

Mercados Financieros Artificiales: Un Paso más hacia la Comprensión de los Mercados Financieros Reales

José Antonio Pascual Ruano¹, Adolfo López Paredes², Javier Pajares Gutierrez³, Cesáreo Hernández Iglesias⁴

¹ AYEU, E.T.S.I.I. Universidad de Valladolid, Paseo del Cauce s/n, 47011, pascual@eis.uva.es

² PTUN, E.T.S.I.I. Universidad de Valladolid, Paseo del Cauce s/n, 47011, aldo@eis.uva.es

³ PTUN, E.T.S.I.I. Universidad de Valladolid, Paseo del Cauce s/n, 47011, pajares@eis.uva.es

⁴ Catedrático de U., E.T.S.I.I. Universidad de Valladolid, Paseo del Cauce s/n, 47011, cesareo@eis.uva.es

RESUMEN

El paradigma dominante en finanzas, basado principalmente en los modelos de equilibrio y en la hipótesis de eficiencia, ha permitido elaborar un marco teórico elegante para analizar los mercados financieros. Sin embargo, la existencia de numerosas anomalías difícilmente explicables bajo este enfoque sugiere la necesidad de buscar nuevas vías de investigación.

De todas las actualmente emergentes, la denominada Behavioural Finance, que trata de explicar la evolución agregada de los mercados teniendo en cuenta la psicología de los inversores, se erige como una de las más prometedoras. No obstante, el desarrollo de nuevas teorías y modelos bajo esta óptica exige utilizar metodologías apropiadas.

En este artículo sugerimos que el modelado basado en agentes constituye un metodología prometedora para tal fin, ya que permite construir “mercados financieros artificiales” en los que modelar distintas psicologías de los inversores y observar sus consecuencias a nivel agregado.

En concreto, hemos construido un mercado financiero artificial, bajo plataforma JAVA, en el que podremos simular la influencia de algunas de las teorías psicológicas recientes, para explicar bajo qué condiciones aparecen burbujas financieras, infra y sobre reacciones y excesos de volatilidad.

Palabras Clave: *Hipótesis de Mercados Eficientes (EMH), Modelos de Equilibrio Financiero, Behavioral Finance, Modelado Basado en Agentes (ABM).*

1. Introducción.

Durante años, el paradigma dominante en finanzas se ha fundamentado en la Hipótesis de Mercados Eficientes (EMH), [8],[9],[10],[11],[19], y en los Modelos de Equilibrio [12],[20],[21]. La primera asume que los mercados, poblados por agentes racionales, son capaces de recoger la información e integrarla en los precios de manera instantánea y eficiente. Por su parte, los modelos de equilibrio expresan la relación entre rentabilidad esperada y riesgo. Sin embargo, en las últimas décadas, se han observado estudios empíricos que recogen fenómenos de mercado que son difíciles de explicar bajo la ortodoxia financiera.

El deseo de construir teorías financieras basadas en supuestos más realistas ha favorecido nuevas direcciones de investigación que integran aspectos relacionados con “la psicología del mercado”, como la denominada *Behavioral Finance* [17], [18], [23], o la Teoría de Juegos Evolucionista [13]. Para poder formular y estudiar las consecuencias de estas teorías en el

comportamiento de los mercados, es posible utilizar la simulación con modelos basados en agentes (*ABM Agent Based Models*) de mercados financieros [1], [4].

Uno de estos modelos, que utiliza ABM para integrar algunos aspectos sugeridos por *Behavioral Finance*, es el desarrollado en el Instituto de Santa Fe [1], conocido como *Artificial Stock Market (ASM)*.

Aunque reconocemos su valor como primera contribución, en este artículo sugerimos cómo puede ser ampliado y complementado para incluir un mayor número de aspectos psicológicos.

Tomando como punto de partida el modelo de Santa Fe, consideramos necesario enriquecer la población de agentes que participan en el mercado. No es suficiente con facilitar que las reglas que los agentes emplean para tomar decisiones sean ajustadas de forma diferente por cada uno. Es preciso incluir agentes que utilicen estrategias cualitativamente diferentes, que combinen información de manera diferente, e incluso que tomen decisiones hasta cierto punto arbitrarias. Los resultados generados con esta ampliación desarrollan un abanico más amplio de comportamientos del mercado respecto a los obtenidos con el ASM original y permitirán estudiar las finanzas desde un punto de vista más cercano a las teorías económicas evolucionistas.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera. En primer lugar, comentaremos las líneas de trabajo que pueden utilizar las finanzas en su intento por superar las limitaciones que exhiben los planteamientos tradicionales. Posteriormente, explicaremos las características más relevantes del modelo de Santa Fe, así como las ampliaciones que sugerimos para hacer el modelo más realista, incluyendo mayor heterogeneidad de estrategias y comportamientos inversores. Finalizaremos con las conclusiones más relevantes.

2. Hacia un nuevo programa de investigación en finanzas.

La teoría económica estándar postula en su declaración más breve que los agentes que intervienen en la economía deducen su comportamiento óptimo mediante procesos lógicos a partir de sus circunstancias. Además, asume la racionalidad casi perfecta de los agentes, que poseen información perfecta, forman expectativas racionales sobre el precio futuro de un activo, descuentan instantáneamente y racionalmente toda la información del mercado en este precio y saben que cualquier otro agente exhibe las mismas propiedades. Este enfoque conduce a situaciones de equilibrio, en las que difícilmente tienen cabida fenómenos dinámicos, aprendizaje y evolución.

Sin embargo, y tal como manifiesta Arthur [2], si adoptamos modelos tradicionales para analizar los mercados financieros, obtendremos que el volumen negociado debería ser inferior al que realmente observamos, y desaparecería la posibilidad de que los inversores basen sus inversiones en el análisis técnico, pues cualquier regularidad de los precios sería inmediatamente arbitrada por los agentes racionales. En definitiva, bajo planteamientos ortodoxos se limita el estudio de algunas características observadas en los mercados reales como quiebras, burbujas especulativas, volatilidad alta, rentabilidades anormales, etc. Pero en realidad, existen inversores que ven posibilidades especulativas en el mercado [1], y utilizan ampliamente el análisis técnico.

El “Crack del 87” dañó significativamente la creencia económica de que cambios repentinos en precios reflejan ajustes racionales a noticias en el mercado, pues diferentes estudios ([3],[14]) no fueron capaces de encontrar correlación significativa entre los descensos en las cotizaciones y la información de mercado publicada.

Por su parte, “El Crack del 29” justificó la falta de capacidad predictiva de los operadores de los mercados financieros. El New York Times recogía 2 semanas antes del “Jueves Negro”: “*Los precios de las acciones permanecerán en niveles elevados durante varios años*”, y 2 días antes decía “*Fisher dice que los precios de las acciones están bajos*” subtítulo: “*Las cotizaciones todavía no han alcanzado su valor fundamental*”. El jueves 24/10/29, sin que se desvelara ninguna información relevante, los precios se hundieron y 3 años más tarde el valor del índice Dow Jones Industrial Average había caído un 85%.

Otro fenómeno difícil de explicar desde la óptica tradicional es el de las burbujas especulativas, en las que inversores impulsados por estrategias *trend following*, reaccionan a variaciones pasadas de precios, y no a nueva información relevante. Si los inversores fuesen tan racionales como sugieren las hipótesis de racionalidad de los agentes, tal fenómeno no ocurriría.

Ante este cúmulo de hechos empíricos no explicados satisfactoriamente, las finanzas deben buscar nuevas líneas de investigación que permitan acomodarlos.

Un primer intento consiste en imponer limitaciones acerca de la racionalidad de los inversores, “*bounded rationality*”, [22], restricciones que afectan al conocimiento, al tiempo de cálculo, a la capacidad de memoria, al repertorio de pronósticos, etc. Pero la dificultad se plantea en las diferentes dimensiones en las que es posible limitar la racionalidad, y no hay ningún principio claro de cómo fijar la dirección y la distancia a la racionalidad perfecta.

Otro intento por esclarecer el comportamiento real de mercado es el denominado enfoque “*noise trader*”, que demuestra que cuando hay inversores que poseen expectativas diferentes de las de los agentes de expectativas racionales, las estrategias chartistas tales como “*trend following*” pueden hacerse racionales. ([5] [6] [7]). También se pone de manifiesto como bajo ciertas condiciones, inversores “no racionales” pueden obtener rentabilidades superiores a las conseguidas por operadores “racionales”.

Un tercer intento más ambicioso, que en cierta medida engloba los dos anteriores, es el denominado *Behavioural Finance* [17], [18], [23]. Consiste en explicar las regularidades observadas en los mercados financieros por medio de los comportamientos psicológicos de los operadores del mercado. Se trata de un nuevo prometedor programa de investigación que ha suscitado incluso el interés de estudiosos en finanzas tradicionalmente involucrados en planteamientos tradicionales, como es el caso del profesor Eugene F. Fama. Así mismo, el reciente Premio Nóbel de Economía concedido al profesor Kahneman sugiere un apoyo a esta nueva línea de investigación.

Las vías anteriores se complementan con el denominado *enfoque experimental*, consistente en diseñar experimentos para averiguar los comportamientos humanos en condiciones similares a las de los mercados financieros.

En cualquiera de los casos, formular teorías y modelos en los que se incorporan comportamientos psicológicos de los agentes económicos exige contar con una metodología que permita deducir comportamientos agregados de los mercados en función de los comportamientos individuales de los agentes que lo integran. De suerte que las nuevas tecnologías de simulación provenientes de la Inteligencia Artificial Distribuida nos ayudarán en este cometido.

En concreto, el modelado basado en agentes en general, y los Sistemas Multi-agente en particular, permiten construir modelos de simulación por ordenador, en los que el diseñador del modelo se centra en programar los comportamientos individuales de los agentes, así como sus interacciones; durante la simulación, es responsabilidad del sistema generar el comportamiento agregado.

Los métodos basados en agentes se han aplicado en distintos entornos económicos. Sin embargo, algunos rasgos hacen a los mercados financieros un campo especialmente adecuado, pues permiten abordar las no-linealidades que surgen al codificar el comportamiento de los agentes. Obviamente son de los mercados más dinámicos, generan datos de alta calidad y frecuencia, que proporcionan un conjunto amplio de hechos y características a partir de las cuales trabajar. Además están bien organizados, centralizados, y negocian productos homogéneos de manera normalmente eficiente.

Este enfoque, en el que se suponen mercados poblados por agentes software, “*inteligentes*”, independientes, con reglas específicas de comportamiento, interactuando, abre un nuevo espectro de posibilidades, pues permite probar varias teorías de comportamiento, aprendizaje y microestructuras de mercado en un ambiente controlado.

En concreto, uno de nuestros objetivos será modelar los comportamientos que sugiere el campo de *Behavioural Finance*, para ver si permiten explicar los fenómenos empíricos agregados comúnmente observados e insuficientemente explicados por el paradigma dominante en finanzas.

2. El Modelo.

El modelo basado en el ASM [1], intenta superar algunas limitaciones del original, introduciendo mayor heterogeneidad en los agentes participantes: desde agentes “irracionales”, que realizarán sus inversiones aleatoriamente, a agentes “inteligentes”, dotados de un sistema de aprendizaje, basado en reglas de producción, actualizadas empleando clasificadores de Holland [16] y Algoritmos Genéticos [14].

Empleamos para su desarrollo las librerías de Swarm pues facilitan la programación y proporcionan algunas ventajas en la simulación como la gestión del tiempo, representación gráfica, gestión de memoria, etc. Como lenguaje de programación usamos Java, que dotará al modelo de modularidad, replicabilidad, etc.

En el mercado se negocia un activo con riesgo (acción), a un precio fijado en función de la oferta y demanda del mismo, que paga un dividendo estocástico d_t , desconocido por los agentes, y un activo sin riesgo, que paga un tipo de interés fijo.

Es precisamente en este punto, en la generación del dividendo donde introducimos otra variante sobre el modelo original, en el que éste seguía un proceso autorregresivo de orden 1. En nuestro modelo también se contempla esta posibilidad, pero de forma genérica los dividendos pueden ser introducidos desde fichero por el programador.

De esta forma, conseguiremos dar un paso más en el estudio de este mercado al introducir la posibilidad de estudiar los efectos de los diferentes tipos de evoluciones temporales de los dividendos en las estrategias “vencedoras” de los agentes, dándole así al estudio un cierto enfoque evolucionista.

Al comenzar la simulación, los agentes disponen de una cantidad de dinero y de acciones. Cada periodo, unos elegirán aleatoriamente la cantidad a comprar/vender y otros toman la decisión de inversión según la predicción del precio más el dividendo futuro de la acción, dado que poseen una función de utilidad CARA:

$$U(W_{i,t+1}) = - \exp(-\lambda W_{i,t+1}) \quad (1)$$

en donde $W_{i,t+1}$ es la riqueza del agente i en $t + 1$, y λ el coeficiente de aversión al riesgo. Si bien en el modelo original éste coeficiente es constante para los agentes, en nuestro trabajo modificaremos la aversión al riesgo con objeto de probar las consecuencias de los postulados más relevantes de la *Prospect Theory* de Kahneman y Tversky [17]. En concreto modelaremos diferentes aversiones al riesgo en función de la pérdida o ganancia del agente con respecto a la situación de riqueza inicial. La función de utilidad es maximizada sujeta a la restricción:

$$W_{i,t+1} = x_{i,t}(p_{t+1} + d_{t+1}) + (1 + r_f)(W_{i,t} - p_t x_{i,t}) \quad (2)$$

siendo $x_{i,t}$ la demanda de acciones del agente i en t . Bajo la suposición de que las predicciones del agente i en t del precio y el dividendo del siguiente periodo están distribuidos bajo una normal con media y varianza, $E[p_{t+1} + d_{t+1}]$, y $\sigma_{i,t,p+d}^2$:

$$x_{i,t} = \frac{E_{i,t}(p_{t+1} + d_{t+1}) - p_t(1 + r)}{\lambda \sigma_{i,t,p+d}^2} \quad (3)$$

Las demandas/ofertas de los agentes son enviadas al “especialista” que determina el precio de vaciado de mercado, de manera que los agentes pueden contabilizar sus pérdidas/ganancias, modificando sus reglas de comportamiento en función de los resultados (aprendizaje).

Los agentes forman sus expectativas en función de reglas de previsión, cada una de las cuales tiene la siguiente forma:

$$IF \text{ (el mercado se encuentra en el estado } D_i) \text{ THEN } (a = a_j, b = b_j) \quad (4)$$

Donde D_i es una descripción del estado del mundo, a_j y b_j son constantes, y a y b son parámetros de previsión. Los valores de las variables a y b son usados para realizar una previsión lineal del precio y el dividendo del siguiente periodo utilizado para ello la ecuación:

$$E(p_{t+1} + d_{t+1}) = a(p_t + d_t) + b. \quad (5)$$

Los parámetros a y b de la previsión, se seleccionan inicialmente al azar a partir de una distribución uniforme de valores centrada sobre los valores que crearían un equilibrio de expectativas racionales homogéneo en el mercado [1].

Los descriptores del mercado $\{D_i\}$ emparejan ciertos estados del mundo mediante un análisis del histórico del precio y el dividendo. Los descriptores son funciones booleanas representadas como una cadena de bits, en la cual 1 significa que el estado ha sido emparejado, 0 indica que el estado no es emparejado, y # indica que este estado es irrelevante para la aplicación de la regla.

Los descriptores se encuentran vinculados a dos categorías de condiciones de mercado. Una corresponde a los bits de negociación técnica, que recogen aspectos de la historia reciente de los precios del activo, y se encargan de detectar patrones recientes de crecimiento o decrecimiento. La otra categoría es la formada por los bits de negociación fundamental, que recogen la relación entre el precio del activo y su valor fundamental y detectan la sobre o infra-valoración del mismo. (Dos bits de condición adicionales están “siempre activados” y “siempre desactivados” para reflejar la extensión para la cuál los agentes siguen información inútil.)

En el equilibrio correspondiente a las predicciones de la teoría de mercados eficientes, los agentes usarían solamente una regla fundamental óptima, que supera a todas las reglas basadas en condiciones técnicas. Nuestro modelo difiere del de Santa Fe en que los agentes no conocen los parámetros del proceso de dividendos, y así ellos deben experimentar con reglas de previsión alternativas basadas en condiciones fundamentales (y quizá técnicas) con el objetivo de mejorar sus previsiones.

A cada regla se le asigna una medida de precisión, definida como la media móvil de la variancia del error (la diferencia entre el precio previsto y el precio real). Un ‘parámetro de actualización de la precisión’ controla la extensión del intervalo de tiempo en que se calcula la media móvil.

Se dice que una regla está activa cuando el estado del mundo empareja el descriptor de la regla. En el caso de que se activen varias reglas, el agente debe escoger aleatoriamente entre las previsiones activas, con una probabilidad proporcional a la precisión. Una vez que el agente ha elegido usar una regla específica, los valores a y b de la regla determinan la decisión de inversión del agente.

El encargado de proporcionar la evolución en la población de reglas es un algoritmo genético (GA). Cuando el GA es invocado, sustituye por reglas de previsión nuevas una fracción de las reglas de previsión menos apropiadas en cada conjunto de reglas del agente.

La generación de nuevas reglas se lleva a cabo mediante la aplicación de los procesos de mutación y cruce sobre las cadenas de bits de aquellas reglas que proporcionan el mejor éxito en el conjunto de reglas del agente. Los parámetros de previsión a y b del descendiente son una combinación lineal de los parámetros de previsión de las reglas del padre. A las nuevas reglas se les asigna una precisión inicial evaluada promediando la precisión de las reglas de sus padres.

En este modelo, el aprendizaje de los agentes se produce de dos maneras: por un lado mediante la precisión de las reglas, cantidad que varía de un periodo a otro. En cada momento, agente utilizará la más precisa de todas las disponibles. Por otro lado, y a una escala evolutiva, el conjunto de reglas mejora por la acción del algoritmo genético.

Esta característica nos permitirá estudiar otro aspecto descrito por Kahneman y Tvesky, [17], como es la tendencia humana a formar una serie de patrones y mantenerlos aunque llegue nueva información. Esta tendencia a no incorporar la nueva información se implementa en agentes que tras un número de periodos no actualizan sus reglas, es decir, que la evolución de las reglas se detiene tras una serie de periodos. Alternativamente, y de forma genérica, podremos probar distintos esquemas de recuerdo-aprendizaje.

3. Conclusiones.

El paradigma dominante en finanzas, fundamentado en los modelos de equilibrio y en la hipótesis de eficiencia, ha permitido establecer un marco conceptual elegante para explicar un buen número de fenómenos empíricos de los mercados. Sin embargo, la existencia de una serie de anomalías difícilmente integrables dentro del enfoque ortodoxo, anima a la comunidad de investigadores en finanzas a buscar nuevos programas de trabajo.

En el ámbito conceptual, la denominada *Behavioural Finance* constituye un prometedor programa de investigación, como así ha sido reconocido, en parte, con la reciente concesión del Premio Nóbel al profesor Daniel Kahneman.

Según este enfoque, podemos explicar muchos de las características de los mercados financieros considerando los comportamientos reales y la psicología de los operadores financieros. Así por ejemplo, se ha comprobado que ni la aversión al riesgo ni las funciones de utilidad de los inversores son como sugieren las finanzas tradicionales.

En cualquier caso, formular teorías y modelos aceptables en finanzas requiere disponer de una metodología que permita traducir algunas de estas “evidencias empíricas de la psicología” en modelos financieros. A nuestro juicio, el modelado basado en agentes, que permite la construcción de mercados financieros artificiales, constituye una herramienta apropiada para tal fin.

Por ello, en este artículo presentamos un mercado financiero artificial, que integrando las principales características del modelo de LeBaron, permite implementar algunas de las principales ideas de *Behavioural Finance*, observando hasta qué punto y bajo qué condiciones permite explicar las principales anomalías detectadas.

En concreto estudiamos la influencia de los resultados pasados en la aversión al riesgo de los inversores y analizamos la existencia de operadores que exhiben comportamientos alejados a los estipulados por las hipótesis de racionalidad.

Concluimos que el modelado de hipótesis provenientes de *Behavioural Finance* por medio de mercados financieros artificiales constituye un aproximación válida y prometedora a las finanzas.

Referencias

- [1] Arthur, W.B., Holland, J., LeBaron, B., Palmer, R. and P. Taylor, "Asset Pricing Under Endogenous Expectations in an Artificial Stock Market", in W.B. Arthur, S. Durlauf, and D. Lane, eds., *The Economy As An Evolving Complex System II*. Reading, MA: Addison-Wesley. 1997
- [2] Arthur W. B. "On Learning and Adaptation in the Economy." Santa Fe Paper 92-07-038. 1992
- [3] Bollerslev, T., R. Y. Chou, N. Jayaraman, and K. F. Kroner, "ARCH Modeling in Finance: A Review of the Theory and Empirical Evidence," *Journal of Econometrics*, 52, 5-60, 1990.
- [4] Chan, N., LeBaron, B., Lo, A. and T. Poggio, 1998, "Information Dissemination and Aggregation in Asset Markets with Simple Intelligent Traders", MIT Artificial Intelligence Laboratory Technical Memorandum No. 1646.
- [5] De Long, J.B., A. Shleifer, L.H. Summers, R.J. Waldmann, "Positive Feedback Strategies and Destabilizing Rational Speculation," *J. of Finance*, 45, 1990.
- [6] De Long, J.B., A. Shleifer, L.H. Summers, R.J. Waldmann, "Noise Trader Risk in Financial Markets," *Journal of Political Economy*, 98, 703-738, 1990.
- [7] De Long, J.B., A. Shleifer, L.H. Summers, R.J. Waldmann, "The Survival of Noise Traders in Financial Markets," *J. of Business*, 64, 1-18, 1991
- [8] Fama, Eugene F. Random Walks in Stock-Market Prices. Paper No. 16 in the Series of Selected Papers of the Graduate School of Business, University of Chicago, 1965. Reprinted in the *Financial Analyst Journal*, London (1966), *The Institutional Investor*, 1968.
- [9] Fama, Eugene F. The Behavior of Stock-Market Prices. *Journal of Business*, 38:34-105, January 1965.
- [10] Fama, Eugene F. Efficient Capital Markets: A Review of Theory and Empirical Work. *Journal of Finance*. 25:383-417, May 1970.
- [11] Fama, Eugene F. Efficient Capital Markets: II. *Journal of Finance*, 46(5):1575-1617, December 1991.
- [12] Fama, Eugene, and James MacBeth, Risk, return, and equilibrium, *Journal of Political Economy*, 1973, 81, p607
- [13] Friedman, D., "Evolutionary Games in Economics", *Econometrica* 59, pp. 637-666. 1991
- [14] Goldberg David E. (1993) *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Reprinted with corrections from Goldberg (1989) Addison Wesley Longman Inc.
- [15] Goodhart C. A. E. and M. O'Hara, "High Frequency Data in Financial Markets: Issues and Applications," mss, London School of Economics, 1995.
- [16] Holland, J. H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. MIT Press, Cambridge, MA, 1975
- [17] Kahneman, D. and A. Tversky, "Prospect Theory: An Analysis of Decision Under Risk", *Econometrica* 47, pp. 263-291. 1979
- [18] Lo, A., "The Three P's of Total Risk Management", *Financial Analysts Journal* 55, pp. 13-26. 1999
- [19] Samuelson, Paul A. "Foundations of Economic Analysis", New York: Atheneum. 1965

- [20] Sharpe, William, A simplified model for portfolio returns, *Management Science*, 1962, p277
- [21] Sharpe, William, Capital asset prices: a theory of market equilibrium under conditions of risk, *Journal of Finance*, v19, p425, 1964
- [22] Simon, H., *Models of Bounded Rationality*, Volumes 1 and 2, MIT Press, Cambridge, MA. 1982
- [23] Thaler, R., *Advances in Behavioral Finance*. New York: Russell Sage Foundation. 1993.