

# Revista de Ciencias Sociales

# Infraestructura tecnológica para la tributación 4.0: Desafíos de ingeniería de datos\*

Villasmil Molero, Milagros del Carmen\*\*  
Arroyo Manjarrez, Jesús David\*\*\*

## Resumen

La transición global hacia la Tributación 4.0 exige una reingeniería profunda de los sistemas fiscales para gestionar volúmenes masivos de datos transaccionales en tiempo real, superando los modelos declarativos tradicionales. El presente estudio tuvo como propósito examinar la tríada crítica para esta modernización: la infraestructura de hardware distribuido, los modelos algorítmicos avanzados para la detección de fraude y las barreras sociotécnicas de adopción. Metodológicamente, se ejecutó una revisión sistemática de literatura técnica y empírica en bases de datos de alto impacto, priorizando estudios del periodo 2024-2025 bajo criterios estrictos de elegibilidad. Los hallazgos se estructuraron en tres ejes: La superioridad de arquitecturas descentralizadas híbridas (Blockchain de Consorcio y Edge Computing) para balancear seguridad y latencia; la implementación de Inteligencia Artificial explicable y Grafos de Conocimiento para auditar redes complejas de evasión; y, la urgencia de métricas de sostenibilidad operativa. Se concluye que la eficiencia tributaria futura no depende de una tecnología aislada, sino de la orquestación estratégica entre cadenas de bloques privadas y algoritmos de aprendizaje profundo que sean, simultáneamente, auditables y energéticamente eficientes, garantizando así la confianza del contribuyente y la viabilidad técnica estatal.

**Palabras clave:** Tributación 4.0; inteligencia artificial; blockchain; infraestructura de datos; evasión fiscal.

---

\* Artículo de revisión sistemática derivado del proyecto de investigación: Aplicación de la Inteligencia Artificial en la Gestión Tributaria: Oportunidades y Desafíos en Colombia, un Enfoque Integral, Cód. 111202414. Enmarcado en la línea de investigación Transformación digital e innovación en la Contabilidad y Gestión Tributaria en la Universidad Libre Seccional Barranquilla-Colombia, Facultad CEAC-Programa Contaduría Pública.

\*\* Posdoctora en Gerencia Pública y Gobierno. Doctora en Ciencias Gerenciales. Magister en Gerencia Tributaria. Licenciada en Contaduría Pública. Docente e Investigadora en la Universidad Libre, Barranquilla, Atlántico, Colombia. E-mail: [milagrosd.villasmilm@unilibre.edu.co](mailto:milagrosd.villasmilm@unilibre.edu.co) ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8222-8871>

\*\*\* Ingeniero Electrónico, Especialista en Soporte TI, Automatización y Gestión de Proyectos enfocados en la Eficiencia Operativa y la Transformación Digital. Investigador Independiente. E-mail: [jdarrez03@gmail.com](mailto:jdarrez03@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3167-5385>

# Technological infrastructure for taxation 4.0: Data engineering challenges

## Abstract

The global transition to Taxation 4.0 demands a profound re-engineering of tax systems to manage massive volumes of transactional data in real time, moving beyond traditional declarative models. This study aimed to examine the critical triad for this modernization: distributed hardware infrastructure, advanced algorithmic models for fraud detection, and socio-technical barriers to adoption. Methodologically, a systematic review of technical and empirical literature was conducted using high-impact databases, prioritizing studies from the 2024-2025 period under strict eligibility criteria. The findings were structured around three main themes: the superiority of hybrid decentralized architectures (Consortium Blockchain and Edge Computing) for balancing security and latency; the implementation of explainable Artificial Intelligence and Knowledge Graphs for auditing complex evasion networks; and the urgent need for operational sustainability metrics. It is concluded that future tax efficiency does not depend on an isolated technology, but on the strategic orchestration between private blockchains and deep learning algorithms that are simultaneously auditable and energy efficient, thus guaranteeing taxpayer confidence and state technical viability.

**Keywords:** Taxation 4.0; artificial intelligence; blockchain; data infrastructure; tax evasion.

## Introducción

La economía globalizada y digital ha obligado a las administraciones tributarias a dejar atrás los modelos reactivos basados en declaraciones periódicas y avanzar hacia ecosistemas de fiscalización proactiva en tiempo real; un modelo denominado Tributación 4.0. Más que una simple actualización administrativa, este cambio es un desafío titánico de ingeniería de datos. En línea con esto, Ali et al. (2025) señalan que enfrentan un cambio estructural de paradigma, donde el conocimiento teórico y práctico de las innovaciones impulsadas por la IA (Inteligencia Artificial) en el sector financiero se vuelve esencial. Esta afirmación se apoya en la evidencia empírica de Valaskova et al. (2025), la cual comprueba que la alineación estratégica digital no es opcional y se asocia con el desempeño financiero y, por extensión, con la eficiencia recaudatoria del Estado.

En el mundo actual, la importancia de este análisis es vital. Los métodos de evasión fiscal se han vuelto tan sofisticados que los métodos de auditoría convencionales resultan insuficientes. A esto se suma

que, en el contexto de América Latina, la obtención de recursos fiscales enfrenta graves dificultades estructurales derivadas del alto incumplimiento, la falta de cultura tributaria y el escaso conocimiento de los contribuyentes (Cabrera et al., 2021; Lira et al., 2023; Villasmil-Molero et al., 2024; Lira-Camargo et al., 2024; Urgilés et al., 2024).

Esta investigación se justifica en la necesidad de ir más allá del enfoque legalista, planteando una arquitectura tecnológica específica y robusta que pueda soportar la carga transaccional actual. El beneficio del estudio es que muestra cómo la convergencia de nuevas tecnologías puede cerrar la brecha de recaudación y proporcionar a las administraciones públicas una guía tecnológica para garantizar la sostenibilidad fiscal. La motivación surge de la brecha que existe entre la teoría impositiva y la capacidad técnica que tienen los gobiernos.

Si bien Tumoro (2025), verifica que la tecnología de la información es un determinante para disminuir de manera sustentable la evasión, la digitalización por sí sola no es suficiente; se debe “inteligenciar” el sistema. En ese sentido, Paul y Ogburie

(2025) señalan que la IA es la pieza clave para automatizar auditorías complejas y prevenir el fraude, una perspectiva técnica apoyada por la revisión exhaustiva de Najem et al. (2025) sobre IA y *Big Data* en E-finanzas. Además, la revisión decenal de Bedoya et al. (2025) confirma la necesidad de extender estos modelos predictivos, ya consolidados en el mundo empresarial, al sector público.

Para medir el impacto de estas soluciones, es necesario conocer los fundamentos teóricos en los que se basa la investigación. El estudio se organiza en tres dimensiones entrelazadas: las arquitecturas de redes distribuidas como guardianas de la integridad de los datos, los modelos algorítmicos sofisticados para la detección de anomalías y los factores socio-técnicos que influyen en su adopción. Solo desde esta mirada holística se puede hablar de Tributación 4.0 como un ecosistema.

Por lo tanto, esta investigación se propuso organizar el conocimiento técnico disperso sobre las arquitecturas *hardware* y *software* para Tributación 4.0, determinando los mejores algoritmos y los puntos críticos de la infraestructura. Para ello, se pretende dar respuesta a la pregunta: ¿Qué arquitecturas tecnológicas, modelos algorítmicos y prerequisites de infraestructura crítica se deben combinar para construir un sistema de Tributación 4.0 eficiente, seguro y sostenible?

## 1. Fundamentación teórica

### 1.1. Infraestructura, *hardware* y arquitectura de redes distribuidas

La transformación hacia 4.0 supone dejar atrás las arquitecturas monolíticas cliente-servidor, susceptibles a cuellos de botella y agujeros de seguridad. La literatura actual propone la Tecnología de Contabilidad Distribuida (DLT), y en particular el *Blockchain*, como el nuevo estándar de integridad. Autores como Javaid et al. (2022); y, Dharma (2025), afirman que la descentralización evita depender de terceros, permite la verificación colectiva y

reduce significativamente la manipulación de los registros. Sin embargo, como señalan Jiang et al. (2024), la seguridad financiera no es inherente; necesita infraestructuras de inteligencia social computacional muy sólidas.

Pero la aplicación gubernamental de *Blockchain* necesita adaptaciones. Prabanand y Thanabal (2025), señalan que las cadenas públicas (tipo *Bitcoin*) son inviables para propósitos fiscales por la latencia y la revelación de información confidencial. Su propuesta teórica aboga por las Cadenas de Bloques de Consorcio Privado, en las que la escritura y verificación están en manos de nodos autorizados (agencias tributarias, bancos centrales) sin perder la inmutabilidad criptográfica. Para que estos sistemas funcionen sin problemas en la nube, Lai y Hsu (2025), proponen incorporar la *web* semántica en aplicaciones móviles conscientes del contexto, un paso esencial para interactuar con el contribuyente actual. Esta arquitectura permite utilizar Contratos Inteligentes para automatizar la retención de impuestos en la fuente de la transacción, con cumplimiento por diseño («*compliance by design*»).

Pero la cantidad de datos crea problemas de latencia. Gola (2025), ve en las arquitecturas *serverless* y en el *edge computing* la solución: al procesar los datos en el «borde» (en el punto de venta o en el dispositivo IoT), se libera el núcleo de la red. Mi y Chen (2026), reafirman esta postura teorizando sobre la IA distribuida en el borde para el comercio de datos. Para asegurar la estabilidad de tales ecosistemas automatizados 24/7, Hartikainen et al. (2025) plantean modelos de *robots* de *software* de monitorización basados en reglas de negocio. Para el análisis forense de *Big Data*, Arianyan et al. (2025) enfatizan la necesidad de hacer la transición a la computación de alto rendimiento (HPC) a escala exa para realizar simulaciones fiscales que la nube no puede manejar.

Además, la infraestructura debe ser adaptable a nuevos activos; Zhang et al. (2024), hablan de la paradoja de centralizar tecnologías descentralizadas (como las CBDC). Esto requiere interoperabilidad para auditar libros mayores centralizados y redes criptográficas.

En este proceso evolutivo, Ariciu et al. (2025) señalan que la auditoría debe adaptarse tecnológicamente para verificar transacciones *on-chain* de forma independiente; en tanto que Tharwat et al. (2025), enfatizan proteger la auditoría interna contra nuevas ciberamenazas.

De lo anterior se interpreta que la infraestructura tecnológica para la Tributación 4.0 no debe concebirse únicamente como una plataforma digital de almacenamiento y procesamiento de datos, sino como un ecosistema inteligente de confianza institucional. La combinación entre *blockchain* de consorcio, *edge computing* y arquitecturas interoperables, constituye una condición necesaria para garantizar simultáneamente transparencia, trazabilidad y capacidad de respuesta en tiempo real de las administraciones tributarias.

## **1.2. Algoritmos y modelos de IA para la detección de fraude**

Los modelos matemáticos son el «cerebro» de la Tributación 4.0. puesto que el fraude fiscal es un problema de aprendizaje supervisado con datos desbalanceados, los métodos tradicionales no son suficientes para detectar patrones evasivos cambiantes, como evidencia la revisión de Nicholls et al. (2021). Por otra parte, el Aprendizaje Profundo (*Deep Learning*) a través de redes neuronales convolucionales (CNN) y recurrentes (RNN) ha probado ser superior en la extracción de características latentes. Dastidar et al. (2024); y, Razzaq et al. (2025), confirman esta eficacia en el contexto del comercio minorista y el fraude con tarjeta de crédito, respectivamente, demostrando el poder del ML sobre reglas estáticas.

Para datos tabulares financieros, el algoritmo *XGBoost* se ha convertido en el estado del arte. Tayebi y Kafhali (2025), plantean una optimización bayesiana para ajustar hiperparámetros y obtener un equilibrio entre precisión y exhaustividad. Por otra parte, Papasavva et al. (2025) estudian modelos de IA para fraude *online*; y, Yousefimehr et

al. (2025), proponen marcos de “destilación de conocimiento” para una detección de anomalías ligera y eficiente, adecuada para sistemas con limitaciones de recursos.

Para descubrir fraudes complejos (como los carruseles de IVA), la mirada se dirige hacia los grafos de conocimiento. Como aclaran Belcastro et al. (2026), esta tecnología estructura la información en nodos y relaciones para revelar comunidades sospechosas, capacidad que Wu (2024) refuerza con datos IoT en tiempo real. Además, garantizar la identidad del contribuyente es esencial; nuevas investigaciones sobre mitigación de fraude (Mahida et al., 2024) indican que la biometría potenciada por IA será el próximo estándar de autenticación.

Finalmente, la transparencia es irrenunciable en la administración pública. Hancock et al. (2025), resuelven el problema de las «cajas negras» con IA explicable (XAI) y valores SHAP, dando la justificación matemática para auditorías automatizadas. Esta exigencia de transparencia es respaldada por Villasmil et al. (2025), quienes advierten que la opacidad algorítmica en los sistemas automatizados, dificulta la trazabilidad de las decisiones fiscales y compromete gravemente la rendición de cuentas institucional. Además, para acelerar la revisión jurídica, Zeng et al. (2025) proponen arquitecturas de decodificación residual que permiten a los LLMs manejar grandes corpus jurídicos con menor coste computacional.

Por lo expuesto, el núcleo algorítmico de la Tributación 4.0 trasciende la simple capacidad predictiva para exigir una precisión interpretable, dado que los modelos matemáticos son el cerebro del sistema. Aunque el Aprendizaje Profundo y los Grafos de Conocimiento, son vitales para extraer características latentes y descubrir fraudes complejos, resultan inviables en la administración pública si actúan como «cajas negras». Por consiguiente, la integración de Inteligencia Artificial Explicable (XAI) es una condición irrenunciable, puesto que proporciona la justificación matemática y jurídica indispensable para validar las

auditorías automatizadas sin vulnerar las garantías del contribuyente

### 1.3. Marco normativo, apropiación y sostenibilidad tecnológica

La tecnología no existe en el vacío; su éxito depende de fuerzas sociotécnicas. Usando el marco TOE, Sánchez et al. (2025) encuentran que para las Pequeñas y Medianas Empresas (PYMES) la complejidad técnica y la incompatibilidad con sistemas heredados son mayores barreras que el costo. Saheb et al. (2025), concuerdan en que la preparación organizacional es tan importante como la tecnología para adoptar *blockchain*. El elemento humano también es clave: Pargmann et al. (2023); y, Fülöp et al. (2024), examinan cómo la digitalización requiere nuevas habilidades que los profesionales de la contabilidad y la auditoría deben desarrollar rápidamente.

Esta urgencia es respaldada por Feijoó et al. (2025), quienes diagnostican una brecha crítica de especialización en la profesión contable frente a la adopción de la Inteligencia Artificial, el *Blockchain* y el análisis de datos. Dichos autores advierten que la falta de formación avanzada impide que el profesional abandone el registro operativo tradicional para asumir el rol de consultoría estratégica que exige la modernización de los ecosistemas fiscales.

Desde un punto de vista regulatorio, la adopción de *Fintech* transforma las obligaciones de información. Como señalan Asmah et al. (2025), para el caso de Ghana, las políticas públicas transparentes estimulan la movilización de impuestos. Un ejemplo local es la Política Nacional de Inteligencia Artificial de Colombia (Consejo Nacional de Política Económica y Social [CONPES], 2025), que define las directrices para el uso ético y productivo de la IA en el Estado.

La variable ambiental se ha vuelto ineludible. Badrous et al. (2025), hallan una correlación positiva entre la adopción de *Fintech* y el desempeño ambiental bancario,

en consonancia con los principios de *Green Computing* establecidos por Rambabu et al. (2025). Por el alto consumo energético de la IA y el *Blockchain*, la sostenibilidad debe ser un criterio de diseño. Piotrowska y Piotrowski (2025), añaden que la conciencia del consumidor está impulsando un «*Green FinTech*»; mientras que Dabbous y Tarhini (2021), relacionan la economía colaborativa con la eficiencia energética.

Finalmente, la tecnología puede afectar la moral fiscal. Kummari (2023); y, Munjeji y Danie (2025), plantean que la IA se debería de utilizar no para obligar, sino para ayudar al contribuyente a disminuir errores involuntarios. Incluso, la política impositiva puede llegar a modelar conductas sustentables, como analizan Karmani et al. (2025). Pero la automatización se debe hacer con cuidado; Marak et al. (2025), señalan la resistencia a la innovación en canales de atención automatizados (*chatbots*), por lo que se deben crear interfaces centradas en el usuario.

Como reflexión de este apartado, se concluye que la viabilidad a largo plazo de la Tributación 4.0 está supeditada a su sostenibilidad ambiental y apropiación social. En este sentido, se postula que cualquier esfuerzo de modernización tecnológica estatal será infructuoso si no se diseña bajo un enfoque de eficiencia energética y si omite la dimensión humana. El propósito fundamental de esta transición no debe limitarse a la automatización coercitiva, sino a la creación de interfaces centradas en el usuario que transformen los algoritmos en aliados estratégicos, reduciendo los errores involuntarios y consolidando la confianza ciudadana.

## 2. Metodología

La investigación se abordó desde un enfoque cualitativo, de diseño documental, utilizando la metodología de Revisión Sistemática de Literatura (RSL). Esta metodología hace posible localizar, evaluar e interpretar toda la investigación existente que sea pertinente para una pregunta de

investigación determinada, asegurando la replicabilidad y la objetividad científica en la selección del corpus de análisis. El protocolo se organizó en etapas secuenciales de identificación, cribado y análisis de contenido.

2.1. Estrategia de búsqueda y fuentes de información

Para garantizar la recuperación de

literatura técnica especializada que responda a los desafíos de ingeniería de la Tributación 4.0, se diseñó un protocolo de búsqueda estructurado en tres ejes fundamentales alineados con los objetivos del estudio. La búsqueda se ejecutó en bases de datos de alto impacto (*Scopus*, *IEEE Xplore* y *Web of Science*), utilizando ecuaciones booleanas específicas para cada dimensión tecnológica, tal como se detalla, en el Cuadro 1.

Cuadro 1  
Matriz de estrategias de búsqueda por ejes temáticos

| Eje Temático del Estudio                               | Ecuación de Búsqueda (Search String)                                                                                                               | Alcance y Propósito del Análisis                                                                                                  |
|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Infraestructura híbrida y procesamiento distribuido    | ("Blockchain" OR "Private Consortium" OR "Distributed Ledger") AND ("Edge Computing" OR "Serverless") AND ("Tax Administration" OR "E-invoicing")  | Identificar arquitecturas que balanceen la seguridad de las redes privadas con la baja latencia del procesamiento en el borde.    |
| Superioridad algorítmica y de datos (IA)               | ("Fraud detection" OR "Tax Evasion") AND ("Deep Learning" OR "XGBoost" OR "Knowledge Graphs" OR "Explainable AI") AND ("Big Data" OR "HPC")        | Evaluar modelos matemáticos avanzados capaces de superar a los métodos clásicos en la detección de patrones evasivos complejos.   |
| Barreras de adopción, regulatorias y de sostenibilidad | ("Technology Adoption" OR "TOE framework" OR "Green Computing") AND ("Energy Efficiency" OR "Carbon Footprint") AND ("Tax Policy" OR "Regulation") | Analizar los factores sociotécnicos, normativos y ambientales que condicionan la viabilidad operativa de la modernización fiscal. |

Fuente: Elaboración Propia, 2025.

2.2. Criterios de elegibilidad y selección de la muestra

Para garantizar la calidad y actualidad de la revisión, se utilizaron criterios rigurosos:

a. **Temporalidad:** Debido a la obsolescencia tecnológica, se priorizó la ventana 2024-2025, pero se aceptaron estudios base del período 2021-2023 solo si mostraban arquitecturas actuales.

b. **Tipo:** Se eligieron documentos de investigación (*papers*), documentos de política (tipo CONPES) y revisiones técnicas (*surveys*)

de revistas arbitradas. Se dejaron a un lado opiniones, editoriales, textos jurídicos sin contribución a la infraestructura tecnológica.

c. **Relevancia:** Se incluyeron solamente estudios que presentaran, validaran o evaluaran arquitecturas de *hardware*, modelos matemáticos o marcos de adopción para el dominio fiscal.

A continuación, se sistematizan los parámetros bibliométricos que aseguraron el cumplimiento de los estándares de indexación requeridos para la muestra final de 50 (ver Cuadro 2).



**Cuadro 2**  
**Parámetros de aseguramiento de la calidad bibliográfica**

| Criterio       |    | Condición de Inclusión                                                        | Justificación Técnica                                                                                                                                |
|----------------|----|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bases de Datos | de | <i>Scopus, Web of Science (WoS), IEEE Xplore, ScienceDirect.</i>              | Asegurar la validez científica seleccionando fuentes provenientes de bases de datos de corriente principal y revistas sometidas a rigurosa revisión. |
| Idioma         |    | Inglés (predominante) y Español.                                              | Acceder a la literatura técnica de punta sobre IA, <i>Hardware y Blockchain</i> , mayoritariamente publicada en inglés.                              |
| Exclusividad   |    | Estudios de Ingeniería, Ciencias de la Computación y Sistemas de Información. | Filtrar la literatura puramente legal o contable para centrar el análisis en los retos de procesamiento de datos.                                    |

**Fuente:** Elaboración propia, 2025.

En esta revisión sistemática se utilizaron LLMs como herramienta de apoyo para resolver el reto que supone procesar una gran cantidad de registros bibliográficos. El uso de estas herramientas informáticas se restringió a optimizar procesos mecánicos, como el cribado inicial de resúmenes y la taxonomía inicial de los descubrimientos, para organizar el fondo documental. Pero hay que decir que esta ayuda algorítmica no reemplazó en ningún caso el trabajo intelectual profundo; la selección final, la hermenéutica de los textos completos y la síntesis argumentativa, fueron realizadas por los investigadores. Además, para asegurar la integridad científica y evitar cualquier error de atribución, se verificó manualmente la autenticidad y rastreabilidad de cada fuente citada.

### 3. Resultados y discusión

La revisión bibliográfica apunta hacia ecosistemas fiscales que favorezcan la velocidad de procesamiento e interpretabilidad de los modelos sobre la mera acumulación de datos.

#### 3.1. Infraestructura híbrida y procesamiento distribuido

El debate sobre la arquitectura idónea para sistemas financieros de misión crítica ha evolucionado desde la centralización absoluta hacia modelos de descentralización controlada.

La evidencia actual posiciona a la *blockchain* de consorcio privado como la arquitectura de referencia para la administración tributaria. Praband y Thanabal (2025), validaron empíricamente una estrategia híbrida sobre *Ethereum* privado que logra resolver el trilema de escalabilidad y seguridad. Esta configuración permite la ejecución de Contratos Inteligentes con latencias viables para el comercio en tiempo real, superando las limitaciones de las cadenas públicas.

Sin embargo, esta nueva infraestructura exige repensar los mecanismos de control; Ariciu et al. (2025), advierten que la auditoría debe evolucionar técnicamente para validar transacciones directamente en la cadena (*on-chain*) sin perder independencia, lo que implica un desafío de ingeniería para integrar nodos auditores en la red de consorcio.

No obstante, la inmutabilidad de la cadena conlleva un costo computacional significativo que puede afectar la experiencia del usuario. Para mitigar la latencia en procesos masivos como la facturación electrónica, Gola (2025) aporta evidencia sobre la superioridad de las arquitecturas *serverless* (sin servidor) para la orquestación de eventos. Sus hallazgos demuestran que desacoplar el procesamiento permite escalar la infraestructura en milisegundos durante picos de demanda fiscal, optimizando simultáneamente el consumo energético. Esto sugiere que la Tributación 4.0 no debe ser una estructura monolítica, sino un ecosistema modular donde la *blockchain* actúa como capa de confianza y el *serverless* como capa de agilidad operativa.



La convergencia entre el mundo físico y el digital se profundiza mediante la integración del *Internet* de las Cosas (IoT). Huang (2025), propone sistemas donde la contabilidad se automatiza mediante sensores vinculados a la *Blockchain*, extendiendo la capacidad de auditoría al movimiento físico de los inventarios en tiempo real. A pesar de estas ventajas, Zhang et al. (2024) alertan sobre la complejidad técnica inherente a la «centralización de tecnología descentralizada» (como las CBDC), lo que obliga a los ingenieros fiscales a desarrollar *gateways* o pasarelas de interoperabilidad robustas. Estas interfaces son críticas para asegurar que los datos provenientes de redes distribuidas puedan ser consumidos y analizados por los sistemas centrales de la administración tributaria sin fricciones.

### **3.2. Superioridad algorítmica y de datos (IA)**

En el ámbito de la detección de fraude, los resultados confirman que los modelos de ensamble mantienen una supremacía sobre las redes neuronales simples cuando se opera con datos tabulares estructurados. Tayebi y El Kafhali (2025), demostraron que el algoritmo *XGBoost*, ajustado mediante optimización bayesiana, reduce drásticamente los falsos positivos en transacciones financieras. Este hallazgo es respaldado por la revisión de Dastidar et al. (2024) sobre fraude en tarjetas de crédito, quienes concluyen que los métodos de aprendizaje automático supervisado superan consistentemente a los sistemas basados en reglas estáticas, ofreciendo una adaptabilidad superior ante patrones de evasión cambiantes. Por tanto, la ingeniería de datos fiscal debe priorizar la implementación de estos modelos dinámicos para el control transaccional inmediato.

Para enfrentar amenazas más sofisticadas, como las redes de testaferreros o carruseles de IVA, la literatura sugiere abandonar el enfoque relacional tradicional. Belcastro et al. (2026), evidenciaron la

capacidad de los Grafos de Conocimiento, aumentados por Grandes Modelos de Lenguaje (LLMs), para detectar topologías de red evasivas que pasarían desapercibidas en auditorías convencionales. En esta línea, Najem et al. (2025) refuerzan la necesidad de integrar técnicas avanzadas de *Big Data* e IA en las finanzas electrónicas, argumentando que la complejidad de los delitos financieros modernos requiere una capacidad de cómputo capaz de inferir relaciones ocultas entre entidades aparentemente desconectadas.

Sin embargo, la potencia algorítmica carece de valor sin una base de datos íntegra. Tahir et al. (2025), encontraron que los Sistemas de Detección de Intrusos (IDS) fallan críticamente ante datos faltantes, y sugieren la implementación de técnicas de imputación estadística como paso previo obligatorio al modelado. Finalmente, el *hardware* se consolida como el habilitador último de estas capacidades; Bidye et al. (2025), reafirman que la paralelización en Unidades de Procesamiento Gráfico (GPU) de alto rendimiento no es un lujo, sino una condición técnica inevitable para procesar bases tributarias a escala nacional con la velocidad que exige la fiscalización en tiempo real.

### **3.3. Barreras de adopción, regulatorias y de sostenibilidad**

La excelencia técnica de las propuestas choca frecuentemente con la realidad operativa y cultural de los contribuyentes. Mogollón et al. (2025) ilustran, con evidencia del caso peruano, cómo la madurez tecnológica de la facturación electrónica se ve limitada por la informalidad económica estructural. De manera similar, Wang et al. (2025) cuestionan desde China si la digitalización disminuye automáticamente los delitos financieros, hallando que la tecnología sin una gobernanza interna sólida es insuficiente. Esto se alinea con lo planteado por Hesami et al. (2024); y, Valaskova et al. (2025), quienes demuestran empíricamente que la transformación digital

solo genera rendimiento financiero cuando existe una alineación estratégica clara, principio que la administración tributaria debe adoptar para no digitalizar la burocracia, sino transformarla.

En el sector empresarial, las barreras no son meramente económicas. Sánchez et al. (2025), muestran que la ausencia de talento especializado y la incompatibilidad con sistemas heredados frenan la adopción de IA en las PYMES mucho más que los costos de licencia. Esta limitación operativa se traslada también al sector público, donde Villasmil et al. (2026) identifican que los problemas de interoperabilidad entre bases de datos, sumados a registros fiscales de baja calidad y una infraestructura tecnológica obsoleta, restringen severamente la capacidad de los modelos de IA.

Profundizando en esto, Saheb et al. (2025) identifican factores críticos para la adopción de *blockchain* en reportes financieros, subrayando que la preparación organizacional y la confianza en la tecnología son determinantes. Por consiguiente, es imperativo que la autoridad fiscal proporcione APIs estandarizadas, documentación clara y soporte técnico, dado que la experiencia del usuario (Al-Habashneh et al., 2024), es un predictor determinante para la aceptación voluntaria del sistema.

Finalmente, la sostenibilidad ha dejado de ser una opción para convertirse en un requisito de diseño. Rambabu et al. (2025); y, Badrous et al. (2025), recalcan la urgencia del *Green Computing*: debido al inmenso gasto energético del entrenamiento de modelos de *Deep Learning* y el consenso en *Blockchain*, los futuros sistemas impositivos deben integrar métricas de eficiencia energética (PUE) en sus licitaciones. Esta presión no es solo regulatoria, sino social; Piotrowska y Piotrowski (2025), destacan cómo la conciencia del consumidor en el sector *Green FinTech* está empujando hacia tecnologías financieras eco-amigables. Así, la infraestructura de la Tributación 4.0 debe ser diseñada bajo principios de eficiencia para ser viable a largo plazo.

## Conclusiones

La revisión sistemática de la literatura lleva a concluir que la migración hacia la Tributación 4.0 va más allá de una actualización administrativa; es un problema de ingeniería de alta complejidad. La viabilidad de los sistemas fiscales modernos pasa por la armonización de tres aspectos: Soberanía sobre infraestructura descentralizada, auditabilidad de la IA, y sostenibilidad.

Primero, las arquitecturas tradicionales centralizadas ya no son suficientes. La literatura avala la superioridad de los modelos híbridos en *Blockchain* Consorcio Privado, que logran el balance entre privacidad y transparencia. Para superar la latencia de estas redes, es esencial descentralizar el procesamiento al borde (*Edge Computing*) y arquitecturas *Serverless*, las cuales son necesarias para permitir la fiscalización en tiempo real.

En segundo lugar, la eficiencia tributaria implica poder modelar relaciones complejas. Algoritmos como *XGBoost* con optimización bayesiana y grafos de conocimiento, superan a los enfoques tradicionales en la detección de fraude. Pero la exactitud predictiva no tiene significado legal sin interpretabilidad; por lo tanto, la incorporación de métodos de IA explicable (XAI) es necesaria para abrir la «caja negra» y permitir auditorías transparentes y justas.

En tercer lugar, la calidad de los datos y la responsabilidad ambiental son fundamentales. Técnicas de imputación estadística y prácticas de *Green Computing* deben ser por defecto, no a elección, engranando eficiencia fiscal con responsabilidad social del Estado.

El principal aporte de esta investigación radica en proporcionar una guía técnica unificada y de alto valor para la comunidad académica y profesional (contadores, ingenieros y desarrolladores). El estudio logra descifrar y estructurar la compleja interacción entre la legislación tributaria, los protocolos informáticos y la sostenibilidad ambiental. Al hacerlo, organiza diversas tecnologías emergentes y dispersas, como *blockchain*, inteligencia artificial y computación en el borde, en un modelo arquitectónico coherente

y aplicable para la modernización de la gestión pública y la consolidación de la Tributación 4.0.

La limitación principal se deriva de su diseño metodológico como revisión sistemática documental centrada en bases de datos indexadas. Al priorizar literatura académica del periodo 2024-2025 para mitigar la obsolescencia, se excluyeron manuales técnicos internos y literatura gris de las administraciones gubernamentales. Asimismo, este enfoque puramente teórico restringe la comprobación empírica directa de los modelos propuestos; es decir, las arquitecturas híbridas y algorítmicas expuestas no fueron sometidas a pruebas de conceptos tangibles ni a simulaciones de carga transaccional dentro de los sistemas reales del Estado.

A partir de los hallazgos y limitaciones, se propone la siguiente agenda de trabajo: (i) desarrollar modelos de evaluación del impacto energético de las infraestructuras tributarias basadas en inteligencia artificial y *blockchain*; (ii) diseñar marcos de gobernanza algorítmica para reducir sesgos en los sistemas automatizados de fiscalización; (iii) estudiar la interoperabilidad técnica y normativa entre plataformas tributarias nacionales y ecosistemas financieros descentralizados; y, (iv) evaluar empíricamente el efecto de la adopción de la Tributación 4.0 sobre la confianza institucional y la moral fiscal de los contribuyentes.

Finalmente, la tecnología por sí sola no es una garantía de recaudación. Las barreras estructurales (informalidad, brecha de habilidades) pueden anular las inversiones tecnológicas si no se abordan de manera integral. Por tanto, la “Tributación 4.0” se ha de considerar como un sistema socio-técnico en el que el futuro de la fiscalización es de las agencias que logren desplegar algoritmos explicables sobre infraestructuras seguras, descentralizadas y energéticamente eficientes.

## Referencias bibliográficas

Al-Habashneh, A. G., Mohammad, S. I. S.,

Vasudevan, A., Al-Adwan, A. S., Mohammad, A. A. S., y Jiang, L. Q. (2024). Impact of the quality of financial and banking applications used on smartphone on the customer satisfaction of Jordanian Islamic Bank. *International Review of Management and Marketing*, 15(1), 99-106. <https://doi.org/10.32479/irmm.17706>

Ali, O., Murray, P. A., Al-Ahmad, A., Jeon, I., y Dwivedi, Y. K. (2025). Comprehending the theoretical knowledge and practice around AI-enabled innovations in the finance sector. *Journal of Innovation & Knowledge*, 10(5), 100762. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2025.100762>

Arianyan, E., Gholipour, N., Maleki, D., Ghorbani, N., Sepahvand, A., y Goudarzi, P. (2025). A systematic review and classification of HPC-Related Emerging Computing Technologies. *Electronics*, 14(12), 2476. <https://doi.org/10.3390/electronics14122476>

Ariciu, G., Tiron-Tudor, A., Teh, C., y Uman, T. (2025). Accounting and auditing in the age of blockchain technology: review and research agenda. *The Journal of Risk Finance*, 27(1), 46-67. <https://doi.org/10.1108/jrf-05-2025-0222>

Asmah, A., Ampong, K. O., Bibi, D., y Ofori, W. (2025). Exploring the drivers of digital technology adoption for enhancing domestic tax mobilization in Ghana. *International Journal of Information Management Data Insights*, 5(1), 100327. <https://doi.org/10.1016/j.jjimei.2025.100327>

Badrous, Y. M. L., Tawfik, O. I., Elmaasrawy, H. E., Srouf, M. I., y Sharaf, M. A. A. (2025). Fintech adoption and commercial banks environmental performance: Do green accounting practices matter? *International Journal of Financial Studies*, 13(2), 90. <https://doi.org/10.1016/j.jjimei.2025.100327>

- [doi.org/10.3390/ijfs13020090](https://doi.org/10.3390/ijfs13020090)
- Bedoya, Ó. M., Pérez, S. M., Osorio, H. L., y Guzmán, J. F. (2025). Inteligencia artificial y toma de decisiones en Gestión empresarial; una revisión bibliométrica de la última década. *European Public & Social Innovation Review*, 11, 1-16. <https://doi.org/10.31637/epsir-2026-1630>
- Belcastro, L., Carlucci, C., Cosentino, C., Liò, P., y Marozzo, F. (2026). Enhancing network security using knowledge graphs and large language models for explainable threat detection. *Future Generation Computer Systems*, 176, 108160. <https://doi.org/10.1016/j.future.2025.108160>
- Bidye, P., Borkar, P., y Rakesh, N. (2025). High performance GPU implementation of KNN algorithm: A review. *MethodsX*, 15, 103633. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2025.103633>
- Cabrera, M. A., Sánchez-Chero, M.-J., Cachay, L. D. C., y Rosas-Prado, C. E. (2021). Cultura tributaria y su relación con la evasión fiscal en Perú. *Revista de Ciencias Sociales (Ve)*, XXVII(E-3), 204-218. <https://doi.org/10.31876/rcs.v27i.36503>
- Consejo Nacional de Política Económica y Social - CONPES (2025). *Política Nacional de Inteligencia Artificial*. Documento CONPES 4144. CONPES. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/4144.pdf>
- Dabbous, A., y Tarhini, A. (2021). Does sharing economy promote sustainable economic development and energy efficiency? Evidence from OECD countries. *Journal of Innovation & Knowledge*, 6(1), 58-68. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2020.11.001>
- Dastidar, K. G., Caelen, O., y Granitzer, M. (2024). Machine Learning Methods for Credit Card Fraud Detection: A survey. *IEEE Access*, 12, 158939-158965. <https://doi.org/10.1109/access.2024.3487298>
- Dharma, P. Y. (2025). Blockchain In Taxation: A Systematic Literature Review (2017-2022). *Scientax: Jurnal Kajian Ilmiah Perpajakan Indonesia*, 7(1), 123-134. <https://doi.org/10.52869/st.v7i1.1015>
- Feijoó, E. M., Gutiérrez, N. D., Orellana, M. N., y Eras, R. D. J. (2025). Transformación digital: Una brecha crítica para a profesión contable. *Revista de Ciencias Sociales (Ve)*, XXXI(4), 304-314. <https://doi.org/10.31876/rcs.v31i4.44861>
- Fülöp, M. T., Ionescu, C. A., Măgdaş, N., Topor, D. I., y Breaz, T. O. (2024). Acceptance of digital instruments in the accounting profession. *Journal of East European Management Studies*, 29(2), 283-313. <https://doi.org/10.5771/0949-6181-2024-2-283>
- Gola, K. K. (2025). Energy efficient low latency event pipelines: A study of Green Computing Practices in Serverless Architectures. *Journal of Quantum Science and Technology*, 2(3), 48-59. <https://doi.org/10.63345/jqst.v2i3.320>
- Hancock, J. T., Khoshgoftaar, T. M., y Liang, Q. (2025). A problem-agnostic approach to feature selection and analysis using SHAP. *Journal of Big Data*, 12(1), 12. <https://doi.org/10.1186/s40537-024-01041-1>
- Hartikainen, E., Hotti, V., y Tukiainen, M. (2025). Business-Driven Data Model for Consistent Software Robot Monitoring in 24/7 Environments. *IEEE Access*, 13, 169929-169952. <https://doi.org/10.1109/access.2025.3611303>
- Hesami, S., Jenkins, H., y Jenkins, G. P. (2024). Digital transformation of

- tax administration and compliance: A systematic literature review on E-Invoicing and prefilled returns. *Digital Government Research and Practice*, 5(3), 18. <https://doi.org/10.1145/3643687>
- Huang, S. (2025). Optimization of intelligent financial management system based on blockchain and internet of things. *Scientific Reports*, 15(1), 26563. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-12217-x>
- Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., Suman, R., y Khan, S. (2022). A review of Blockchain Technology applications for financial services. *Bench Council Transactions on Benchmarks Standards and Evaluations*, 2(3), 100073. <https://doi.org/10.1016/j.tbench.2022.100073>
- Jiang, C., Wang, F.-Y., Zhou, M., Nandi, A. K., y Liu, G. (2024). Guest Editorial: Special Issue on Big Data and Computational Social Intelligence for Guaranteed Financial Security. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 11(2), 1551-1555. <https://doi.org/10.1109/tcss.2024.3373929>
- Karmani, S. T., Acharekar, S. V., Pruswani, K. J., Mirwani, P. M., y Raut, T. B. (2025). Using GST as a tool for public awareness promoting sustainable consumer behavior through tax policy. *International Journal of Accounting and Economics Studies*, 12(5), 236-247. <https://doi.org/10.14419/6h2qjq39>
- Kummari, D. N. (2023). AI-Powered Tax Compliance: Enhancing accuracy and efficiency through predictive modeling. *Educational Administration: Theory and Practice*, 29(4), 5234-5253. <https://doi.org/10.53555/kuey.v29i4.10066>
- Lai, T.-Y., y Hsu, I.-C. (2025). Integrating semantic web into context-aware mobile application based on cloud computing. *Journal of Cloud Computing*, 14, 8. <https://doi.org/10.1186/s13677-025-00731-2>
- Lira, Z. R., Terrones, E. I., Ostos, E. L., y Lira, J. (2023). Evasión tributaria y su incidencia en la recaudación del impuesto a la renta en Perú. *Revista de Ciencias Sociales (Ve)*, XXX(E-7), 420-432. <https://doi.org/10.31876/rcs.v29i.40475>
- Lira-Camargo, Z. R., Nieves-Chen, J. H., y Lira-Camargo, J. (2024). Elusión tributaria y la recaudación del impuesto a la renta en el Perú. *Revista de Ciencias Sociales (Ve)*, XXX(E-9), 437-446. <https://doi.org/10.31876/rcs.v30i.42323>
- Mahida, A., Mandala, V., Ramdas, S., Konkimalla, S., y Surender, M. (2024). Real-Time fraud mitigation in digital payments: big data and AI-Driven biometric authentication. *Nanotechnology Perceptions*, 20(5), 1176-1193. <https://nano-ntp.com/index.php/nano/article/view/2450>
- Marak, Z. R., Pahari, S., Shekhar, R., y Tiwari, A. (2025). Factors affecting chatbots in banking services: the UTAUT2 and innovation resistance theory perspective. *Journal of Innovation and Entrepreneurship*, 14, 47. <https://doi.org/10.1186/s13731-025-00514-8>
- Mi, B., y Chen, K. (2026). Distributed edge artificial intelligence empowered data trading: Theories, algorithms, and applications. *Computer Science Review*, 59, 100844. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2025.100844>
- Mogollón, F. S., Rodríguez, S. L., Núñez, S. M., Quiroga, B. C., Garcés, L. A., Arévalo, M. E., y Garcia, A. (2025). Electronic Invoicing as a Tax Collection Strategy in the Context of Peruvian Economic Informality. *Journal of Educational and Social Research*, 15(3), 397.

- <https://doi.org/10.36941/jesr-2025-0106>
- Munjeyi, E., y Danie, N. (2025). Development of an artificial intelligence framework to combat tax noncompliance in Botswana. *Acta Commerciali*, 25(1), a1379. <https://doi.org/10.4102/ac.v25i1.1379>
- Najem, R., Bahnasse, A., Amr, M. F., y Talea, M. (2025). Advanced AI and big data techniques in E-finance: a comprehensive survey. *Discover Artificial Intelligence*, 5, 102. <https://doi.org/10.1007/s44163-025-00365-y>
- Nicholls, J., Kuppa, A., y Le-Khac, N.-A. (2021). Financial Cybercrime: A Comprehensive Survey of Deep Learning Approaches to Tackle the Evolving Financial Crime Landscape. *IEEE Access*, 9, 163965-163986. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3134076>
- Papasavva, A., Lundrigan, S., Lowther, E., Johnson, S., Mariconti, E., Markovska, A., y Tuptuk, N. (2025). Applications of AI-Based Models for Online Fraud Detection and Analysis. *Crime Science*, 14, 7. <https://doi.org/10.1186/s40163-025-00248-8>
- Pargmann, J., Riebenbauer, E., Flick-Holtsch, D., y Berding, F. (2023). Digitalisation in accounting: a systematic literature review of activities and implications for competences. *Empirical Research in Vocational Education and Training*, 15, 1. <https://doi.org/10.1186/s40461-023-00141-1>
- Paul, A. A., y Ogburie, C. (2025). The Role of AI in preventing financial fraud and enhancing compliance. *GSC Advanced Research And Reviews*, 22(3), 269-282. <https://doi.org/10.30574/gscarr.2025.22.3.0086>
- Piotrowska, A. I., y Piotrowski, D. (2025). Green FinTech: A Consumer Awareness study. *Sustainability*, 17(8), 3701. <https://doi.org/10.3390/su17083701>
- Prabanand, S. C., y Thanabal, M. S. (2025). Advanced financial security system using smart contract in private ethereum consortium blockchain with hybrid optimization strategy. *Scientific Reports*, 15, 6764. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-89404-3>
- Rambabu, M., Krishna, K. R., Tripathi, M. A., Kataria, J., Srivastava, P., y Dixit, A. (2025). Green Computing: Advancing Energy-Efficient data Centers with AI. *International Journal of Environmental Sciences*, 11(5), 65-74. <https://doi.org/10.64252/5m56y357>
- Razzaq, K., Shah, M., Fattahi, M., y Tang, J. (2025). Empowering machine learning for robust cyber-attack prevention in online retail: an integrative analysis. *Humanities and Social Sciences Communications*, 12, 733. <https://doi.org/10.1057/s41599-025-04636-y>
- Saheb, S. S., Chinnapareddy, V. K. R., Devalla, D., Charugulla, S., Chakka, N. B., y Sekhar, K. R. (2025). Factors leading to the adoption of blockchain technology in financial reporting. *Frontiers in Blockchain*, 8, 1491609. <https://doi.org/10.3389/fbloc.2025.1491609>
- Sánchez, E., Calderón, R., y Herrera, F. (2025). Artificial Intelligence Adoption in SMEs: Survey Based on TOE-DOI Framework, Primary Methodology and Challenges. *Applied Sciences*, 15(12), 6465. <https://doi.org/10.3390/app15126465>
- Tahir, M., Abdullah, A., Udzir, N. I., y Kasmiran, K. A. (2025). A novel approach for handling missing data to enhance network intrusion detection system. *Cyber Security And Applications*, 3, 100063. <https://doi.org/10.1016/j.csa.2024.100063>



- Tayebi, M., y El Kafhali, S. (2025). A novel approach based on XGBoost classifier and Bayesian optimization for credit card fraud detection. *Cyber Security and Applications*, 3, 100093. <https://doi.org/10.1016/j.csa.2025.100093>
- Tharwat, H., Hafez, S. T., Elgohary, I. E., y Hassanein, A. (2025). A decade of cybersecurity research in internal auditing: bibliometric mapping and future research agenda. *Discover Sustainability*, 6, 1066. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-02031-w>
- Tumoro, D. T. (2025). The effect of information technology on the sustainable reduction of tax evasion with mediating role of innovation in Ethiopia. *Discover Global Society*, 3, 154. <https://doi.org/10.1007/s44282-025-00302-5>
- Urgilés, J. H., Ramón, M. E., Campoverde, J. R., y Ochoa, V. D. (2024). Determinantes del incumplimiento tributario desde la percepción de contribuyentes y asesores fiscales. *Revista de Ciencias Sociales (Ve)*, XXX(E-10), 426-447. <https://doi.org/10.31876/rcs.v30i.42852>
- Valaskova, K., Nagy, M., y Juracka, D. (2025). Digital transformation and financial performance: an empirical analysis of strategic alignment in the digital age. *Journal of Enterprising Communities People and Places in the Global Economy*, 19(5), 1178-1205. <https://doi.org/10.1108/jec-11-2024-0241>
- Villasmil, M. D. C., Muñoz, J. A., Boscán, M., León, J. J., y Hernández, J. (2026). Desafíos y barreras en la implementación de inteligencia artificial en gestión tributaria: revisión de literatura. *Revista Jurídicas CUC*, 22(1), 81-99. <http://doi.org/10.17981/juridcuc.22.1.2026.05>
- Villasmil, M. D. C., Muñoz, J. A., Hernández, J. C., y León, J. J. (2025). Inteligencia artificial en la eficiencia, transparencia y equidad de la administración tributaria. *Revista Lasallista de Investigación*, 22(2), 304-320. <https://doi.org/10.22507/rli.v22n2a3896>
- Villasmil-Molero, M., Maza, C. A., Barros, J., y Torres, J. C. (2024). Cultura tributaria en Colombia: Un análisis del cumplimiento de obligaciones fiscales. *Revista de Ciencias Sociales (Ve)*, XXX(E-9), 422-436. <https://doi.org/10.31876/rcs.v30i.42280>
- Wang, W., Wen, J., Liu, M., y Du, M. (2025). Can digital transformation reduce bank violations? Evidence from China. *International Review of Economics & Finance*, 104, 104707. <https://doi.org/10.1016/j.iref.2025.104707>
- Wu, Y. (2024). The Construction of Digital Tax Collection Model Based on Knowledge Graph Empowered by IoT Technology. *Applied Mathematics And Nonlinear Sciences*, 9(1), 1-17.
- Yousefimehr, B., Ghatee, M., y Razavi-Far, R. (2025). Multi-teacher knowledge distillation framework for lightweight anomaly detection. *Neural Networks*, 195, 108267. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2025.108267>
- Zeng, Z., Yu, J., Pang, Q., Wang, Z., Zhuang, H., Yu, F., Shao, H., y Zou, X. (2025). ResDecode: Accelerating Large Language Models Inference via Residual Decoding Heads. *Big Data Mining and Analytics*, 8(4), 779-793. <https://doi.org/10.26599/bdma.2024.9020074>
- Zhang, Y., Gong, B., y Zhou, P. (2024). Centralized use of decentralized technology: Tokenization of currencies and assets. *Structural Change and Economic Dynamics*, 71, 15-25. <https://doi.org/10.1016/j.strueco.2024.06.006>