SADAF
DOCENTES DE ADMINISTRACIÓN FINANCIERA

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

De la modelización dinámica a la inteligencia artificial explicable

Aplicación a la tokenización de activos

Daniel Miliá
Emiliano Bedini
Universidad de Buenos Aires

SUMARIO

1. Introducción
2. De los modelos dinámicos al aprendizaje automático en finanzas
3. Inteligencia artificial explicable, SHAP y LIME en la evaluación del riesgo financiero
4. Tokenización de activos y arquitectura financiera descentralizada
5. Estudio de caso: bono verde tokenizado y modelos híbridos VECM-LSTM-CNN
6. Implicancias regulatorias para Argentina y América Latina
7. Conclusiones

Para comentarios:
daniel@economicas.uba.ar

1. Introducción

La digitalización del sistema financiero constituye uno de los procesos de transformación institucional más relevantes de las últimas décadas. A diferencia de innovaciones puntuales asociadas a instrumentos específicos o a modificaciones regulatorias aisladas, la actual revolución tecnológica afecta simultáneamente la infraestructura de pagos, la intermediación financiera, la gestión del riesgo, la valuación de activos y la arquitectura de supervisión. El creciente volumen de datos disponibles, la reducción del costo computacional y el desarrollo de plataformas distribuidas basadas en blockchain han modificado la manera en que los agentes económicos registran información, estructuran contratos y asignan recursos. En este contexto, la frontera entre finanzas tradicionales y finanzas digitales se vuelve cada vez más difusa, dando lugar a un ecosistema en el que la capacidad de procesar información de forma rápida, precisa y verificable se convierte en una ventaja competitiva y, al mismo tiempo, en una condición para la estabilidad del sistema.

La literatura contemporánea en finanzas y regulación coincide en que la innovación tecnológica no debe evaluarse exclusivamente por su potencial para reducir costos o mejorar la eficiencia operativa. Su impacto más profundo reside en la posibilidad de transformar la calidad y la granularidad de la información utilizada para tomar decisiones. En el pasado, gran parte de la actividad financiera se apoyaba en estados contables históricos, ratios relativamente estables y modelos estadísticos construidos sobre conjuntos de datos acotados. Actualmente, los analistas pueden incorporar información transaccional de alta frecuencia, datos alternativos, textos, imágenes, indicadores de comportamiento y métricas derivadas de redes distribuidas. Esta ampliación del espacio informativo permite captar patrones más complejos, pero también obliga a desarrollar metodologías capaces de interpretar, validar y gobernar algoritmos cuya lógica interna puede resultar difícil de reconstruir.

La gestión del riesgo financiero se encuentra en el centro de esta transformación. Las decisiones relacionadas con otorgamiento de crédito, *pricing* de bonos, administración de portafolios, detección de fraude y asignación de capital dependen de modelos que intentan anticipar eventos inciertos en entornos caracterizados por volatilidad, no linealidades y cambios estructurales frecuentes. A medida que aumenta la complejidad de los mercados y de las fuentes de información disponibles, los modelos tradicionales, aunque continúan siendo útiles, muestran limitaciones para capturar interacciones dinámicas y relaciones de alta dimensionalidad. En respuesta a estas restricciones, las instituciones financieras comenzaron a incorporar técnicas de *machine learning* y *deep learning* que amplían considerablemente la capacidad predictiva, pero al mismo tiempo generan nuevos desafíos de interpretabilidad, documentación y control.

La problemática de la opacidad algorítmica adquiere una relevancia particular en el ámbito financiero porque las decisiones automatizadas producen consecuencias patrimoniales inmediatas. La aprobación o rechazo de una línea de crédito, la determinación de una tasa de interés, la estimación de provisiones o la valuación de un instrumento pueden afectar la distribución del financiamiento y modificar la percepción del riesgo de manera significativa. Cuando los criterios que sustentan dichas decisiones no son transparentes, la organización enfrenta dificultades para justificar sus acciones frente a clientes, reguladores, auditores y tribunales. En términos más amplios, la falta de explicabilidad puede erosionar la confianza en el sistema financiero y

limitar la adopción de innovaciones que, desde el punto de vista técnico, podrían generar beneficios sustanciales.

La inteligencia artificial explicable surge precisamente como respuesta a esta tensión entre sofisticación analítica y accountability. En lugar de considerar que la opacidad es un costo inevitable del progreso tecnológico, la XAI propone mecanismos para traducir el funcionamiento de algoritmos complejos en representaciones comprensibles y operativamente útiles. Herramientas como SHAP, LIME y los métodos contrafactuales permiten identificar las variables que dominan cada predicción, cuantificar su aporte marginal y ofrecer explicaciones adaptadas a distintos tipos de usuarios. Esta capacidad resulta esencial en actividades donde la automatización debe coexistir con principios de debido proceso, control interno y supervisión prudencial.

En paralelo, la tokenización de activos representa otra dimensión de cambio estructural. La posibilidad de registrar digitalmente derechos económicos sobre activos reales y financieros mediante *blockchain* y contratos inteligentes introduce una nueva infraestructura para la emisión, transferencia y seguimiento de instrumentos financieros. Al fraccionar la propiedad, automatizar cláusulas contractuales y generar registros inmutables, la tokenización reduce costos de intermediación, mejora la liquidez y amplía el acceso a mercados históricamente restringidos. No obstante, la valuación de estos instrumentos requiere metodologías capaces de integrar factores tradicionales de riesgo con variables tecnológicas, regulatorias y operativas específicas de las redes distribuidas.

La convergencia entre inteligencia artificial explicable y tokenización de activos no constituye una yuxtaposición accidental de dos tendencias tecnológicas independientes. Ambas responden a una lógica común orientada a reducir asimetrías de información, mejorar la trazabilidad y fortalecer la confianza en los mecanismos de asignación del capital. La tokenización genera registros detallados y programables sobre la estructura contractual y el comportamiento de los activos. La inteligencia artificial, por su parte, permite procesar esta información junto con variables macroeconómicas y financieras para construir modelos más precisos. La explicabilidad asegura que los resultados de dichos modelos puedan ser comprendidos, discutidos y auditados, cerrando así el círculo entre innovación, control y legitimidad institucional.

El contexto argentino ofrece un terreno particularmente fértil para analizar estas herramientas. La volatilidad macroeconómica, la persistencia de episodios inflacionarios, las fluctuaciones del tipo de cambio y las restricciones estructurales del mercado de capitales elevan el costo del financiamiento y dificultan la evaluación del riesgo mediante enfoques estáticos. Al mismo tiempo, el país dispone de sectores con elevado potencial de generación de valor −como energía, agroindustria, minería e infraestructura− que podrían beneficiarse significativamente de nuevas formas de estructuración y financiación. La aplicación de modelos dinámicos, inteligencia artificial explicable y tokenización de activos permite imaginar esquemas más eficientes para canalizar ahorro hacia proyectos productivos y sostenibles, preservando al mismo tiempo estándares rigurosos de transparencia y gobernanza.

La hipótesis central del presente ensayo sostiene que la integración entre modelización dinámica, aprendizaje profundo, técnicas de explicabilidad y tokenización de activos configura un nuevo paradigma para la evaluación avanzada del riesgo financiero. Este paradigma no se define únicamente por su capacidad de mejorar la precisión predictiva, sino por la posibilidad de combinar teoría económica, sofisticación tecnológica y control institucional en una misma arquitectura analítica. La relevancia de este enfoque se extiende más allá del ámbito académico,

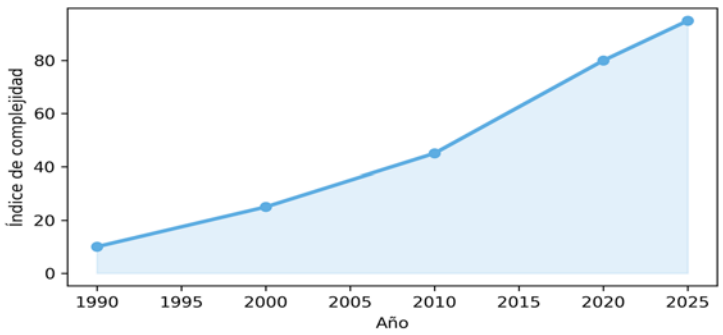
ya que ofrece herramientas concretas para reducir el costo del capital, ampliar la inclusión financiera y fortalecer la resiliencia de los mercados en economías emergentes.

Sobre la base de esta premisa se desarrolla un marco metodológico que integra cointegración de Johansen, modelos VECM, redes neuronales LSTM-CNN y técnicas SHAP y LIME para la valuación y gestión del riesgo de instrumentos tokenizados. Posteriormente, se aplica este enfoque a un estudio de caso centrado en un bono verde tokenizado respaldado por proyectos de energía renovable. Finalmente, se examinan las implicancias regulatorias para-Argentina y América Latina, considerando las recomendaciones del Bank for International Settlements, el International Monetary Fund, la Organisation for Economic Co-operation and Development, el National Institute of Standards and Technology, la European Banking Authority y los organismos nacionales competentes.

2. De los modelos dinámicos al aprendizaje automático en finanzas

En la ilustración 1 se presenta la transición desde modelos econométricos tradicionales hacia arquitecturas de inteli-gencia artificial explicable.

Ilustración 1: Evolución de la sofisticación analítica en la evaluación del riesgo financiero



La evolución de los modelos utilizados para evaluar el riesgo financiero refleja, en gran medida, la transformación de la propia teoría financiera y de la disponibilidad de información. En sus primeras etapas, la modelización se apoyó en herramientas relativamente simples, diseñadas para sintetizar un número limitado de variables y traducirlas en reglas de decisión operativas. Los modelos discriminantes, las regresiones lineales y las especificaciones logísticas constituyeron durante décadas la base metodológica del *scoring* crediticio y de numerosas aplicaciones de riesgo. Su atractivo radicaba en la posibilidad de vincular directamente cada coeficiente con una interpretación económica concreta, facilitando la documentación, el challenge y la validación por parte de auditores y supervisores. La transparencia de estos enfoques contribuyó a consolidarlos como instrumentos centrales en la gestión del riesgo bancario y corporativo.

El desarrollo de los mercados y la creciente volatilidad macroeconómica revelaron progresivamente las limitaciones de estas herramientas. Los modelos estáticos resultaban adecuados

para contextos relativamente estables, pero tendían a perder precisión cuando las variables exhibían persistencia, cambios de régimen y relaciones no lineales. Esta constatación condujo a una expansión de metodologías orientadas a incorporar explícitamente la dimensión temporal. Los modelos autorregresivos integrados de medias móviles (ARIMA), los procesos GARCH, los modelos de duración y los sistemas state-space ampliaron la capacidad analítica al capturar dinámica, heterocedasticidad y transiciones entre estados económicos. La noción de riesgo dejó de concebirse como una característica fija del deudor o del activo y pasó a interpretarse como una magnitud condicionada por la evolución conjunta de múltiples factores endógenos y exógenos.

Dentro de esta familia, la cointegración de Johansen y los modelos de corrección de errores vectoriales (VECM) ocupan un lugar particularmente relevante. Su principal contribución consiste en permitir que variables no estacionarias mantengan relaciones estructurales de largo plazo, al tiempo que exhiben desviaciones transitorias en el corto plazo. En el análisis financiero, esta propiedad resulta fundamental para estudiar cómo interactúan el riesgo país, la inflación, el tipo de cambio, las tasas internacionales y los *spreads* de bonos corporativos o soberanos. El término de corrección de errores cuantifica la velocidad con la que el sistema retorna a su equilibrio luego de un shock, proporcionando información valiosa sobre la sensibilidad y resiliencia de los activos frente a perturbaciones macroeconómicas. Desde una perspectiva aplicada, esta metodología ofrece una base robusta para distinguir entre movimientos coyunturales y cambios estructurales en la percepción del riesgo.

El avance hacia modelos dinámicos también modificó la lógica de las pruebas de estrés y de los sistemas de alerta temprana. En lugar de limitarse a estimaciones puntuales, las instituciones comenzaron a proyectar trayectorias completas bajo escenarios alternativos de actividad, inflación, tasas de interés y liquidez. Esta aproximación permitió evaluar no sólo el nivel esperado de pérdida, sino también la velocidad y la intensidad con la que los shocks podían propagarse a través del sistema financiero. La supervisión prudencial incorporó estas técnicas en ejercicios de stress testing y en marcos de evaluación prospectiva, fortaleciendo la capacidad de anticipar vulnerabilidades antes de que se materializaran en eventos de incumplimiento o deterioro patrimonial.

La irrupción del *big data* y del aprendizaje automático representó un cambio metodológico de naturaleza distinta. Mientras que los modelos dinámicos ampliaban la estructura temporal y macroeconómica del análisis, el *machine learning* introdujo la posibilidad de explotar bases de datos de alta dimensionalidad, integrar información no estructurada y capturar interacciones complejas sin imponer relaciones funcionales rígidas. *Random forests*, *gradient boosting*, *support vector machines* y redes neuronales profundas comenzaron a demostrar ventajas sustanciales en tareas de clasificación y predicción. La capacidad de detectar patrones latentes y relaciones altamente no lineales resultó especialmente valiosa en contextos donde la heterogeneidad de los datos y la presencia de variables alternativas limitaban el desempeño de los enfoques convencionales.

En el ámbito del riesgo crediticio, estas herramientas permitieron incorporar señales provenientes de historiales transaccionales, facturación electrónica, comportamiento de pagos, relaciones comerciales y otras fuentes que tradicionalmente no eran utilizadas de forma sistemática. El International Monetary Fund (Bazarbash, 2019) destaca que esta expansión del universo informativo puede mejorar significativamente la evaluación de prestatarios con escaso historial bancario, favoreciendo la inclusión financiera. El Bank for International Settlements (Doerr *et*

al., 2021) señala, además, que el uso de *big data* y *machine learning* transformó no sólo la originación de crédito, sino también la supervisión, la vigilancia de mercados y el análisis de estabilidad financiera. Sin embargo, cuanto mayor es la capacidad predictiva de estos sistemas, mayor es también la necesidad de contar con mecanismos que permitan interpretar sus resultados y controlar sus riesgos.

Las redes neuronales recurrentes *long short-term memory* (LSTM) constituyen uno de los avances más importantes para el tratamiento de series temporales financieras. Su arquitectura incorpora celdas de memoria y compuertas que regulan el flujo de información, permitiendo retener dependencias de largo plazo y evitar el problema del desvanecimiento del gradiente. Esta característica resulta especialmente útil para modelar variables cuya dinámica depende de procesos acumulativos y de shocks persistentes, como *spreads* soberanos, volatilidad cambiaria, precios de commodities o indicadores macroeconómicos. Cuando las LSTM se combinan con redes convolucionales (CNN), el modelo adquiere la capacidad adicional de detectar patrones locales y estructuras no lineales de alta complejidad, mejorando el desempeño predictivo en entornos altamente volátiles.

La integración entre econometría y aprendizaje profundo dio origen a arquitecturas híbridas que aprovechan las fortalezas complementarias de ambos enfoques. Los modelos VECM aportan estructura teórica, restricciones de equilibrio y una interpretación económica clara. Las redes neuronales capturan componentes residuales no lineales y relaciones que escapan a las especificaciones paramétricas. Esta combinación permite preservar la consistencia conceptual de la teoría financiera y, al mismo tiempo, explotar la flexibilidad de los algoritmos modernos. En aplicaciones de valuación y riesgo, el resultado es una metodología más robusta, capaz de adaptarse a contextos complejos sin renunciar a la trazabilidad analítica.

La tokenización de activos amplifica aún más la necesidad de este tipo de enfoques. Los instrumentos digitales dependen simultáneamente del desempeño económico del activo subyacente, de variables macroeconómicas, de factores regulatorios y de elementos específicos de la infraestructura *blockchain*. La coexistencia de múltiples fuentes de riesgo y de interacciones no lineales hace que los modelos tradicionales resulten insuficientes para capturar toda la complejidad del sistema. La combinación entre cointegración, modelos dinámicos y redes neuronales permite construir valuaciones más precisas y estimar con mayor rigor la sensibilidad de los instrumentos tokenizados frente a shocks económicos y tecnológicos.

La discusión contemporánea, por lo tanto, no puede reducirse a una elección dicotómica entre métodos “tradicionales” y técnicas “modernas”. Cada familia metodológica aporta capacidades diferentes y cumple funciones complementarias dentro de una arquitectura analítica más amplia. Los modelos parsimoniosos siguen siendo valiosos cuando la transparencia inmediata y la simplicidad operativa son prioritarias. Los modelos dinámicos aportan profundidad al incorporar relaciones temporales y sensibilidad macroeconómica. El aprendizaje automático amplía el horizonte predictivo y permite procesar información de alta dimensionalidad. La estrategia más eficiente consiste en diseñar combinaciones metodológicas que equilibren precisión, interpretabilidad y control institucional, alineando el poder analítico de la inteligencia artificial con los requerimientos de gobernanza propios del sistema financiero.

3. Inteligencia artificial explicable, SHAP y LIME en la evaluación del riesgo financiero

La expansión del aprendizaje automático en finanzas produjo una tensión metodológica que se ubica en el centro del debate contemporáneo sobre gobernanza algorítmica. Los modelos más sofisticados suelen ofrecer mejoras sustanciales en términos de discriminación, calibración y reducción del error de pronóstico, pero esas ganancias se acompañan de una pérdida relativa de inteligibilidad. En los enfoques econométricos tradicionales, la interpretación formaba parte de la propia estructura del modelo. La magnitud y el signo de los coeficientes permitían inferir la dirección y la intensidad del efecto de cada variable sobre la probabilidad de incumplimiento, el *spread* de un bono o el valor presente de un activo. A medida que las instituciones incorporaron arquitecturas basadas en árboles ensamblados, *boosting* y redes neuronales profundas, esa relación directa entre parámetro y significado económico se volvió más difícil de reconstruir, generando un problema de transparencia que no puede ser ignorado en actividades donde las decisiones automatizadas tienen consecuencias patrimoniales inmediatas.

La necesidad de comprender los resultados de un algoritmo no responde únicamente a una preocupación académica o epistemológica. En el ámbito financiero, la opacidad puede afectar la capacidad de las organizaciones para justificar decisiones frente a clientes, reguladores, auditores, tribunales y comités internos de riesgo. La aprobación o rechazo de una línea de crédito, la determinación de un límite operativo, la asignación de capital económico o la estimación de provisiones requieren fundamentos que puedan ser discutidos y defendidos razonablemente. La ausencia de explicaciones adecuadas reduce la posibilidad de detectar errores, sesgos o relaciones espurias, y debilita la legitimidad de los sistemas automatizados. Por esta razón, la discusión actual ya no se limita a evaluar si la inteligencia artificial mejora la predicción, sino a determinar bajo qué condiciones esa mejora puede integrarse dentro de un marco de control institucional robusto.

La inteligencia artificial explicable (XAI) surge como una respuesta a esta problemática. Su propósito consiste en generar representaciones comprensibles del funcionamiento de modelos complejos, sin sacrificar necesariamente la capacidad predictiva que los caracteriza. Doshi-Velez & Kim (2017) señalan que la interpretabilidad debe entenderse como una propiedad funcional orientada a satisfacer necesidades concretas de seguridad, justicia y rendición de cuentas (*accountability*). Desde esta perspectiva, una explicación es útil cuando permite identificar qué factores influyeron en una predicción, evaluar si el modelo se comporta de acuerdo con principios económicos razonables y ofrecer elementos suficientes para cuestionar o revisar decisiones con impacto significativo sobre los agentes económicos.

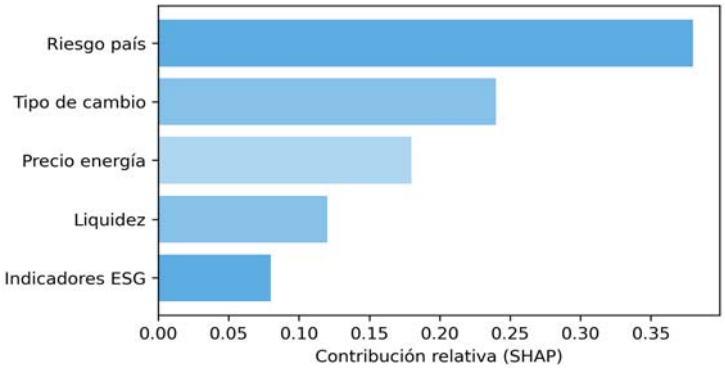
Entre las herramientas más influyentes se encuentra LIME (*local interpretable model-agnostic explanations*), desarrollado por Ribeiro, Singh & Guestrin (2016). Esta metodología construye una aproximación interpretable del comportamiento del modelo en el entorno de una observación específica. Para ello, genera perturbaciones locales de los datos, observa cómo cambian las predicciones y ajusta un modelo simple que resume el efecto marginal de cada variable. La principal virtud de LIME reside en su flexibilidad, ya que puede aplicarse prácticamente a cualquier algoritmo sin requerir acceso a su estructura interna. En la práctica financiera, esta herramienta permite explicar por qué un cliente fue clasificado como de alto riesgo,

por qué un bono exhibe un *spread* superior al de sus comparables o por qué un sistema antifraude activó una alerta determinada.

SHAP (*shapley additive explanations*), propuesto por Lundberg & Lee (2017), ofrece una base teórica particularmente sólida al apoyarse en la teoría de juegos cooperativos. Cada variable se interpreta como un "jugador" que contribuye al resultado final, y el valor de Shapley cuantifica su aporte marginal promedio considerando todas las combinaciones posibles de variables. Esta metodología posee propiedades matemáticas deseables, como consistencia y aditividad, que facilitan la comparación entre observaciones y entre modelos. En el análisis financiero, SHAP permite descomponer una predicción individual, identificar los principales *drivers* del riesgo y construir interpretaciones globales sobre el comportamiento de una cartera o de un conjunto de activos tokenizados.

En la ilustración 2 se ejemplifica una estimación de las contribuciones marginales sobre el spread de un bono verde tokenizado.

Ilustración 2: Importancia relativa de variables explicativas según valores SHAP



Los métodos contrafactuales agregan una dimensión particularmente valiosa desde el punto de vista operativo y jurídico. En lugar de describir retrospectivamente qué variables influyeron en una decisión, indican cuáles deberían modificarse para obtener un resultado distinto. Wachter, Mittelstadt & Russell (2017) destacan que este enfoque resulta especialmente útil cuando la explicación debe ser accionable para el usuario afectado. Una pyme cuyo financiamiento fue rechazado, por ejemplo, puede conocer qué cambios en su estructura de capital, en sus flujos de fondos o en la calidad de sus garantías permitirían mejorar su evaluación. De esta manera, la explicación deja de ser una mera descripción técnica y se transforma en una herramienta concreta para orientar decisiones futuras.

La utilidad de estas técnicas, sin embargo, depende de su integración dentro de un marco más amplio de gobernanza de modelos. Las explicaciones aisladas pueden resultar insuficientes si no existen procesos rigurosos de validación, documentación, control de versiones y monitoreo continuo. La guía SR 11-7 de la Reserva Federal y la Office of the Comptroller of the Currency subraya que la gestión del riesgo de modelos requiere validación independiente, challenge periódico y una clara asignación de responsabilidades. En este contexto, SHAP y LIME no sustituyen la necesidad de juicio profesional, sino que proporcionan evidencia complementaria que fortalece la capacidad de supervisión y auditoría.

La estabilidad explicativa constituye otro aspecto crítico. Una explicación es realmente útil cuando se mantiene razonablemente consistente frente a perturbaciones menores en los datos o a reentrenamientos ordinarios del modelo. Si pequeñas modificaciones producen interpretaciones radicalmente distintas, la organización puede enfrentar dificultades para documentar y defender sus decisiones. El Bank for International Settlements ha advertido que la explicabilidad no debe confundirse con certeza causal ni con comprensión total del algoritmo, sino con la capacidad de generar evidencia suficientemente robusta y reproducible para apoyar procesos de control (Pérez-Cruz *et al*., 2025).

La diversidad de destinatarios también condiciona la forma en que deben diseñarse las explicaciones. Un científico de datos necesita comprender la estructura técnica y las métricas del modelo; un oficial de crédito requiere una justificación operativa; un auditor demanda trazabilidad y evidencia reproducible; un regulador busca verificar el cumplimiento normativo; y el cliente afectado necesita una explicación clara y comprensible. La construcción de sistemas explicativos multinivel permite adaptar el grado de detalle y el lenguaje a cada uno de estos públicos, maximizando la utilidad de la información y fortaleciendo la legitimidad de las decisiones automatizadas.

En el ámbito de la tokenización de activos, la importancia de la XAI se intensifica. Los instrumentos digitales combinan riesgos tradicionales de crédito, mercado y liquidez con factores específicos vinculados a la gobernanza del protocolo, la seguridad de los contratos inteligentes, la concentración de validadores y la calidad de los oráculos externos. Las interacciones entre estas variables suelen ser complejas y altamente no lineales, lo que vuelve especialmente atractivas las arquitecturas de aprendizaje profundo. Sin mecanismos de explicabilidad, la valuación y el monitoreo de estos instrumentos quedarían expuestos a una opacidad incompatible con los estándares prudenciales contemporáneos.

La inteligencia artificial explicable permite transformar esa complejidad en conocimiento operativo. Al identificar con precisión los factores que determinan el comportamiento de un bono tokenizado, una stablecoin respaldada por activos reales o una cartera de proyectos sostenibles, las organizaciones pueden mejorar la asignación del capital, fortalecer la supervisión y ofrecer a los inversores una comprensión más clara de los riesgos asumidos. La XAI, en consecuencia, no debe ser entendida como un accesorio metodológico, sino como una infraestructura de confianza que hace posible conciliar innovación tecnológica, eficiencia analítica y responsabilidad institucional dentro del sistema financiero moderno.

4. Tokenización de activos y arquitectura financiera descentralizada

La tokenización de activos representa una de las innovaciones más profundas en la evolución reciente del mercado de capitales, ya que redefine la forma en que los derechos económicos son representados, transferidos y administrados. Desde una perspectiva jurídica y financiera, tokenizar un activo implica crear una representación digital de derechos patrimoniales sobre bienes reales o financieros y registrarla en una infraestructura basada en tecnología de registros distribuidos. Cada token puede reflejar una participación accionaria, un derecho crediticio, una fracción de un activo físico, un flujo futuro de caja o una combinación de estos elementos. La

relevancia del proceso no reside únicamente en la digitalización del soporte, sino en la posibilidad de incorporar programabilidad, trazabilidad y divisibilidad a instrumentos que históricamente dependían de intermediarios centralizados y de procesos administrativos relativamente costosos.

El impacto económico de la tokenización se manifiesta de manera simultánea en tres dimensiones fundamentales del sistema financiero. En primer lugar, mejora la liquidez de activos tradicionalmente ilíquidos al permitir su fraccionamiento y negociación en unidades de menor valor nominal. En segundo término, reduce barreras de entrada al ampliar la base potencial de inversores y facilitar la participación de agentes con menor capacidad patrimonial. Finalmente, fortalece la trazabilidad y la transparencia al registrar cada transacción en una base inmutable y cronológica, susceptible de ser auditada con mayor facilidad que los sistemas convencionales. La interacción entre estos tres efectos puede modificar sustancialmente la eficiencia del mercado y la forma en que se canaliza el ahorro hacia proyectos productivos.

La utilización de contratos inteligentes constituye uno de los elementos más disruptivos de esta arquitectura. Los *smart contracts* son programas informáticos que ejecutan automáticamente cláusulas contractuales cuando se verifican determinadas condiciones objetivas. En el caso de un bono tokenizado, por ejemplo, pueden programarse pagos automáticos de intereses, amortizaciones de capital, liberación de garantías y activación de eventos de default. Esta automatización reduce costos operativos, minimiza errores administrativos y disminuye la necesidad de intervención manual en procesos recurrentes. Desde una perspectiva de gobernanza, además, permite incorporar reglas transparentes y verificables ex ante, fortaleciendo la confianza de los inversores y de los organismos supervisores.

La tokenización no altera la lógica económica esencial del activo subyacente, pero sí modifica la infraestructura institucional a través de la cual se registran y transfieren los derechos asociados. Un bono corporativo tokenizado continúa siendo una obligación financiera cuyo valor depende de los flujos de fondos esperados y del riesgo crediticio del emisor. Un activo inmobiliario tokenizado sigue expuesto a la evolución del mercado de bienes raíces. Una stablecoin respaldada por activos reales mantiene su valor en función de la calidad y liquidez de las reservas que la sustentan. La diferencia radica en que la tecnología permite automatizar procesos, fraccionar la propiedad y mejorar la capacidad de seguimiento y control sobre dichos instrumentos.

Los bonos verdes tokenizados constituyen una aplicación especialmente relevante. Estos instrumentos combinan las características financieras de los títulos de deuda con mecanismos tecnológicos que facilitan el monitoreo del uso de fondos y del cumplimiento de indicadores ambientales. Los contratos inteligentes pueden registrar información sobre generación de energía, reducción de emisiones o eficiencia operativa y vincular automáticamente dichas métricas con ajustes en el costo financiero o en las obligaciones del emisor. Esta capacidad de integrar variables ESG dentro de la estructura contractual mejora la credibilidad del instrumento y reduce el riesgo de *greenwashing*, uno de los principales desafíos del financiamiento sostenible contemporáneo.

La tokenización también ofrece oportunidades significativas para las pequeñas y medianas empresas. Muchas pymes enfrentan dificultades para acceder al mercado de capitales debido a costos fijos elevados, escasa liquidez secundaria y limitaciones en la difusión de información. La emisión de instrumentos tokenizados puede reducir costos de estructuración, ampliar el uni-

verso de inversores y facilitar mecanismos automatizados de seguimiento de covenants y garantías. Cuando esta infraestructura se complementa con modelos avanzados de evaluación del riesgo, las empresas con historiales financieros incompletos o heterogéneos pueden acceder a esquemas de financiamiento más flexibles y eficientes.

No obstante, la tecnología incorpora fuentes de riesgo adicionales que deben ser cuidadosamente consideradas. Los contratos inteligentes pueden contener errores de programación; los oráculos externos pueden transmitir información incorrecta; la gobernanza del protocolo puede concentrarse en pocos participantes; y la incertidumbre regulatoria puede afectar la ejecutabilidad jurídica de los derechos representados digitalmente. Estas contingencias no invalidan el potencial de la tokenización, pero exigen metodologías de valuación y monitoreo capaces de integrar variables financieras tradicionales con factores tecnológicos, operativos y normativos.

En este punto, la inteligencia artificial y la modelización dinámica adquieren una importancia decisiva. La valuación de un activo tokenizado requiere considerar simultáneamente flujos de caja esperados, volatilidad macroeconómica, riesgo soberano, liquidez de mercado, métricas de *blockchain* y características específicas del protocolo subyacente. La combinación entre cointegración, VECM, redes LSTM-CNN y técnicas de explicabilidad permite capturar esta complejidad y determinar con mayor precisión cuáles son los factores que explican el comportamiento del precio, del *spread* o de la probabilidad de incumplimiento. La tokenización se convierte así en un ámbito natural para la aplicación de metodologías avanzadas de análisis financiero.

Diversos organismos internacionales han comenzado a destacar el potencial transformador de esta infraestructura. El Bank for International Settlements subraya que la tokenización puede incrementar la eficiencia del sistema financiero y facilitar la interoperabilidad entre infraestructuras de pagos y de mercado. El International Monetary Fund señala que los activos digitales programables podrían contribuir a profundizar mercados y ampliar el acceso al financiamiento. Estas evaluaciones sugieren que la tokenización no constituye una innovación marginal, sino una posible reconfiguración de la arquitectura del mercado de capitales.

En economías emergentes como la Argentina, el impacto potencial de esta tecnología es particularmente significativo. La existencia de abundantes recursos naturales, necesidades persistentes de inversión y restricciones estructurales de financiamiento crea un entorno en el que la tokenización puede desempeñar un papel estratégico. Proyectos vinculados a energía, minería, agroindustria e infraestructura podrían estructurarse como activos digitales más accesibles y transparentes, permitiendo atraer inversores nacionales e internacionales. Cuando esta infraestructura se articula con inteligencia artificial explicable y con marcos regulatorios adecuados, la tokenización deja de ser una simple innovación tecnológica para transformarse en una herramienta concreta de modernización financiera y de fortalecimiento de la soberanía económica.

5. Estudio de caso: bono verde tokenizado y modelos híbridos VECM-LSTM-CNN

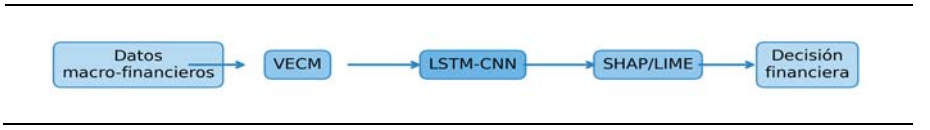
La aplicación de modelos híbridos de inteligencia artificial y econometría dinámica resulta particularmente relevante en instrumentos financieros cuya valuación depende simultáneamente de variables macroeconómicas, factores sectoriales y riesgos tecnológicos. Los bonos

verdes tokenizados constituyen un ejemplo representativo de esta complejidad, ya que combinan características propias de los instrumentos de renta fija tradicionales con elementos asociados a *blockchain*, contratos inteligentes y métricas ambientales. Para ilustrar el funcionamiento de estas metodologías se desarrolla un estudio de caso centrado en un bono verde tokenizado emitido para financiar proyectos de energía solar en América Latina.

El instrumento considerado posee vencimiento a diez años, cupones semestrales y cláusulas programables que ajustan determinadas condiciones financieras en función del cumplimiento de indicadores ambientales y operativos. Los fondos obtenidos se destinan a la construcción y mantenimiento de parques solares distribuidos en distintas regiones con elevada radiación solar y fuerte potencial de expansión energética. Desde el punto de vista financiero, el valor del bono depende de la estabilidad de los flujos futuros de caja, de la calidad crediticia del emisor, de la evolución del riesgo soberano y de la volatilidad de variables macroeconómicas relevantes, especialmente inflación y tipo de cambio. A estos factores se agregan elementos específicos de la infraestructura digital, tales como la seguridad del protocolo utilizado, la confiabilidad de los contratos inteligentes y la liquidez del mercado secundario de tokens.

El esquema en la ilustración 3 muestra la secuencia desde los datos macro-financieros hasta la decisión de inversión apoyada en técnicas de XAI.

Ilustración 3: Arquitectura metodológica integrada para la evaluación avanzada del riesgo



La modelización comienza con un análisis de cointegración de Johansen aplicado a series de tiempo relacionadas con *spreads* de bonos comparables, riesgo país medido a través del EMBI, precios internacionales de la energía, inflación, tasas de interés internacionales y tipo de cambio. El objetivo consiste en identificar relaciones estructurales de largo plazo entre estas variables y determinar si el *spread* del bono tokenizado converge hacia un equilibrio económico relativamente estable. Los resultados muestran la existencia de vectores de cointegración estadísticamente significativos, indicando que, pese a la volatilidad de corto plazo, las variables mantienen vínculos persistentes a lo largo del tiempo.

Sobre esta base se estima un modelo VECM que permite analizar la velocidad de ajuste del sistema frente a perturbaciones macroeconómicas. El término de corrección de errores revela que los *spreads* reaccionan con rapidez a shocks vinculados al riesgo soberano y a variaciones abruptas del tipo de cambio, mientras que las modificaciones en los precios internacionales de la energía generan efectos más graduales pero persistentes. Desde una perspectiva económica, este resultado refleja la elevada sensibilidad de los mercados emergentes a factores financieros sistémicos y la importancia del contexto macroeconómico para la valuación de instrumentos sostenibles.

Sin embargo, los residuos del modelo econométrico contienen patrones no lineales que no son capturados adecuadamente por la especificación paramétrica. Para modelar esta componente residual se implementa una arquitectura híbrida basada en redes neuronales *long short-*

term memory (LSTM) y capas convolucionales (CNN). Las LSTM permiten retener dependencias temporales de largo alcance y detectar persistencias complejas en las series financieras, mientras que la CNN identifica estructuras locales y patrones de comportamiento difíciles de modelar mediante relaciones lineales tradicionales. La combinación entre ambas capas mejora significativamente la capacidad de pronóstico y reduce errores asociados a volatilidad extrema y cambios abruptos de régimen.

El entrenamiento del modelo se realiza utilizando validación cruzada y técnicas de regularización destinadas a minimizar el sobreajuste. Se aplican procedimientos de dropout y normalización de datos para mejorar la estabilidad fuera de muestra y garantizar que la red no capture ruido estadístico como si se tratara de información relevante. El desempeño se evalúa mediante error cuadrático medio, error absoluto medio y capacidad de anticipar episodios de ampliación del *spread*. Los resultados indican que la arquitectura híbrida supera de manera consistente a los modelos lineales tradicionales, particularmente en períodos de elevada volatilidad financiera.

Desde el punto de vista económico, uno de los hallazgos más relevantes consiste en la identificación de los principales drivers del riesgo. La aplicación de SHAP permite descomponer cada predicción y cuantificar el aporte marginal de las variables consideradas. El análisis muestra que el riesgo soberano y la volatilidad cambiaria representan los factores con mayor impacto sobre el *spread* del bono tokenizado. En períodos de tensión financiera internacional, estas variables adquieren una importancia dominante, mientras que en escenarios de mayor estabilidad macroeconómica aumentan la relevancia relativa de los precios de la energía, de la generación efectiva de los parques solares y de los indicadores ESG asociados al proyecto.

La utilización de explicaciones locales aporta información especialmente valiosa para emisores e inversores. Determinadas observaciones revelan que pequeñas variaciones en el riesgo país producen incrementos desproporcionados en el *spread*, reflejando la sensibilidad de los mercados emergentes frente a cambios en la percepción de solvencia soberana. Otras muestran que la mejora en la generación energética y en la eficiencia operativa contribuye a reducir el costo financiero del instrumento. Estas explicaciones permiten transformar un algoritmo complejo en una herramienta operativamente útil para procesos de inversión y gestión del riesgo.

Los métodos contrafactuales complementan este análisis al identificar qué modificaciones serían necesarias para alterar la valuación del bono. Una disminución del EMBI, una mayor cobertura cambiaria o un incremento en la liquidez secundaria del token reducen significativamente el *spread* exigido por los inversores. Desde la perspectiva del estructurador financiero, esta información resulta crucial para optimizar la arquitectura del instrumento y mejorar sus condiciones de colocación.

El estudio de caso también evidencia la relevancia de la tokenización desde el punto de vista operativo. Los contratos inteligentes incorporados en la estructura del bono permiten automatizar pagos de intereses, monitorear indicadores ambientales y registrar de manera transparente cada transacción asociada al instrumento. Esta infraestructura mejora la trazabilidad y reduce costos administrativos, fortaleciendo simultáneamente la capacidad de supervisión y auditoría. La integración entre *blockchain* e inteligencia artificial explicable genera así un entorno en el que la precisión analítica y la transparencia institucional se refuerzan mutuamente.

La experiencia analizada permite extraer conclusiones relevantes para mercados emergentes. En contextos caracterizados por volatilidad macroeconómica y restricciones de financiamiento, los instrumentos tokenizados respaldados por proyectos sostenibles pueden convertirse

en una alternativa eficaz para canalizar capital hacia sectores estratégicos. Sin embargo, su éxito depende de la existencia de modelos capaces de capturar relaciones dinámicas complejas y, al mismo tiempo, ofrecer explicaciones comprensibles y auditables. La combinación entre VECM, redes LSTM-CNN y técnicas SHAP y LIME demuestra que es posible construir sistemas avanzados de evaluación del riesgo que integren sofisticación tecnológica con fundamentos económicos y gobernanza institucional.

6. Implicancias regulatorias para Argentina y América Latina

La incorporación simultánea de inteligencia artificial explicable y tokenización de activos plantea desafíos regulatorios que exceden el marco tradicional de supervisión financiera. Durante décadas, la regulación se concentró en la solvencia patrimonial, la gestión de riesgos y la protección del inversor bajo estructuras relativamente estables de intermediación. La aparición de algoritmos complejos, infraestructuras descentralizadas y contratos inteligentes obliga a ampliar el alcance de la supervisión hacia dimensiones como la gobernanza del dato, la trazabilidad de los procesos, la seguridad tecnológica y la explicabilidad de las decisiones automatizadas. El problema ya no consiste únicamente en determinar si una entidad cumple con ratios prudenciales o requisitos de divulgación, sino en evaluar si los sistemas utilizados para asignar capital y valorar activos son técnicamente robustos, reproducibles y razonablemente comprensibles.

Los principales organismos internacionales convergen en torno a un conjunto de principios que ofrecen una base conceptual sólida para abordar esta transformación. El National Institute of Standards and Technology (2023) propone un marco de gestión del riesgo de inteligencia artificial orientado a identificar, medir y mitigar riesgos durante todo el ciclo de vida del sistema. La Organisation for Economic Co-operation and Development (2024) enfatiza la necesidad de transparencia, responsabilidad y supervisión humana. El Bank for International Settlements y el International Monetary Fund destacan, además, que la adopción de modelos avanzados puede modificar la estructura de los mercados, incrementar la dependencia de proveedores tecnológicos y generar nuevas fuentes de riesgo operacional y sistémico. Estas recomendaciones sugieren que la regulación de la innovación financiera debe apoyarse en una visión integral que combine eficiencia, estabilidad y legitimidad institucional.

La European Banking Authority y el Reglamento Europeo de Inteligencia Artificial constituyen referencias particularmente relevantes. La EBA (2023) reconoce que las técnicas de *machine learning* pueden incorporarse al marco prudencial, siempre que se aseguren estándares rigurosos de documentación, validación, control de datos y explicabilidad. El Reglamento (UE) 2024/1689 clasifica como sistemas de alto riesgo aquellos utilizados para evaluar la solvencia o el *credit scoring* de personas físicas, imponiendo obligaciones específicas de registro, monitoreo, supervisión humana y documentación técnica. Si bien estas normas responden a un contexto institucional particular, ofrecen un antecedente valioso para otras jurisdicciones interesadas en compatibilizar innovación con salvaguardas proporcionales al impacto potencial de los modelos.

En América Latina, la discusión regulatoria se encuentra en una etapa de consolidación. Diversos países avanzan en marcos normativos vinculados a activos digitales, protección de datos e inteligencia artificial, aunque con grados heterogéneos de desarrollo institucional. Esta

diversidad refleja diferencias en la profundidad de los mercados, en las capacidades supervisoras y en la velocidad de adopción tecnológica. No obstante, la región comparte desafíos estructurales comunes, tales como elevada volatilidad macroeconómica, restricciones de financiamiento y necesidad de ampliar el acceso al crédito y al mercado de capitales. En este contexto, la adopción de estándares internacionales adaptados a las particularidades locales puede contribuir a fortalecer la confianza y a reducir costos de transacción.

La Argentina presenta características que hacen especialmente relevante esta agenda. La persistencia de inflación elevada, fluctuaciones cambiarias y episodios recurrentes de estrés financiero exige modelos de riesgo capaces de capturar dinámicas complejas y de ajustarse rápidamente a cambios estructurales. Al mismo tiempo, el financiamiento de pymes y proyectos de infraestructura enfrenta limitaciones derivadas de la escasez de instrumentos líquidos y de la percepción de riesgo soberano. La combinación entre inteligencia artificial explicable y tokenización de activos ofrece una oportunidad para modernizar el mercado de capitales y ampliar las alternativas de financiación, pero su adopción requiere marcos regulatorios claros y capacidades técnicas suficientes para validar modelos y supervisar infraestructuras digitales.

El Banco Central de la República Argentina ya dispone de lineamientos que constituyen una base importante para esta evolución. Las normas sobre gestión integral de riesgos exigen que los procesos implementados por las entidades financieras sean adecuados, suficientemente comprobados, debidamente documentados y revisados periódicamente. Estos principios son plenamente compatibles con los requerimientos de gobernanza algorítmica y model risk management. La Comisión Nacional de Valores, por su parte, ha comenzado a desarrollar regulaciones vinculadas a proveedores de servicios de activos virtuales y a nuevas formas de intermediación financiera. La Agencia de Acceso a la Información Pública aporta, además, lineamientos relevantes en materia de protección de datos personales, transparencia y auditabilidad de sistemas de inteligencia artificial.

Una agenda regulatoria moderna para la Argentina debería contemplar al menos cinco dimensiones complementarias. En primer lugar, fortalecer la gobernanza del dato, asegurando calidad, representatividad, trazabilidad y respeto por los derechos de los titulares de la información. En segundo término, establecer estándares específicos de documentación, validación y monitoreo para modelos de inteligencia artificial utilizados en crédito, mercado, prevención de fraude y cumplimiento normativo. En tercer lugar, promover mecanismos de explicabilidad adaptados a distintos tipos de usuarios, de modo que las decisiones automatizadas puedan ser comprendidas tanto por especialistas como por clientes e inversores. En cuarto término, desarrollar capacidades supervisoras y de auditoría orientadas a modelos complejos y contratos inteligentes. Finalmente, implementar entornos de experimentación controlada, como sandboxes regulatorios, que permitan innovar sin comprometer la estabilidad del sistema.

La tokenización de activos introduce, además, desafíos jurídicos específicos relacionados con la naturaleza de los derechos representados digitalmente, la validez de los contratos inteligentes, la custodia de claves criptográficas y la interoperabilidad entre registros distribuidos y marcos legales tradicionales. La claridad normativa en estas materias resulta esencial para que los inversores puedan confiar en la ejecutabilidad efectiva de los instrumentos. Desde una perspectiva económica, la seguridad jurídica es un componente central del valor de cualquier activo financiero, independientemente de la tecnología utilizada para representarlo.

La dimensión regional también reviste una importancia estratégica. América Latina enfrenta un déficit crónico de financiamiento para infraestructura, transición energética y modernización

productiva. La armonización gradual de criterios regulatorios sobre tokenización, inteligencia artificial y protección del inversor podría facilitar la creación de mercados más profundos e integrados. Esta convergencia normativa reduciría costos de estructuración, ampliaría la base de inversores y fortalecería la credibilidad de las emisiones digitales en la región.

El financiamiento sostenible constituye uno de los ámbitos con mayor potencial de aplicación. La tokenización de bonos verdes y de instrumentos vinculados a métricas ESG permite mejorar la trazabilidad del uso de fondos y del desempeño ambiental de los proyectos. La inteligencia artificial explicable, por su parte, facilita la evaluación continua del riesgo y del cumplimiento de objetivos. Cuando ambas tecnologías operan dentro de marcos regulatorios sólidos, se crea una infraestructura especialmente adecuada para movilizar capital hacia sectores estratégicos como energías renovables, eficiencia energética, agroindustria y transporte sustentable.

En última instancia, la regulación no debe ser concebida como un obstáculo a la innovación, sino como una condición para que la innovación sea sostenible y socialmente legítima. La inteligencia artificial y la tokenización tienen el potencial de transformar profundamente el mercado financiero, pero ese potencial sólo podrá materializarse plenamente si los sistemas desarrollados son transparentes, explicables y auditables. La capacidad de equilibrar sofisticación tecnológica con prudencia institucional será uno de los factores determinantes para definir el papel de Argentina y de América Latina en la próxima etapa de evolución del sistema financiero global.

7. Conclusiones

La convergencia entre modelización dinámica, aprendizaje profundo, inteligencia artificial explicable y tokenización de activos configura una de las transformaciones más significativas en la historia reciente de las finanzas. Lejos de constituir innovaciones aisladas, estas herramientas forman parte de una arquitectura analítica e institucional orientada a reducir asimetrías de información, mejorar la asignación del capital y fortalecer la capacidad del sistema financiero para canalizar recursos hacia proyectos productivos y sostenibles. La magnitud del cambio no radica únicamente en la incorporación de nuevas tecnologías, sino en la posibilidad de articular teoría económica, capacidad computacional y mecanismos de gobernanza dentro de un mismo marco metodológico.

La modelización dinámica aporta la estructura conceptual necesaria para comprender cómo las variables macroeconómicas y financieras interactúan en el tiempo y convergen hacia relaciones de equilibrio de largo plazo. Los modelos de cointegración y los VECM permiten distinguir entre shocks transitorios y cambios estructurales, proporcionando una base sólida para interpretar la sensibilidad de los activos frente a perturbaciones del entorno económico. Las redes neuronales LSTM-CNN amplían este marco al capturar patrones no lineales y dependencias complejas que exceden las posibilidades de los enfoques paramétricos tradicionales. La inteligencia artificial explicable, mediante herramientas como SHAP, LIME y explicaciones contrafactuales, traduce esa complejidad en evidencia comprensible y operativamente útil. La tokenización de activos, finalmente, incorpora una infraestructura programable y trazable que redefine la manera en que los derechos económicos son emitidos, negociados y supervisados.

El principal aporte de esta integración consiste en demostrar que la sofisticación analítica y la transparencia institucional no son objetivos incompatibles. Durante mucho tiempo, el debate sobre inteligencia artificial en finanzas estuvo dominado por la idea de un trade-off inevitable entre precisión predictiva e interpretabilidad. El análisis desarrollado en este trabajo muestra que dicho antagonismo puede ser superado cuando los modelos se diseñan dentro de una arquitectura de gobernanza adecuada. La explicabilidad no reduce el valor del aprendizaje automático; por el contrario, lo convierte en una herramienta defendible y socialmente legítima, capaz de ser incorporada a procesos de decisión con elevados requerimientos prudenciales y regulatorios.

La tokenización de activos amplifica el alcance de este paradigma al ofrecer nuevas formas de estructuración y financiamiento. Bonos verdes tokenizados, stablecoins respaldadas por activos reales e instrumentos digitales para pymes permiten ampliar la liquidez, reducir costos de intermediación y atraer inversores hacia sectores estratégicos. Sin embargo, estos beneficios sólo pueden materializarse plenamente si la valuación y el monitoreo del riesgo se apoyan en metodologías capaces de integrar factores macroeconómicos, financieros, tecnológicos y normativos. La combinación entre econometría, inteligencia artificial explicable y *blockchain* ofrece precisamente esa capacidad de análisis multidimensional.

El estudio de caso sobre un bono verde tokenizado demuestra que la utilización de arquitecturas híbridas VECM-LSTM-CNN mejora sustancialmente la precisión de los pronósticos y permite identificar con claridad los principales drivers del riesgo. La evidencia obtenida sugiere que el riesgo soberano y la volatilidad cambiaria continúan desempeñando un papel central en la determinación del costo de financiamiento en mercados emergentes, incluso cuando los instrumentos incorporan innovaciones tecnológicas avanzadas. Esta constatación confirma que la tecnología no elimina los fundamentos económicos subyacentes, sino que proporciona herramientas más potentes para modelarlos y gestionarlos.

Las implicancias para la Argentina y América Latina son particularmente relevantes. La región enfrenta restricciones persistentes de acceso al capital, elevada volatilidad macroeconómica y necesidades significativas de inversión en infraestructura, energía y transformación productiva. La adopción de modelos explicables y de instrumentos tokenizados puede contribuir a reducir el costo del financiamiento, ampliar el universo de inversores y mejorar la credibilidad de los proyectos. No obstante, el éxito de esta estrategia dependerá de la capacidad institucional para desarrollar marcos regulatorios claros, fortalecer competencias técnicas y consolidar estándares de validación y supervisión acordes con la complejidad de las nuevas herramientas.

Desde una perspectiva más amplia, el trabajo sugiere que el futuro de las finanzas no estará determinado exclusivamente por la velocidad de innovación tecnológica, sino por la calidad de las instituciones capaces de gobernarla. Los algoritmos pueden procesar volúmenes crecientes de información y detectar patrones de enorme complejidad; las infraestructuras descentralizadas pueden automatizar contratos y reducir costos de transacción. Sin embargo, el valor económico y social de estas capacidades depende de que sus resultados sean transparentes, auditables y consistentes con principios de responsabilidad y protección del inversor. La confianza, en última instancia, sigue siendo el activo fundamental sobre el que se construye cualquier sistema financiero.

La hipótesis central planteada al inicio del ensayo encuentra así respaldo conceptual y metodológico. La inteligencia artificial aplicada a la tokenización de activos sólo resulta sostenible

cuando la mejora en la capacidad predictiva es acompañada por mecanismos robustos de explicabilidad, documentación y gobernanza. Bajo estas condiciones, la convergencia entre econometría dinámica, aprendizaje profundo, XAI y *blockchain* configura un nuevo paradigma para la evaluación avanzada del riesgo financiero, con capacidad para transformar la estructura del mercado de capitales y fortalecer la soberanía económica de los países emergentes.

Las líneas futuras de investigación son amplias y prometedoras. Resulta particularmente relevante profundizar en el uso de modelos explicables para activos vinculados a recursos naturales estratégicos, analizar la interacción entre tokenización y políticas monetarias digitales, y estudiar el papel de la privacidad de datos y del aprendizaje federado en contextos donde la información es sensible o dispersa. La consolidación de estas agendas permitirá avanzar hacia sistemas financieros más eficientes, inclusivos y resilientes, en los que la innovación tecnológica y la responsabilidad institucional se potencien mutuamente en beneficio del desarrollo económico y social.

REFERENCIAS

Agencia de Acceso a la Información Pública. (2024). *Guía de recomendaciones para entidades públicas y privadas en materia de transparencia y protección de datos personales para una inteligencia artificial responsable*.

Bazarbash, M. (2019). *FinTech in financial inclusion: Machine learning applications in assessing credit risk* (IMF Working Paper No. WP/19/109). International Monetary Fund.

Bank for International Settlements. (2025). *Annual Economic Report 2025*. Bank for International Settlements.

Board of Governors of the Federal Reserve System, & Office of the Comptroller of the Currency. (2011). *Supervisory guidance on model risk management (SR 11-7)*. Federal Reserve System.

Brealey, R. A., Myers, S. C. & Allen, F. (2023). *Principles of corporate finance*, 14th ed. McGraw-Hill.

Damodaran, A. (2024). *Applied corporate finance*, 5th ed. Wiley.

Doerr, S., Gambacorta, L. & Serena, J. M. (2021). *Big data and machine learning in central banking*. BIS Working Papers, No. 930.

Doshi-Velez, F. & Kim, B. (2017). *Towards a rigorous science of interpretable machine learning*. arXiv.

European Banking Authority. (2023). *Follow-up report on machine learning for IRB models*. European Banking Authority.

European Union. (2024). *Regulation (EU) 2024/1689 laying down harmonised rules on artificial intelligence (Artificial Intelligence Act)*. Official Journal of the European Union.

Fabozzi, F. J. (2023). *Bond markets, analysis, and strategies*, 10th ed. Pearson.

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

Hull, J. C. (2024). *Options, futures, and other derivatives*, 11th ed. Pearson.

International Monetary Fund. (2024). *Advances in artificial intelligence: Implications for capital markets*. International Monetary Fund.

Lundberg, S. M. & Lee, S.-I. (2017). *A unified approach to interpreting model predictions*. NIPS'17, Proceedings of the 31st Conference on Neural Information Processing Systems Advances in Neural Information Processing Systems, 4765-4774.

National Institute of Standards and Technology. (2023). *Artificial Intelligence Risk Management Framework (AI RMF 1.0)*. U.S. Department of Commerce.

Organisation for Economic Co-operation and Development. (2024). *OECD AI Principles*. OECD Publishing.

Pérez-Cruz, F., Prenio, J., Restoy, F. & Yong, J. (2025). *Managing explanations: How regulators can address AI explainability*. Bank for International Settlements.

Ribeiro, M. T., Singh S., & Guestrin, C. (2016). *Why should I trust you? Explaining the predictions of any classifier*. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 1135-1144.

Ross, S. A., Westerfield, R. & Jordan, B. (2022). *Fundamentals of corporate finance*, 14th ed. McGraw-Hill.

Wachter, S., Mittelstadt, B. & Russell, C. (2017). *Counterfactual explanations without opening the black box: Automated decisions and the GDPR*. Harvard Journal of Law & Technology, 31 (2): 841-887

World Bank. (2022). *Responsible use of technology in credit reporting*. World Bank Group.