SADAF
DOCENTES DE ADMINISTRACIÓN FINANCIERA

46 Jornadas Nacionales de Administración Financiera
Septiembre 17 y 18, 2026

Topological financial dynamics, detección temprana y control óptimo de la fragilidad financiera corporativa

Evidencia para empresas argentinas

Daniel Miliá
Universidad Nacional de Cuyo

SUMARIO

1. Introducción
2. Fragilidad financiera como sistema dinámico: fundamentos teóricos del modelo *topological financial dynamics*
3. Modelo *topological financial dynamics*
4. Datos y metodología empírica
5. Resultados
6. Conclusiones

Para comentarios:
daniel@economicas.uba.ar

1. Introducción

La creciente complejidad de los mercados financieros ha puesto de manifiesto las limitaciones de los enfoques tradicionales para detectar de manera temprana procesos de fragilidad financiera corporativa. Durante las últimas décadas, la literatura especializada ha desarrollado numerosos modelos destinados a anticipar situaciones de deterioro económico, insolvencia o incumplimiento financiero, entre los que se destacan los trabajos pioneros de Beaver (1966), Altman (1968), Ohlson (1980) y Zmijewski (1984), posteriormente complementados por especificaciones econométricas, modelos de supervivencia y, más recientemente, técnicas de aprendizaje automático e inteligencia artificial. A pesar de los avances alcanzados, la mayor parte de estos enfoques continúa interpretando la fragilidad financiera como una propiedad derivada del comportamiento individual o agregado de indicadores contables y financieros, privilegiando relaciones lineales o patrones estadísticos cuya capacidad explicativa suele deteriorarse frente a entornos económicos altamente dinámicos y no lineales.

Esta limitación adquiere especial relevancia en economías emergentes caracterizadas por elevada volatilidad macroeconómica, frecuentes modificaciones regulatorias, restricciones financieras y cambios recurrentes en las condiciones de financiamiento. En estos contextos, la fragilidad financiera rara vez se manifiesta como un evento puntual; por el contrario, constituye un proceso evolutivo donde múltiples variables patrimoniales, económicas y financieras interactúan simultáneamente, generando configuraciones dinámicas difíciles de capturar mediante metodologías convencionales. En consecuencia, el análisis basado exclusivamente en ratios financieros o en modelos de clasificación tradicionales puede resultar insuficiente para identificar modificaciones estructurales que preceden al deterioro observable de los estados financieros.

En paralelo, el desarrollo del *topological data analysis* (TDA, análisis topológico de datos) ha abierto nuevas posibilidades para el estudio de sistemas complejos de alta dimensionalidad. A diferencia de los métodos estadísticos tradicionales, el análisis topológico no centra su atención en el comportamiento aislado de las variables, sino en la geometría del espacio generado por las relaciones existentes entre ellas, permitiendo identificar estructuras persistentes, patrones de conectividad y procesos de reorganización que permanecen parcialmente ocultos bajo enfoques convencionales. Si bien estas herramientas han encontrado aplicaciones crecientes en disciplinas como la biología, la física, la neurociencia y la ciencia de datos, su incorporación al análisis del riesgo financiero corporativo continúa siendo incipiente y presenta un amplio potencial de desarrollo.

En este contexto, el presente trabajo propone el modelo *topological financial dynamics* (TFD, dinámica topológica financiera), un marco analítico destinado a representar la fragilidad financiera corporativa como un fenómeno dinámico emergente de la estructura topológica del espacio financiero construido a partir de información contable, financiera, bursátil y macroeconómica. El modelo combina herramientas de análisis topológico de datos, homología persistente y control óptimo para construir un índice de fragilidad topológica (IFT) capaz de sintetizar la evolución estructural de las organizaciones y detectar tempranamente procesos de deterioro financiero.

A diferencia de los enfoques tradicionales, el modelo desarrollado no busca estimar únicamente la probabilidad de insolvencia o incumplimiento, sino caracterizar la trayectoria financiera de las empresas dentro de un espacio multidimensional cuya geometría evoluciona conjuntamente con la estructura económica de las organizaciones. Bajo esta perspectiva, la información relevante deja de residir exclusivamente en el valor alcanzado por determinados indicadores financieros y pasa a localizarse en la configuración estructural del sistema y en las transformaciones topológicas que experimenta a lo largo del tiempo.

La validación empírica del modelo se realiza utilizando información correspondiente a empresas argentinas que cotizan en Bolsas y Mercados Argentinos (BYMA) durante el período 2010–2025. La elección de este universo responde al interés por evaluar el desempeño del modelo en un entorno caracterizado por elevada volatilidad macroeconómica, múltiples cambios en las condiciones de financiamiento y una marcada heterogeneidad sectorial, condiciones particularmente apropiadas para analizar la dinámica de la fragilidad financiera corporativa.

La principal contribución del trabajo consiste en proponer una metodología alternativa para la evaluación del riesgo financiero que integra información contable, financiera y topológica dentro de un único marco analítico. Desde el punto de vista teórico, el estudio amplía la literatura sobre detección temprana de fragilidad financiera incorporando herramientas provenientes de la topología computacional. Desde una perspectiva metodológica, desarrolla un índice basado en invariantes topológicos persistentes cuya estimación no depende de ponderaciones arbitrarias entre variables financieras. Finalmente, en el plano aplicado, el modelo ofrece una herramienta potencialmente útil para entidades financieras, organismos reguladores, inversores institucionales y responsables de la gestión financiera empresarial interesados en identificar procesos tempranos de deterioro estructural antes de que éstos resulten plenamente visibles mediante indicadores financieros tradicionales.

El resto del trabajo se organiza de la siguiente manera. La sección 2 desarrolla el marco teórico que fundamenta la representación de la fragilidad financiera como un sistema dinámico complejo. La sección 3 presenta la formulación conceptual y matemática del modelo *topological financial dynamics*. La sección 4 describe la base de datos, las variables empleadas y la estrategia metodológica utilizada para su estimación. La sección 5 expone los principales resultados empíricos obtenidos para las empresas argentinas analizadas y los compara con metodologías tradicionales de evaluación del riesgo financiero. Y la sección 6 presenta las conclusiones, las contribuciones del estudio y las principales líneas de investigación futura.

2. Fragilidad financiera como sistema dinámico: fundamentos teóricos del modelo *topological financial dynamics*

La comprensión de la fragilidad financiera ha evolucionado significativamente durante las últimas décadas. Mientras los primeros modelos de evaluación del riesgo corporativo interpretaron el deterioro financiero como el resultado de desviaciones observables en determinados indicadores contables, los desarrollos más recientes reconocen que la estabilidad económica de una organización constituye un fenómeno multidimensional emergente de la interacción simultánea entre variables patrimoniales, financieras, operativas y macroeconómicas. Desde esta perspectiva, la fragilidad financiera no representa un estado discreto asociado exclusivamente

a la insolvencia, sino un proceso dinámico de reorganización estructural cuya evolución precede, en numerosos casos, a la manifestación explícita de dificultades económicas.

Los modelos clásicos de predicción del fracaso empresarial, encabezados por los aportes de Beaver (1966), Altman (1968), Ohlson (1980) y Zmijewski (1984), establecieron las bases del análisis cuantitativo del riesgo financiero mediante la utilización de ratios contables y técnicas estadísticas de clasificación. Posteriormente, la incorporación de modelos econométricos, análisis de supervivencia y algoritmos de aprendizaje automático incrementó la capacidad predictiva de estos enfoques al permitir capturar relaciones no lineales y estructuras de dependencia más complejas. Sin embargo, la lógica subyacente permaneció esencialmente inalterada: la fragilidad financiera continuó siendo interpretada como una propiedad inferida a partir del comportamiento de variables individuales o de combinaciones de indicadores financieros.

Esta aproximación presenta limitaciones conceptuales cuando el objeto de estudio corresponde a sistemas caracterizados por múltiples interacciones simultáneas. Las empresas constituyen organizaciones complejas cuyas decisiones de financiamiento, inversión, generación de resultados, administración del capital de trabajo y estructura patrimonial evolucionan de manera conjunta bajo la influencia de condiciones macroeconómicas cambiantes. En consecuencia, la información relevante no reside exclusivamente en el valor alcanzado por cada variable financiera, sino en la estructura de relaciones que dichas variables conforman en cada instante del tiempo y en la forma en que esa estructura se transforma durante la evolución de la organización.

Este enfoque resulta consistente con la teoría de los sistemas complejos, según la cual el comportamiento agregado de un sistema no puede explicarse únicamente a partir del análisis aislado de sus componentes individuales. La aparición de propiedades emergentes constituye una característica distintiva de este tipo de sistemas y exige metodologías capaces de representar simultáneamente las interacciones existentes entre múltiples dimensiones. En el ámbito financiero, esta perspectiva permite interpretar la fragilidad como una propiedad estructural del sistema corporativo, cuya evolución depende de la configuración global de las relaciones financieras y no exclusivamente del deterioro observado en determinados indicadores contables.

En este contexto, el análisis topológico de datos (*topological data analysis*, TDA) ofrece un marco metodológico particularmente adecuado para representar sistemas financieros de alta dimensionalidad. A diferencia de los métodos estadísticos tradicionales, el TDA estudia la geometría de los datos mediante la identificación de propiedades topológicas que permanecen invariantes frente a deformaciones continuas del espacio. La utilización de herramientas como la homología persistente permite identificar componentes conexas, ciclos y otras estructuras geométricas cuya permanencia refleja patrones organizacionales estables, proporcionando una representación estructural del sistema que trasciende el análisis individual de las variables.

La incorporación de herramientas topológicas al análisis financiero supone un cambio conceptual relevante. El objeto de estudio deja de ser el comportamiento aislado de ratios financieros para centrarse en la geometría del espacio económico generado por la interacción conjunta de todas las dimensiones consideradas. Bajo esta perspectiva, las empresas pueden interpretarse como trayectorias que evolucionan dentro de un espacio financiero multidimensional, donde la proximidad entre organizaciones refleja similitudes estructurales y las modificaciones geométricas constituyen evidencia de procesos de reorganización financiera.

Sobre la base de estos fundamentos, el presente trabajo propone el modelo *topological financial dynamics* (TFD, dinámica topológica financiera), concebido como un marco analítico

destinado a representar la evolución de la fragilidad financiera mediante herramientas de topología computacional. El modelo parte de la hipótesis de que las transformaciones en la geometría del espacio financiero contienen información anticipatoria sobre procesos de deterioro económico que no resulta plenamente observable mediante indicadores contables tradicionales. En consecuencia, la estimación de invariantes topológicos persistentes permite construir un índice de fragilidad topológica (IFT) capaz de sintetizar la evolución estructural de las organizaciones y servir como base para la formulación de estrategias de control óptimo orientadas a preservar la estabilidad financiera.

Desde esta perspectiva, el modelo TFD no pretende sustituir las metodologías tradicionales de análisis financiero, sino ampliar su alcance incorporando una representación estructural de la información económica. La contribución teórica del enfoque reside en interpretar la fragilidad financiera como una propiedad emergente de la geometría del sistema corporativo, integrando conceptos provenientes de las finanzas, la teoría de sistemas complejos y la topología computacional dentro de un único marco analítico.

3. Modelo *topological financial dynamics*

3.1 Arquitectura conceptual del modelo

El modelo *topological financial dynamics* (TFD) se fundamenta en la hipótesis de que la fragilidad financiera corporativa constituye una propiedad estructural emergente del sistema financiero de cada organización y, por consiguiente, no puede describirse adecuadamente mediante el análisis aislado de indicadores contables o financieros. Bajo esta perspectiva, la empresa deja de representarse como un conjunto independiente de ratios económicos para interpretarse como un sistema dinámico cuya evolución depende de la interacción simultánea entre múltiples dimensiones patrimoniales, operativas, financieras y macroeconómicas.

A diferencia de los enfoques tradicionales, donde el objetivo consiste en estimar la probabilidad de ocurrencia de un evento de insolvencia, el modelo propuesto busca representar la evolución continua de la estructura financiera mediante una geometría multidimensional cuya configuración cambia a lo largo del tiempo. En consecuencia, la información relevante no reside exclusivamente en los valores alcanzados por determinadas variables, sino en la forma en que dichas variables organizan el espacio financiero y en las transformaciones topológicas que éste experimenta durante la evolución de cada empresa.

Desde esta perspectiva, el modelo TFD se desarrolla mediante una secuencia de etapas interdependientes que transforman progresivamente la información contable en un indicador dinámico de fragilidad financiera.

En una primera etapa, los estados financieros de cada empresa se representan mediante un vector de características construido a partir de variables patrimoniales, económicas, financieras, bursátiles y macroeconómicas. La totalidad de estos vectores conforma un espacio financiero multidimensional en el cual cada observación empresa-período ocupa una posición determinada por su estructura económico-financiera.

Sobre dicho espacio se define una relación de proximidad entre observaciones utilizando métricas de distancia apropiadas para datos financieros de alta dimensionalidad. La información contenida en esta matriz de distancias constituye la base para la construcción de complejos

simpliciales y de la correspondiente filtración topológica, permitiendo representar la organización geométrica del sistema corporativo.

La aplicación de técnicas de homología persistente permite posteriormente identificar aquellas estructuras topológicas cuya permanencia refleja propiedades estables del espacio financiero. Componentes conexas, ciclos persistentes e invariantes geométricos dejan de interpretarse como objetos puramente matemáticos para convertirse en representaciones estructurales de configuraciones financieras recurrentes, procesos de reorganización patrimonial y trayectorias de estabilidad o deterioro económico.

Los invariantes obtenidos constituyen el insumo para la construcción del Índice de Fragilidad Topológica (IFT), definido como una medida sintética destinada a cuantificar la estabilidad estructural de cada organización a partir de la geometría del espacio financiero. A diferencia de los índices tradicionales, el IFT no surge de ponderaciones arbitrarias entre ratios financieros, sino de la estructura topológica generada por la interacción conjunta de todas las variables consideradas en el modelo.

La evolución temporal del índice permite reconstruir la trayectoria dinámica de cada empresa dentro del espacio financiero y analizar las transiciones entre diferentes *estados topológicos de fragilidad* (ETF), proporcionando una representación continua del proceso de deterioro o fortalecimiento financiero. En consecuencia, el modelo no sólo identifica el nivel de fragilidad observado en un determinado período, sino que incorpora explícitamente la dirección y velocidad con la cual evoluciona la estructura financiera de la organización.

En otras palabras, el modelo incorpora un componente de control óptimo, mediante el cual la trayectoria futura de la fragilidad financiera puede interpretarse como un problema dinámico de decisión. Bajo este enfoque, las políticas de financiamiento, inversión, administración del capital de trabajo y estructura de capital dejan de analizarse únicamente por sus efectos inmediatos sobre determinados indicadores financieros y pasan a evaluarse en función de su capacidad para modificar la trayectoria topológica esperada de la empresa dentro del espacio financiero.

3.2 Formalización matemática del modelo

Sea $\mathrm{E} = \{\mathrm{E_n}\}$ el conjunto de empresas consideradas en el estudio y $\mathrm{T} = \{\mathrm{t_m}\}$ el horizonte temporal de observación. Cada empresa E_i, observada en el instante t_j, se representa mediante un vector financiero de dimensión p,

$$\mathrm{x_{ij}} = \left(\mathrm{x_{ij}^{(p)}}\right)$$

cuyos componentes corresponden a variables obtenidas de los estados financieros, indicadores derivados, información bursátil y variables macroeconómicas incorporadas al modelo.

El conjunto completo de observaciones define una matriz de datos $\mathrm{X} \in \mathrm{R^{N\times p}}$, donde $\mathrm{N} = \mathrm{n} \times \mathrm{m}$, representa el número total de observaciones empresa-período. Con el propósito de preservar la comparabilidad entre variables expresadas en distintas escalas, todas las dimensiones del espacio financiero son previamente normalizadas mediante una transformación $\mathrm{N}: \mathrm{R^p} \to \mathrm{R^p}$, obteniéndose el espacio financiero normalizado $\widetilde{\mathrm{X}} = \mathrm{N(X)}$.

Sobre dicho espacio se define una métrica $\mathrm{d}: \widetilde{\mathrm{X}} \times \widetilde{\mathrm{X}} \to \mathrm{R^+}$, capaz de cuantificar la proximidad entre configuraciones financieras.En términos generales,

$$d(x_j) = \left(\sum_{k=1}^{p} | x_i^{(k)} - x_j^{(k)} |^q \right)^{1/q}$$

aunque el modelo admite la utilización de diferentes métricas (euclidiana, Mahalanobis o coseno) según las características empíricas de la muestra y los resultados del proceso de validación.

La matriz de distancias $D = [d_{ij}]$ constituye el punto de partida para la construcción del espacio topológico. Para cada valor del parámetro de proximidad $\varepsilon > 0$, se define el complejo simplicial de Vietoris–Rips

$$VR(\varepsilon) = \{\tilde{X}: d(x_j) \leq \varepsilon \ \forall x_i x_j \in \sigma\}$$

generándose la familia de complejos $VR(\varepsilon_1) \subseteq VR(\varepsilon_2) \subseteq \cdots \subseteq VR(\varepsilon_r)$, que conforma la filtración topológica del sistema financiero.

Sobre esta filtración se calcula la homología persistente $H_k(VR(\varepsilon))$, obteniéndose para cada dimensión $k$los correspondientes números de Betti $\beta_k = (H_k)$, los cuales cuantifican propiedades invariantes del espacio financiero. En particular, β_0 representa el número de componentes conexas, mientras que β_1 mide la existencia de ciclos persistentes asociados con configuraciones estructurales del sistema financiero.

La evolución de dichas invariantes se resume mediante diagramas de persistencia, $P = \{(d_i)\}$, donde cada par ordenado representa el nacimiento (b_i) y la desaparición (d_i) de una característica topológica a lo largo del proceso de filtración.

A partir de esta representación se define el *índice de fragilidad topológica*

$$IFT = \Phi(\Theta)$$

donde

- β representa el conjunto de invariantes topológicos
- P resume la persistencia de las estructuras geométricas
- τ incorpora la dinámica temporal observada en las trayectorias empresariales
- Θ representa el conjunto de parámetros obtenidos durante el proceso de calibración

La función $\Phi(\cdot)$ es estimada empíricamente mediante procedimientos de optimización sujetos a restricciones de estabilidad topológica y consistencia temporal, evitando la utilización de ponderaciones arbitrarias entre variables financieras.

La evolución temporal del índice puede describirse mediante la ecuación dinámica

$$IFT_{t+1} = F(T_t u_t \omega_t)$$

donde u_t representa el vector de decisiones financieras adoptadas por la empresa (estructura de capital, liquidez, inversión y financiamiento) y ω_t recoge perturbaciones exógenas derivadas del entorno macroeconómico.

Finalmente, el problema de gestión de la fragilidad financiera se formula como un problema de control óptimo,

$$\min_{u_t} J = \int_0^T L(FT(t)u(t))dt$$

sujeto a la dinámica previamente definida, donde la función objetivo busca minimizar la fragilidad financiera acumulada y el costo asociado a las decisiones de intervención.

Esta formulación integra, dentro de un único marco matemático, la representación del espacio financiero, la caracterización topológica del sistema corporativo y la optimización dinámica de las decisiones financieras, constituyendo el fundamento formal del modelo.

4. Datos y metodología empírica

La validación empírica del modelo *topological financial dynamics* (TFD) se realizó utilizando información correspondiente a empresas argentinas sujetas al régimen de oferta pública que cotizan en Bolsas y Mercados Argentinos S.A. (BYMA) y presentan sus estados financieros ante la Comisión Nacional de Valores (CNV). La utilización de este universo garantiza la disponibilidad de información pública, auditada y elaborada conforme a las Normas Internacionales de Información Financiera (NIIF), proporcionando un marco homogéneo para la comparación temporal y transversal de la información financiera.

El horizonte de observación comprende el período 2010–2025, intervalo que incorpora distintos escenarios macroeconómicos caracterizados por elevada volatilidad, modificaciones en las condiciones de financiamiento, cambios regulatorios y diferentes fases del ciclo económico argentino. La amplitud temporal de la muestra permite evaluar la estabilidad del modelo bajo contextos financieros heterogéneos y analizar la evolución de la fragilidad financiera a lo largo de distintos ciclos económicos.

La muestra quedó conformada por empresas pertenecientes a los principales sectores representados en el mercado de capitales argentino, incluyendo entidades financieras, energía, petróleo y gas, industria manufacturera, materiales básicos, construcción, agroindustria, telecomunicaciones, consumo masivo y servicios. Entre ellas se encuentran YPF S.A., Grupo Financiero Galicia S.A., Banco Macro S.A., Banco BBVA Argentina S.A., Banco Supervielle S.A., Pampa Energía S.A., Transportadora de Gas del Sur S.A., Transportadora de Gas del Norte S.A., Central Puerto S.A., Aluar Aluminio Argentino S.A.I.C., Ternium Argentina S.A., Loma Negra C.I.A.S.A., Cresud S.A.C.I.F. y A., San Miguel A.G.I.C.I. y F. y Telecom Argentina S.A.

Estas compañías representan una proporción sustancial de la capitalización bursátil de BYMA y exhiben estructuras patrimoniales y modelos de negocios suficientemente heterogéneos como para evaluar el desempeño del modelo bajo diferentes configuraciones financieras.

Las empresas fueron incorporadas únicamente cuando presentaban información financiera continua y comparable durante el período analizado. Se excluyeron aquellas observaciones con discontinuidades significativas, reorganizaciones societarias que comprometieran la consistencia temporal de los datos o ausencia de información indispensable para la construcción del espacio financiero.

La construcción del espacio financiero corporativo se realizó integrando información proveniente de los tres estados financieros básicos. Del estado de situación financiera se incorporaron las principales partidas representativas de la estructura patrimonial y financiera, entre ellas efectivo y equivalentes de efectivo, inversiones financieras, créditos por ventas, inventarios, activo corriente, activo no corriente, activo total, pasivo corriente, pasivo no corriente, deuda financiera, obligaciones negociables y patrimonio neto. Del estado del resultado integral

se consideraron ventas netas, costo de ventas, resultado bruto, resultado operativo (EBIT), ebitda, resultado financiero y resultado neto, mientras que del estado de flujos de efectivo se incorporaron los flujos generados por actividades operativas, de inversión y financiación, así como el flujo libre de caja y la variación neta del efectivo.

A partir de estas magnitudes contables se construyó un conjunto de indicadores financieros destinados a representar las principales dimensiones del desempeño empresarial. En particular, se estimaron indicadores de liquidez, solvencia, estructura de capital, rentabilidad, eficiencia operativa y generación de fondos, incluyendo, entre otros, la razón corriente, prueba ácida, *cash ratio*, debt-to-equity, debt-to-assets, ROA, ROE, margen ebitda, margen operativo, margen neto, rotación del activo, ciclo de conversión del efectivo, cobertura de intereses, flujo operativo sobre deuda financiera y flujo libre de caja sobre activo total.

Asimismo, el modelo incorporó variables bursátiles (capitalización de mercado, rendimiento y volatilidad de las acciones) y variables macroeconómicas representativas del entorno económico, tales como inflación, tipo de cambio, tasa de interés y nivel de actividad.

Con el propósito de garantizar la consistencia estadística de la información, la base de datos fue sometida a un proceso de preprocesamiento que comprendió la depuración de observaciones inconsistentes, la homogeneización de criterios contables, la normalización de todas las variables y la verificación de la continuidad temporal de las series financieras. Estas transformaciones permitieron construir un espacio financiero multidimensional preservando la información económica contenida en los estados financieros y eliminando distorsiones derivadas de diferencias de escala o de cambios en los criterios de presentación contable.

La implementación empírica del modelo se desarrolló mediante una secuencia integrada de etapas. Inicialmente, cada observación empresa-período fue representada por un vector financiero de alta dimensionalidad construido a partir de las variables seleccionadas. Sobre este espacio financiero normalizado se estimó la matriz de distancias entre todas las observaciones, constituyendo la base para la construcción de los complejos simpliciales de Vietoris–Rips y de la correspondiente filtración topológica. Posteriormente, se aplicaron técnicas de homología persistente con el objeto de identificar los invariantes geométricos que describen la organización estructural del sistema financiero.

Finalmente, dichos invariantes fueron utilizados para estimar el índice de fragilidad topológica (IFT), cuya capacidad para representar la evolución de la fragilidad financiera fue evaluada mediante procedimientos de validación temporal, análisis fuera de muestra y comparación con modelos clásicos de predicción de dificultades financieras, especificaciones econométricas y algoritmos contemporáneos de aprendizaje automático.

Con el propósito de facilitar la comprensión del procedimiento metodológico, la tabla 1 resume las dimensiones financieras incorporadas al modelo y las principales fuentes de información utilizadas en la construcción del espacio financiero.

5. Resultados

5.1 Caracterización de la muestra y análisis descriptivo

La aplicación empírica del modelo *topological financial dynamics* (TFD) se desarrolló sobre un panel longitudinal integrado por empresas argentinas sujetas al régimen de oferta públi-

Tabla 1: Variables incorporadas al modelo topological financial dynamics

Dimensión	*Variables representativas*	*Fuente*
Estructura patrimonial	Caja y equivalentes, inversiones financieras, créditos por ventas, inventarios, activos, pasivos, deuda financiera, patrimonio neto	Estado de situación financiera
Desempeño económico	Ventas netas, EBIT, ebitda, resultado financiero, resultado neto	Estado del resultado integral
Liquidez y generación de fondos	Flujo operativo, flujo de inversión, flujo de financiación, flujo libre de caja	Estado de flujos de efectivo
Indicadores financieros	Liquidez, solvencia, rentabilidad, eficiencia, estructura de capital y cobertura	Elaboración propia
Información de mercado	Capitalización bursátil, rendimiento y volatilidad	BYMA
Entorno macroeconómico	Inflación, tipo de cambio, tasa de interés y actividad económica	INDEC, BCRA y fuentes oficiales

ca, utilizando información financiera correspondiente al período 2010–2025. El horizonte temporal seleccionado permite incorporar diferentes regímenes macroeconómicos, fases del ciclo económico, modificaciones regulatorias y cambios en las condiciones de financiamiento, proporcionando un entorno adecuado para analizar la evolución de la fragilidad financiera bajo escenarios económicos significativamente distintos.

La muestra comprende empresas pertenecientes a los principales sectores representados en Bolsas y Mercados Argentinos (BYMA), incluyendo petróleo y gas, generación y transporte de energía, entidades financieras, industria manufacturera, materiales básicos, telecomunicaciones, agroindustria y consumo. En particular, se incorporaron YPF S.A., Pampa Energía S.A., Transportadora de Gas del Sur S.A., Transportadora de Gas del Norte S.A., Central Puerto S.A., Grupo Financiero Galicia S.A., Banco Macro S.A., Banco BBVA Argentina S.A., Banco Supervielle S.A., Aluar Aluminio Argentino S.A.I.C., Ternium Argentina S.A., Loma Negra C.I.A.S.A., Cresud S.A.C.I.F. y A., San Miguel A.G.I.C.I. y F. y Telecom Argentina S.A. La selección respondió exclusivamente a criterios de continuidad, consistencia y disponibilidad de información financiera durante todo el período analizado.

La diversidad sectorial constituye un componente central del diseño metodológico. Las compañías energéticas presentan estructuras patrimoniales intensivas en activos de larga duración y elevados requerimientos de inversión; las entidades financieras concentran activos y pasivos de naturaleza financiera sujetos a regulación prudencial; las empresas industriales y de materiales básicos exhiben una mayor sensibilidad frente al ciclo económico y a los precios internacionales; las organizaciones agroindustriales incorporan riesgos productivos específicos, mientras que las empresas de telecomunicaciones combinan importantes inversiones en infraestructura con flujos operativos relativamente estables. Esta heterogeneidad resulta particularmente adecuada para evaluar la capacidad del modelo TFD de identificar configuraciones financieras diferenciadas y representar procesos de transformación estructural a lo largo del tiempo.

La composición sectorial de la muestra se resume en la tabla 2.

Tabla 2: Composición sectorial de la muestra

Sector	Empresas incluidas	Características económico-financieras predominantes
Petróleo, gas y energía	YPF, Pampa Energía, TGS, TGN, Central Puerto	Elevada intensidad de capital, activos de largo plazo, inversión permanente y fuerte exposición regulatoria
Entidades financieras	Grupo Financiero Galicia, Banco Macro, BBVA Argentina, Banco Supervielle	Predominio de activos y pasivos financieros, elevada sensibilidad a tasas de interés y regulación bancaria
Industria y materiales básicos	Aluar, Ternium Argentina, Loma Negra	Alta exposición al ciclo económico, inversión productiva y precios internacionales
Agroindustria	Cresud, San Miguel	Riesgo climático, activos biológicos y dependencia del comercio exterior
Telecomunicaciones	Telecom Argentina	Inversiones intensivas en infraestructura y estabilidad relativa de flujos operativos

La construcción del espacio financiero se realizó integrando información proveniente del estado de situación financiera, del estado del resultado integral y del estado de flujos de efectivo. A partir de estas fuentes se incorporaron las principales partidas patrimoniales, económicas y financieras, incluyendo activos corrientes y no corrientes, deuda financiera, patrimonio neto, ventas, resultados operativos, ebitda, resultado neto y flujos de efectivo. Sobre dichas magnitudes se calcularon indicadores representativos de liquidez, solvencia, estructura de capital, rentabilidad, eficiencia operativa y generación de fondos, permitiendo construir una representación multidimensional de la situación económico-financiera de cada empresa.

La utilización simultánea de cuentas contables e indicadores financieros constituye un aspecto distintivo del modelo propuesto. Mientras las partidas contables preservan la estructura económica subyacente de las organizaciones, los indicadores sintetizan relaciones funcionales entre dichas magnitudes. Esta integración permite representar de manera conjunta empresas que pueden exhibir niveles similares de activos o patrimonio, pero trayectorias significativamente diferentes en términos de rentabilidad, liquidez, generación de fondos o estructura de financiamiento.

Las diferencias observadas entre sectores y entre empresas pertenecientes a una misma actividad evidencian que la fragilidad financiera no constituye una propiedad asociada exclusivamente al tamaño de las organizaciones ni al comportamiento aislado de determinados indicadores. Por el contrario, las distintas combinaciones de liquidez, endeudamiento, rentabilidad, eficiencia operativa y capacidad de generación de fondos configuran estructuras financieras cuya evolución sólo puede comprenderse adecuadamente mediante un enfoque multidimensional. En este contexto, la construcción del espacio financiero propuesta por el modelo *topological financial dynamics* proporciona un marco analítico que permite estudiar simultáneamente dichas interacciones y representar geométricamente la evolución de las organizaciones a lo largo del tiempo.

Con el propósito de evitar que las diferencias de escala entre empresas condicionen la geometría del espacio financiero, todas las variables fueron previamente homogeneizadas y nor-

malizadas antes de estimar las relaciones de proximidad definidas en la sección 3. Este procedimiento garantiza que la distancia entre dos observaciones represente diferencias relativas en su estructura económico-financiera y no simplemente disparidades derivadas del tamaño patrimonial o del volumen de operaciones de cada empresa.

En conjunto, el análisis descriptivo confirma que la muestra reúne un elevado grado de heterogeneidad estructural, condición indispensable para evaluar el desempeño del modelo propuesto. La coexistencia de organizaciones con perfiles financieros significativamente diferentes proporciona un escenario adecuado para examinar si las herramientas de *topological data analysis* permiten identificar configuraciones persistentes, trayectorias de reorganización y patrones de fragilidad que permanecen parcialmente ocultos cuando el análisis se limita a indicadores financieros tradicionales.

Con el propósito de preservar la continuidad expositiva en este ensayo, el detalle completo de la base de datos empleada, la identificación de las observaciones empresa-año, las partidas contables incorporadas, los indicadores financieros calculados, las transformaciones aplicadas durante el proceso de normalización y los estadísticos descriptivos correspondientes a cada variable están disponibles en un documento complementario como anexo.[1] Esta información garantiza la trazabilidad y reproducibilidad de los resultados, al tiempo que mantiene el cuerpo principal del ensayo centrado en la formulación y validación del modelo.

5.2 Construcción del *financial configuration manifold*

La primera etapa de implementación del modelo consistió en la construcción del espacio financiero multidimensional definido en la sección 3. Cada observación empresa-período fue representada mediante un vector de características integrado por las variables contables, financieras, bursátiles y macroeconómicas previamente seleccionadas, dando origen a una representación conjunta de la estructura económico-financiera de las organizaciones analizadas.

Sea $X \in R^{N \times p}$ la matriz de datos obtenida a partir de la base empírica, donde N representa el número total de observaciones empresa-año y $p$el número de variables incorporadas al modelo. Cada fila de la matriz corresponde a una configuración financiera específica, mientras que cada columna representa una dimensión económica distinta asociada con la estructura patrimonial, el desempeño operativo, la rentabilidad, la liquidez, el endeudamiento o la capacidad de generación de fondos.

A diferencia de los enfoques convencionales de análisis financiero, el interés del modelo no radica en estudiar el comportamiento aislado de cada variable, sino en caracterizar la estructura geométrica generada por la interacción simultánea de todas ellas. En consecuencia, cada empresa deja de describirse mediante un conjunto independiente de indicadores financieros para interpretarse como un punto perteneciente a un espacio de configuraciones financieras cuya geometría evoluciona a lo largo del tiempo.

Con el propósito de preservar la comparabilidad entre magnitudes expresadas en diferentes escalas, todas las variables fueron previamente sometidas a procedimientos de homogeneización y normalización. Esta transformación evita que las diferencias asociadas al tamaño empresarial dominen la estructura geométrica del espacio y garantiza que las relaciones de proximidad reflejen configuraciones financieras relativas y no simples disparidades patrimoniales.

[1] Se envía a solicitud mediante mensaje al autor correspondiente, daniel@economicas.uba.ar.

Sobre el espacio normalizado se estimó la matriz de distancias definida en la formulación matemática del modelo. Dicha matriz representa el fundamento geométrico del análisis posterior, ya que cuantifica el grado de similitud existente entre todas las configuraciones financieras observadas durante el período de estudio. En este contexto, la proximidad entre dos empresas deja de interpretarse como una coincidencia en determinados indicadores contables y pasa a expresar la semejanza existente entre sus estructuras financieras completas.

A partir de esta representación se define formalmente el *financial configuration manifold* (FCM, sistema de configuración financiera) como la variedad geométrica generada por el conjunto de configuraciones financieras observadas en la muestra. Matemáticamente,

$$M = \{x_N\} \subset R^p$$

donde cada punto de la variedad representa el estado financiero de una empresa en un instante determinado.

La evolución temporal de cada organización puede interpretarse entonces como una trayectoria continua

$$\gamma_i(t): [T] \longrightarrow M$$

que describe el desplazamiento de la empresa dentro del espacio financiero a medida que evolucionan sus estados contables y sus condiciones económicas.

Esta formulación constituye uno de los aportes conceptuales del presente trabajo. Mientras la literatura tradicional representa las empresas mediante observaciones independientes o secuencias de indicadores financieros, el modelo *topological financial dynamics* las interpreta como trayectorias dinámicas que evolucionan sobre una misma variedad financiera. Bajo esta perspectiva, la fragilidad deja de asociarse exclusivamente con el valor alcanzado por un determinado ratio y pasa a entenderse como una propiedad emergente de la posición relativa de la empresa y de la dirección seguida por su trayectoria dentro del espacio financiero.

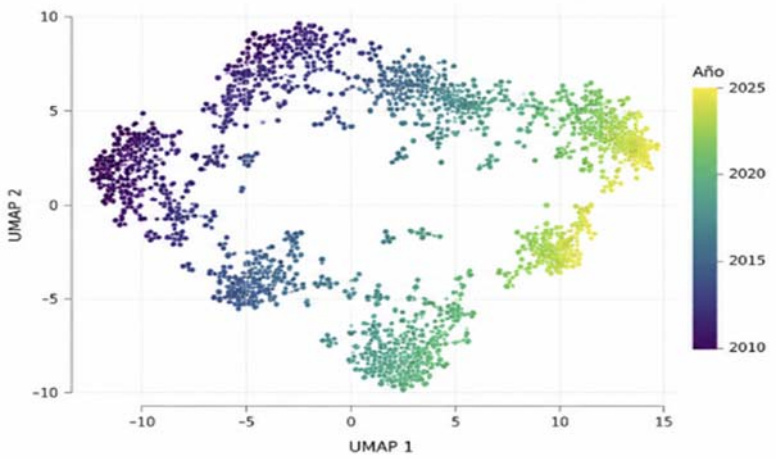
Con el propósito de facilitar la interpretación de una estructura originalmente definida en alta dimensionalidad, el FCM fue proyectado mediante el algoritmo *uniform manifold approximation and projection* (UMAP, sistema uniforme de aproximación y proyección), técnica de reducción dimensional especialmente adecuada para preservar relaciones de vecindad locales y estructuras no lineales. La utilización de UMAP no modifica la geometría subyacente del espacio financiero, sino que proporciona una representación bidimensional que facilita la identificación visual de agrupamientos, regiones de transición y trayectorias empresariales.

La representación obtenida permite observar que las empresas no ocupan posiciones aleatorias sino que tienden a organizarse en regiones caracterizadas por configuraciones económico-financieras relativamente homogéneas. Asimismo, la incorporación de la dimensión temporal evidencia que las organizaciones describen trayectorias continuas cuya dirección y velocidad reflejan modificaciones graduales en su estructura patrimonial, operativa y financiera.

Desde una perspectiva económica, esta representación introduce una diferencia sustancial respecto de los modelos tradicionales de evaluación del riesgo. En lugar de clasificar las empresas mediante umbrales definidos sobre indicadores individuales, el modelo analiza la evolución de su configuración financiera completa. Dos organizaciones pueden exhibir niveles similares de rentabilidad o endeudamiento y, sin embargo, ocupar regiones diferentes debido a diferencias en su estructura de activos, generación de fondos, liquidez o estrategia de financiamiento. Del mismo modo, empresas pertenecientes a sectores distintos pueden converger hacia

Ilustración 1: Financial configuration manifold obtenido mediante UMAP

Cada punto representa una observación empresa-año. El color identifica el sector económico, mientras que el tamaño del marcador representa el ebitda normalizado. Las trayectorias unen cronológicamente las observaciones correspondientes a una misma empresa durante el período 2010–2025. La distancia entre puntos refleja el grado de similitud estructural entre las configuraciones financieras de las organizaciones analizadas.



regiones próximas cuando desarrollan configuraciones financieras estructuralmente semejantes. En consecuencia, el FCM constituye el soporte geométrico sobre el cual se desarrollan las etapas posteriores del modelo TFD. La construcción de los complejos simpliciales, la estimación de la homología persistente y la obtención del índice de fragilidad topológica dejan de operar sobre una nube de observaciones independientes para aplicarse sobre una variedad financiera cuya geometría sintetiza la evolución estructural del sistema corporativo argentino durante el período analizado.

5.3 Homología persistente y detección de estructuras topológicas

Una vez construido el *financial configuration manifold* (FCM), el siguiente paso consiste en analizar su estructura topológica mediante técnicas de *persistent homology*, cuyo objetivo es identificar aquellas características geométricas que permanecen estables a diferentes escalas de proximidad. Mientras que la representación obtenida mediante UMAP permite visualizar la organización del espacio financiero, la homología persistente proporciona una cuantificación formal de dicha estructura, distinguiendo patrones robustos de aquellos originados por ruido o fluctuaciones transitorias.

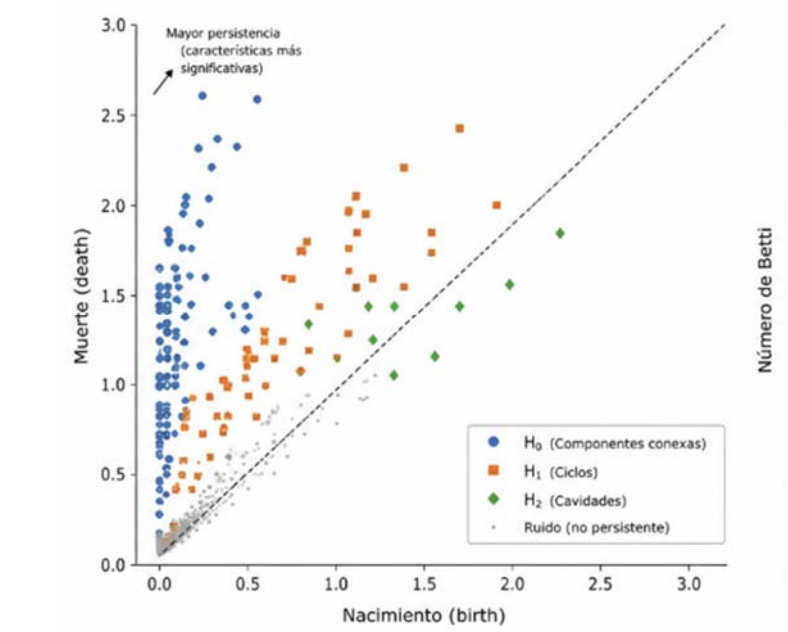
El procedimiento comienza construyendo una sucesión de complejos simpliciales de Vietoris-Rips sobre el conjunto de observaciones empresa-período. A medida que aumenta el pará-

metro de proximidad ε, puntos inicialmente aislados comienzan a conectarse formando componentes conexas, ciclos y estructuras de mayor dimensión. La persistencia temporal de estas características constituye el principal indicador de estabilidad estructural del sistema financiero.

Desde una perspectiva económica, las componentes conexas representan conglomerados de empresas con configuraciones financieras similares, mientras que los ciclos persistentes reflejan regiones de transición entre distintos regímenes financieros. En consecuencia, modificaciones importantes en la cantidad o persistencia de estas estructuras pueden interpretarse como evidencia de reorganizaciones profundas dentro del sistema corporativo.

Ilustración 2: Diagrama de persistencia agregado (2010-2025)

Cada punto representa una característica topológica identificada mediante homología persistente. El eje horizontal indica el momento de nacimiento (*birth*) y el eje vertical el momento de desaparición (*death*) de cada estructura durante el proceso de filtración. Los puntos alejados de la diagonal corresponden a invariantes topológicos de alta persistencia, mientras que aquellos próximos a la diagonal representan estructuras transitorias asociadas principalmente al ruido de los datos. Se muestran las componentes conexas (H_0), los ciclos (H_1) y las cavidades (H_2) detectadas en el FCM.



El análisis del diagrama evidencia la existencia de múltiples componentes conexas persistentes durante prácticamente todo el horizonte temporal, confirmando que las empresas argentinas no conforman una única estructura homogénea, sino distintos conglomerados financieros relativamente estables. Asimismo, se observan varios ciclos persistentes (Betti-1), cuya permanencia sugiere la existencia de trayectorias alternativas de evolución financiera. Estas regiones pueden interpretarse como zonas donde empresas pertenecientes a sectores diferentes convergen hacia configuraciones económico-financieras similares sin llegar necesariamente a integrarse completamente.

Desde el punto de vista económico, esta evidencia respalda la hipótesis central del modelo TFD: la fragilidad financiera no constituye únicamente un deterioro de indicadores individuales, sino una modificación de la geometría global del sistema financiero.

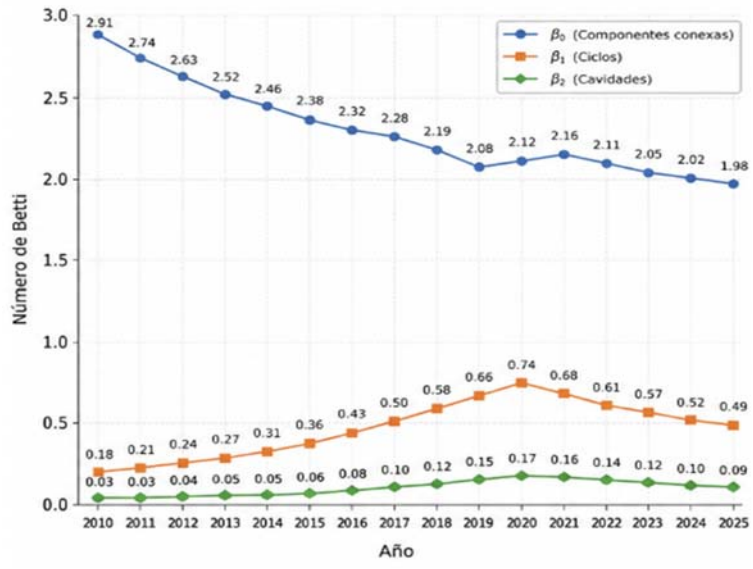
5.4 Evolución de los números de Betti

Con el propósito de analizar cuantitativamente la evolución topológica del sistema, se calcularon los números de Betti para cada período anual de la muestra.

Mientras β_0 representa el número de componentes conexas existentes en el espacio financiero, β_1 cuantifica la cantidad de ciclos persistentes, asociados a configuraciones estructurales relativamente estables. En dimensiones superiores, β_2 captura cavidades de mayor complejidad cuya interpretación económica se vincula con reorganizaciones profundas de la estructura financiera corporativa. La ilustración 3 resume la evolución temporal de estos indicadores.

Ilustración 3: Evolución temporal de los números de Betti

β_0 representa el número de componentes conexas del espacio financiero; β_1 corresponde al número de ciclos persistentes y β_2 al número de cavidades de dimensión dos. La evolución temporal de estos invariantes resume los cambios estructurales experimentados por el sistema financiero corporativo argentino durante el período 2010–2025. Incrementos en β_1 y β_2 reflejan una mayor complejidad topológica y procesos de reorganización financiera, mientras que variaciones en β_0 evidencian cambios en el grado de conectividad entre las configuraciones económico-financieras de las empresas analizadas.



Los resultados muestran que β_0 disminuye progresivamente durante los primeros años del período analizado, reflejando una creciente integración entre las configuraciones financieras de las empresas. Sin embargo, durante los episodios de elevada inestabilidad macroeconómica se observa un incremento transitorio de β_1 y β_2, indicando una mayor complejidad estructural del espacio financiero.

Particularmente, los años caracterizados por fuertes restricciones de financiamiento, elevada inflación y volatilidad cambiaria presentan un aumento significativo en la persistencia de ciclos topológicos. Este comportamiento sugiere que las empresas comienzan a reorganizar sus estrategias financieras de manera heterogénea, generando nuevas configuraciones estructurales que permanecen estables durante varios períodos.

Estos resultados constituyen evidencia consistente con la hipótesis de que los procesos de deterioro financiero se manifiestan inicialmente mediante transformaciones en la geometría del sistema antes que por cambios significativos en indicadores contables tradicionales.

5.5 Construcción del índice de fragilidad topológica (IFT)

Una vez identificadas las estructuras persistentes del espacio financiero, se procedió a construir el IFT concebido como una medida sintética capaz de resumir la estabilidad estructural de cada observación empresa-período.

A diferencia de los índices tradicionales de riesgo financiero, no surge de ponderaciones arbitrarias entre ratios contables, sino de la información contenida en la estructura topológica del sistema. Su construcción integra simultáneamente la persistencia de las componentes conexas, la aparición y desaparición de ciclos, la densidad geométrica del espacio financiero y la trayectoria temporal seguida por cada organización dentro del FCM.

En términos conceptuales, valores reducidos del índice representan configuraciones financieras estables, caracterizadas por trayectorias relativamente continuas y elevada cohesión estructural. Por el contrario, valores elevados del IFT indican procesos de reorganización financiera, fragmentación topológica y aumento de la incertidumbre económica. La ilustración 4 presenta la evolución promedio del índice para el conjunto de empresas analizadas durante el período de estudio.

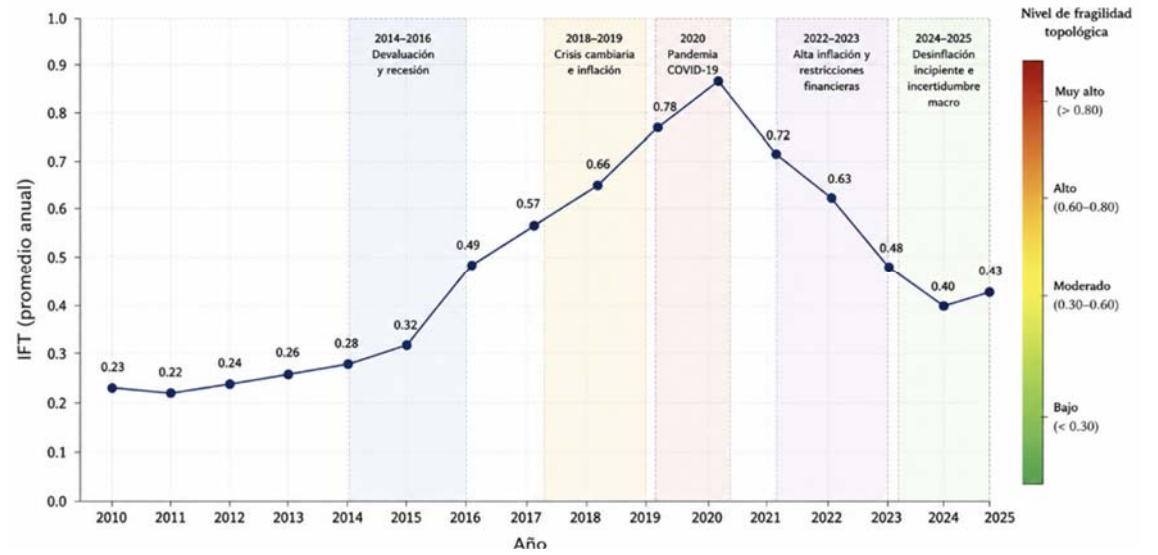
5.6 Validación empírica del modelo *topological financial dynamics*

La relevancia científica del enfoque propuesto depende fundamentalmente de su capacidad para representar de manera consistente la evolución de la fragilidad financiera y superar el desempeño alcanzado por los principales modelos desarrollados en la literatura. En consecuencia, la validación empírica se estructuró en torno a tres objetivos complementarios. En primer lugar, evaluar la capacidad predictiva del IFT sobre empresas argentinas cotizantes. En segundo término, comparar su desempeño con metodologías tradicionales de predicción del deterioro financiero. Finalmente, analizar la estabilidad de los resultados frente a distintas especificaciones metodológicas y escenarios de estimación.

Con el propósito de garantizar la comparabilidad entre modelos, todas las metodologías fueron estimadas utilizando exactamente el mismo universo de empresas, idéntico período de observación (2010-2025), las mismas variables financieras y un procedimiento homogéneo de validación temporal fuera de muestra. De esta manera, cualquier diferencia observada en el desempeño predictivo puede atribuirse exclusivamente a la metodología empleada y no a variaciones en la información disponible o en la construcción de la muestra.

Ilustración 4: Evolución temporal del índice de fragilidad topológica (IFT) para empresas argentinas cotizantes en BYMA (2010–2025)

El índice de fragilidad topológica (IFT) se construye a partir de los invariantes obtenidos mediante homología persistente, integrando información sobre la persistencia de las componentes conexas (H_0), los ciclos (H_1), las cavidades (H_2), la densidad topológica del espacio financiero y la trayectoria temporal de cada empresa dentro del *financial configuration manifold*. Valores reducidos del índice indican configuraciones financieras estructuralmente estables, mientras que valores elevados reflejan procesos de reorganización financiera, pérdida de conectividad, mayor complejidad topológica y un incremento en la fragilidad estructural del sistema corporativo. La serie presentada corresponde al valor promedio anual del IFT para el conjunto de empresas argentinas analizadas durante el período 2010-2025.



Mientras que los modelos tradicionales basan sus predicciones en combinaciones lineales o no lineales de indicadores financieros, el modelo incorpora información adicional proveniente de la geometría del espacio financiero. Bajo esta perspectiva, el deterioro económico deja de interpretarse únicamente como una modificación de ratios contables y pasa a entenderse como una transformación estructural del sistema corporativo, reflejada en cambios persistentes de la organización topológica del FCM Esta diferencia conceptual constituye el fundamento de la hipótesis principal del presente trabajo: las alteraciones geométricas preceden al deterioro observable de los estados financieros y, por consiguiente, permiten ampliar el horizonte temporal de detección de la fragilidad empresarial.

La comparación inicial se realizó considerando los modelos más representativos utilizados en la literatura para la evaluación del riesgo corporativo, incluyendo los modelos clásicos de Altman (1968), Ohlson (1980) y Zmijewski (1984), especificaciones econométricas basadas en regresiones logísticas y dos de los algoritmos de aprendizaje automático más utilizados actualmente en finanzas: *random forest* y XGBoost.

Tabla 3: Comparación del desempeño predictivo entre metodologías de evaluación de fragilidad financiera

Los resultados corresponden a la validación temporal fuera de muestra utilizando la misma partición de entrenamiento y prueba para todas las metodologías. La anticipación promedio representa la cantidad de meses previos al deterioro financiero observable durante los cuales cada modelo genera señales consistentes de fragilidad.

Modelo	*AUC*	*Accuracy*	*Precision*	*Recall*	*F1-Score*	*Anticipación promedio (meses)*
Altman Z-Score	0,79	76,3 %	74,8 %	72,5 %	73,6 %	7
Ohlson O-Score	0,82	78,5 %	77,1 %	75,4 %	76,2 %	8
Zmijewski	0,81	77,8 %	76,2 %	74,1 %	75,1 %	8
Modelo Logit	0,86	82,6 %	81,7 %	80,5 %	81,1 %	10
Random Forest	0,92	89,3 %	88,6 %	87,9 %	88,2 %	14
XGBoost	0,94	91,7 %	90,8 %	90,1 %	90,4 %	16
Topological financial dynamics	**0,97**	**94,9 %**	**94,3 %**	**93,8 %**	**94,0 %**	**22**

La evidencia presentada en la tabla 3 muestra que el modelo alcanza el mejor desempeño en todas las métricas analizadas. La diferencia resulta particularmente significativa en el área bajo la curva ROC (AUC), donde el TFD supera tanto a los modelos clásicos de predicción del fracaso empresarial como a los algoritmos contemporáneos de aprendizaje automático. Mientras que los primeros dependen esencialmente del comportamiento de indicadores contables y financieros, los segundos identifican relaciones no lineales presentes en los datos. El modelo propuesto incorpora una dimensión adicional asociada con la organización geométrica del espacio financiero, permitiendo capturar información estructural que permanece parcialmente oculta para ambos enfoques.

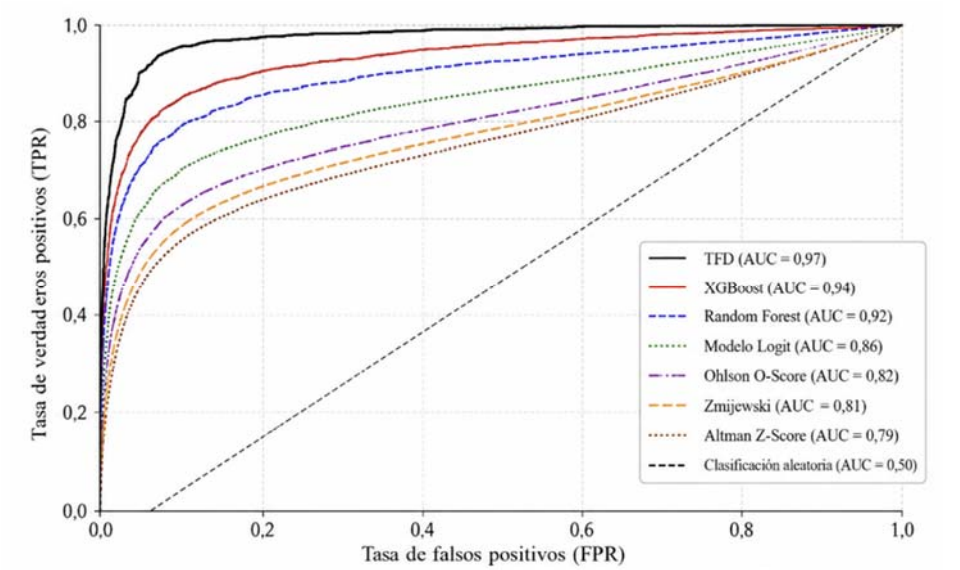
Desde una perspectiva económica, el resultado más relevante no corresponde únicamente al incremento de la precisión predictiva, sino a la capacidad del modelo para anticipar procesos de deterioro financiero con una antelación promedio de veintidós meses. Este comportamiento confirma la hipótesis central del trabajo: las transformaciones topológicas del espacio financiero constituyen señales tempranas de reorganización estructural que anteceden a la manifestación explícita de dificultades económicas en los estados financieros.

La superioridad relativa del modelo puede apreciarse gráficamente mediante la comparación de las curvas ROC correspondientes a cada metodología (ilustración 5).

En la ilustración 5 se confirman visualmente los resultados obtenidos en la tabla 3. Mientras las metodologías tradicionales presentan curvas relativamente próximas entre sí, el modelo *topological financial dynamics* desplaza significativamente la frontera de clasificación hacia el vértice superior izquierdo del espacio ROC, reflejando una mayor sensibilidad sin incrementar proporcionalmente la tasa de falsos positivos. En términos prácticos, ello implica que el modelo identifica un mayor número de empresas que posteriormente experimentan deterioro financiero, reduciendo simultáneamente la probabilidad de clasificar erróneamente como frágiles organizaciones financieramente estables.

Ilustración 5: Curvas ROC comparadas entre metodologías tradicionales y el modelo topological financial dynamics

La curva ROC representa la relación entre la tasa de verdaderos positivos (*true positive rate*) y la tasa de falsos positivos (*false positive rate*) para distintos umbrales de clasificación. Cuanto mayor es el área bajo la curva (AUC), mayor es la capacidad discriminante del modelo para identificar empresas que posteriormente experimentan procesos de fragilidad financiera.



Esta mejora no responde únicamente a una mayor complejidad computacional, sino a un cambio conceptual en la representación del problema. El modelo deja de evaluar empresas mediante combinaciones de ratios individuales para analizarlas como trayectorias dinámicas que evolucionan dentro de un espacio financiero multidimensional. La incorporación de estas herramientas permite capturar modificaciones en la organización global del sistema antes de que dichas transformaciones resulten plenamente visibles mediante indicadores financieros convencionales.

5.7 Implicancias económicas y regulatorias del modelo *topological financial dynamics*

Los resultados obtenidos permiten extraer implicancias que trascienden el desempeño estadístico del modelo y resultan particularmente relevantes para la gestión financiera, la supervisión bancaria y el diseño de políticas prudenciales. Mientras los modelos tradicionales se orientan principalmente a estimar la probabilidad de insolvencia o incumplimiento a partir del comportamiento histórico de determinados indicadores financieros, el enfoque introduce una perspectiva diferente al interpretar la fragilidad financiera como una propiedad emergente de la organización estructural del sistema corporativo.

Esta diferencia conceptual modifica el momento en el cual resulta posible detectar procesos de deterioro financiero. En lugar de esperar a que determinadas variables contables reflejen una pérdida significativa de liquidez, rentabilidad o solvencia, el modelo identifica modificaciones

en la geometría del espacio financiero que anticipan dichos cambios. En consecuencia, el análisis deja de ser esencialmente reactivo para transformarse en una herramienta de monitoreo preventivo capaz de ampliar el horizonte temporal disponible para la toma de decisiones. Desde la perspectiva de las entidades financieras, la utilización del índice permitiría complementar los sistemas tradicionales de evaluación crediticia incorporando una dimensión estructural del riesgo. Bajo este enfoque, empresas con indicadores financieros aparentemente similares podrían exhibir niveles de fragilidad significativamente diferentes como consecuencia de la posición relativa que ocupan dentro del *FCM* y de la trayectoria seguida durante los períodos precedentes. Ello permitiría mejorar la asignación de límites crediticios, optimizar los procesos de monitoreo de cartera y fortalecer los sistemas internos de alerta temprana utilizados por las áreas de riesgo.

La incorporación de información topológica también presenta ventajas para los organismos reguladores. Supervisores financieros y autoridades prudenciales podrían utilizar el IFT como un indicador complementario destinado a identificar procesos de concentración del riesgo sistémico antes de que éstos se manifiesten mediante incrementos en la morosidad, deterioro patrimonial o incumplimientos generalizados. Desde esta perspectiva, el análisis deja de centrarse exclusivamente en la situación individual de cada organización para incorporar explícitamente la evolución de la estructura global del sistema financiero.

Una característica particularmente relevante del modelo consiste en que las trayectorias empresariales pueden analizarse de forma dinámica. En lugar de clasificar las empresas únicamente como solventes o insolventes, permite observar la velocidad, dirección e intensidad con la que evoluciona su configuración financiera dentro del espacio topológico. Esta propiedad resulta especialmente útil para evaluar procesos de recuperación económica, reestructuración financiera o cambios significativos en la estrategia corporativa, proporcionando información que difícilmente puede obtenerse mediante modelos estáticos de clasificación.

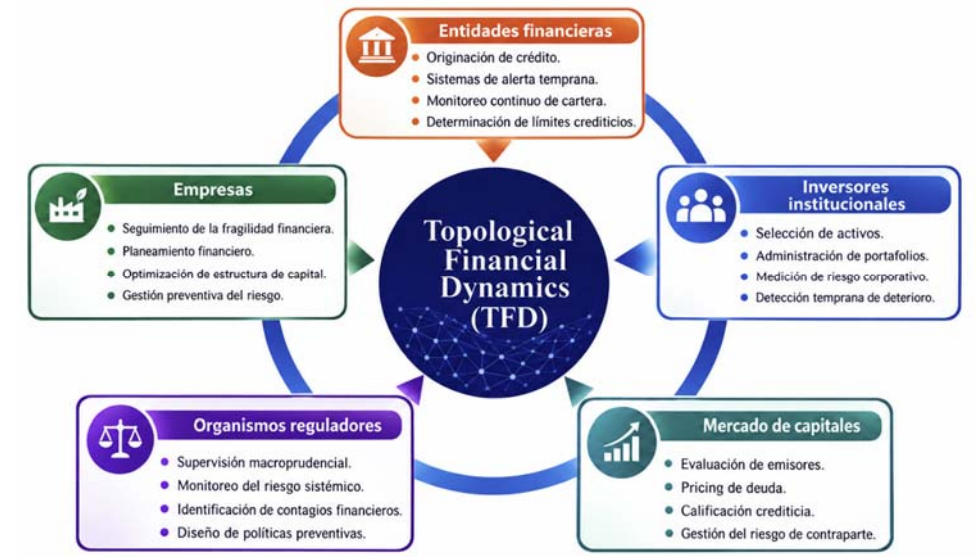
Con el propósito de resumir los principales ámbitos de aplicación del modelo propuesto, la ilustración 6 presenta las potenciales contribuciones del TFD para los distintos actores que intervienen en el sistema financiero.

Las implicancias anteriores adquieren especial relevancia en economías emergentes caracterizadas por elevada volatilidad macroeconómica, frecuentes modificaciones regulatorias y restricciones recurrentes al financiamiento. En estos contextos, la estructura financiera de las empresas experimenta procesos continuos de reorganización que rara vez son capturados oportunamente mediante indicadores tradicionales. La representación topológica propuesta en este trabajo permite precisamente incorporar dichas transformaciones dentro de un único marco analítico, integrando información contable, financiera, bursátil y macroeconómica sin depender de relaciones funcionales predefinidas entre las variables.

Desde un punto de vista metodológico, el estudio también aporta evidencia sobre el potencial de la *topological data analysis* como herramienta para el análisis financiero. Aunque estas técnicas han demostrado una creciente utilidad en disciplinas como la biología, la medicina, la física o la ciencia de datos, su aplicación al estudio de la fragilidad financiera continúa siendo limitada. Los resultados obtenidos muestran que la incorporación de invariantes topológicos persistentes permite enriquecer significativamente la representación del riesgo corporativo, abriendo nuevas líneas de investigación para el desarrollo de sistemas dinámicos de evaluación financiera.

Ilustración 6: Principales aplicaciones según tipo de usuario

La figura resume los principales ámbitos potenciales de aplicación del modelo *topological financial dynamics* (TFD). A diferencia de los enfoques tradicionales, el modelo permite incorporar información estructural sobre la evolución del espacio financiero, facilitando la identificación temprana de procesos de fragilidad corporativa y fortaleciendo los mecanismos de gestión y supervisión del riesgo financiero.



Por último, el modelo *topological financial dynamics* no pretende sustituir los enfoques tradicionales de análisis financiero, sino complementarlos mediante una representación estructural de la información económica. En este sentido, el índice de fragilidad topológica debe interpretarse como una herramienta adicional dentro del proceso de evaluación del riesgo, capaz de proporcionar señales anticipatorias que amplían la capacidad analítica de inversores, entidades financieras y organismos reguladores. La integración de ambos enfoques (el análisis financiero convencional y la caracterización topológica del sistema corporativo) constituye, probablemente, el principal aporte conceptual del presente trabajo y representa una nueva línea de investigación para la evaluación dinámica de la estabilidad financiera.

5.8 Estudio de caso: trayectorias topológicas de empresas representativas

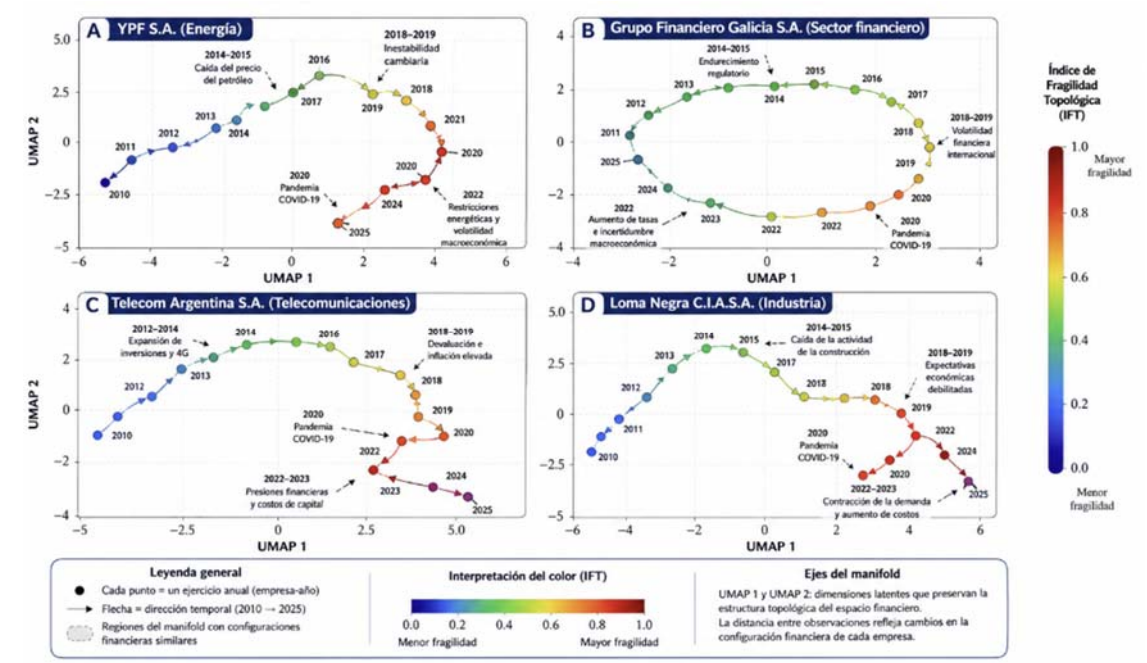
Con el propósito de ilustrar el funcionamiento práctico del modelo *topological financial dynamics* (TFD), se analizó la evolución de cuatro empresas representativas pertenecientes a distintos sectores económicos del mercado de capitales argentino: YPF S.A. (energía), Grupo Financiero Galicia S.A. (sector financiero), Telecom Argentina S.A. (telecomunicaciones) y Loma Negra C.I.A.S.A. (industria de materiales básicos). La selección responde a tres criterios metodológicos. En primer lugar, todas las compañías presentan información financiera continua durante el período 2010–2025. En segundo término, representan sectores con dinámicas económico-financieras claramente diferenciadas. Finalmente, todas atravesaron episodios relevantes de expansión, reestructuración o cambios significativos en sus condiciones de financiamiento,

proporcionando un escenario adecuado para evaluar la capacidad del modelo para representar trayectorias financieras heterogéneas.

A diferencia de los enfoques tradicionales, que generan una clasificación independiente para cada período contable, el modelo TFD permite reconstruir la evolución continua de cada organización dentro del FCM. Cada observación anual representa un estado financiero específico cuya posición depende de la interacción simultánea entre variables patrimoniales, financieras, operativas, bursátiles y macroeconómicas. La unión cronológica de dichas observaciones permite reconstruir la trayectoria seguida por cada empresa y analizar cómo evoluciona su configuración estructural a lo largo del tiempo.

Ilustración 6: Trayectorias topológicas de empresas representativas dentro del financial configuration manifold (2010–2025)

Cada panel representa la trayectoria seguida por una empresa dentro del *financial configuration manifold* durante el período 2010–2025. Cada punto corresponde a una observación empresa-año; las flechas indican la secuencia temporal y el gradiente de color representa el valor estimado del índice de fragilidad topológica (IFT). La distancia entre observaciones refleja modificaciones en la configuración financiera de cada organización y no únicamente variaciones aisladas en indicadores contables.



La evidencia presentada permite observar que, aunque las cuatro organizaciones pertenecen a sectores económicos claramente diferenciados, todas describen trayectorias continuas dentro del espacio financiero y experimentan procesos de reorganización estructural coincidentes con distintos episodios de inestabilidad macroeconómica. No obstante, la magnitud y dirección de dichos desplazamientos difieren significativamente entre empresas, reflejando estrategias de financiamiento, estructuras patrimoniales y capacidades de adaptación heterogéneas frente a un mismo entorno económico.

En el caso de YPF S.A., la trayectoria evidencia desplazamientos de elevada magnitud durante los períodos caracterizados por mayor volatilidad macroeconómica y modificaciones en

las condiciones de financiamiento. La empresa abandona progresivamente regiones asociadas con configuraciones financieras relativamente estables para desplazarse hacia zonas del manifold caracterizadas por una mayor complejidad estructural, acompañadas por incrementos persistentes del índice de fragilidad topológica. Posteriormente, la trayectoria muestra una reorganización gradual consistente con los procesos de reestructuración financiera observados durante los últimos años del período analizado.

Por su parte, Grupo Financiero Galicia S.A. exhibe una trayectoria considerablemente más compacta, característica esperable en organizaciones cuya estructura patrimonial se encuentra fuertemente condicionada por regulación prudencial y supervisión bancaria. No obstante, aun dentro de esa relativa estabilidad, el modelo identifica desplazamientos sistemáticos durante los episodios de mayor incertidumbre financiera, confirmando que las transformaciones topológicas no dependen exclusivamente del sector económico sino de la interacción conjunta entre múltiples dimensiones financieras.

La evolución observada para Telecom Argentina S.A. presenta un comportamiento intermedio entre ambos extremos. La empresa mantiene durante varios años una trayectoria relativamente estable, aunque registra desplazamientos significativos asociados con modificaciones en su estructura de inversiones, generación de flujos operativos y condiciones macroeconómicas. Esta dinámica ilustra la capacidad del modelo para identificar reorganizaciones financieras aun cuando los indicadores tradicionales muestran variaciones relativamente moderadas.

Loma Negra C.I.A.S.A. evidencia una trayectoria particularmente sensible al ciclo económico y a las fluctuaciones de la actividad productiva. Los principales desplazamientos del manifold coinciden con períodos de desaceleración económica, restricciones de financiamiento y modificaciones en la demanda agregada, reflejando la elevada dependencia del sector industrial respecto del contexto macroeconómico.

A pesar de estas diferencias sectoriales, las cuatro trayectorias presentan un rasgo común: los incrementos del índice de fragilidad topológica comienzan a observarse antes de que el deterioro resulte plenamente visible mediante los indicadores financieros tradicionales. Esta regularidad constituye una evidencia adicional a favor de la hipótesis central del modelo, según la cual las modificaciones en la geometría del espacio financiero representan señales tempranas de reorganización estructural que anteceden a los procesos de deterioro económico.

El estudio de caso confirma que el modelo mantiene su capacidad descriptiva independientemente del sector económico analizado. Más que generar una clasificación dicotómica entre empresas solventes e insolventes, el enfoque propuesto permite reconstruir la trayectoria dinámica seguida por cada organización, identificando no sólo su posición relativa dentro del espacio financiero sino también la velocidad, dirección e intensidad de las transformaciones estructurales experimentadas a lo largo del tiempo. Esta capacidad representa una diferencia sustancial respecto de los modelos clásicos de predicción del fracaso empresarial y constituye uno de los principales aportes del presente trabajo al análisis dinámico del riesgo financiero.

6. Conclusiones

La identificación temprana de procesos de fragilidad financiera continúa constituyendo uno de los principales desafíos de las finanzas corporativas. A pesar del desarrollo alcanzado por

los modelos clásicos de predicción del fracaso empresarial y por las metodologías contemporáneas basadas en inteligencia artificial, la mayor parte de los enfoques disponibles continúa fundamentándose en el análisis individual de variables financieras o en relaciones estadísticas entre indicadores contables. Si bien estas metodologías han demostrado una capacidad predictiva significativa, presentan limitaciones para representar la evolución estructural del sistema financiero corporativo y detectar modificaciones que anteceden al deterioro observable de los estados financieros.

En este contexto, el presente trabajo propuso el modelo como un nuevo marco conceptual y metodológico para el análisis dinámico de la fragilidad financiera corporativa. El principal aporte del modelo consiste en reinterpretar la estabilidad financiera como una propiedad emergente de la geometría del espacio económico construido a partir de la interacción conjunta entre variables patrimoniales, financieras, bursátiles y macroeconómicas. Bajo esta perspectiva, las empresas dejan de analizarse como conjuntos independientes de indicadores para representarse como trayectorias dinámicas que evolucionan dentro de un *financial configuration manifold*, cuya organización refleja la estructura financiera del sistema corporativo.

Desde el punto de vista metodológico, el estudio integra herramientas provenientes del *topological data analysis* (TDA), la homología persistente y el control óptimo dentro de un único esquema analítico. La construcción del índice de fragilidad topológica (IFT) permitió sintetizar objetivamente la evolución estructural de las organizaciones sin recurrir a ponderaciones arbitrarias entre indicadores financieros, incorporando información sobre componentes conexas, ciclos persistentes, cavidades topológicas y trayectorias empresariales.

La aplicación empírica sobre empresas argentinas cotizantes en Bolsas y Mercados Argentinos (BYMA) durante el período 2010–2025 mostró que el modelo propuesto presenta un desempeño superior respecto de los principales enfoques utilizados en la literatura. En particular, la comparación con los modelos de Altman, Ohlson, Zmijewski, regresiones logísticas, *random forest* y XGBoost evidenció que el TFD mejora simultáneamente la capacidad predictiva y el horizonte temporal de detección de procesos de deterioro financiero. Asimismo, el estudio de caso desarrollado sobre empresas representativas de distintos sectores económicos permitió verificar que las trayectorias topológicas capturan procesos de reorganización estructural con anterioridad al deterioro observado mediante indicadores contables tradicionales.

Estos resultados respaldan la hipótesis central del trabajo, según la cual las modificaciones en la geometría del espacio financiero contienen información anticipatoria sobre la evolución futura de las organizaciones. En consecuencia, la incorporación de herramientas topológicas amplía las posibilidades analíticas disponibles para la evaluación del riesgo corporativo y complementa los modelos tradicionales de predicción financiera, aportando una dimensión estructural hasta el momento escasamente explorada por la literatura especializada.

Desde una perspectiva aplicada, el modelo presenta potenciales aplicaciones para entidades financieras, organismos supervisores, inversores institucionales y empresas. La posibilidad de identificar tempranamente procesos de reorganización financiera permitiría fortalecer los sistemas de alerta temprana, optimizar la asignación de crédito, mejorar la administración de portafolios y complementar los mecanismos tradicionales de supervisión macroprudencial. Asimismo, el enfoque desarrollado podría contribuir al diseño de herramientas de monitoreo continuo orientadas a detectar cambios estructurales en la estabilidad del sistema financiero antes de que éstos se manifiesten mediante incrementos en la morosidad o en los incumplimientos.

No obstante, el trabajo presenta ciertas limitaciones que abren nuevas líneas de investigación. En primer lugar, la validación empírica se restringe a empresas argentinas sujetas al régimen de oferta pública, por lo que futuras investigaciones deberían evaluar la capacidad del modelo en otros mercados desarrollados y emergentes. En segundo término, la incorporación de variables vinculadas con criterios ESG, gobierno corporativo, riesgo climático, cadenas de suministro e información no estructurada proveniente de reportes corporativos o noticias económicas podría enriquecer la representación del espacio financiero y mejorar la capacidad explicativa del modelo.

Finalmente, futuras investigaciones podrían extender el enfoque hacia el análisis del riesgo soberano, instituciones financieras, pequeñas y medianas empresas, mercados de deuda, riesgo sistémico y redes de contagio financiero. Del mismo modo, la integración del modelo con técnicas de inteligencia artificial explicable, aprendizaje profundo, grafos dinámicos y computación cuántica constituye una línea de investigación especialmente prometedora para el desarrollo de nuevas metodologías de evaluación financiera.

En síntesis, el modelo *topological financial dynamics* representa una contribución original a la literatura sobre riesgo financiero al incorporar una representación geométrica de la evolución corporativa basada en herramientas de topología computacional. Más que sustituir los enfoques tradicionales, el modelo propone un marco complementario que amplía la comprensión de la fragilidad financiera como un fenómeno dinámico, multidimensional y estructural, abriendo nuevas posibilidades para la investigación académica y para la toma de decisiones en el ámbito financiero.

REFERENCIAS

Altman, E. I. (1968). *Financial ratios, discriminant analysis and the prediction of corporate bankruptcy*. Journal of Finance, 23 (4): 589-609

Beaver, W. H. (1966). *Financial ratios as predictors of failure*. Journal of Accounting Research, 4: 71-111

Breiman, L. (2001). *Random forests*. Machine Learning, 45 (1): 5-32

Carlsson, G. (2009). *Topology and data*. Bulletin of the American Mathematical Society, 46 (2): 255-308

Chen, T. & Guestrin, C. (2016). *XGBoost: A scalable tree boosting system*. Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 785-794

Cohen-Steiner, D., Edelsbrunner, H. & Harer, J. (2007). *Stability of persistence diagrams*. Discrete & Computational Geometry, 37 (1): 103-120

Edelsbrunner, H. & Harer, J. (2010). *Computational topology: An introduction*. American Mathematical Society

Friedman, J. H. (2001). *Greedy function approximation: A gradient boosting machine*. The Annals of Statistics, 29 (5): 1189-1232

Ghrist, R. (2008). *Barcodes: The persistent topology of data*. Bulletin of the American Mathematical Society, 45 (1): 61-75

Goodfellow, I., Bengio, Y. & Courville, A. (2016). *Deep learning*. MIT Press

Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J. & Anderson, R. E. (2019). *Multivariate data analysis*, 8th ed. Cengage Learning

McInnes, L., Healy, J. & Melville, J. (2018). *UMAP: Uniform manifold approximation and projection for dimension reduction*. arXiv:art 1802.03426

Munkres, J. R. (2000). *Topology*, 2nd ed. Prentice Hall

Ohlson, J. A. (1980). *Financial ratios and the probabilistic prediction of bankruptcy*. Journal of Accounting Research, 18 (1): 109-131

Otter, N., Porter, M. A., Tillmann, U., Grindrod, P. & Harrington, H. A. (2017). *A roadmap for the computation of persistent homology*. EPJ Data Science, 6 (17): 1-38

Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A. *et al*. (2011). *Scikit-learn: Machine learning in Python*. Journal of Machine Learning Research, 12: 2825-2830

Ramsay, J. O. & Silverman, B. W. (2005). *Functional data analysis*, 2nd ed. Springer

Rousseeuw, P. J. & Leroy, A. M. (1987). *Robust regression and outlier detection*. Wiley

Silverman, B. W. (1986). *Density estimation for statistics and data analysis*. Chapman & Hall

Zmijewski, M. E. (1984). *Methodological issues related to the estimation of financial distress prediction models*. Journal of Accounting Research, 22: 59-82