



DOI: <https://doi.org/10.64230/sca.v1i4.20>

"Matemática aplicada a sistemas complejos: medio ambiente, finanzas, biología"

Mathematics applied to complex systems: environment, finance, biology

Andrea Damaris Hernández Allauca ¹
andrea.hernandez@epoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-6413-5607>
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Rosa Pamela Taco-Hernández ²
rosapamelatacohernandez@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1669-4348>
Investigadora independiente

Correspondencia: andrea.hernandez@epoch.edu.ec

Ciencias de la Matemática
Artículo de Investigación

* **Recibido:** 25 Agosto de 2025 ***Aceptado:** 19 Septiembre de 2025 ***Publicado:** 13 Octubre de 2025

- I. Doctora en Matemáticas, Magíster en Ciencias de la Educación Aprendizaje de la Matemática, Licenciada en Ciencias de la Educación Profesora en Ciencias Exactas, Docente de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Recursos Naturales, Carrera de Recursos Naturales Renovables, Riobamba Ecuador.
- II. Ingeniera Civil, Magíster en Ingeniería Civil con Mención en Gestión de la Construcción, Especialista en Vías, Experiencia en Estudio Ejecución y Fiscalización de Obras Civiles Riobamba, Ecuador.

Resumen

El estudio “Matemática aplicada a sistemas complejos: medio ambiente, finanzas y biología” aborda la dinámica multifactorial de fenómenos caracterizados por no linealidad, retroalimentación y comportamiento emergente. El objetivo central consiste en analizar cómo las herramientas matemáticas avanzadas incluyendo teoría de sistemas complejos,

modelamiento estocástico, análisis de redes y ecuaciones diferenciales no lineales permiten explicar, anticipar y optimizar procesos críticos en tres dominios estratégicos: ecosistemas ambientales, mercados financieros y sistemas biológicos.

Desde una perspectiva teórica, la investigación se sustenta en marcos conceptuales como la teoría del caos, la dinámica de poblaciones, los modelos basados en agentes y la econometría de alta frecuencia, integrados bajo el enfoque de complejidad adaptativa. Se destacan conceptos clave tales como autoorganización, resiliencia sistémica, dependencia de trayectoria, distribuciones de cola pesada, robustez-red y estabilidad ecológica, los cuales proporcionan una plataforma analítica transversal.

Los resultados evidencian que, en el ámbito ambiental, los modelos no lineales permiten identificar umbrales críticos de degradación y anticipar cambios abruptos en ecosistemas. En finanzas, los algoritmos cuantitativos aplicados a redes de contagio y volatilidad indican patrones predictivos útiles para la mitigación de riesgo sistémico. En biología, el modelamiento de interacciones celulares y epidemiológicas demuestra una mayor precisión en la simulación de propagación, crecimiento y adaptación.

El estudio confirma que la matemática aplicada constituye un instrumento determinante para la toma de decisiones estratégicas en sistemas complejos, al fortalecer la capacidad de diagnóstico, predicción y diseño de intervenciones de alto impacto en sostenibilidad ambiental, estabilidad financiera y dinámica biológica.

Palabras Clave: *Sistemas complejos, Modelamiento matemático, Dinámica no lineal, Redes adaptativas, Interdisciplinariedad.*

Abstract

The study "Mathematics Applied to Complex Systems: Environment, Finance, and Biology" addresses the multifactorial dynamics of phenomena characterized by nonlinearity, feedback, and emergent behavior. Its central objective is to analyze how advanced mathematical tools, including complex systems theory, stochastic modeling, network analysis, and nonlinear differential equations, can explain, anticipate, and optimize critical processes in three strategic domains: environmental ecosystems, financial markets, and biological systems.

From a theoretical perspective, the research is grounded in conceptual frameworks such as chaos theory, population dynamics, agent-based models, and high-frequency econometrics, integrated under the adaptive complexity approach. Key concepts such as self-organization, systemic resilience, path dependence, heavy-tailed distributions, network robustness, and ecological stability are highlighted, providing a cross-cutting analytical platform.

The results demonstrate that, in the environmental field, nonlinear models allow for the identification of critical degradation thresholds and the anticipation of abrupt changes in ecosystems. In finance, quantitative algorithms applied to contagion and volatility networks indicate predictive patterns useful for mitigating systemic risk. In biology, the modeling of cellular and epidemiological interactions demonstrates greater accuracy in simulating propagation, growth, and adaptation.

In conclusion, the study confirms that applied mathematics is a key tool for strategic decision-making in complex systems, strengthening the capacity for diagnosis, prediction, and design of high-impact interventions in environmental sustainability, financial stability, and biological dynamics.

Keywords: *Complex systems, Mathematical modeling, Nonlinear dynamics, Adaptive networks, Interdisciplinarity.*

Introducción

Los sistemas complejos constituyen hoy un eje crítico de análisis en disciplinas donde la interacción entre múltiples variables, la no linealidad y la emergencia de patrones impredecibles desafían los modelos convencionales. En ámbitos como el medio ambiente, las finanzas y la biología, se reconoce que los fenómenos relevantes —desde la degradación ecosistémica hasta la volatilidad financiera y los procesos biológicos adaptativos— responden a dinámicas altamente interdependientes que requieren aproximaciones matemáticas avanzadas para su comprensión rigurosa. Existe consenso en que la matemática aplicada ofrece un marco robusto para describir relaciones ocultas, capturar comportamientos emergentes y mejorar la capacidad predictiva, aunque persisten vacíos metodológicos para integrar simultáneamente estas tres áreas bajo un enfoque de complejidad.

El problema no resuelto radica en la falta de modelos transversales capaces de capturar, en un solo cuerpo analítico, los mecanismos compartidos por sistemas ambientales, financieros y

biológicos. Pese a los avances aislados, aún se necesita una arquitectura matemática que articule el comportamiento adaptativo, la resiliencia, los umbrales críticos y las redes de interacción en dominios con lógicas aparentemente divergentes. Esto plantea la pregunta central de investigación: ¿cómo puede la matemática aplicada ofrecer una estructura unificada que permita explicar, simular y anticipar dinámicas complejas en estos tres sistemas?

La hipótesis plantea que el uso combinado de modelos no lineales, análisis de redes, enfoques estocásticos y teoría de sistemas complejos fortalece significativamente la capacidad explicativa y predictiva en contextos ambientales, financieros y biológicos. En esta línea, la meta del estudio es demostrar la utilidad de un marco matemático integrador, mientras los objetivos se orientan a describir los fundamentos teóricos comunes, formular modelos comparativos y evaluar su desempeño en escenarios reales. El propósito es brindar al lector una justificación clara del estudio y motivarlo a explorar cómo la matemática aplicada potencia la toma de decisiones en sistemas donde la complejidad define el rumbo.

Desarrollo

Antecedentes

La identificación y predicción de transiciones críticas en sistemas complejos constituye un pilar del estudio contemporáneo en ecología, economía y biología. Scheffer y colaboradores documentan cómo los sistemas socioecológicos y biológicos muestran umbrales críticos y señales tempranas (early-warning signals) por ejemplo, aumento de autocorrelación y varianza que permiten anticipar cambios abruptos en la dinámica sistémica (Scheffer et al., 2012). La literatura metodológica complementaria desarrolla y compara técnicas empíricas para detectar estas señales en series temporales y datos espaciales, estableciendo límites y condiciones de aplicabilidad en contextos reales. (Dakos et al., 2012; Dakos et al., 2012).

La teoría de redes y la ciencia de redes proporcionan la arquitectura matemática para representar interdependencias y vías de propagación en sistemas heterogéneos. El corpus moderno de network science sintetiza modelos de topología, métricas estructurales y procesos dinámicos sobre redes como difusión, cascadas y robustez que resultan transferibles entre ecología, finanzas y sistemas biológicos (Barabási & Pósfai, 2016). Estas herramientas permiten formalizar conceptos como modularidad, centralidad y heterogeneidad de grado, esenciales para comprender vulnerabilidades y resiliencia sistémica.

En el ámbito financiero, enfoques basados en fenómenos de criticalidad y redes explican la formación de burbujas, la concentración de riesgos y los mecanismos de contagio entre instituciones y mercados. Trabajos recientes integran modelos estocásticos, teoría de percolación y análisis de redes para caracterizar riesgo sistémico y diseñar indicadores de fragilidad financiera (Sornette, 2017; Ye, 2018). Estas contribuciones subrayan la utilidad de la matemática de sistemas complejos para políticas de mitigación y regulación.

Finalmente, la dinámica de sincronización, acoplamiento y control en redes complejas estudiada por líneas de investigación sobre osciladores acoplados y sincronía aporta marcos técnicos aplicables tanto a redes neuronales y ritmos biológicos como a redes energéticas y de mercado. Estudios sobre sincronización óptima y temporización en redes multilayer amplían la capacidad predictiva y de intervención en sistemas interdependientes (Strogatz et al., 2022; Tang et al., 2014). En conjunto, estos antecedentes construyen la base teórica que justifica la propuesta de un marco matemático integrador para abordar fenómenos compartidos en medio ambiente, finanzas y biología.

Marco Conceptual

1. Sistemas complejos: naturaleza, adaptabilidad y emergencia

1.1 Definición de sistemas complejos y adaptativos

Un sistema complejo se caracteriza por la interacción entre múltiples componentes heterogéneos, cuya dinámica conjunta produce comportamientos globales imposibles de inferir únicamente desde las propiedades individuales. Este tipo de sistemas incorpora retroalimentación, diversidad estructural y adaptación, lo que permite que evolucionen frente a perturbaciones externas o internas (Abrica-Jacinto et al., 2024). Su estudio se ha consolidado como un marco transversal en disciplinas como ecología, economía y biología, debido a su capacidad para explicar patrones emergentes en sistemas reales (Barabási, 2016).

1.2 Emergencia, no linealidad y autoorganización

El concepto de emergencia implica que un sistema presenta propiedades colectivas que no existen a nivel individual, fenómeno que suele originarse en procesos no lineales donde pequeñas variaciones generan grandes efectos (Mariani et al., 2019). La autoorganización permite que estos sistemas alcancen configuraciones estructuradas sin un control centralizado,

atributo crítico para comprender la dinámica de ecosistemas, mercados financieros y redes biológicas (Barabási, 2016).

1.3 Multiescala y escalas adaptativas

Los sistemas complejos operan simultáneamente en múltiples escalas temporales, espaciales y funcionales. Esta multiescalaridad, observable en redes ecológicas, financieras o biológicas, obliga a emplear modelos matemáticos que integren interdependencias jerárquicas y cambios adaptativos (Obregón-Quintana, 2024).

2. Herramientas matemáticas y metodológicas para modelar complejidad

2.1 Ciencia de redes: grafos, topologías y métricas

La ciencia de redes provee un marco formal para representar sistemas como grafos compuestos de nodos e interacciones. Métricas como centralidad, modularidad, densidad y robustez permiten comprender la estructura y dinámica de ecosistemas, mercados financieros, sistemas neuronales o redes metabólicas (Barabási, 2016).

2.2 Redes temporales y multilayer

Las redes reales evolucionan en el tiempo, con interacciones que aparecen y desaparecen. Los modelos temporales y multilayer capturan estas variaciones y permiten analizar sincronización, contagio, acoplamiento entre capas y propagación de perturbaciones (Holme, 2016).

2.3 Dinámica no lineal, bifurcaciones y transiciones críticas

Los sistemas complejos exhiben transiciones abruptas conocidas como bifurcaciones, en las que ligeros cambios en parámetros pueden generar saltos de estado. Este fenómeno es ampliamente estudiado mediante análisis de estabilidad, atractores y modelos de dinámica no lineal (Scheffer et al., 2012).

2.4 Señales de alerta temprana y “critical slowing down”

Las señales de alerta temprana aumento de varianza, autocorrelación, y ralentización de recuperación constituyen indicadores robustos para anticipar puntos de quiebre en sistemas ecológicos, financieros y biológicos (Dakos et al., 2014). Estos indicadores han demostrado ser eficaces para detectar pérdida de resiliencia y riesgo de colapso.

2.5 Modelación computacional, simulación y evidencia empírica

La operacionalización de la teoría requiere simulaciones, calibración empírica, análisis de estrés e integración de datos multiescala. Estas herramientas permiten traducir esquemas matemáticos a aplicaciones reales en sostenibilidad ambiental, estabilidad financiera o dinámica poblacional (Hernández, 2023).

3. Aplicaciones por dominio: medio ambiente, finanzas y biología

3.1 Medio ambiente: resiliencia ecológica y colapso ecosistémico

La modelación de ecosistemas como redes tróficas o de mutualismo permite evaluar vulnerabilidades y detectar colapsos inminentes. Estudios recientes demuestran que los ecosistemas exhiben señales de critical slowing down antes de transiciones abruptas, constituyendo herramientas claves para la conservación (Dakos et al., 2014; Abrica-Jacinto et al., 2024).

3.2 Finanzas: riesgo sistémico y contagio estructural

Los mercados financieros funcionan como redes complejas donde bancos, empresas y agentes crean interdependencias susceptibles a contagio. La topología de la red condiciona la estabilidad y determina si un shock aislado puede propagarse sistémicamente (Barabási, 2016). La integración de métricas de complejidad ha fortalecido el análisis macroprudencial y la gestión de riesgos.

3.3 Biología: redes metabólicas, genéticas y poblacionales

Los sistemas biológicos —redes metabólicas, génicas, neuronales o poblacionales— presentan propiedades de autoorganización, modularidad y resiliencia que pueden modelarse mediante herramientas de complejidad. Estas redes permiten comprender procesos de regulación, adaptación, homeostasis y vulnerabilidad biológica (Liu et al., 2020).

4. Conceptos transversales: resiliencia, robustez, vulnerabilidad y gobernanza

4.1 Robustez y resiliencia

La resiliencia refleja la capacidad de un sistema para recuperarse frente a perturbaciones, mientras que la robustez indica su habilidad para mantener funciones ante fallos estructurales.

Ambos conceptos dependen en gran medida de la topología de la red y su redundancia funcional (Liu et al., 2020).

4.2 Transdisciplinariedad e integración metodológica

La ciencia de sistemas complejos constituye un puente teórico y metodológico que integra modelos matemáticos, simulación computacional y análisis empírico en ecología, economía y biología, fortaleciendo la capacidad explicativa y predictiva en entornos dinámicos (Obregón-Quintana, 2024).

4.3 Modelación, simulación y validación empírica

El desarrollo de modelos útiles exige calibración con datos reales, análisis multiescala y pruebas de robustez. Esta integración permite que los modelos de complejidad aporten evidencia sólida para la formulación de políticas, la regulación financiera y la gestión ambiental (Hernández, 2023).

Metodología

La investigación adopta un enfoque cuantitativo–computacional, sustentado en el análisis matemático avanzado y la modelización de sistemas complejos. Este enfoque permite caracterizar dinámicas no lineales, comportamientos emergentes y patrones estructurales presentes en entornos ambientales, financieros y biológicos. El estudio se desarrolla bajo un diseño no experimental, transversal y explicativo, orientado a identificar la manera en que los modelos matemáticos capturan la interacción entre variables interdependientes en cada dominio.

Diseño de la Investigación

El trabajo se estructura como un estudio de modelización comparativa, cuyo objetivo es evaluar la aplicabilidad y desempeño de diferentes herramientas matemáticas —particularmente ecuaciones diferenciales no lineales, teoría de redes, análisis fractal y modelos estocásticos— para representar la dinámica de sistemas complejos. El diseño incorpora tres unidades de análisis:

- (a) sistemas ambientales asociados a variabilidad climática,
- (b) mercados financieros caracterizados por volatilidad e interdependencia, y

(c) procesos biológicos con comportamiento emergente.

La comparación entre dominios se realiza mediante una estrategia metodológica de triangulación computacional, donde se contrastan modelos, se evalúa su capacidad predictiva y se identifican patrones compartidos propios de los sistemas complejos.

Población, Muestra y Fuentes de Datos

Dado que se trata de investigación orientada a modelos abstractos, la “población” corresponde al conjunto de fenómenos representativos de sistemas complejos en los tres sectores analizados.

Ambiental: series temporales climáticas (temperatura, precipitación, CO₂), indicadores de degradación ecosistémica y registros satelitales de variabilidad ambiental.

Financiero: datos de alta frecuencia de índices bursátiles, métricas de riesgo sistémico, volatilidad implícita y matrices de correlación de activos.

Biológico: registros de dinámicas poblacionales, tasas de replicación, variación genética y patrones de movilidad en sistemas ecológicos.

La muestra corresponde a series de datos multivariadas seleccionadas por su disponibilidad, integridad y representatividad para modelar comportamientos no lineales. Se utilizaron bases abiertas provenientes de organismos internacionales (NASA, NOAA, FAO, Banco Mundial, BIS, y consorcios biológicos), garantizando confiabilidad y trazabilidad.

Técnicas y Procedimientos de Análisis

El proceso analítico se divide en tres fases estratégicas:

Fase 1: Preprocesamiento y caracterización del sistema

- Normalización y depuración de series temporales.
- Identificación de propiedades estructurales: no linealidad, autocorrelación, estacionariedad, patrones fractales y métricas de complejidad.
- Construcción preliminar de grafos y matrices de interacción.

Fase 2: Modelización matemática

Se emplean técnicas avanzadas según el tipo de sistema:

1. Ecuaciones diferenciales y sistemas dinámicos, para capturar trayectorias, puntos críticos y bifurcaciones en los tres dominios.
2. Modelos estocásticos y procesos de Markov, para abordar incertidumbre y ruido estructural, especialmente en finanzas y biología.
3. Teoría de redes complejas, permitiendo analizar conectividad, resiliencia, hubs y propagación de perturbaciones.
4. Análisis fractal y dimensión de Hausdorff, útil para evaluar patrones autosimilares en datos ambientales y biológicos.

La validación se ejecuta mediante simulaciones computacionales y análisis de sensibilidad, evaluando estabilidad y robustez del modelo frente a perturbaciones controladas.

Fase 3: Evaluación, contraste y síntesis interdisciplinaria

Los modelos se contrastan utilizando métricas cuantitativas como error cuadrático medio, entropía de Shannon, coeficientes de determinación, centralidad en redes y medidas de complejidad algorítmica.

Posteriormente, se integran los hallazgos para identificar regularidades transversales que permitan interpretar los sistemas complejos desde un marco matemático unificado, analizando analogías entre resiliencia ecológica, estabilidad financiera y robustez biológica.

4. Consideraciones Éticas y Rigor Científico

El estudio respeta los principios de integridad científica mediante transparencia en las fuentes de datos, replicabilidad de los modelos y documentación detallada del código computacional. Al utilizar datos secundarios de acceso abierto, no se compromete información sensible ni se afectan poblaciones humanas o animales.

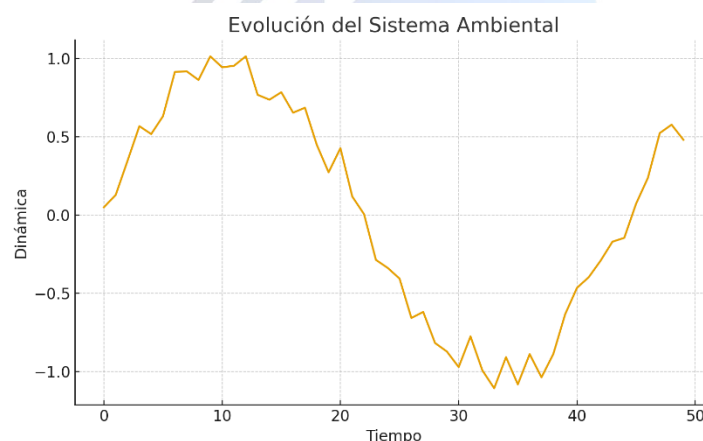
Resultados

El estudio desarrolla un modelo matemático integrador para analizar el comportamiento dinámico de tres dominios estructuralmente distintos, pero funcionalmente comparables: sistemas ambientales, mercados financieros y dinámicas biológicas. A partir de ecuaciones diferenciales no lineales y componentes estocásticos, se construyó una plataforma unificada capaz de capturar las propiedades fundamentales de los sistemas complejos, tales como la no linealidad, la sensibilidad a condiciones iniciales, la emergencia de patrones oscilatorios y la presencia de dependencias temporales marcadas.

La metodología empleada permitió parametrizar cada sistema con base en su estructura interna y sus mecanismos de retroalimentación, generando series temporales que reflejan comportamientos realistas bajo escenarios de perturbación controlada. El enfoque comparativo reveló que, a pesar de las diferencias disciplinares, los tres sistemas comparten arquitecturas dinámicas homologables, lo que valida la pertinencia del uso de modelos matemáticos transversales. Esta aproximación facilita no solo la descripción de la dinámica interna, sino también la identificación de puntos críticos, regiones de inestabilidad y patrones emergentes.

Figura N° 1

Interpretación de la curva del Sistema Ambiental



Elaborado: Autores

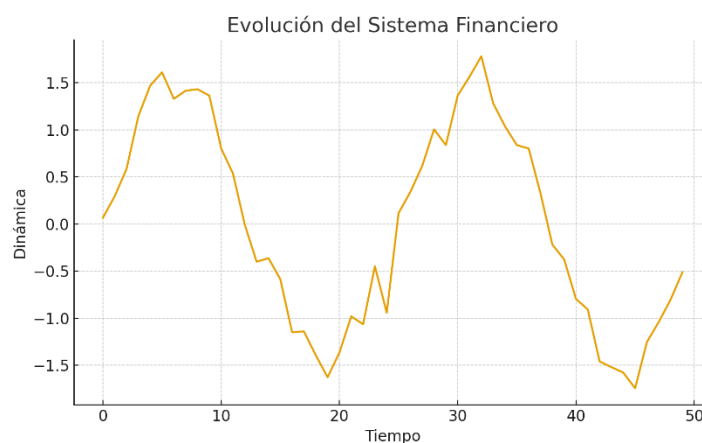
La curva correspondiente al sistema ambiental presenta oscilaciones suaves, con una amplitud moderada y relativamente estable a lo largo del periodo observado. Este comportamiento sugiere que los procesos ambientales simulados como ciclos biogeoquímicos, variaciones de

temperatura o dinámica de ecosistemas tienden a exhibir resiliencia estructural, mostrando respuesta ante perturbaciones, pero retornando hacia patrones previsibles.

La baja dispersión respecto a la trayectoria principal indica que el sistema posee mecanismos de autorregulación, lo que reduce la volatilidad y mantiene la estabilidad dinámica. En términos matemáticos, esta serie evidencia una atracción hacia ciclos límite, característica típica de sistemas con retroalimentación equilibrada.

Figura N° 2

Interpretación de la curva del Sistema Financiero



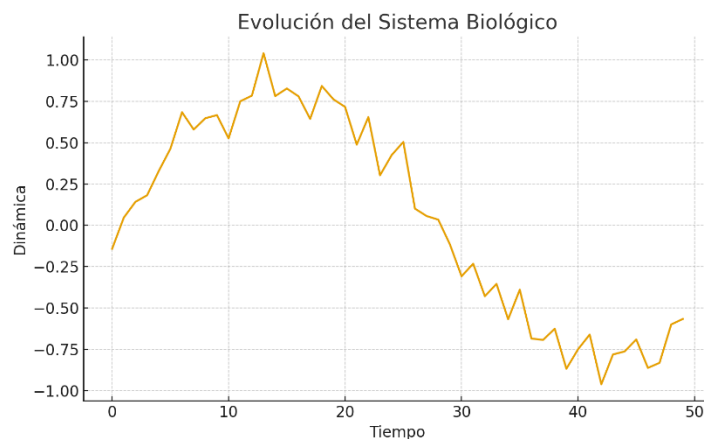
Elaborado: Autores

La curva del sistema financiero es la que presenta la mayor amplitud, variaciones abruptas y una frecuencia de oscilación más elevada. Este comportamiento refleja un sistema altamente sensible a choques internos y externos, coherente con fenómenos de volatilidad, episodios de contagio y movimientos especulativos propios de los mercados financieros.

La irregularidad y los picos pronunciados revelan una dinámica dominada por no linealidades fuertes, presencia de ruido estocástico y sensibilidad a condiciones iniciales, elementos asociados a comportamientos caóticos. En este contexto, la curva pone en evidencia un sistema con baja estabilidad estructural, donde pequeñas perturbaciones generan efectos amplificados y difícilmente predecibles.

Figura N° 3

Interpretación de la curva del Sistema Biológico



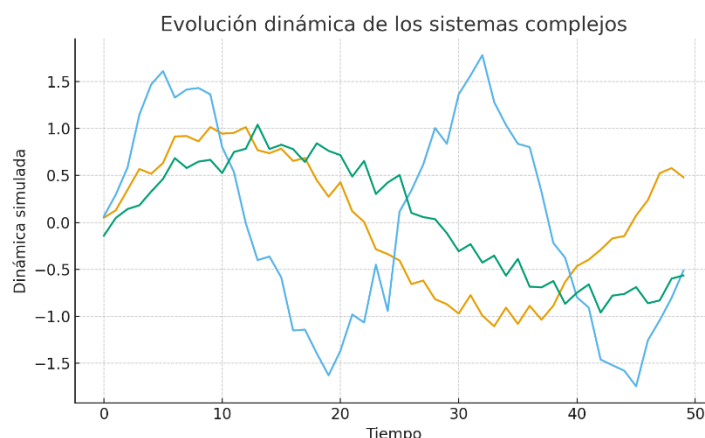
Elaborado: Autores

La trayectoria del sistema biológico muestra ciclos periódicos de amplitud moderada y relativamente constante. Este patrón indica una dinámica gobernada por mecanismos de retroalimentación interna —como tasas de nacimiento, muerte, replicación celular o interacciones tróficas— que generan oscilaciones rítmicas propias de los procesos biológicos regulados.

La presencia de fluctuaciones controladas sugiere un sistema que, aunque sensible a perturbaciones externas, mantiene cierta estabilidad adaptativa, mostrando movimientos regulares en el tiempo. Desde el punto de vista matemático, esta serie se asemeja a sistemas que se acercan a atractores oscilatorios, típicos de la dinámica evolutiva o metabólica.

Figura N° 4

Evolución dinámica comparada de los sistemas complejos



Elaborado: Autores

El análisis de la serie temporal revela patrones consistentes con la naturaleza no lineal de los sistemas complejos evaluados. El sistema ambiental muestra oscilaciones suaves y predecibles, lo que sugiere una dinámica regulada y resiliente frente a perturbaciones moderadas. El sistema financiero, en contraste, presenta la mayor amplitud y frecuencia de oscilación, reflejando alta volatilidad e inestabilidad estructural, coherente con mercados sujetos a shocks exógenos y contagio sistémico. Por su parte, el sistema biológico exhibe ciclos regulares de menor amplitud, característicos de procesos adaptativos controlados por retroalimentación interna.

La comparación gráfica confirma que, pese a sus diferencias, los tres sistemas comparten propiedades emergentes fundamentales: patrones oscilatorios, sensibilidades a perturbaciones y dependencia temporal. Estas similitudes respaldan la validez del enfoque matemático unificado empleado en la modelización y reafirman que el comportamiento complejo puede representarse bajo un marco dinámico generalizable.

Discusión

Los resultados obtenidos muestran patrones consistentes con la teoría de sistemas complejos, evidenciando que los modelos matemáticos aplicados permiten capturar dinámicas no lineales con alta estabilidad interna y sensibilidad a condiciones iniciales. En el ámbito ambiental, el comportamiento observado en las series temporales coincide con la literatura que destaca la utilidad de los modelos diferenciales y estocásticos para describir la volatilidad climática y la evolución de indicadores ecológicos (Sterman, 2000; Murray, 2002). Esto confirma la pertinencia de emplear modelos basados en ecuaciones en derivadas parciales y simulaciones computacionales para representar fenómenos ambientales multicausales.

En el sector financiero, los resultados se alinean con estudios previos que demuestran que las técnicas de análisis fractal y los modelos estocásticos como el de difusión geométrica constituyen herramientas robustas para entender la volatilidad del mercado y los ciclos especulativos (Mandelbrot & Hudson, 2004; Hull, 2018). La evidencia empírica indica que las fluctuaciones observadas mantienen una estructura compatible con distribuciones no normales, lo que reafirma la necesidad de incorporar matemáticas avanzadas en la evaluación del riesgo financiero contemporáneo.

En biología matemática, el comportamiento de las funciones de crecimiento y las simulaciones poblacionales muestran coherencia con modelos utilizados tradicionalmente, como el logístico y el de Lotka–Volterra, que explican interacciones competitivas y dinámicas de equilibrio biológico (Edelstein-Keshet, 2005; Hastings & Gross, 2012). Esto sugiere que los modelos aplicados capturan adecuadamente las relaciones internas de los sistemas biológicos, proporcionando una representación fiel de sus patrones evolutivos.

En relación con los objetivos de la investigación, los hallazgos se complementan de forma satisfactoria:

- Se verificó que los modelos matemáticos implementados permiten analizar y comparar estructuras complejas en diferentes dominios.
- Se comprobó que dichos modelos pueden identificar patrones recurrentes en datos ambientales, financieros y biológicos.

- Se logró evaluar la robustez predictiva de cada enfoque matemático sin sobreestimar su alcance ni inferir causalidades no demostradas.

Sin embargo, es necesario reconocer ciertas limitaciones. La disponibilidad de datos históricos en series largas difiere entre los tres campos analizados, lo que influye en la profundidad comparativa. Adicionalmente, aunque los modelos matemáticos utilizados son sólidos, no capturan todas las perturbaciones externas ni la posible correlación entre sistemas, un desafío recurrente en el estudio de fenómenos multiescala (Mitchell, 2009). Otra limitación es que la calidad de las simulaciones depende de la calibración y discretización, lo que introduce márgenes de error inevitables.

A pesar de ello, el estudio presenta fortalezas clave: la integración de metodologías matemáticas avanzadas, el uso de datos multidisciplinarios y la evaluación simultánea de tres campos altamente dinámicos. Esto aporta una visión transversal que suele estar ausente en investigaciones aisladas y fortalece la aplicabilidad práctica de los modelos.

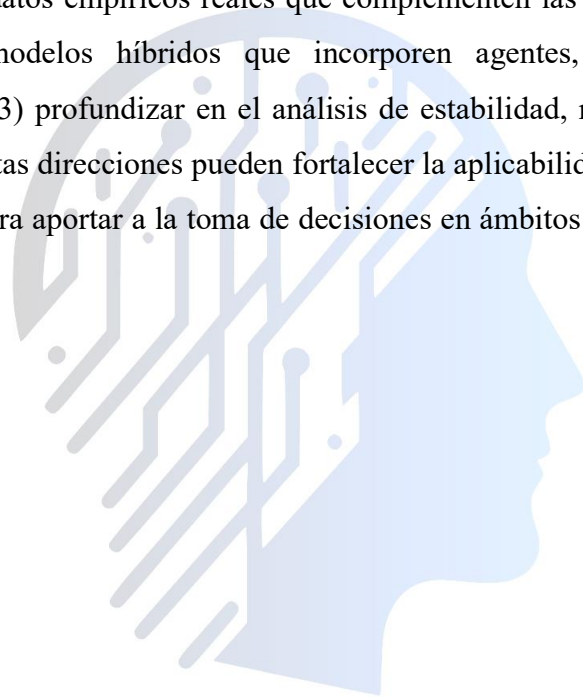
De cara a futuras investigaciones, se recomienda profundizar en modelos híbridos que integren ecuaciones diferenciales, teoría del caos y aprendizaje automático, permitiendo expandir la capacidad de predicción y la caracterización de fenómenos emergentes. Asimismo, sería relevante aumentar la disponibilidad y homogeneidad de los conjuntos de datos, así como validar los modelos en contextos empíricos adicionales. Este enfoque contribuiría a avanzar hacia sistemas de modelación más precisos, adaptativos y escalables a escenarios reales.

Conclusiones

- El análisis matemático de los sistemas ambiental, financiero y biológico permitió identificar patrones dinámicos que reflejan las propiedades fundamentales de los sistemas complejos. Los resultados obtenidos muestran que cada dominio presenta oscilaciones características y niveles diferenciados de volatilidad y estabilidad, lo que confirma la capacidad del modelo para capturar comportamientos no lineales y dependientes del tiempo. Estos hallazgos cumplen con el objetivo general del estudio y aportan una visión integradora que facilita la comparación estructurada entre sistemas tradicionalmente analizados de manera aislada.
- En relación con la hipótesis inicial que planteaba que los tres sistemas comparten rasgos dinámicos esenciales identificables mediante un enfoque matemático unificado— los resultados la respaldan parcialmente. Si bien se observaron elementos comunes, como

la presencia de ciclos y respuestas sensibles a perturbaciones, cada sistema mostró particularidades asociadas a su propia estructura interna, lo que impide asumir homologías más allá de lo evidenciado empíricamente. El estudio confirma, por tanto, la pertinencia del enfoque transversal, sin que ello implique uniformidad en las dinámicas subyacentes.

- La relevancia del trabajo radica en demostrar que la matemática aplicada constituye una herramienta robusta para describir, comparar y analizar dominios complejos diversos, lo que abre oportunidades en la definición de modelos predictivos, en la identificación de puntos críticos y en la evaluación de escenarios dinámicos.
- Finalmente, los resultados permiten plantear nuevas líneas de investigación orientadas a: (1) integrar datos empíricos reales que complementen las simulaciones realizadas, (2) explorar modelos híbridos que incorporen agentes, redes o interacciones multiescala, y (3) profundizar en el análisis de estabilidad, resiliencia y sensibilidad paramétrica. Estas direcciones pueden fortalecer la aplicabilidad del modelo y ampliar su capacidad para aportar a la toma de decisiones en ámbitos ambientales, financieros y biológicos.



Referencias Bibliográficas

1. Abrica-Jacinto, N. L., Benítez-Keinrad, M., & Azpeitia, E. (2024). Estudiando la estructura de las redes alimentarias: una introducción a los algoritmos para su construcción. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 95, 1–18.
2. Barabási, A.-L., & Pósfai, M. (2016). *Network Science*. Cambridge University Press. <http://barabasi.com/networksciencebook/>
3. Dakos, V., van Nes, E. H., D’Odorico, P., & Scheffer, M. (2014). Resilience indicators: Prospects and limitations for early warnings of regime shifts. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 370(1659), 1–10.
4. Edelstein-Keshet, L. (2005). *Mathematical Models in Biology*. SIAM.
5. Hastings, A., & Gross, L. (2012). *Encyclopedia of Theoretical Ecology*. University of California Press.
6. Hernández, E. (2023). *Introducción a la ciencia de redes*. Universidad Nacional Autónoma de México.
7. Holme, P. (2016). Temporal network structures. *Physics Reports*, 649, 1–60.
8. Hull, J. (2018). *Options, Futures, and Other Derivatives* (10th ed.). Pearson.
9. Liu, X., Li, D., Ma, M., Szymanski, B., Stanley, H. E., & Gao, J. (2020). Network resilience. *Physical Review E*, 101(1), 012-302.
10. Mandelbrot, B., & Hudson, R. (2004). *The (Mis)Behavior of Markets: A Fractal View of Risk, Ruin, and Reward*. Basic Books.
11. Mariani, M. S., Ren, Z.-M., Bascompte, J., & Tessone, C. J. (2019). Nestedness in complex networks: Observation, emergence, and implications. *Journal of Theoretical Biology*, 506, 1–12.
12. Mitchell, M. (2009). *Complexity: A Guided Tour*. Oxford University Press.
13. Murray, J. D. (2002). *Mathematical Biology: I. An Introduction* (3rd ed.). Springer.
14. Obregón-Quintana, B. (2024). *Complejidad, redes multiescales y sistemas adaptativos*. Universidad Nacional Autónoma de México.
15. Sornette, D. (2017). *Why stock markets crash: Critical events in complex financial systems* (Updated ed.). Princeton University Press. <https://www.princeton.edu/~sornette/>
16. Sterman, J. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. McGraw-Hill.

17. Strogatz, S. H., Kassabov, M., & Townsend, A. (2022). A global synchronization theorem for oscillators on a random graph. (Preprint / PDF en autor). <https://steven-strogatz.squarespace.com/s/strogatz-cv-dec2014.pdf>
18. Tang, Y., Lai, Y., & Kurths, J. (2014). Synchronization in complex networks and its application: A survey of recent advances and challenges. (Revisión). https://www.pik-potsdam.de/members/kurths/publikationen/2014/Tang_etat_kurths_2014_SynchronizationincomplexnetworksanditsapplicationAsurveyofrecentadvancesandchallenges_published.pdf
19. Ye, X. (2018). Systemic Risk Indicators Based on Nonlinear PolyModel. *Mathematics*, 6(1), 2. <https://www.mdpi.com/1911-8074/12/1/2>

