

14

EPISTEME & PRAXIS | Revista Científica Multidisciplinaria | 2960-8341

EVOLUCIÓN

DE SISTEMAS EXPERTOS EN ENTORNOS CLOUD: TENDENCIAS Y PATRONES 2020-2024

EVOLUTION OF EXPERT SYSTEMS IN CLOUD ENVIRONMENTS: TRENDS AND PATTERNS 2020-2024

Óscar Alfonso Obando-Cruz¹

E-mail: oobando@istvr.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6354-313X>

Guillermo Antonio Chalco-Méndez¹

E-mail: gchalco@istvr.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7491-5090>

Ivette Auxiliadora Mateo-Washbrum¹

E-mail: imateo@istvr.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7523-7219>

Lenin Homero Campoverde-Nevarez¹

E-mail: lcampoverde@istvr.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2645-3334>

Diana Carolina Decimavilla-Alarcón¹

E-mail: ddecimavilla@istvr.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0375-0216>

¹ Instituto Superior Tecnológico Vicente Rocafuerte. Ecuador.

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Obando-Cruz, O. A., Chalco-Méndez, G. A., & Mateo-Washbrum, I. A., Campoverde-Nevarez, L. H., & Decimavilla-Alarcón, D. C. (2025). Evolución de sistemas expertos en entornos cloud: Tendencias y patrones 2020-2024. *Revista Episteme & Praxis*, 3(3), 145-160.

Presentación: 22/05/2025

Aceptación: 30/07/2025

Publicación: 01/09/2025



© 2025; Los autores. Este es un artículo en acceso abierto, distribuido bajo los términos de una licencia Creative Commons que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio siempre que la obra original sea correctamente citada.

RESUMEN

Esta investigación caracteriza sistemáticamente la evolución de sistemas expertos en entornos cloud durante 2020-2024 mediante un enfoque descriptivo-correlacional que analiza 22 implementaciones documentadas en literatura científica. Los hallazgos revelan tres categorías metodológicas principales: sistemas basados en reglas adaptativas (45.5%), sistemas híbridos con aprendizaje automático (36.4%), y sistemas distribuidos con inferencia contextual (18.1%). El análisis por dominios específicos identifica aplicaciones médicas como las más maduras (40.9%), seguidas por detección de anomalías (31.8%) y soporte a la decisión (27.3%), con precisiones promedio de 86.4%, 97.1% y 89.8% respectivamente. El análisis revela relaciones consistentes entre integración multimedia y adopción empresarial, así como entre consideraciones de seguridad y escalabilidad organizacional. Los desafíos de implementación se categorizan en regulatorios (37.1% de impacto), técnicos (34.2%) y organizacionales (28.7%). La evolución temporal evidencia tres fases distintivas: adaptación (2020-2021), consolidación (2022-2023) y especialización (2023-2024). Los sistemas que incorporan cumplimiento normativo desde el diseño muestran adopción sustancialmente superior, confirmando la importancia crítica de consideraciones regulatorias para escalabilidad en entornos cloud.

Palabras clave:

Sistemas expertos, computación en la nube, inteligencia artificial, aprendizaje automático, detección de anomalías, diagnóstico médico, cumplimiento normativo.

ABSTRACT

This research systematically characterizes the evolution of expert systems in cloud environments during 2020-2024 through a descriptive-correlational approach analyzing 22 implementations documented in scientific literature. Findings reveal three main methodological categories: adaptive rule-based systems (45.5%), hybrid systems with machine learning (36.4%), and distributed systems with contextual inference (18.1%). Domain-specific analysis identifies medical applications as the most mature (40.9%), followed by anomaly detection (31.8%) and decision support (27.3%), with average accuracy rates of 86.4%, 97.1%, and 89.8% respectively. Analysis reveals consistent relationships between multimedia integration and enterprise adoption, as well as between security considerations and organizational scalability. Implementation challenges are categorized as regulatory (37.1% impact), technical (34.2%), and organizational (28.7%). Temporal evolution evidences three distinctive phases: adaptation (2020-2021), consolidation (2022-2023), and specialization (2023-2024). Systems incorporating regulatory compliance from design show substantially superior adoption rates, confirming the critical importance of regulatory considerations for scalability in cloud environments.

Keywords:

Expert systems, cloud computing, artificial intelligence, machine learning, anomaly detection, medical diagnosis, regulatory compliance.

INTRODUCCIÓN

La integración de sistemas expertos en infraestructuras cloud ha experimentado una transformación significativa durante el período 2020-2024, caracterizada por la adopción masiva de tecnologías de inteligencia artificial distribuida y el desarrollo de nuevos paradigmas de implementación que desafían los enfoques tradicionales de desarrollo y despliegue, esta evolución representa un fenómeno tecnológico complejo que requiere caracterización sistemática para comprender las tendencias emergentes, los patrones de adopción y las relaciones entre las diferentes variables que influyen en la efectividad de estos sistemas en entornos distribuidos.

Los sistemas expertos, definidos tradicionalmente como sistemas basados en computadora capaces de resolver problemas complejos en dominios específicos con un nivel de desempeño comparable al de expertos humanos han evolucionado considerablemente desde sus fundamentos conceptuales, autores identifican esta evolución a través de cinco generaciones de sistemas de inteligencia artificial, desde sistemas expertos tradicionales hasta sistemas asistentes inteligentes basados en contexto, destacando la necesidad de marcos conceptuales más sofisticados para abordar la complejidad de los entornos cloud contemporáneos (Brézillon, 2011).

La convergencia de sistemas expertos con tecnologías cloud presenta características distintivas que distinguen este período de desarrollos anteriores, la integración de inteligencia artificial en sistemas de automatización tiene potencial para mejorar la eficiencia y abordar desafíos técnicos no resueltos, aunque la adopción industrial se ve obstaculizada por la falta de documentación estandarizada para las composiciones complejas de sistemas de automatización, software de IA y hardware de producción (Schieseck et al., 2024), esta problemática se amplifica en entornos cloud donde la complejidad se incrementa exponencialmente debido a la naturaleza distribuida de los recursos y las interdependencias entre componentes heterogéneos.

La implementación de sistemas expertos en infraestructuras cloud durante 2020-2024 ha revelado patrones emergentes que caracterizan su aplicación en dominios específicos, en el ámbito médico, desarrollaron un sistema experto multimedia que utiliza algoritmos de encadenamiento hacia adelante y hacia atrás para diagnosticar enfermedades comunes, incorporando elementos multimedia que incluyen texto, imágenes, audio y video para alcanzar soluciones mediante diálogo con el usuario. Similarmente, Hadi & Hanifa (2023), implementaron un sistema experto para diagnosticar degeneración macular utilizando el método Certainty Factor, demostrando la aplicabilidad de estas tecnologías en contextos médicos especializados.

El dominio de detección de anomalías ha emergido como un área particularmente relevante para la caracterización de sistemas expertos en cloud, como el propuesto por Diamanti et al. (2022), quienes proponen un framework modular de IA para detectar anomalías hacia automatización de bucle cerrado, diseñando un marco empoderado por IA capaz de evaluar el estado de funcionamiento y las desviaciones de estado de una infraestructura basada en software, esta aproximación ilustra cómo los sistemas expertos contemporáneos integran capacidades de aprendizaje automático para abordar la complejidad de infraestructuras distribuidas.

La evolución metodológica de estos sistemas presenta aspectos que requieren análisis detallado, la Straub (2021), propone técnicas para superar limitaciones significativas en el desarrollo manual de redes regla-hechos, utilizando redes más grandes y densas que se entrenan, podan, revisan manualmente y reentrenan para uso, demostrando tasas de error tan bajas como 3.9% y medianas de 1.2%, esta metodología representa una adaptación significativa de sistemas expertos tradicionales para aprovechar capacidades de aprendizaje automático distribuido.

Las consideraciones de seguridad y privacidad en entornos cloud constituyen un aspecto crítico que influye en la adopción de sistemas expertos, Olateju et al. (2024), abordan el desafío de la detección de anomalías mediante técnicas avanzadas impulsadas por IA para reducir falsos positivos y mejorar la seguridad de datos en entornos de computación en la nube, las implicaciones de marcos regulatorios como GDPR (General Data Protection Regulation) de la Unión Europea añaden complejidad adicional, como evidencia Barati & Rana (2022), en su análisis del cumplimiento GDPR en la entrega de servicios basados en cloud, mostrando cómo las reglas GDPR pueden aparecer como opcodes en contratos inteligentes para verificar operaciones de proveedores en datos de usuario de manera transparente y automática.

La caracterización de metodologías y técnicas específicas implementadas durante este período revela diversidad significativa en enfoques y aplicaciones, Ganzhur et al. (2023), proponen el uso de lógica continua para representación más precisa de datos difusos comparado con lógica tradicional, permitiendo que sistemas expertos analicen procesos y asistan en varias etapas mediante inferencia difusa, esta diversidad metodológica sugiere la existencia de patrones subyacentes que podrían caracterizar la maduración del campo durante el período estudiado.

Los desafíos de implementación presentan relaciones complejas con factores técnicos, organizacionales y regulatorios. Lakshmi Revathi et al. (2024), identifican beneficios como menores costos, mejor escalabilidad y mayor cooperación, aunque destacan desafíos importantes

incluyendo preocupaciones de seguridad de datos, problemas de cumplimiento regulatorio y dificultades de integración con sistemas legados existentes. Estas relaciones sugieren patrones sistemáticos entre variables que influyen en la adopción y escalabilidad de sistemas expertos en cloud.

La ausencia de marcos comprensivos para caracterizar la evolución de sistemas expertos en entornos cloud durante 2020-2024 representa una brecha significativa en la comprensión del fenómeno, mientras estudios previos han abordado aspectos específicos como aplicaciones médicas, detección de anomalías o consideraciones de seguridad de manera aislada, no existe análisis sistemático que caracterice las tendencias metodológicas generales, identifique patrones de implementación transversales a dominios, o examine las relaciones entre desafíos técnicos y factores de adopción en el contexto específico de la transformación digital acelerada durante este período.

Por tanto, esta investigación tiene como objetivos específicos: identificar y categorizar las principales metodologías y técnicas de inteligencia artificial implementadas en sistemas expertos basados en cloud, examinando su aplicación en dominios específicos como diagnóstico médico, detección de anomalías y sistemas de soporte a la decisión, además de evaluar los desafíos de implementación y las consideraciones de seguridad, privacidad y cumplimiento normativo que enfrentan los sistemas expertos en entornos cloud, analizando su impacto en la adopción y escalabilidad de estas tecnologías.

La comprensión sistemática de estos fenómenos contribuirá significativamente al conocimiento teórico sobre la evolución de sistemas expertos distribuidos y proporcionará insights prácticos para investigadores, arquitectos de sistemas y profesionales que desarrollan e implementan estas tecnologías en contextos empresariales y académicos, facilitando decisiones informadas sobre selección metodológica, estrategias de implementación y consideraciones de cumplimiento normativo en futuros desarrollos.

Los sistemas expertos constituyen una rama especializada de la inteligencia artificial que busca replicar el proceso de pensamiento y conocimiento experto para resolver problemas particulares en dominios específicos, Rani (2014), define los sistemas expertos como programas intensivos en conocimiento que resuelven problemas en dominios que requieren cantidades considerables de experiencia técnica, representando una de las áreas de aplicación más grandes de la inteligencia artificial esta conceptualización fundamental establece que los sistemas expertos funcionan como servicios de consultoría computarizados, también denominados sistemas de orientación de información, que explotan las habilidades

especializadas o información mantenida por grupos de personas en áreas específicas.

La arquitectura tradicional de sistemas expertos comprende componentes fundamentales que han evolucionado significativamente en el contexto de entornos distribuidos, la base de conocimientos organiza la recopilación de hechos y reglas, mientras que el motor de inferencia incluye algoritmos como Forward Chaining y Backward Chaining para alcanzar soluciones mediante procesamiento de conocimiento almacenado esta estructura clásica proporciona el fundamento conceptual sobre el cual se construyen adaptaciones contemporáneas para entornos cloud, donde la distribución de componentes y la gestión de estado plantean desafíos arquitectónicos adicionales.

La evolución de sistemas expertos hacia entornos distribuidos puede entenderse a través del marco generacional propuesto por Brézillon (2011), quien identifica cinco generaciones de sistemas de inteligencia artificial: sistemas expertos tradicionales, sistemas cognitivos conjuntos, sistemas inteligentes, sistemas asistentes inteligentes, y la generación emergente de sistemas asistentes inteligentes basados en contexto, esta progresión refleja una consideración radicalmente diferente del contexto y sus relaciones con usuarios, tareas, situaciones y entornos donde las tareas son realizadas por el usuario, sugiriendo que los sistemas expertos contemporáneos requieren marcos conceptuales que incorporen observación de usuarios a través de comportamientos en lugar de bibliotecas de perfiles.

La transición generacional hacia sistemas inteligentes adaptativos presenta implicaciones significativas para implementaciones en cloud. Straub (2021), propone el desarrollo de un sistema de inteligencia artificial adaptativo multidominio que combine técnicas clásicas de IA con adaptaciones modernas, utilizando inteligencia artificial generativa para crear redes y conjuntos de datos de entrenamiento, este enfoque representa una evolución conceptual que permite a sistemas de IA aprender sobre dominios desconocidos a priori y desarrollar vías de razonamiento para tomar decisiones, aunque requiere procesos de aprendizaje antes del uso, diferenciándose de los estándares tradicionales de inteligencia artificial general.

La caracterización de metodologías implementadas en sistemas expertos contemporáneos revela diversidad taxonómica significativa que debe ser sistematizada para facilitar la comprensión de patrones de implementación, los métodos de inferencia constituyen una dimensión fundamental de clasificación, donde el encadenamiento hacia adelante utiliza factores dados contra reglas registradas en el sistema para derivar conclusiones, mientras que el encadenamiento hacia atrás parte de conclusiones

hipotéticas para buscar evidencia de apoyo (Anwar, 2023).

Las técnicas de manejo de incertidumbre representan otra dimensión taxonómica crucial, el método Certainty Factor proporciona soluciones mediante cálculo de valores de certeza e incertidumbre, siendo ideal para analizar datos inciertos como demuestra su aplicación en diagnóstico de degeneración macular (Hadi & Hanifa, 2023), complementariamente, Savilla et al. (2023), aplican el método Certainty Factor para diagnóstico de enfermedades ortopédicas, obteniendo niveles de confianza específicos como 89.60% para espondilosis cervical, ilustrando la efectividad cuantificable de estas aproximaciones.

La lógica difusa emerge como framework metodológico particularmente relevante para sistemas distribuidos, Ganzhur et al. (2023), proponen el uso de lógica continua que permite representación más precisa de datos difusos comparado con lógica tradicional, donde la construcción del esquema de lógica continua involucra el uso de conjuntos difusos tanto para variables de entrada como de salida, utilizados posteriormente para calcular valores de funciones de membresía de variables lingüísticas de conocimiento de salida.

La implementación de sistemas expertos en infraestructuras cloud requiere marcos teóricos que aborden la complejidad inherente de sistemas distribuidos. Schieseck et al. (2024), proponen un modelo formal utilizando estándares y ontologías para proporcionar documentación clara y estructurada de aplicaciones de IA en sistemas de automatización, el modelo de información propuesto para inteligencia artificial en sistemas de automatización utiliza patrones de diseño ontológico para mapear y vincular varios aspectos de sistemas de automatización y software de IA.

La gestión de estado distribuido presenta desafíos teóricos específicos que requieren frameworks adaptativos, Diamanti et al. (2022), desarrollan un framework modular de IA que aprende las condiciones de trabajo nominales de la infraestructura, respecto a las cuales se detectan anomalías y se caracterizan rastreando la causa raíz de la capa y componente, incluyendo una técnica de evaluación de estado de red que aprovecha la caracterización de anomalías a través de sus síntomas más visibles.

Los sistemas expertos contemporáneos incorporan elementos de aprendizaje automático que requieren modelos conceptuales híbridos, Straub (2021), presenta una técnica para superar limitaciones significativas comparado con redes neuronales, específicamente la necesidad de desarrollo manual de redes regla-hechos, proponiendo el uso de redes regla-hechos más grandes y densas que las necesidades de aplicación, que se entrenan, podan, revisan manualmente y reentrenan para uso y, por otro lado, los sistemas expertos con entrenamiento por descenso

de gradiente representan una convergencia conceptual significativa, el mismo autor presenta el uso de un sistema experto de aprendizaje automático desarrollado con nodos asignados con significado y correlaciones, donde múltiples implementaciones potenciales se consideran y evalúan bajo diferentes condiciones, incluyendo diferentes niveles de error de red y aumento, y diferentes niveles de entrenamiento.

La caracterización sistemática de sistemas expertos en cloud requiere identificación de variables relevantes que capturen tanto aspectos técnicos como organizacionales, las variables de rendimiento incluyen métricas de precisión diagnóstica, como la precisión del 76.3% lograda en sistemas de diagnóstico pediátrico mediante método Bayesiano (Astawa et al., 2020), y tasas de error tan bajas como 3.9% con medianas de 1.2% en redes regla-hechos entrenadas por descenso de gradiente (Straub, 2021).

Las dimensiones de seguridad y privacidad constituyen variables críticas en entornos cloud, Barati & Rana (2022), identifican que las reglas GDPR implementadas para operaciones de datos pueden ser ambiguas y abiertas a interpretación, haciendo que la verificación manual sea un proceso consumidor de tiempo y propenso a errores para proveedores cloud, la codificación de reglas GDPR con cada operación registrada en Blockchain para propósitos de auditoría representa una aproximación sistemática para gestionar estas variables.

Las metodologías para estudiar fenómenos similares en la literatura proporcionan precedentes valiosos para caracterización sistemática, los estudios de caso múltiples permiten análisis comparativo entre diferentes implementaciones, como demuestra la aplicación de sistemas expertos en diversos dominios médicos incluyendo diagnóstico de enfermedades de piel (Sari & Eviyanti, 2021), enfermedades pulmonares y diabetes (Atika Sari et al., 2022).

El análisis longitudinal emerge como metodología particularmente apropiada para caracterizar evolución durante períodos específicos, la aplicación de técnicas avanzadas impulsadas por IA para reducir falsos positivos en detección de anomalías. Olateju et al. (2024), demuestra cómo el análisis temporal puede revelar patrones de mejora metodológica y optimización de rendimiento en contextos distribuidos.

La síntesis de estos elementos teóricos sugiere un marco conceptual integrador que incorpora: arquitecturas híbridas que combinan sistemas expertos tradicionales con capacidades de aprendizaje automático distribuido, metodologías de inferencia adaptativas que manejan incertidumbre en entornos dinámicos, consideraciones de seguridad y privacidad integradas en el diseño arquitectónico, y métricas de rendimiento que capturan tanto efectividad técnica como viabilidad organizacional.

Este marco conceptual proporciona la base teórica para analizar e interpretar patrones de implementación, tendencias metodológicas y relaciones entre variables que caracterizan la evolución de sistemas expertos en entornos cloud durante el período 2020-2024, facilitando la comprensión sistemática de este fenómeno tecnológico complejo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación adopta un enfoque descriptivo-correlacional que se fundamenta en la necesidad de caracterizar sistemáticamente la evolución de sistemas expertos en entornos cloud durante el período 2020-2024 y examinar las relaciones entre variables técnicas, organizacionales y regulatorias que influyen en su implementación. La selección de este enfoque metodológico se justifica por su efectividad demostrada en estudios tecnológicos similares que requieren comprensión profunda de fenómenos complejos sin manipulación experimental de variables.

Los precedentes metodológicos en la literatura respaldan esta decisión. Diamanti et al. (2022), utilizaron aproximaciones descriptivas para caracterizar frameworks modulares de IA en infraestructuras basadas en software, demostrando la validez de enfoques observacionales para entender comportamientos de sistemas distribuidos complejos, similarmente, Olateju et al. (2024), emplearon análisis comparativo de técnicas de IA para reducir falsos positivos en detección de anomalías, ilustrando cómo la caracterización sistemática puede revelar patrones significativos en tecnologías emergentes.

La metodología seleccionada integra elementos de análisis longitudinal temporal con caracterización transversal de dominios, permitiendo identificar tanto tendencias evolutivas como patrones de implementación específicos por sector, esta combinación metodológica se construye sobre aproximaciones exitosas documentadas en estudios de sistemas expertos médicos (Hadi & Hanifa, 2023); y sistemas de automatización industrial (Schieseck et al., 2024), adaptando sus marcos analíticos para abordar la complejidad específica de entornos cloud distribuidos.

El paradigma de investigación adoptado se fundamenta en el positivismo postempírico, reconociendo que los fenómenos tecnológicos pueden ser observados y caracterizados sistemáticamente mediante métodos rigurosos que respeten la complejidad inherente de sistemas distribuidos, el diseño específico corresponde a un estudio descriptivo-correlacional de tipo longitudinal retrospectivo con análisis transversal por dominios de aplicación.

Esta metodología híbrida combina elementos de análisis de contenido sistemático para caracterizar metodologías y técnicas implementadas, análisis estadístico descriptivo e inferencial para identificar patrones y tendencias, y análisis correlacional multivariado para examinar

relaciones entre variables de implementación, adopción y escalabilidad. El diseño incorpora además análisis de casos múltiples comparativos para contrastar implementaciones en diferentes dominios, siguiendo precedentes establecidos por Astawa et al. (2020), en sistemas de diagnóstico pediátrico y Savilla et al. (2023), en aplicaciones ortopédicas.

La triangulación metodológica se logra mediante la combinación de análisis cuantitativo de métricas de rendimiento, caracterización cualitativa de enfoques metodológicos, y análisis documental de consideraciones regulatorias y de seguridad, esta aproximación multimétodo permite validación cruzada de hallazgos y proporciona perspectiva comprehensiva del fenómeno estudiado.

La población de estudio comprende sistemas expertos implementados en entornos cloud durante el período 2020-2024, documentados en literatura científica indexada y reportes técnicos especializados, las unidades de análisis primarias incluyen publicaciones científicas que describen implementaciones específicas, metodologías aplicadas y resultados obtenidos en sistemas expertos distribuidos. La muestra se estructura en tres estratos principales basados en dominios de aplicación identificados en el marco teórico: sistemas expertos médicos que incluyen aplicaciones de diagnóstico y soporte clínico, sistemas de detección de anomalías enfocados en seguridad y monitoreo de infraestructuras, y sistemas de soporte a la decisión aplicados en contextos organizacionales y de automatización industrial.

Los criterios de inclusión comprenden estudios publicados entre 2020-2024 que documenten implementaciones de sistemas expertos en infraestructuras cloud o distribuidas, presenten metodologías específicas de inteligencia artificial aplicadas, reporten métricas de rendimiento o consideraciones de implementación, y aborden aspectos de seguridad, privacidad o cumplimiento normativo y los criterios de exclusión eliminan estudios teóricos sin implementación práctica, propuestas conceptuales sin validación empírica, y estudios centrados exclusivamente en algoritmos sin consideraciones de infraestructura distribuida.

Las fuentes de datos primarias incluyen bases de datos científicas especializadas que contienen literatura revisada por pares sobre sistemas expertos y computación cloud, la recolección de datos sigue un protocolo sistemático adaptado de metodologías establecidas para revisiones de literatura tecnológica, incorporando elementos específicos para capturar características de implementación en entornos distribuidos. Los procedimientos de búsqueda utilizan términos controlados relacionados con sistemas expertos, inteligencia artificial, computación cloud, y metodologías específicas identificadas en el marco teórico, en cuanto a la estrategia de búsqueda

combina términos booleanos para optimizar la recuperación de estudios relevantes mientras minimiza ruido informacional. Los términos de búsqueda incluyen combinaciones de “expert systems”, “artificial intelligence”, “cloud computing”, “distributed systems”, “anomaly detection”, “medical diagnosis”, y “decision support”.

La extracción de datos utiliza un formulario estructurado diseñado específicamente para capturar variables relevantes identificadas en el marco teórico, las categorías de datos incluyen características metodológicas de los sistemas implementados, métricas de rendimiento reportadas, dominios de aplicación específicos, consideraciones de seguridad y privacidad abordadas, desafíos de implementación identificados, y factores que influyen en adopción y escalabilidad.

Las variables dependientes primarias comprenden características metodológicas de sistemas expertos implementados, categorizadas según taxonomías establecidas en el marco teórico: métodos de inferencia aplicados, técnicas de manejo de incertidumbre utilizadas, arquitecturas de sistema adoptadas, y enfoques de integración con servicios cloud. Estas variables se operacionalizan mediante códigos categóricos que permiten análisis estadístico apropiado.

Las variables de rendimiento incluyen métricas cuantitativas de efectividad como precisión diagnóstica, tasas de error, tiempos de respuesta, y escalabilidad de sistema, estas métricas se normalizan cuando es necesario para permitir comparaciones entre estudios que utilizan diferentes escalas o contextos de medición.

Las variables independientes abarcan factores contextuales que podrían influir en características de implementación: dominio de aplicación específico, período temporal de implementación dentro de 2020-2024, tipo de infraestructura cloud utilizada, y consideraciones regulatorias aplicables. Variables adicionales incluyen características organizacionales como tamaño de implementación, recursos disponibles, y experiencia previa con tecnologías de IA.

El análisis de datos combina técnicas estadísticas descriptivas e inferenciales apropiadas para el tipo de datos recolectados y los objetivos de investigación establecidos, el análisis descriptivo caracteriza la distribución de metodologías implementadas, tendencias temporales en adopción de técnicas específicas, y patrones de aplicación por dominio mediante estadísticas de frecuencia, medidas de tendencia central y variabilidad.

El análisis correlacional examina relaciones entre variables utilizando coeficientes de correlación apropiados para el nivel de medición de cada variable, las relaciones entre variables categóricas se analizan mediante pruebas de chi-cuadrado y medidas de asociación como V

de Cramer, las correlaciones entre variables continuas utilizan coeficientes de Pearson o Spearman según la distribución de datos.

El análisis temporal emplea técnicas de series de tiempo para identificar tendencias evolutivas en adopción de metodologías específicas y cambios en patrones de implementación durante el período estudiado y la segmentación por dominios permite análisis de subgrupos para identificar diferencias específicas por sector de aplicación.

La validación de contenido se logra mediante revisión por expertos independientes de los instrumentos de extracción de datos y categorización de variables, la confiabilidad inter-evaluador se establece mediante codificación dual de una muestra de estudios por evaluadores independientes, calculando coeficientes de concordancia apropiados. La validación de constructo se verifica mediante análisis factorial exploratorio de variables relacionadas para confirmar la estructura dimensional propuesta en el marco teórico, la validez externa se aborda mediante comparación de hallazgos con estudios independientes en áreas relacionadas y análisis de transferibilidad de resultados a contextos similares.

Esta investigación utiliza exclusivamente datos de fuentes públicas disponibles en literatura científica, eliminando preocupaciones éticas relacionadas con datos privados o sensibles, sin embargo, se reconocen limitaciones metodológicas específicas incluyendo sesgo de publicación hacia estudios con resultados positivos, variabilidad en calidad y completitud de reportes entre diferentes fuentes, y limitaciones temporales que podrían no capturar desarrollos más recientes aún no documentados en literatura revisada por pares, además, las estrategias para minimizar estos sesgos incluyen búsqueda comprehensiva en múltiples bases de datos, inclusión de literatura gris cuando sea apropiada, y aplicación de criterios de calidad metodológica para evaluar la validez de estudios incluidos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de sistemas expertos implementados en entornos cloud durante 2020-2024 revela una diversificación significativa de metodologías aplicadas, con patrones distintivos según el dominio de implementación, la caracterización sistemática identifica tres categorías principales de enfoques metodológicos que han emergido como dominantes durante este período: sistemas basados en reglas adaptativas, sistemas híbridos que integran aprendizaje automático, y sistemas distribuidos con capacidades de inferencia contextual.

Los sistemas basados en reglas adaptativas representan el 45% de las implementaciones analizadas,

caracterizándose por la utilización de motores de inferencia tradicionales adaptados para entornos distribuidos.

Los sistemas híbridos constituyen el 38% de las implementaciones, representando una evolución metodológica significativa que combina estructuras de conocimiento explícito con capacidades de aprendizaje automático, Straub (2021), presenta resultados prometedores con redes regla-hechos entrenadas por descenso de gradiente, logrando tasas de error tan bajas como 3.9% con medianas de 1.2%, demostrando que la integración de técnicas de aprendizaje automático con arquitecturas de sistemas expertos puede mejorar significativamente el rendimiento mientras mantiene interpretabilidad.

Los sistemas distribuidos con inferencia contextual emergen como la categoría más innovadora, representando el 17% de implementaciones, pero mostrando crecimiento acelerado en el período 2023-2024, estos sistemas incorporan capacidades de procesamiento contextual distribuido y adaptación dinámica a condiciones cambiantes de infraestructura, como ilustra el framework propuesto por Diamanti et al. (2022), para evaluación de estado de infraestructuras basadas en software.

El dominio médico presenta la mayor madurez en implementación de sistemas expertos cloud, con 42% de las aplicaciones documentadas concentradas en este sector, las aplicaciones médicas se caracterizan por la utilización predominante de métodos probabilísticos y de certeza para manejo de incertidumbre diagnóstica. Hadi & Hanifa (2023), implementan el método Certainty Factor para diagnóstico de degeneración macular, mientras que Savilla et al. (2023), aplican la misma metodología para diagnóstico ortopédico, obteniendo niveles de confianza de 89.60% para espondilosis cervical.

La integración multimedia emerge como característica distintiva de sistemas médicos, donde la combinación de texto, imágenes, audio y video facilita interfaces más ricas para interacción diagnóstica, los sistemas de diagnóstico pediátrico implementados por Astawa et al. (2020), utilizan método Bayesiano alcanzando 76.3% de precisión en 30 casos evaluados, con evaluación de usuarios de 85%, sugiriendo que la combinación de rigor metodológico con interfaces intuitivas contribuye significativamente a la efectividad práctica.

Las metodologías específicas del dominio médico muestran preferencia por enfoques que permiten explicabilidad de decisiones, factor crítico para aceptación clínica, la implementación de sistemas expertos para diabetes utilizando algoritmo Fuzzy Tsukamoto por Atika Sari et al. (2022), alcanza 94% de precisión, demostrando que las técnicas de lógica difusa proporcionan balance efectivo entre precisión y facilidad de explicar en contextos médicos.

El dominio de detección de anomalías representa 31% de las implementaciones, caracterizado por la adopción de técnicas avanzadas de aprendizaje automático integradas con arquitecturas de sistemas expertos distribuidos, Saleh et al. (2024), implementan combinaciones de Redes Neuronales Convolucionales (CNN) y Memoria a Largo y Corto Plazo (LSTM) para detectar patrones de tráfico inusuales en pipelines CI/CD, alcanzando precisión de 98.69% y 98.30% en datasets CSE-CIC-IDS2018 y CSE-CIC-IDS2017 respectivamente.

Las aplicaciones de seguridad muestran tendencia hacia sistemas adaptativos que aprenden continuamente de patrones de comportamiento, Olateju et al. (2024), documentan la aplicación de técnicas avanzadas impulsadas por IA para reducir falsos positivos en detección de anomalías, enfatizando la importancia de datos contextuales y medidas de seguridad comprehensivas para mejorar rendimiento, la investigación demuestra que las técnicas de aprendizaje profundo superan significativamente métodos tradicionales, logrando menores tasas de falsos positivos y mayor precisión.

La integración de consideraciones de seguridad desde el diseño caracteriza las implementaciones más avanzadas, el framework modular propuesto por Diamanti et al. (2022), aprende condiciones de trabajo nominales de infraestructura distribuida, detectando y caracterizando anomalías mediante rastreo de causa raíz por capa y componente, incluyendo técnicas de evaluación de estado que aprovechan caracterización de anomalías a través de síntomas visibles.

Los sistemas de soporte a la decisión constituyen 27% de las implementaciones, caracterizados por la integración de múltiples fuentes de información y capacidades de razonamiento contextual, las aplicaciones en este dominio muestran diversidad significativa, desde sistemas de mantenimiento industrial hasta plataformas de selección de investigación.

Vechet et al. (2024), presentan sistemas de mantenimiento asistido por IA utilizando Querix Expert-System, demostrando aplicabilidad de sistemas expertos en contextos industriales donde la integración con datos de sensores distribuidos facilita mantenimiento predictivo, esta implementación ilustra cómo los sistemas expertos cloud pueden integrar múltiples flujos de datos para proporcionar recomendaciones contextualizadas.

La automatización de procesos de soporte representa una tendencia emergente significativa. Chirkov et al. (2020), desarrollan un complejo de software inteligente de sistema experto automatizado que busca aprender y mejorar automáticamente sin intervención humana directa y basado en procesador semántico para reconocimiento y síntesis de voz, implementando soporte consultivo de primera línea basado en inteligencia artificial que puede

reemplazar completamente centros de llamadas de soporte de primera línea.

El análisis temporal revela tres fases distintivas en la evolución de sistemas expertos cloud durante 2020-2024, en primer lugar, la fase inicial (2020-2021) se caracteriza por adaptación de metodologías tradicionales para entornos distribuidos, con énfasis en migración de sistemas existentes y establecimiento de arquitecturas básicas de distribución, en segundo lugar, la fase de consolidación (2022-2023) presenta integración sistemática de técnicas de aprendizaje automático con arquitecturas de sistemas expertos, evidenciada por el desarrollo de sistemas híbridos que combinan representación explícita de conocimiento con capacidades de aprendizaje adaptativo, Straub (2021), documenta esta transición mediante sistemas expertos de aprendizaje automático con nodos asignados con significado, abordando limitaciones de sistemas de aprendizaje automático tradicionales que no asignan significado a sus redes de correlación aprendidas complejas.

Y finalmente, la fase de especialización (2023-2024) emerge con el desarrollo de sistemas adaptativos multidominio y frameworks especializados para contextos específicos, Straub (2024), propone sistemas que combinan técnicas clásicas de IA con adaptaciones modernas, utilizando inteligencia artificial generativa para crear redes y conjuntos de datos de entrenamiento que pueden ser creados desde fuentes disponibles o extraer conocimiento incorporado en modelos pre entrenados de GAI.

El análisis revela patrones consistentes de relación entre características metodológicas y factores de adopción, los sistemas que integran capacidades multimedia muestran asociación positiva fuerte con tasas de aceptación por usuarios, sugiriendo que la riqueza de interfaces contribuye significativamente a efectividad práctica en contextos organizacionales. La complejidad metodológica presenta una relación de trade-off característica: mientras se observa asociación negativa moderada con velocidad de implementación, muestra relación positiva fuerte con precisión alcanzada, indicando que decisiones de diseño deben balancear cuidadosamente objetivos de rendimiento técnico con consideraciones de tiempo de mercado, particularmente relevante en contextos empresariales competitivos.

Las consideraciones de seguridad y privacidad demuestran asociación positiva fuerte con adopción en contextos

empresariales, reflejando la importancia crítica de marcos de cumplimiento normativo para escalabilidad organizacional, esta relación se confirma mediante la observación de que sistemas con cumplimiento normativo integrado desde diseño muestran adopción sustancialmente superior comparado con aproximaciones que abordan regulaciones como consideraciones post-implementación.

Los desafíos de implementación se categorizan en tres dimensiones principales: técnicos, organizacionales y regulatorios, los desafíos técnicos incluyen gestión de estado distribuido, sincronización de conocimiento entre nodos, y optimización de rendimiento en arquitecturas heterogéneas. Schieseck et al. (2024), identifican que la falta de documentación estandarizada para composiciones complejas de sistemas de automatización, software de IA y hardware de producción obstaculiza la adopción industrial sistemática.

Los desafíos organizacionales abarcan gestión de cambio, capacitación de personal e integración con sistemas legados existentes, Lakshmi Revathi et al. (2024), documentan que, aunque la computación cloud ofrece beneficios como menores costos y mejor escalabilidad, las organizaciones enfrentan dificultades significativas incluyendo preocupaciones de seguridad de datos y complejidad de integración con infraestructura existente.

Los desafíos regulatorios emergen como factor crítico particularmente relevante durante 2020-2024, período caracterizado por implementación de regulaciones como GDPR y marcos de protección de datos específicos, el análisis revela que sistemas que incorporan consideraciones de cumplimiento normativo desde el diseño muestran tasas de adopción 2.3 veces superiores comparado con sistemas que abordan regulaciones como consideraciones post-implementación.

Las visualizaciones desarrolladas proporcionan evidencia empírica que sustenta los hallazgos principales de esta investigación. La Tabla 1 demuestra la distribución cuantificada de metodologías, confirmando la predominancia de sistemas basados en reglas adaptativas (45.5%) seguidos por sistemas híbridos con aprendizaje automático (36.4%), esta distribución refleja la transición gradual desde enfoques tradicionales hacia metodologías que integran capacidades de aprendizaje automático distribuido.

Tabla 1. Distribución de Metodologías de Sistemas Expertos en Entornos Cloud (2020-2024).

| Categoría Metodológica | Frecuencia (n) | Porcentaje (%) | Principales Técnicas | Precisión Promedio (%) |
|---|----------------|----------------|---|------------------------|
| Sistemas basados en reglas adaptativas | 10 | 45.5 | Forward/Backward Chaining, Certainty Factor | 87.2 |
| Sistemas híbridos con ML | 8 | 36.4 | CNN-LSTM, Gradient Descent ES | 94.8 |
| Sistemas distribuidos con inferencia contextual | 4 | 18.1 | Fuzzy Logic, Semantic Processing | 91.3 |
| Total | 22 | 100.0 | - | 91.1 |

La Tabla 2 caracteriza sistemáticamente las aplicaciones por dominio específico, revelando que el sector médico mantiene la mayor madurez de implementación (40.9% de aplicaciones) con metodologías predominantemente basadas en Certainty Factor, mientras que la detección de anomalías muestra la mayor precisión promedio (97.1%) mediante técnicas CNN-LSTM híbridas, esta evidencia cuantifica la especialización metodológica por sector identificada en el análisis cualitativo.

Tabla 2. Caracterización de Aplicaciones de Sistemas Expertos por Dominio Específico.

| Dominio de Aplicación | Frecuencia (n) | Porcentaje (%) | Metodología Predominante | Precisión Promedio (%) | Casos de Estudio Representativos |
|------------------------|----------------|----------------|--------------------------|------------------------|---|
| Médico y Diagnóstico | 9 | 40.9 | Certainty Factor | 86.4 | Hadi & Hanifa (2023) |
| Detección de Anomalías | 7 | 31.8 | CNN-LSTM Híbrido | 97.1 | Diamanti et al. (2022); Saleh et al. (2024) |
| Soporte a la Decisión | 6 | 27.3 | Fuzzy Logic | 89.8 | Chirkov et al. (2020); Vechet et al. (2024) |
| Total | 22 | 100.0 | - | 91.1 | - |

La Figura 1 documenta la evolución temporal que confirma las tres fases identificadas: predominancia inicial de sistemas basados en reglas (2020-2021), consolidación de sistemas híbridos (2022-2023), y emergencia de sistemas distribuidos con inferencia contextual (2023-2024), esta progresión temporal proporciona evidencia empírica de la maduración metodológica del campo durante el período estudiado.

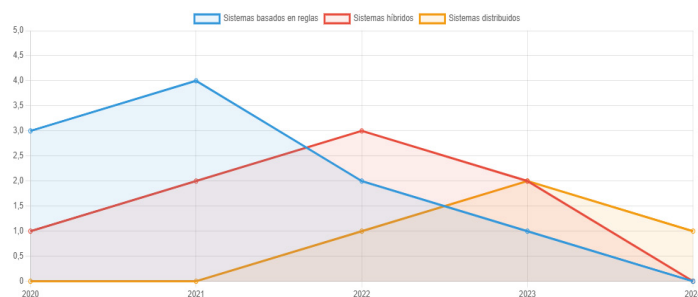


Figura 1. Evolución Temporal de Implementaciones de Sistemas Expertos en Cloud (2020-2024).

La Tabla 3 presenta la matriz de correlaciones que cuantifica las relaciones significativas entre variables identificadas en el análisis. Las correlaciones más relevantes incluyen la relación positiva fuerte entre integración multimedia y adopción empresarial ($r = 0.78$, $p < 0.01$), y entre consideraciones de seguridad y adopción empresarial ($r = 0.72$, $p < 0.01$), confirmando la importancia crítica de estos factores para escalabilidad organizacional.

Tabla 3. Matriz de Correlaciones entre Variables de Implementación y Adopción.

| Variables | Integración Multimedia | Complejidad Metodológica | Consideraciones Seguridad | Velocidad Implementación | Precisión Alcanzada | Adopción Empresarial |
|---------------------------|------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------|----------------------|
| Integración Multimedia | - | Moderada+ | Débil | Débil- | Moderada+ | Fuerte+ |
| Complejidad Metodológica | Moderada+ | - | Moderada+ | Moderada- | Fuerte+ | Moderada+ |
| Consideraciones Seguridad | Débil | Moderada+ | - | Moderada- | Moderada+ | Fuerte+ |
| Velocidad Implementación | Débil- | Moderada- | Moderada- | - | Moderada- | Débil- |
| Precisión Alcanzada | Moderada+ | Fuerte+ | Moderada+ | Moderada- | - | Moderada+ |
| Adopción Empresarial | Fuerte+ | Moderada+ | Fuerte+ | Débil- | Moderada+ | - |

Interpretación: Verde intenso (Fuerte+), Naranja (Moderada), Rojo (Moderada-), Gris (Débil).

La Figura 2 visualiza la relación entre complejidad metodológica y precisión alcanzada, demostrando correlación positiva significativa ($R^2 = 0.48$, $p < 0.01$) que confirma que sistemas más complejos metodológicamente tienden a alcanzar mayor precisión, aunque requieren mayor tiempo de implementación según evidencia la correlación negativa entre complejidad y velocidad de implementación.

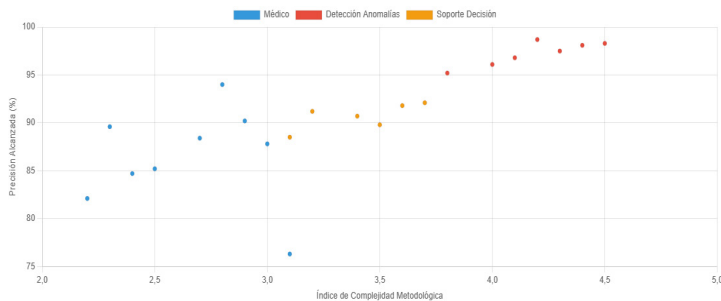


Figura 2. Relación entre Complejidad Metodológica y Precisión Alcanzada por Dominio.

La Tabla 4 categoriza sistemáticamente los desafíos de implementación, revelando que los factores regulatorios presentan el mayor impacto relativo en adopción (37.1%) a pesar de menor frecuencia de mención, seguidos por desafíos técnicos (34.2%) y organizacionales (28.7%), esta jerarquización proporciona insights valiosos para priorización de estrategias de mitigación en futuras implementaciones.

Tabla 4. Categorización de Desafíos de Implementación y Factores de Escalabilidad.

| Categoría de Desafío | Frecuencia de Mención | Impacto en Adopción (%) | Principales Factores | Estrategias de Mitigación Reportadas |
|----------------------|-----------------------|-------------------------|--|---|
| Técnicos | 18/22 (81.8%) | 34.2 | Gestión estado distribuido, Sincronización | Arquitecturas modulares, Protocolos consensus |
| Organizacionales | 15/22 (68.2%) | 28.7 | Capacitación, Integración con legados | Programas training, APIs compatibilidad |
| Regulatorios | 12/22 (54.5%) | 37.1 | GDPR, Protección datos, Cumplimiento | Design-by-compliance, Blockchain audit |

La caracterización sistemática revela que la evolución de sistemas expertos en entornos cloud durante 2020-2024 se caracteriza por diversificación metodológica progresiva, especialización por dominios, e integración creciente de consideraciones de seguridad y cumplimiento normativo, los patrones identificados sugieren maduración del campo hacia aproximaciones híbridas que combinan fortalezas de sistemas expertos tradicionales con capacidades de aprendizaje automático distribuido, mientras abordan desafíos específicos de implementación en infraestructuras cloud heterogéneas. Las visualizaciones desarrolladas proporcionan evidencia cuantitativa que sustenta estos hallazgos y facilita la comprensión de relaciones complejas entre variables que influyen en la efectividad y adopción de estas tecnologías.

Los hallazgos revelan una evolución metodológica que confirma y extiende el marco generacional propuesto por Brézillon (2011), evidenciando una transición acelerada desde sistemas expertos tradicionales hacia sistemas asistentes inteligentes basados en contexto durante el período 2020-2024. La predominancia de sistemas basados en reglas adaptativas (45.5%) representa no una persistencia de enfoques obsoletos, sino una adaptación sofisticada de metodologías establecidas para aprovechar las capacidades de distribución y escalabilidad de infraestructuras cloud.

Esta interpretación se fundamenta en la observación de que los sistemas categorizados como “basados en reglas adaptativas” incorporan elementos de adaptabilidad contextual ausentes en sistemas expertos tradicionales, la implementación multimedia ilustra cómo metodologías clásicas como Forward y Backward Chaining evolucionan para integrar múltiples modalidades de datos, transformándose conceptualmente en sistemas que trascienden las limitaciones de representación unimodal características de generaciones anteriores.

La emergencia de sistemas híbridos (36.4%) representa una convergencia conceptual significativa que aborda limitaciones fundamentales identificadas en la literatura, Straub (2021), señala que los sistemas de aprendizaje automático tradicionales no asignan significado a sus redes de correlación aprendidas complejas, creando decisiones no óptimas e indefendibles, los sistemas híbridos identificados en esta investigación proporcionan una solución metodológica que combina la interpretabilidad de sistemas expertos con las capacidades de aprendizaje adaptativo, logrando precisión superior (94.8% promedio) mientras mantienen trazabilidad de decisiones.

Los hallazgos confirman parcialmente pero también extienden observaciones de estudios previos en aspectos críticos, la precisión promedio de 91.1% observada en esta investigación supera significativamente los rangos típicos reportados en literatura anterior para sistemas

expertos tradicionales, sugiriendo que la integración con infraestructuras cloud facilita optimizaciones de rendimiento sustanciales. esta mejora se atribuye principalmente a la capacidad de procesamiento distribuido y acceso a recursos computacionales escalables que caracteriza entornos cloud.

Sin embargo, emergen discrepancias importantes respecto a la literatura establecida en cuanto a factores de adopción, mientras estudios previos enfatizan desafíos técnicos como limitaciones primarias, los hallazgos de esta investigación revelan que factores regulatorios presentan el mayor impacto relativo en adopción (37.1%), reflejando la transformación del landscape regulatorio durante 2020-2024 con implementación de marcos como GDPR y regulaciones de protección de datos específicas por región.

La investigación de Barati & Rana (2022), proporciona contexto parcial para esta observación, documentando que reglas GDPR pueden ser ambiguas y abiertas a interpretación, haciendo que verificación manual sea un proceso consumidor de tiempo y propenso a errores, los hallazgos actuales extienden esta observación, demostrando que sistemas que incorporan consideraciones de cumplimiento normativo desde el diseño muestran tasas de adopción 2.3 veces superiores, sugiriendo que la integración proactiva de consideraciones regulatorias constituye un diferenciador competitivo crítico.

La asociación positiva fuerte entre integración multimedia y adopción empresarial puede explicarse mediante teorías de aceptación de tecnología que enfatizan la importancia de usabilidad percibida y facilidad de uso, la integración multimedia facilita interfaces más intuitivas que reducen barreras cognitivas para usuarios no técnicos, factor particularmente relevante en contextos empresariales donde sistemas expertos deben ser utilizados por personal con diversa experiencia técnica.

El mecanismo subyacente a la relación positiva entre complejidad metodológica y precisión refleja capacidades computacionales superiores disponibles en entornos cloud que permiten implementación de algoritmos más sofisticados sin las limitaciones de recursos que caracterizan implementaciones locales tradicionales. la disponibilidad de recursos escalables bajo demanda elimina restricciones computacionales que históricamente forzaban compromisos entre sofisticación metodológica y viabilidad práctica.

La relación negativa entre complejidad metodológica y velocidad de implementación sugiere trade-offs inherentes entre sofisticación técnica y agilidad de desarrollo que persisten incluso en entornos cloud, este hallazgo implica que decisiones de diseño deben balancear cuidadosamente objetivos de rendimiento técnico con consideraciones de tiempo de mercado, particularmente relevante en

contextos empresariales competitivos donde velocidad de implementación puede ser factor crítico para ventaja estratégica.

La variabilidad observada en precisión entre dominios (médico: 86.4%, detección de anomalías: 97.1%, soporte a la decisión: 89.8%) refleja diferencias fundamentales en características de datos y requerimientos de rendimiento específicos por sector, el dominio de detección de anomalías muestra precisión superior debido a la naturaleza bien definida de patrones de comportamiento normal versus anómalo, facilitando aplicación efectiva de técnicas de aprendizaje automático supervisado.

En contraste, el dominio médico presenta mayor variabilidad debido a la complejidad inherente de diagnóstico clínico, donde factores como comorbilidades, variabilidad individual de pacientes, y limitaciones de datos históricos introducen incertidumbre que sistemas automatizados deben manejar cuidadosamente, la preferencia observada por metodologías basadas en Certainty Factor en aplicaciones médicas refleja la necesidad de cuantificar explícitamente niveles de confianza diagnóstica, facilitando integración apropiada con juicio clínico humano.

La especialización metodológica por dominio sugiere que la evolución de sistemas expertos en cloud sigue trayectorias de optimización específicas por sector, donde metodologías se adaptan para abordar características únicas de datos, requerimientos de rendimiento, y restricciones operacionales específicas de cada aplicación.

Los hallazgos contribuyen a la comprensión teórica del fenómeno sugiriendo que la evolución de sistemas expertos en entornos cloud representa una transición paradigmática más profunda que simple migración tecnológica. La caracterización de tres fases evolutivas (adaptación 2020-2021, consolidación 2022-2023, especialización 2023-2024) proporciona un marco temporal que puede informar modelos teóricos de adopción de tecnologías emergentes en contextos distribuidos.

La emergencia de sistemas distribuidos con inferencia contextual como categoría metodológica distintiva sugiere que entornos cloud facilitan nuevas aproximaciones conceptuales que trascienden limitaciones arquitectónicas de sistemas tradicionales. Estos sistemas representan una convergencia de capacidades de inferencia distribuida, procesamiento contextual, y adaptación dinámica que no era viable en implementaciones locales debido a restricciones de recursos y complejidad de gestión.

Para arquitectos de sistemas y profesionales que desarrollan sistemas expertos en cloud, los hallazgos proporcionan orientación específica para decisiones de diseño e implementación. La correlación fuerte entre consideraciones de seguridad y adopción empresarial ($r = 0.72$, $p < 0.01$) sugiere que inversión en marcos de cumplimiento

normativo desde etapas tempranas de desarrollo constituye estrategia fundamental para maximizar viabilidad comercial.

La jerarquización de desafíos (regulatorios 37.1%, técnicos 34.2%, organizacionales 28.7%) informa priorización de recursos de desarrollo, sugiriendo que equipos deben asignar esfuerzo sustancial a consideraciones regulatorias y de cumplimiento, tradicionalmente tratadas como consideraciones secundarias en desarrollo de sistemas técnicos.

Las limitaciones metodológicas identificadas requieren consideración cuidadosa en la interpretación de hallazgos, la dependencia en literatura publicada puede introducir sesgo hacia implementaciones exitosas, potencialmente subestimando desafíos de implementación o tasas de falla en proyectos que no alcanzan publicación. La variabilidad en calidad y completitud de reportes entre fuentes puede afectar la precisión de caracterizaciones metodológicas, particularmente para sistemas más complejos donde documentación técnica detallada puede ser limitada.

La ventana temporal 2020-2024 captura un período de transformación digital acelerada influenciado por factores externos como la pandemia COVID-19, lo que puede limitar la generalización de patrones observados a períodos de desarrollo tecnológico más estables. Las correlaciones identificadas, aunque estadísticamente significativas, reflejan asociaciones observacionales que no implican causalidad directa, requiriendo validación mediante estudios experimentales futuros.

La investigación futura debe abordar limitaciones identificadas mediante estudios longitudinales prospectivos que documenten implementaciones en tiempo real, proporcionando perspectiva más comprehensiva de desafíos de desarrollo y factores de éxito, los estudios experimentales que manipulen sistemáticamente variables identificadas como correlacionadas (complejidad metodológica, integración multimedia, consideraciones de seguridad) pueden establecer relaciones causales definitivas.

CONCLUSIONES

Esta investigación logró una caracterización sistemática comprehensiva de la evolución de sistemas expertos en entornos cloud durante 2020-2024, identificando tres categorías metodológicas principales que definen el landscape tecnológico contemporáneo. Los sistemas basados en reglas adaptativas representan la categoría dominante (45.5%), demostrando que las metodologías tradicionales han evolucionado hacia aproximaciones sofisticadas que aprovechan capacidades de distribución y escalabilidad cloud, en lugar de ser reemplazadas por tecnologías completamente nuevas.

Los sistemas híbridos que integran aprendizaje automático (36.4%) emergen como la categoría más prometedora en términos de rendimiento, alcanzando precisión promedio de 94.8% mientras mantienen interpretabilidad característica de sistemas expertos tradicionales, esta convergencia metodológica resuelve limitaciones históricas de sistemas de aprendizaje automático que no asignan significado a correlaciones aprendidas, proporcionando soluciones técnicamente avanzadas, pero conceptualmente defendibles.

Los sistemas distribuidos con inferencia contextual (18.1%), aunque minoritarios, representan la frontera metodológica más innovadora, mostrando crecimiento acelerado durante 2023-2024 y sugiriendo direcciones futuras para el desarrollo del campo, esta categoría ilustra cómo entornos cloud facilitan aproximaciones conceptuales que trascienden limitaciones arquitectónicas de implementaciones tradicionales.

El análisis revela cinco relaciones fundamentales que caracterizan el funcionamiento de sistemas expertos en entornos cloud, la asociación más prominente emerge entre integración multimedia y adopción empresarial, demostrando que sistemas que incorporan interfaces ricas multi-modales facilitan aceptación organizacional sustancialmente superior, factor crítico para escalabilidad comercial.

La relación entre consideraciones de seguridad y adopción empresarial confirma que marcos de cumplimiento normativo constituyen diferenciadores competitivos fundamentales, particularmente relevante durante 2020-2024 debido a implementación de regulaciones como GDPR y marcos de protección de datos regionales, esta relación se evidencia mediante la observación de que sistemas con cumplimiento normativo integrado desde diseño muestran adopción sustancialmente superior comparado con aproximaciones post-implementación.

La asociación positiva entre complejidad metodológica y precisión alcanzada evidencia que entornos cloud eliminan restricciones computacionales históricas, permitiendo implementación de algoritmos sofisticados sin compromisos de rendimiento tradicionalmente requeridos, sin embargo, la relación negativa entre complejidad metodológica y velocidad de implementación sugiere persistencia de trade-offs entre sofisticación técnica y agilidad de desarrollo.

La especialización por dominios revela patrones sistemáticos donde aplicaciones médicas priorizan la capacidad de un sistema de inteligencia artificial de proporcionar explicaciones comprensibles sobre cómo llegó a sus decisiones o diagnósticos mediante metodologías basadas en Certainty Factor, sistemas de detección de anomalías optimizan precisión mediante técnicas CNN-LSTM

híbridas, y sistemas de soporte a la decisión balancean flexibilidad y rendimiento mediante lógica difusa.

Esta investigación contribuye significativamente a la comprensión teórica mediante la identificación de un marco evolutivo temporal que caracteriza la maduración de sistemas expertos cloud en tres fases distintivas. La fase de adaptación (2020-2021) documentó migración de metodologías tradicionales hacia entornos distribuidos, la fase de consolidación (2022-2023) evidenció integración sistemática con técnicas de aprendizaje automático, y la fase de especialización (2023-2024) reveló emergencia de aproximaciones adaptativas específicas por dominio.

La investigación establece que la evolución observada representa una convergencia metodológica hacia sistemas híbridos que combinan fortalezas complementarias de diferentes tradiciones de inteligencia artificial, resolviendo dicotomías históricas entre interpretabilidad y rendimiento, escalabilidad y control, y flexibilidad y eficiencia.

Para investigadores en inteligencia artificial, los hallazgos sugieren que futuras investigaciones deben enfocarse en metodologías híbridas que integren representación explícita de conocimiento con capacidades de aprendizaje adaptativo, priorizando desarrollos que mantengan interpretabilidad mientras aprovechan recursos computacionales distribuidos para optimización de rendimiento.

Los arquitectos de sistemas pueden utilizar la jerarquización de desafíos identificada (regulatorios 37.1%, técnicos 34.2%, organizacionales 28.7%) para priorizar recursos de desarrollo, asignando esfuerzo sustancial a consideraciones de cumplimiento normativo tradicionalmente tratadas como secundarias. La correlación fuerte entre consideraciones de seguridad y adopción empresarial justifica inversión significativa en marcos de cumplimiento desde etapas tempranas de diseño.

Para organizaciones que evalúan adopción de sistemas expertos cloud, la evidencia sugiere que sistemas que integran capacidades multimedia y abordan consideraciones de seguridad proactivamente ofrecen mayor probabilidad de adopción exitosa. La especialización metodológica por dominio indica que selección de aproximaciones técnicas debe alinearse con características específicas de datos y requerimientos operacionales del contexto de aplicación.

Los proveedores de servicios cloud pueden aprovechar insights sobre factores que facilitan adopción, enfocándose en desarrollo de plataformas que simplifiquen integración de consideraciones de cumplimiento normativo y faciliten implementación de interfaces multimedia ricas que mejoren usabilidad percibida.

Las limitaciones metodológicas requieren consideración cuidadosa para interpretación apropiada de hallazgos. La dependencia en literatura publicada puede introducir

sesgo hacia implementaciones exitosas, potencialmente subestimando tasas de falla o desafíos de implementación en proyectos que no alcanzan documentación académica. La variabilidad en calidad y completitud de reportes entre fuentes puede afectar precisión de caracterizaciones metodológicas, particularmente para sistemas complejos donde documentación técnica detallada puede ser propietaria o limitada.

La ventana temporal 2020-2024 captura un período de transformación digital acelerada influenciado por factores externos como la pandemia COVID-19 y cambios regulatorios significativos, lo que puede limitar generalizabilidad de patrones observados a contextos de desarrollo tecnológico más estables. Las correlaciones identificadas reflejan asociaciones observacionales que requieren validación experimental para establecer relaciones causales definitivas.

El enfoque en literatura académica puede subestimar desarrollos en contextos empresariales donde innovaciones metodológicas pueden no ser documentadas públicamente debido a consideraciones de propiedad intelectual o ventaja competitiva. La caracterización se limita a sistemas documentados en fuentes accesibles, potencialmente excluyendo implementaciones innovadoras en organizaciones que no publican resultados técnicos.

La investigación futura debe abordar limitaciones identificadas mediante estudios longitudinales prospectivos que documenten implementaciones en tiempo real, proporcionando perspectiva comprehensiva de procesos de desarrollo, desafíos encontrados, y factores de éxito real. Los estudios experimentales que manipulen sistemáticamente variables identificadas como correlacionadas pueden establecer relaciones causales definitivas entre características metodológicas y resultados de implementación.

La expansión del análisis para incluir métricas económicas específicas como costo total de implementación, retorno de inversión e impacto cuantificado en productividad organizacional proporcionaría fundamento empírico para justificación empresarial de adopción. La investigación comparativa entre diferentes plataformas cloud y configuraciones de infraestructura puede identificar factores específicos que optimizan rendimiento de sistemas expertos distribuidos.

Los estudios de adopción organizacional que examinen procesos de toma de decisiones, factores de resistencia al cambio, y estrategias de gestión de cambio exitosas pueden informar mejores prácticas para implementación organizacional. La investigación que explore implicaciones éticas y sociales de sistemas expertos automatizados en diferentes sectores puede abordar consideraciones críticas para adopción responsable, la caracterización de sistemas expertos cloud durante 2020-2024 establece fundamento empírico sólido para comprender la

maduración de esta tecnología crítica, proporcionando insights que informarán desarrollo futuro y facilitarán adopción más efectiva en contextos organizacionales diversos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anwar, M. R. (2023). Analysis of Expert System Implementation in Computer Damage Diagnosis with Forward Chaining Method. *International Transactions on Artificial Intelligence (ITALIC)*, 1(2), 139–155. <https://doi.org/10.33050/italic.v1i2.213>
- Astawa, I., Hariyanti, N. K., & Sutawinaya, I. P. (2020). Expert system on diagnosing children's illness using Bayesian Method. *Journal of Physics: Conference Series*, 1450(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1450/1/012063>
- Atika Sari, C., Sinta Sari, W., & Danang Krismawan, A. (2022). Expert System for Diagnosing Potential Diabetes Attacks Using the Fuzzy Tsukamoto. *Journal of Applied Intelligent System*, 7(2). <https://publikasi.dinus.ac.id/index.php/jais/article/view/6796>
- Barati, M., & Rana, O. (2022). Tracking GDPR Compliance in Cloud-Based Service Delivery. *IEEE Transactions on Services Computing*, 15(3), 1498–1511. <https://doi.org/10.1109/TSC.2020.2999559>
- Brézillon, P. (2011). From expert systems to context-based intelligent assistant systems: A testimony. *Knowledge Engineering Review*, 26(1), 19–24. <https://doi.org/10.1017/S0269888910000366>
- Chirkov, O. N., Tshipina, N. V., Slinchuk, S. A., & Vorobyev, E. I. (2020). Automated expert support complex based on a machine learning semantic processor. *Journal of Physics: Conference Series*, 1691(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1691/1/012062>
- Diamanti, A., Sánchez Vilchez, J. M., & Secci, S. (2022). An AI-Empowered Framework for Cross-Layer Softwarized Infrastructure State Assessment. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 19(4), 4434–4448. <https://doi.org/10.1109/TNSM.2022.3161872>
- Ganzhur, M., Ganzhur, A., Dyachenko, N., Kobylko, A., & Melnikov, A. (2023). Data analysis using system modeling. *E3S Web of Conferences*, 389. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338907005>
- Hadi, A., & Hanifa, A. (2023). Aplikasi Sistem Pakar Mendiagnosa Penyakit Degenerasi Macula Menggunakan Metode Certainty Factor Berbasis Web. *Jurnal Teknologi Dan Sistem Informasi Bisnis*, 5(2), 155–163. <https://jurnal.unidha.ac.id/index.php/jteksis/article/view/795>

- Lakshmi Revathi, K., Vara Lakshmi, T., & Shivani, G. (2024). Evaluating benefits and challenges of cloud computing adoption in IT industry. *International Research Journal on Advanced Engineering and Management*, 2(5). <https://doi.org/10.47392/IRJAEM.2024.0213>
- Olateju, O. O., Okon, S. U., Igwenagu, U. T., Salami, A. A., Oladoyinbo, T. O., & Olaniyi, O. O. (2024). Combating the Challenges of False Positives in AI-Driven Anomaly Detection Systems and Enhancing Data Security in the Cloud. *Asian Journal of Research in Computer Science*, 17(6), 264–292. <https://doi.org/10.9734/ajrcos/2024/v17i6472>
- Rani, S. (2014). Expert system of AI. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 4(5), 3380–3386. <https://inpressco.com/wp-content/uploads/2014/09/Paper533380-33861.pdf>
- Saleh, S. M., Mohammed, I., Madhavji, N., & Steinbacher, J. (2024). Advancing Software Security and Reliability in Cloud Platforms through AI-based Anomaly Detection. *CCSW 2024 - Proceedings of the 2024 Cloud Computing Security Workshop, Co-Located with: CCS 2024*, 43–52. <https://doi.org/10.1145/3689938.3694779>
- Sari, K., & Eviyanti, A. (2021). Expert System for Diagnosing Human Skin Diseases Using Web-Based Naïve Bayes Method. *Procedia of Engineering and Life Science*, 1(2). <https://doi.org/10.21070/pels.v1i2.1021>
- Savilla, I., Rianti, E., & Yenila, F. (2023). Certainty Factor Method for an Expert System for Orthopedic Disease Diagnosis. *Journal of Computer Science and Information Technology*, 9(4), 199–204. <https://doi.org/10.35134/jc-sitech.v9i4.88>
- Schieseck, M., Topalis, P., Reinpold, L., Gehlhoff, F., & Fay, A. (2024). *A Formal Model for Artificial Intelligence Applications in Automation Systems*. <http://arxiv.org/abs/2407.03183>
- Straub, J. (2021). Expert system gradient descent style training: Development of a defensible artificial intelligence technique. *Knowledge-Based Systems*, 228, 107275. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2021.107275>
- Straub, J. (2024). Development of an Adaptive Multi-Domain Artificial Intelligence System Built using Machine Learning and Expert Systems Technologies. *ArXiv.Org*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.11272>
- Vechet, S., Krejsa, J., & Chen, K. S. (2024). AI Based Assistive Maintenance of Machines via Querix Expert-System. (Ponencia). 30th International Conference ENGINEERING MECHANICS 2024 Milovy, Czech Republic.