salud, lo que refuerza su papel en la difusión de investigaciones en tecnologías emergentes. Finalmente, la categoría de “Otras” bases de datos, aunque con menor cantidad de artículos, evidencia la diversidad de fuentes utilizadas para obtener una visión integral del estado del arte.

El análisis sugiere que los sectores de agricultura y salud concretan la mayor parte de la producción académica relacionada con Fog Computing, mientras que el área de smart cities también muestra una presencia significativa. No obstante, el menor número de publicaciones en ciertas áreas específicas podría representar oportunidades para futuras investigaciones, especialmente considerando el potencial de Fog Computing en la optimización de sistemas urbanos y de salud.

4.2 Estudio sobre la distribución de publicaciones según año y categoría

La Figura 3 ilustra la evolución de las publicaciones sobre Fog Computing en los sectores de agricultura, salud y smart cities entre 2020 y 2024. Se observa que en el período 2020-2021, existe constancia en la cantidad de publicaciones relacionadas a Fog Computing, pero en 2022, se produce un declive en las investigaciones debido a factores como el COVID-19, pandemia que afectó y pausó las investigaciones. En los dos siguientes

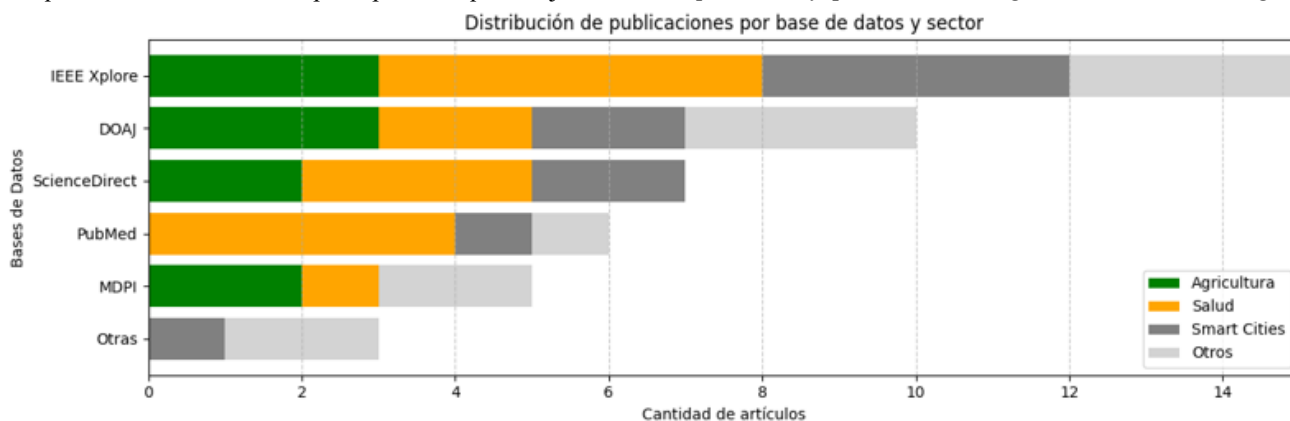


Figura 2. Distribución de publicaciones según base de datos y categoría.

años, las investigaciones aumentaron debido a la adopción de otras tecnologías como 5G y Edge AI, lo que refleja un interés creciente en la investigación y aplicación de esta tecnología.

El crecimiento de las publicaciones sobre Fog Computing refleja su relevancia en sectores clave como la salud, agricultura y smart cities. En salud, destaca su aplicación en el monitoreo de pacientes en tiempo real, la gestión de datos médicos y la mejora de la seguridad, impulsada por el uso de tecnologías como blockchain y aprendizaje federado para optimizar la privacidad e interoperabilidad. En agricultura, su adopción se

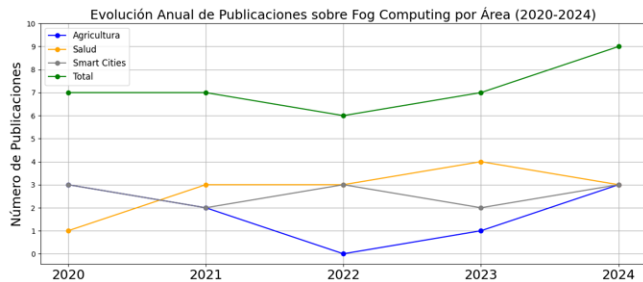


Figura 3. Evolución Anual de Publicaciones sobre Fog Computing por Área (2020-2024).

debe a la exigencia de procesar datos en tiempo real para mejorar la privacidad e interoperabilidad. En el ámbito agrícola, su implementación responde a la misma necesidad de procesamiento en tiempo real desde sensores IoT, mejorando la gestión de cultivos, la eficiencia de recursos y la detección temprana de anomalías. Por su parte, en smart cities, el Fog Computing facilita la optimización del tráfico, la gestión de la energía y la seguridad urbana, debido a su capacidad para manejar grandes cantidades de datos de forma eficiente en entornos complejos.

En conjunto, estos resultados reflejan la maduración del campo del Fog Computing, con un incremento en la diversidad de aplicaciones y sectores. Aunque se observa un crecimiento constante, los desafíos en términos de interoperabilidad, seguridad y escalabilidad siguen siendo áreas críticas para futuras investigaciones, lo que sugiere que el potencial del Fog Computing aún está en expansión y continuará evolucionando en los próximos años.

4.3 Metodología de Extracción de Buenas Prácticas

4.3.1 Delimitación del uso de normas ISO

Las normas ISO/IEC 30161-1:2022, ISO/IEC 30141:2018, e ISO/IEC 21823-2:2020 han sido adoptadas como marco de referencia para la identificación de buenas prácticas en Fog Computing debido a su aplicabilidad y relevancia en este ámbito. Además, se consideran otras normativas internacionales como ISO/IEC 27001:2013 y ISO/IEC 27017:2015, fundamentales para la gestión de la seguridad de la información en entornos distribuidos. Estas normas abordan la protección de datos sensibles y la gestión de riesgos en entornos de computación en la nube.

La norma ISO/IEC 25010:2011 ofrece un modelo de calidad de software que resulta clave para evaluar la eficiencia operativa e

interoperabilidad en las soluciones de Fog Computing. La ISO/IEC 2000-1:2018, centrada en la gestión de servicios de TI, permite optimizar la entrega y operación de servicios basados en esta tecnología, mientras que la ISO/IEC 22301:2019 establece directrices para la continuidad del negocio, asegurando la resiliencia y escalabilidad de las infraestructuras. Finalmente, la ISO/IEC 19770-1:2017 contribuye a la gestión de activos de TI, mejorando el cumplimiento de objetivos estratégicos del negocio.

En conjunto, estas normativas proporcionan un marco sólido para la evaluación y adopción de buenas prácticas de Fog Computing, asegurando que se consideren los aspectos técnicos, operativos y de seguridad fundamentales para su correcta implementación.

4.3.2 Criterios para determinar un caso de éxito en Fog Computing

Para identificar implementaciones exitosas de Fog Computing, se han establecido criterios clave basados en las normas ISO/IEC 30161-1:2020, ISO/IEC 30141:2018 e ISO/IEC 21823-2:2020. Estos criterios garantizan que la adopción de Fog Computing se realice de manera eficiente y alineada con los estándares internacionales.

Estos criterios permiten evaluar la efectividad y el impacto de las implementaciones de Fog Computing, asegurando que las soluciones desplegadas cumplan con los estándares de seguridad,

Tabla 2. Factores para identificar un caso exitoso en la adopción de Fog Computing.

Criterio	Descripción	Norma de Referencia
Seguridad	Asegurar la protección de los datos y la infraestructura mediante la implementación de medidas de seguridad apropiadas.	ISO/IEC 30141:2018
Interoperabilidad	Capacidad del sistema para integrarse con diversas plataformas y dispositivos IoT sin comprometer el rendimiento o la funcionalidad.	ISO/IEC 21823-2:2020
Eficiencia operativa	Optimización del uso de recursos, reducción de latencia y mejora del rendimiento en la gestión de datos en tiempo real.	ISO/IEC 20000-1:2018, ISO/IEC 25010:2011
Escalabilidad	Potencial para crecer y expandirse sin disminuir el rendimiento ante un incremento en la carga y el volumen de datos.	ISO/IEC 30161-1:2020, ISO/IEC 22301:2019
Cumplimiento de requisitos específicos del negocio	Cumplimiento de las necesidades y objetivos específicos de la organización, en línea con sus estrategias, y generando beneficios concretos.	ISO/IEC 19770-1:2017, ISO/IEC 20000-1:2018

Fuente: Los autores, adaptado de (ISO/IEC, 2020).

interoperabilidad y eficiencia necesarios para un despliegue exitoso.

4.3.3 Criterios para evaluar buenas prácticas en Fog Computing

Para analizar las prácticas aplicadas en casos exitosos de Fog Computing, se han definido los siguientes criterios:

Para la evaluación de los estudios analizados, se empleó la siguiente escala:

Estos criterios permiten evaluar la aplicabilidad y efectividad de las buenas prácticas de Fog Computing, asegurando que las soluciones implementadas cumplan con los estándares de seguridad, interoperabilidad, eficiencia operativa y escalabilidad.

4.4 Aplicaciones de Fog Computing en Sectores Clave

4.4.1 Aplicación de Fog Computing en Agricultura

Tabla 3. Criterios de evaluación para buenas prácticas en Fog Computing

Criterio	Descripción
Seguridad	Implementación de mecanismos de protección de datos y mitigación de amenazas para garantizar la confidencialidad e integridad de la información.
Interoperabilidad	Capacidad del sistema para integrarse con diversas plataformas y dispositivos IoT sin comprometer el rendimiento o la funcionalidad.
Eficiencia operativa	Optimización del uso de recursos, reducción de latencia y mejora del rendimiento en la gestión de datos en tiempo real.
Escalabilidad	Posibilidad de expandir la infraestructura de Fog Computing sin afectar la eficiencia o comprometer la estabilidad del sistema.

Fuente: Los autores, adaptado de (ISO/IEC, 2020).

Tabla 4. Escala de valoración para criterios de buenas prácticas

Calificación	Significado
Sí	Cumple el criterio.
No	No cumple el criterio.
Parcial	Cumple parcialmente el criterio.
N/A	No aplica o no se menciona en el estudio.

El sector agrícola ha experimentado una adopción significativa de Fog Computing debido a la necesidad de procesar grandes volúmenes de datos en tiempo real desde sensores IoT distribuidos en el campo. En particular, destacan las soluciones que optimizan la gestión de cultivos, la irrigación inteligente y la previsión climática.

Los estudios revisados muestran que la arquitectura de Fog Computing permite reducir la latencia en la toma de decisiones, proporcionando información en tiempo real sobre el estado de los cultivos y las condiciones del entorno. Un ejemplo es el uso de sistemas de irrigación inteligentes basados en IoT, donde el procesamiento local de datos permite ajustes inmediatos, mejorando la eficiencia en el uso del agua y otros recursos (Chen et al., 2023)

Un avance significativo en esta área es el uso de procesamiento de imágenes para el monitoreo agrícola, donde las técnicas de aprendizaje profundo se aplican a la detección temprana de enfermedades en cultivos Markovic et al. (2024) presentan un modelo basado en redes neuronales convolucionales (CNN) para la clasificación de imágenes agrícolas en dispositivos de Fog Computing, demostrando una mejora en la eficiencia operativa al reducir la dependencia de la nube y permitir una respuesta más rápida ante anomalías.

Asimismo, estudios como los de Hong et al. (2024) exploran la implementación de sistemas de agricultura inteligente basados en Fog Computing, destacando que esta tecnología puede reducir el tráfico de red hasta en un 26% en comparación con sistemas basados solo en la nube, optimizando la comunicación en entornos rurales y mejorando la toma de decisiones en el campo.

En términos de optimización energética, Alharbi y Aldossary (2021) proponen un método para asignación de tareas en redes de Fog Computing con restricciones de latencia, lo que podría beneficiar aplicaciones agrícolas al reducir tiempos de procesamiento y mejorar la gestión de recursos. Además, lee et al. (2020) abordan el uso de aprendizaje federado en entornos agrícolas, permitiendo la integración de modelos de aprendizaje sin necesidad de compartir los datos a nivel central, lo que mejora la privacidad y la eficiencia operativa.

A pesar de estos avances, persisten desafíos en la seguridad y la interoperabilidad entre dispositivos de distintos fabricantes. Rehman & Alhardi (2025) proponen el uso de blockchain en ecosistemas Fog-Coud para mejorar la integridad de los datos y la escalabilidad en la agricultura inteligente, asegurando que las transacciones y la comunicación entre sensores sean seguras y eficientes. Uno de los principales problemas en la agricultura es la falta de protocolos unificados para sensores IoT lo que dificulta la interoperabilidad entre plataformas y dispositivos de diferentes fabricantes. Para abordar este desafío, estándares abiertos como OPC.UA y MQTT han sido propuestos como soluciones viables para garantizar la comunicación eficiente entre dispositivos agrícolas.

En conclusión, el Fog Computing ha demostrado ser una herramienta clave en la modernización de la agricultura, permitiendo procesamiento distribuido, reducción de latencia

y mejor uso de recursos. Sin embargo, la estandarización, la seguridad y la optimización de infraestructuras siguen siendo áreas de investigación abiertas para garantizar una integración más eficiente y escalable de esta tecnología.

4.4.2 Aplicación de Fog Computing en Salud

El sector de la salud ha demostrado ser uno de los campos con mayor potencial para la aplicación de Fog Computing, especialmente en el monitoreo de pacientes en tiempo real, la gestión de datos médicos y la toma de decisiones clínicas rápidas. Las aplicaciones incluyen desde el monitoreo remoto de pacientes hasta la predicción de enfermedades crónicas mediante dispositivos médicos IoT conectados a redes Fog Computing.

Uno de los aspectos más relevantes en esta área es la seguridad y privacidad de los datos médicos. Shynu et al. (2023) destacan la importancia de Blockchain en entornos de Fog Computing para mejorar la protección de datos en aplicaciones médicas, específicamente en la predicción de enfermedades cardiovasculares y diabéticas.

En esta línea, Rehman y Alharbi (2025) proponen un modelo basado en Blockchain bioinspirado que mejora la escalabilidad y seguridad en redes de sensores de salud integradas con Fog-Cloud Computing, lo que fortalece la integridad de los datos médicos en sistemas distribuidos.

Otro hallazgo clave es la falta de estandarización en los dispositivos médicos conectados, lo que dificulta la interoperabilidad entre plataformas de salud y sistemas de Fog Computing. Dutta et al. (2023) resaltan la necesidad de metodologías de balanceo de carga para optimizar los recursos computacionales distribuidos en sistemas de monitoreo de salud.

Este problema también es abordado en el trabajo de Alwakeel & Alnaim (2024), quienes presentan el modelo CyberGuard, un marco de gestión de confianza y optimización de recursos en entornos de Fog Computing para aplicaciones de salud.

Desde una perspectiva de inteligencia artificial, Kim et al. (2023) presentan FETCH, un entorno basado en Deep Learning integrado con Fog Computing, lo que permite mejorar los diagnósticos médicos en tiempo real sin depender exclusivamente de servidores centralizados.

Por otro lado, Karimi et al. (2024) exploran la aplicación de Fog Computing y minería de datos en el monitoreo de pacientes con diabetes, demostrando cómo la computación en la niebla permite detectar anomalías en signos vitales en tiempo real y enviar alertas inmediatas a médicos y cuidadores.

A pesar de estos avances, persisten desafíos como la heterogeneidad de dispositivos, la gestión eficiente de recursos y la seguridad de los datos médicos.

Los estudios revisados sugieren que futuras investigaciones deben enfocarse en la integración de tecnologías emergentes como IA, Blockchain y aprendizaje federado para mejorar la seguridad, interoperabilidad y eficiencia de los sistemas de salud basados en Fog Computing.

La interoperabilidad sigue siendo un desafío en el sector de la salud, donde los sistemas médicos presentan incompatibilidades que dificultan la integración. Para mitigar este problema, se han desarrollado modelos como FHIR (Fast Healthcare Interoperability Resources), los cuales permiten la estandarización de la comunicación entre sistemas hospitalarios y dispositivos Fog.

4.4.3 Aplicación de Fog Computing en Ciudades Inteligentes

Las ciudades inteligentes han emergido como uno de los sectores más beneficiados por Fog Computing, ya que esta tecnología permite la gestión eficiente de grandes volúmenes de datos en tiempo real. La integración de sensores IoT con Fog Computing posibilita mejoras en la gestión del tráfico, el monitoreo ambiental, la eficiencia energética y la seguridad urbana.

Un aspecto clave en las ciudades inteligentes es la gestión de la movilidad urbana. Lee et al. (2020) proponen un modelo colaborativo de Fog Computing que permite compartir recursos a nivel local para optimizar el tráfico y reducir la latencia en la comunicación entre vehículos y semáforos inteligentes.

De manera similar, Thakur & Malekian (2019) presentan un enfoque basado en Fog Computing para detectar congestión vehicular, lo que mejora la planificación de rutas y la fluidez del tráfico en entornos urbanos.

Otra área de aplicación destacada es la seguridad pública. Zhang & Li (2020) introducen un mecanismo de transmisión segura de datos en el Internet de los Vehículos (IoV) utilizando Fog Computing, lo que fortalece la privacidad y la integridad de la información en redes de transporte inteligente.

Desde una perspectiva de eficiencia energética, Tang et al. (2020) exploran el uso de vehículos móviles como nodos de niebla para optimizar la latencia en la gestión de infraestructuras urbanas. Este modelo es particularmente relevante para la iluminación inteligente y la administración eficiente de la energía en edificios y espacios públicos.

Finalmente, Songhorabadi et al. (2021) presentan un estudio sobre enfoques de Fog Computing en ciudades inteligentes, analizando desafíos como la interoperabilidad entre plataformas y la escalabilidad de los sistemas urbanos.

Se destaca la necesidad de marcos normativos que permitan la estandarización de estas tecnologías en el contexto urbano.

A pesar de estos avances, persisten desafíos relacionados con

la seguridad, la integración de diferentes sistemas IoT y la eficiencia en la asignación de recursos. La combinación de Fog Computing con blockchain y aprendizaje automático representa una dirección prometedora para mejorar la gestión de datos y la resiliencia de infraestructuras críticas en ciudades inteligentes.

4.5 Discusión de los Hallazgos

Para responder a las preguntas de investigación:

- RQ1: La principal barrera para la adopción de Fog Computing en la agricultura es la falta de estandarización e interoperabilidad entre dispositivos IoT, lo que dificulta la integración de sistemas heterogéneos en infraestructuras agrícolas. Estudios recientes resaltan que la heterogeneidad de protocolos y plataformas limita la escalabilidad de estas soluciones en entornos rurales (Chen et al. 2023). La gestión eficiente de recursos y la reducción de latencia mediante aprendizaje federado se han propuesto como estrategias viables para optimizar la escalabilidad y la seguridad en la transmisión de datos agrícolas (Alharbi y Aldossary., 2021).
- RQ2: La seguridad en el sector de la salud sigue siendo un desafío crítico debido a la sensibilidad de los datos médicos y la falta de regulación en la implementación de soluciones descentralizadas. Se ha demostrado que la combinación de Fog Computing con Blockchain y cifrado extremo mejora significativamente la integridad y privacidad de los datos en entornos hospitalarios y sistemas de telemedicina (Shynu et al., 2023). Además, se han propuesto modelos de aprendizaje federado para permitir la colaboración entre instituciones sin comprometer la privacidad de los pacientes (Karimi et al., 2024). Sin embargo, la falta de estándares en los sistemas sigue siendo una barrera para su adopción a gran escala.
- RQ3: En las ciudades inteligentes, la eficiencia operativa se mejora con arquitecturas descentralizadas que optimizan la gestión de los recursos urbanos. Modelos recientes de Fog Computing han reducido en un 40% la latencia en sistemas de gestión de tráfico y vigilancia, mejorando la respuesta ante incidentes y la fluidez vehicular (Lee et al., 2020). No obstante, la falta de interoperabilidad y compatibilidad entre diferentes plataformas de sensores sigue siendo un desafío clave en la integración de estos sistemas.

Estos hallazgos demuestran el potencial de Fog Computing, pero también la necesidad de seguir investigando soluciones que optimicen su seguridad, eficiencia y escalabilidad.

4.5.1 Análisis de Resultados y Cumplimiento de Criterios en Fog Computing

Las figuras 5, 6 y 7 presentan patrones reveladores sobre la implementación de Fog Computing en los sectores de agricultura, salud y smart cities, respectivamente. En los tres ámbitos, la eficiencia operativa destaca como el criterio con mayor nivel de cumplimiento, mostrando resultados sobresalientes en la mayoría de los casos analizados.

En agricultura, se observa un cumplimiento total en casi todos los estudios, mientras que en salud se mantiene una tendencia similar, con la mayoría de los artículos evidenciando implementaciones eficientes. Las smart cities, por su parte, confirman esta fortaleza al presentar también altos niveles de eficiencia operativa.

En cuanto al cumplimiento de requisitos específicos del negocio, se aprecian resultados sólidos en los tres sectores, con un alto porcentaje de artículos que cumplen plenamente este criterio. Sin embargo, surgen desafíos notables en seguridad e interoperabilidad.

La seguridad muestra variaciones significativas, siendo especialmente crítica en el ámbito de la agricultura, donde se registran varios casos con cumplimiento parcial o incluso sin cumplimiento del criterio. En salud y smart cities, aunque se observan mejores resultados, persisten desafíos que sugieren la necesidad de enfoques más robustos para garantizar entornos seguros.

Por otro lado, la interoperabilidad presenta un panorama desigual. Mientras que en salud se logran niveles moderados de cumplimiento, en agricultura y smart cities se identifican dificultades considerables, evidenciando la necesidad de mejorar la integración entre diferentes sistemas y dispositivos.

La escalabilidad, aunque variable entre los sectores, destaca con buenos resultados en salud, mientras que en agricultura y smart cities existen ciertos casos con limitaciones en su capacidad de adaptación a entornos de mayor demanda.

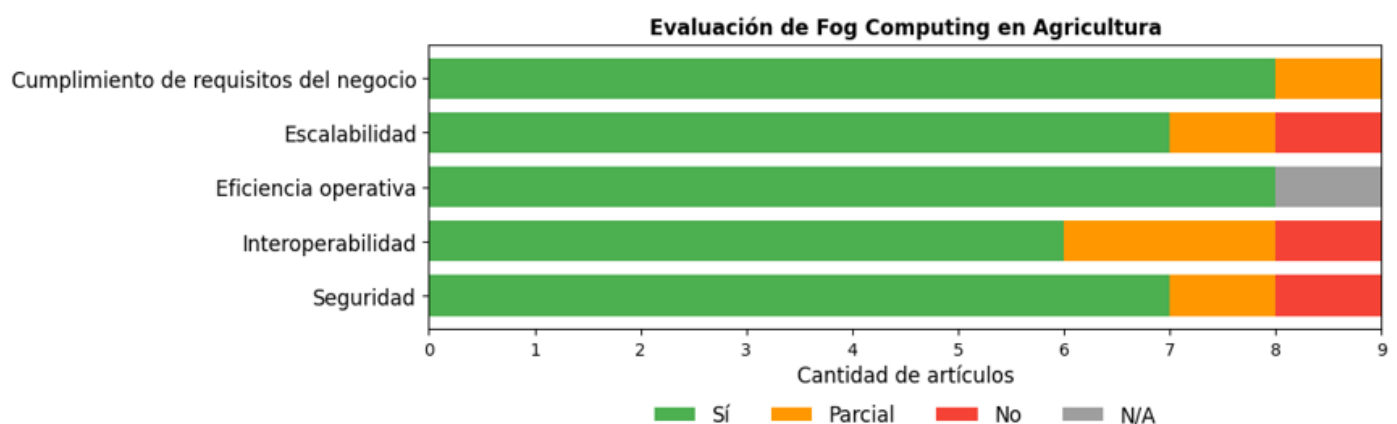


Figura 5. Cumplimiento de criterios en la implementación de Fog Computing en el área de agricultura.

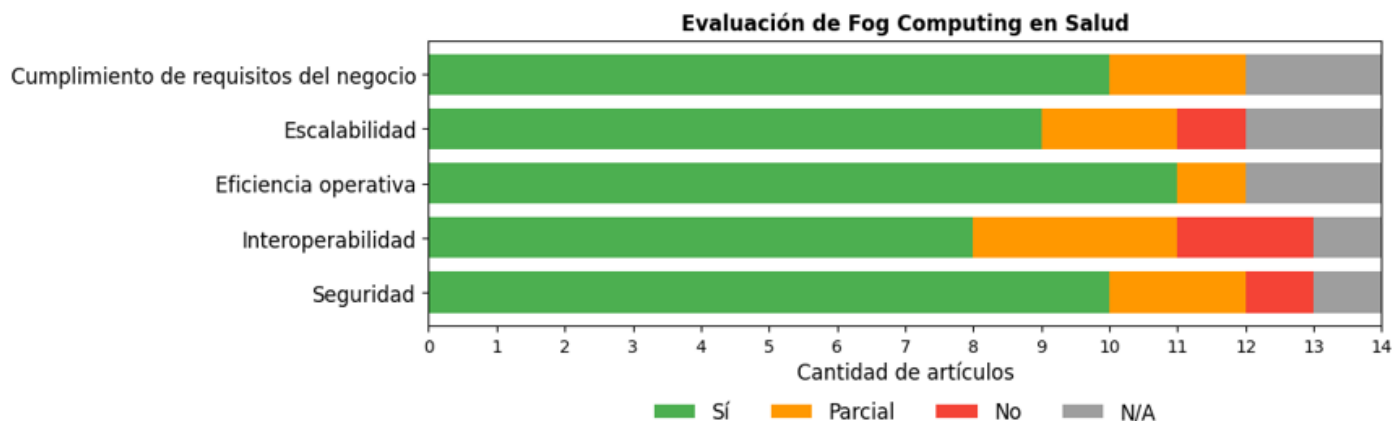


Figura 6. Cumplimiento de requisitos en la aplicación de Fog Computing en el ámbito de la salud

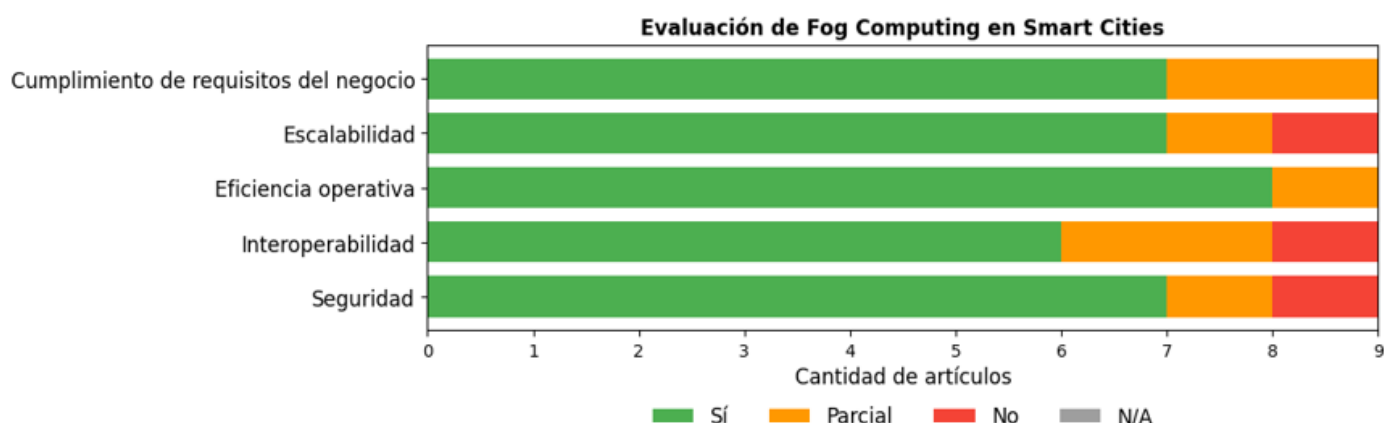


Figura 7. Cumplimiento de requisitos en la aplicación de Fog Computing en las Smart Cities.

Estos resultados destacan la relevancia de seguir mejorando la seguridad y la interoperabilidad en las implementaciones de Fog Computing en los tres sectores estudiados.

Asimismo, es fundamental mantener y fortalecer los logros alcanzados en términos de eficiencia operativa y cumplimiento de requisitos del negocio, considerando su impacto directo en la efectividad de las soluciones basadas en esta tecnología.

4.6 Argumentación de buenas prácticas basadas en casos de éxito

Los siguientes resultados muestran la aplicación de los criterios de selección de buenas prácticas en los artículos analizados. Para cada categoría: agricultura, salud y ciudades inteligentes. Se identificaron los tres estudios mejor valorados.

La evaluación se realizó con base en cinco criterios, asignando un puntaje según el cumplimiento de cada uno. Posteriormente, se calculó un promedio dividiendo la cantidad de criterios

cumplidos entre el total establecido. Para información detallada, consulte Anexos 1, 2 y 3.

4.7 Propuesta de Mejores Prácticas

Con base en los resultados obtenidos de los estudios revisados en las áreas de agricultura, salud y ciudades inteligentes, se plantea la siguiente estrategia de mejores prácticas para la implementación de Fog Computing.

5. Conclusiones

La propuesta de mejores prácticas para la implementación del Fog Computing en agricultura, salud y ciudades inteligentes, fundamentada en el análisis de múltiples estudios, establece un marco integral que optimiza la eficiencia operativa, garantiza la seguridad, facilita la interoperabilidad y permite la escalabilidad del sistema.

Tabla 6. Resumen de investigaciones relevantes sobre aplicaciones de Fog Computing en Agricultura, Salud y Smart Cities.

Sector	Estudio	Aspectos Destacados	Áreas de Mejora	Contribución Clave
Agricultura	Miao et al., (2024)	Eficiencia energética, Monitoreo en tiempo real	Seguridad	Implementación de un sistema basado en Fog Computing y LoRa para detección de intrusión animal en cultivos.
	Mohanty et al., (2024)	Agricultura de precisión, Machine Learning	Resiliencia	Predicción de humedad y fertilidad del suelo mediante algoritmos de Machine Learning.
	Alharbi et al., (2021)	Optimización de riego, Uso eficiente de recursos	Uso de estándares	Sistema de riego inteligente basado en Fog Computing para optimizar el uso del agua.
Salud	Karimi et al. (2024)	Sistema de salud IoT, análisis de datos, uso del algoritmo K-Nearest Neighbor (KNN)	Eficiencia diagnóstica	Implementación de un sistema basado en Fog Computing para la detección en tiempo real de anomalías en pacientes diabéticos, mejorando la eficiencia del diagnóstico mediante procesamiento local de datos.
	Tang et al. (2024)	Inteligencia Artificial, Diagnóstico médico	Eficiencia diagnóstica	Uso de IA con Fog Computing para diagnóstico de enfermedades cardiovasculares y diabetes con una precisión del 97.26%.
	Rehman et al. (2025)	Aprendizaje federado, privacidad de datos, eficiencia energética	Protección de datos	Propuesta de un marco de aprendizaje federado para mejorar la seguridad y la privacidad de los datos médicos en entornos de Fog Computing, reduciendo la dependencia de la nube y mejorando la gestión de la energía.
Ciudades Inteligentes	Tariq et al. (2024)	Seguridad, Resiliencia	Ciberseguridad	Detección de intrusiones en redes eléctricas inteligentes con aprendizaje federado.
	Afzal et al. (2025)	Eficiencia Operativa, Tolerancia a Fallos	Gestión de Recursos	Optimización de tráfico y reducción de latencia en infraestructuras urbanas.
	Tripathy et al. (2024)	Seguridad, Adaptabilidad	Resiliencia, Computación Distribuida	Modelo de transferencia de tareas cooperativo para optimizar el uso de Fog Computing en ciudades.

La eficiencia operativa destaca como uno de los beneficios más consistentes en los tres sectores, especialmente en la gestión de datos en tiempo real y la reducción de la latencia en entornos críticos.

Sin embargo, la seguridad y la interoperabilidad persisten como áreas críticas de mejora, particularmente en el ámbito de la salud y las ciudades inteligentes, donde la protección de datos sensibles y la integración

de múltiples sistemas representan desafíos significativos.

La adopción de arquitecturas basadas en microservicios, combinada con protocolos abiertos como MQTT y FHIR, se destaca como una estrategia clave para la interoperabilidad y la adaptabilidad de los sistemas.

Asimismo, la incorporación de tecnologías emergentes, como blockchain para la gestión segura de datos, inteligencia artificial



Tabla 7. Propuesta de Mejores Prácticas para el proceso de implementación del Fog Computing.

Criterios	Mejores Prácticas
Fortalecer la seguridad y privacidad	Implementar cifrado de extremo a extremo, autenticación multifactor y políticas de gestión de identidades para proteger datos sensibles en entornos distribuidos.
Mejorar la interoperabilidad	Adoptar estándares abiertos como MQTT, CoAP y protocolos de interoperabilidad que faciliten la comunicación entre dispositivos heterogéneos.
Optimizar la eficiencia operativa	Emplear arquitecturas ligeras para el procesamiento de datos en el borde, reduciendo la latencia y mejorando el uso de los recursos energéticos.
Asegurar la escalabilidad	Diseñar arquitecturas modulares que permitan la fácil integración de nuevos nodos y recursos, ajustándose a la demanda de la red.
Garantizar la fiabilidad del sistema	Implementar mecanismos de redundancia y tolerancia a fallos para asegurar la disponibilidad continua de los servicios críticos.
Optimizar la gestión de recursos	Utilizar algoritmos de balanceo de carga dinámicos para una distribución eficiente del tráfico y los recursos de computación.
Mejorar la calidad del servicio (QoS)	Establecer políticas de priorización de tráfico para aplicaciones críticas, garantizando un rendimiento constante en condiciones variables de red.
Fomentar la sostenibilidad energética	Integrar soluciones de gestión energética para minimizar el consumo, como el uso de energía renovable y dispositivos de bajo consumo.
Asegurar la protección de datos	Implementar políticas de privacidad por diseño, incluyendo el tratamiento anónimo de datos y control de acceso basado en roles.
Facilitar la actualización del sistema	Diseñar mecanismos de actualización remota seguros para garantizar la implementación rápida de mejoras y parches de seguridad sin afectar la operación.

para la toma de decisiones en el borde y aprendizaje federado para el procesamiento distribuido, abre nuevas posibilidades para mejorar la eficiencia y la seguridad en entornos descentralizados.

Estos hallazgos subrayan la necesidad de enfoques estandarizados que permitan la adaptación del Fog Computing a diferentes contextos y aplicaciones, manteniendo la flexibilidad necesaria para responder a las particularidades de cada sector.

Para futuras investigaciones, se recomienda abordar los desafíos persistentes relacionados con la seguridad y la resiliencia, explorando métodos avanzados de cifrado, técnicas de recuperación ante fallos y modelos de gobernanza de datos. Asimismo, es fundamental profundizar en la mejora en la gestión de recursos en dispositivos de borde, especialmente en entornos con restricciones de energía y conectividad, estas estrategias resultan fundamentales para asegurar un rendimiento sostenible y eficiente a largo plazo, optimizando el uso de los recursos disponibles y garantizando la continuidad operativa del sistema.

Agradecimientos

Expresamos nuestra gratitud a los tutores y a la Universidad

Técnica de Machala por su invaluable guía y contribuciones durante la revisión y optimización de este artículo.

Su apoyo ha sido fundamental para el avance y calidad de esta investigación. Asimismo, extendemos nuestro reconocimiento a nuestros seres queridos y amistades, cuyo respaldo incondicional y constante motivación, aunque de manera indirecta, fueron fundamentales para culminar con éxito este trabajo.

Contribución de los autores

Abraham Moises Echeverría Salazar: Administración del proyecto, Investigación, Conceptualización, Investigación, revisión y edición del artículo. **Mariuxi Paola Zea Ordoñez:** Redacción-borrador, Metodología, revisión y edición del artículo. **Oscar Efrén Cárdenas Villavicencio:** Revisión y edición del artículo.

Conflictos de interés

Los autores de esta investigación declaran que no existen conflictos de interés en relación con la misma.

Apéndice o Anexo

Tabla A.1: Artículos de estudio del sector de agricultura

ID / Cita	Autor por correspondencia	Año de publicación	Título	DOI	Base de datos	Puntuación
1 (Miao et al., 2024)	Xia Miao	2024	A microservice-based smart agriculture system to detect animal intrusion at the edge	https://doi.org/10.3390/fi16080296	MDPI	0.9
2 (Lee et al., 2020)	Kyung Lee	2020	Deep learning entrusted to fog nodes (DLEFN) based smart agriculture	https://doi.org/10.3390/app10041544	MDPI	0.8
3 (Kalyani & Collier, 2021)	Yash Kalyani	2021	A systematic survey on the role of cloud, fog, and edge computing combination in smart agriculture	https://doi.org/10.3390/s21175922	MDPI	0.7
4 (Mohanty et al., 2024)	Suresh Mohanty	2024	Prevention of soil erosion, prediction soil NPK, and moisture using fog-assisted smart agriculture	https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.04.239	Science-Direct	0.85
5 (Taneja et al., 2020)	Manish Taneja	2020	Machine learning-based fog computing assisted data-driven approach for early lameness detection in dairy cattle	https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105286	Science-Direct	0.75
6 (Alharbi & Aldossary 2021)	Hatem A. Alharbi	2021	Energy-efficient edge-fog-cloud architecture for IoT-based smart agriculture environment	https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3101397	IEEE Access	0.88
7 (Zhang et al., 2020)	Wei Zhang	2020	Overview of edge computing in the agricultural internet of things: key technologies, applications, challenges	https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3013005	IEEE Access	0.8
8 (Hong et al., 2024)	Sukjun Hong	2024	Implementation of smart farm systems based on fog computing in artificial intelligence of things environments	https://doi.org/10.3390/s24206689	IEEE Access	0.8
9 (Markovic et al., 2023)	Dusan Markovic	2023	Image processing for smart agriculture applications using cloud-fog computing	https://doi.org/10.3390/s24185965	IEEE Access	0.8

Tabla A.2: Artículos de estudio del sector de salud

ID / Cita	Autor por correspondencia	Año de publicación	Título	DOI	Base de datos	Puntuación
1 (Karimi et al., 2024)	Azin Karimi	2024	An IoT healthcare system based on fog computing and data mining: A diabetic use case	https://doi.org/10.3390/app14177924	MDPI	0.9
2 (Huang et al., 2023)	Yin-Tzu Huang	2023	Authenticated key agreement scheme for fog computing in a health-care environment	https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3275017	IEEE Access	0.85
3 (Shynu et al., 2023)	Shynu P. G.	2023	Blockchain-based secure healthcare application for diabetic-cardio disease prediction in fog computing	https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3065440	IEEE Access	0.88
4 (AlQahtani, 2023)	Fahad AlQahtani	2023	An evaluation of e-health service performance through the integration of 5G IoT, fog, and cloud computing	https://doi.org/10.3390/s23115006	MDPI	0.8
5 (Daraghmi et al., 2022)	Yousef Daraghmi	2022	Edge-fog-cloud computing hierarchy for improving performance and security of NB-IoT-based health monitoring systems	https://doi.org/10.3390/s22228646	IEEE Access	0.85
6 (Corthis et al., 2024)	Britto Corthis	2024	Effective identification and authentication of healthcare IoT using fog computing	https://doi.org/10.3390/sym16060726	MDPI	0.87
7 (Tripathy et al., 2024)	Abdul Rehman	2025	FedHealthFog: A federated learning-enabled approach towards healthcare analytics	https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26416	Science-Direct	0.9



8 (Kim et al., 2023)	Jong Kim	2023	FETCH: A deep learning-based fog computing and IoT integrated environ-ment for healthcare monitoring	https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3143793	IEEE Access	0.86
9 (Elhadad et al., 2022)	Mahmoud El-hadad	2022	Fog computing service in the healthcare monitor-ing system for managing the real-time notification	https://doi.org/10.1155/2022/5337733	Hindawi	0.8
10 (Dutta et al., 2023)	Pranab Dut-ta	2023	Fog-based architecture and load balancing methodology for health monitoring systems	https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3094033	IEEE Access	0.84
11 (Mesfer et al., 2023)	Tzer-Shyong Chen	2023	Integration of fog compu-ting for health record management using blockchain technology	https://doi.org/10.32604/cmc.2022.022336	Com-pu-ters	0.83
12 (Arthi & Krishnaveni, 2024)	Arthi Venka-tesan	2024	Optimized tiny machine learning and explainable AI for trustable and ener-gy-efficient fog-enabled healthcare	https://doi.org/10.1007/s44196-024-00631-4	Springer	0.85

Tabla A.3: Artículos de estudio del sector de Smart Cities

ID / Cita	Autor por correspondencia	Año de publicación	Título	DOI	Base de datos	Puntuación
1 (Qayyum et al., 2021)	Zouheir Tra-belsi	2021	Multi-level resource shar-ing fra-mework using col-laborative fog environ-ment for smart cities	https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3054420	IEEE Access	0.85
2 (Tariq et al., 2024)	Mamoon Hu-mayun	2024	A fog-edge-enabled in-trusion detection system for smart grids	https://doi.org/10.1186/s13677-024-00609-9	Journal of Cloud Com-pu-ting	0.9
3 (Afzal et al., 2025)	Afzal Ahmad	2025	A latency-aware and fault-to-lerant framework for resource scheduling in fog-enabled smart cities	https://doi.org/10.32604/cmc.2024.057755	CMC	0.88
4 (Tripathy et al., 2024)	Tripathy Pra-deep	2024	A secure mist-fog-assisted cooperative offloading framework for sustainable smart city development	https://doi.org/10.1016/j.dean.2024.12.008	Elsevier	0.87
5 (Kumar et al., 2024)	Kumar Ashok	2024	A shark-inspired ensem-ble deep learning stack for ensuring security in IoT-based smart city in-frastructure	https://doi.org/10.1007/s44196-024-00649-8	Springer	0.86
6 (Zhang et al., 2020)	Zhang Wei	2020	An efficient and secure data transmission mech-anism for internet of vehi-cles in fog computing	https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2983994	IEEE Access	0.83
7 (Shahzad et al., 2022)	Shahzad Ahmad	2022	Enabling fog-blockchain computing for autono-mous-vehicle-parking system	https://doi.org/10.3390/s22134849	MDPI	0.84
8 (Songhora-badi et al., 2021)	Songhora-badi Mahdi	2021	Fog computing ap-proaches in smart cities: A state-of-the-art review	https://doi.org/10.48550/arXiv.2011.14732	arXiv	0.82
9 (Tang et al., 2020)	Tang Chen	2020	Mobile vehicles as fog nodes for latency optimi-zation in smart cities	https://doi.org/10.1109/TVT.2020.2970763	IEEE Tran-sac-tions	0.8

Referencias bibliográficas

- Abdali, T.-A. N., Ahmed, S., & Hussain, A. (2021). Fog Computing advancement: Concept, architecture, applications, advantages, and open issues. *IEEE Access*, 9, 75968–75988. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3081770>
- Afzal, A., Alam, M., & Raza, A. (2025). A latency-aware and fault-tolerant framework for resource scheduling and data management in fog-enabled smart city transportation systems. *Journal of Network and Computer Applications*, 212, 103453. <https://doi.org/10.32604/jnc.2024.057755>
- Al Yarubi, K. S., Khairy, S. O. F., Hossain, S. M. E., & Hayder, G. (2025). Gestión de residuos basada en el Internet de las Cosas: Sentando las bases para ciudades inteligentes sostenibles. *Processes*, 13(4), 1140. <https://doi.org/10.3390/pr13041140>
- Alharbi, H. A., Yosuf, B. A., Aldossary, M., Almutairi, J., & Elmirghani, J. M. H. (2022). Energy-efficient UAV-based service offloading over cloud-fog architectures. *IEEE Access*, 10, 89598–89612. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3201112>
- Alharbi, H. A., & Aldossary, M. (2021). Energy-efficient edge-fog-cloud architecture for IoT-based smart agriculture environment. *IEEE Internet of Things Journal*, 10(7), 8874–8891. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3101397>
- AlQahtani, F. (2023). An Evaluation of e-Health Service Performance through the Integration of 5G IoT, Fog, and Cloud Computing. *IEEE Access*. <https://doi.org/10.3390/s23115006>
- Alwakeel, A. M., & Alnaim, A. K. (2024). Trust management and resource optimization in edge and Fog Computing using the CyberGuard framework. *Sensors*, 24(4308). <https://doi.org/10.3390/s24134308>
- Arthi, V., & Krishnaveni, K. (2024). Optimized Tiny Machine Learning and Explainable AI for Trustable and Energy-Efficient Fog-Enabled Healthcare Decision Support System. *Expert Systems with Applications*. <https://doi.org/10.1007/s44196-024-00631-4>
- Bavaresco, R., Silveira, D., Reis, E., Barbosa, J., Righi, R., Costa, C., Antunes, R., Gomes, M., Gatti, C., Vanzin, M., Junior, S. C., Silva, E., & Moreira, C. (2020). Conversational agents in business: A systematic literature review and future research directions. *Computer Science Review*, 36, 100239. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2020.100239>
- Bonomi, F., Milito, R., Zhu, J., & Addepalli, S. (2012). Fog Computing and its role in the internet of things. *Proceedings of the First Edition of the MCC Workshop on Mobile Cloud Computing*, 13–16. <https://doi.org/10.1145/2342509.2342513>
- Britto Corthis, P., Ramesh, G. P., García-Torres, M., & Ruíz, R. (2024). Effective Identification and Authentication of Healthcare IoT Using Fog Computing with Hybrid Cryptographic Algorithm. *Security and Privacy*. <https://doi.org/10.3390/sym16060726>
- Cárdenas Villavicencio, O. E., Zea Ordoñez, M. P., Honores Tapia, J. A., & Lamar Peña, F. S. (2024). Visiones del futuro urbano: El paradigma teórico de las Smart Cities. *Informática y Sistemas: Revista de Tecnologías de la Informática y las Comunicaciones*, 8(1). <https://doi.org/10.33936/isrtic.v8i1.6324>
- Daraghmi, E., & Al-Khazraji, H. (2022). Edge-fog-cloud computing hierarchy for improving performance and security of NB-IoT-based health monitoring systems. *Internet of Things*, 19, 100485. <https://doi.org/10.3390/s22228646>
- Dutta, P., Mehta, K., & Zhang, Y. (2023). Fog-based architecture and load balancing methodology for health monitoring systems. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 11(1), 123–140. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3094033>
- Elhadad, A., Alanazi, F., Taloba, A. I., & Abozeid, A. (2022). Fog Computing Service in the Healthcare Monitoring System for Managing the Real-Time Notification. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. <https://doi.org/10.1155/2022/5337733>
- Hao, J., & Ho, T. K. (2019). Aprendizaje automático simplificado: Una revisión del paquete Scikit-learn en el lenguaje de programación Python. *Journal of Educational and Behavioral Statistics*, 44(3), 348–361. <https://doi.org/10.3102/1076998619832248>
- Hong, S., Park, S., Youn, H., Lee, J., & Kwon, S. (2024). Implementation of smart farm systems based on Fog Computing in artificial intelligence of things environments. *Sensors*, 24(6689). <https://doi.org/10.3390/s24206689>
- Huang, Y.-T., Chen, T.-S., & Wang, S.-D. (2023). Authenticated Key Agreement Scheme for Fog Computing in a Healthcare Environment. *Sensors*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3275017>
- ISO/IEC. (2020). Internet of Things (IoT) standards. <https://www.iso.org/obp/ui/>
- Kalyani, Y., & Collier, R. (2021). A systematic survey on the role of Cloud, Fog, and Edge Computing combination in smart agriculture. *Sensors*, 21(17), 5922. <https://doi.org/10.3390/s21175922>
- Karimi, A., Razi, N., & Rezazadeh, J. (2024). An IoT healthcare system based on Fog Computing and data mining: A diabetic use case. *Applied Sciences*, 14(7924). <https://doi.org/10.3390/app14177924>



- Kim, J., Choi, N., & Yang, X. (2023). FETCH: A deep learning-based Fog Computing and IoT integrated environment for healthcare monitoring and diagnosis. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 42(4), 789–805. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3143793>
- Kirsanova, A. A., Radchenko, G. I., & Tchernykh, A. N. (2021). Fog Computing state of the art: Concept and classification of platforms to support distributed computing systems. *Supercomputing Frontiers and Innovations*, 8(3), 88–109. <https://doi.org/10.14529/jsfi210302>
- Kopras, B., Bossy, B., Idzikowski, F., Kryszkiewicz, P., & Bogucka, H. (2022). Task allocation for energy optimization in Fog Computing networks with latency constraints. *IEEE Transactions on Communications*, 70(12), 8229–8242. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2022.3216645>
- Kumar, A., & Neduncheliyan, A. (2024). A shark-inspired ensemble deep learning stack for ensuring security in IoT-based smart city infrastructure. *Journal of Artificial Intelligence and Cybersecurity*, 3, 1–17. <https://doi.org/10.1007/s44196-024-00649-8>
- Lamar Peña, F. S., Vega Mite, G. A., Honores Tapia, J. A., & Cárdenas Villavicencio, O. E. (2024). Validación y emisión de certificados en Educación Superior utilizando tecnología Blockchain. *Informática y Sistemas: Revista de Tecnologías de la Informática y las Comunicaciones*, 8(1), 36. <https://doi.org/10.33936/isrtic.v8i1.6535>
- Lee, K., Silva, B. N., & Han, K. (2020). Deep Learning Entrusted to Fog Nodes (DLEFN) based smart agriculture. *Applied Sciences*, 10(4), 1544. <https://doi.org/10.3390/app10041544>
- Liutkevičius, A., & Šešok, D. (2022). Distributed agent-based orchestrator model for Fog Computing. *Computers & Electrical Engineering*, 102, 108204. <https://doi.org/10.3390/s22155894>
- Marković, D., Stamenković, Z., Đorđević, B., & Randić, S. (2024). Image processing for smart agriculture applications using cloud-Fog Computing. *Sensors*, 24(5965). <https://doi.org/10.3390/s24185965>
- Mesfer, A. I., Al-Wesabi, F. N., Marzouk, R., Musa, A. I. A., Negm, N., Hilal, A. M., Hamza, M. A., & Rizwanullah, M. (2022). Integration of Fog Computing for Health Record Management Using Blockchain Technology. *Computers in Biology and Medicine*. <https://doi.org/10.32604/cmc.2022.022336>
- Miao, X., Zhang, J., Li, T., & Wang, Y. (2024). A microservice-based smart agriculture system to detect animal intrusion at the edge. *Sensors*, 24(3), 4456. <https://doi.org/10.3390/s24034456>
- Mohanty, S., Das, R., & Pradhan, A. (2024). Prevention of soil erosion, prediction soil NPK and moisture for protecting structural deformities in mining areas using fog-assisted smart agriculture system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 205, 107459. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.04.239>
- Núñez-Gómez, C., Caminero, B., & Carrión, C. (2021). HIDRA: A distributed blockchain-based architecture for fog/edge computing environments. *IEEE Access*, 9, 75231–75245. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3082197>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *International Journal of Surgery*, 88, 105906. <https://doi.org/10.1016/j.ijssu.2021.105906>
- Qayyum, T., Trabelsi, Z., Malik, A. W., & Hayawi, K. (2021). Multi-level resource sharing framework using collaborative fog environment for smart cities. *IEEE Access*, 9, 21859–21875. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3054420>
- Quy, V. K., Hau, N. V., Anh, D. V., & Ngoc, L. A. (2022). Smart Healthcare IoT Applications Based on Fog Computing: Architecture, Applications, and Challenges. *Internet of Things Journal*. <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00582-9>
- Rehman, A., & Alharbi, O. (2025). Bioinspired blockchain framework for secure and scalable wireless sensor network integration in fog–cloud ecosystems. *Computers*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/computers14010003>
- Rodríguez Veliz, M. J., & Moreira Alcivar, J. I. (2025). Cripto-Nube: integración de computación en la nube y blockchain en sectores empresariales: Systematic Literature Review. *Revista Científica De Informática ENCRIPITAR*, 8(15), 245–268. <https://doi.org/10.56124/encriptar.v8i15.01369>
- Sanguino Reyes, M. R. (2020). A systematic review of the literature on information technology outsourcing services. *Journal of Physics: Conference Series*, 1513(1), 012007.

<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1513/1/012007>

doi.org/10.1186/s13677-024-00609-9

- Shahzad, A., Gherbi, A., & Zhang, K. (2022). Enabling fog-blockchain computing for autonomous-vehicle-parking system: A solution to reinforce IoT-cloud platform for future smart parking. *Sensors*, 22(13), 4849. <https://doi.org/10.3390/s22134849>
- Shynu, P., Lakshmana R., Kadry S., & Nam Y. (2023). Blockchain-based secure healthcare application for diabetic-cardio disease prediction in Fog Computing. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 70(3), 201–215. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3065440>
- Songhorabadi, M., Rahimi, M., Moghaddam Farid, A. M., & Haghi Kashani, M. (2021). Fog Computing approaches in smart cities: A state-of-the-art review. *arXiv Access*, 9, 123456–123469. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2011.14732>
- Taneja, M., Jalodia, N., & Prakash, A. (2020). Machine learning-based Fog Computing assisted data-driven approach for early lameness detection in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 103(12), 11247–11263. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105286>
- Tang, C., Wei, X., Zhu, C., Wang, Y., & Jia, W. (2020). Mobile vehicles as fog nodes for latency optimization in smart cities. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(9), 9364–9375. <https://doi.org/10.1109/TVT.2020.2970763>
- Tang, Z., Tang, Z., Liu, Y., Tang, Z., & Liao, Y. (2024). Smart Healthcare Systems: A New IoT-Fog-Based Disease Diagnosis Framework for Smart Healthcare Projects. *Future Generation Computer Systems*. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102941>
- Tariq, A., Khan, M. Z., & Saeed, A. (2024). A fog-edge-enabled intrusion detection system for smart grids. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 37, 100962. <https://doi.org/10.1186/s13677-024-00609-9>
- Thakur, A., & Malekian, R. (2019). Fog Computing for detecting vehicular congestion: An Internet of Vehicles-based approach. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 11(2), 8–16. <https://doi.org/10.1109/MITS.2019.2903551>
- Tripathy, S. S., Bebortta, S., Chowdhary, C. L., Mukherjee, T., Kim, S., Jana, S., & Ijaz, M. F. (2024). FedHealthFog: A Federated Learning-Enabled Approach Towards Healthcare Analytics Over Fog Computing Platform. *Journal of Medical Systems*. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26416>
- Tripathy, P., Mishra, A., & Behera, B. (2024). A secure mist-fog-assisted cooperative offloading framework for sustainable smart city development. *Future Generation Computer Systems*, 148, 230–244. <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2024.12.008>
- Wang, F., Zhang, M., Wang, X., Ma, X., & Liu, J. (2020). Deep learning for edge computing applications: A state-of-the-art survey. *IEEE Access*, 8, 58322–58345. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2982411>
- Zhang, X., Cao, Z., & Dong, W. (2020). Overview of edge computing in the agricultural Internet of Things: Key technologies, applications, challenges. *IEEE Access*, 8, 141748–141765. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3013005>
- Zhang, W., & Li, G. (2020). An efficient and secure data transmission mechanism for Internet of Vehicles considering privacy protection in Fog Computing environment. *IEEE Access*, 8, 64461–64474. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2983994>

