



CARACTERIZACIÓN DEL ÍNDICE GENERAL DE LA BOLSA DE VALORES DE COLOMBIA (IGBC) MEDIANTE SIMULACIÓN BASADA EN AGENTES (ABS)¹

ALVARO ANTONIO GIL BERROCAL²

Resumen:

El presente estudio trata sobre la bolsa de valores de Colombia utilizando simulación basada en agentes para construir un mercado artificial que permite replicar el índice general de la bolsa de valores (IGBC) en cuanto a sus momentos estadísticos se refiere. La serie de referencia es primero segmentada utilizando el algoritmo de suma iterativa de cuadrados (ICSS), lo que permite identificar cuatro estados fundamentales (crecimiento, estabilidad, nerviosismo y crisis). El modelo permite replicar el mercado en estado estable e incorpora choques que afectan la percepción de los agentes, lo que se traduce en cambios generalizados en los valores del índice que replican cambios entre los diferentes estados.

Palabras Claves: Simulación Basada en Agentes, Mercados Artificiales, Sistemas Complejos, Mercado de Valores.

Clasificación JEL: C150 Métodos de simulación estadística, D530 Equilibrio general en Mercados financieros, E440 Mercados financieros, D810 Criterios para la toma de decisiones con riesgo e incertidumbre, D830 Búsqueda, Aprendizaje, Información y conocimiento

¹ Trabajo presentado para optar por el título de Magister o Magistra en Economía de la Pontificia Universidad Javeriana.

² Agradezco la dirección del profesor Jorge Ruiz. Todos los errores son propios.

Tabla de Contenido

SECCIÓN 1. INTRODUCCIÓN	1
SECCIÓN 2. MARCO TEÓRICO	3
REVISIÓN DE LA LITERATURA	3
MODELO DE SIMULACIÓN ESTOCÁSTICA (SSM)	4
MODELO DE EXPECTATIVAS ADAPTATIVAS (ABS)	5
MODELO DE ÓRDENES DE MERCADO BASADO EN AGENTES HETEROGÉNEOS (ODMHA)	5
MODELO DE MICROSIMULACIÓN DE LEVY Y SOLOMON (LLS)	6
MERCADO FINANCIERO BASADO EN OPINIONES, MEDIOS E HISTORIA (OMP)	7
MODELO DE PUNTOS DE CRISIS (CPM)	7
MERCADO ARTIFICIAL DE GENOA (GASM)	8
MODELO DE JUEGO MIXTO BASADO EN AGENTES (ABMGM)	8
GRAN JUEGO MINORITARIO CANÓNICO (GCMG)	9
MERCADO ARTIFICIAL DE VALORES DEL INSTITUTO SANTA FE (SF-ASM)	9
RESUMEN DE MODELOS	11
MODELOS A CONSIDERAR EN ESTE ESTUDIO	11
SECCIÓN 3. CARACTERIZACIÓN DEL IGBC	13
EMISORES	13
ÍNDICES BURSÁTILES	14
ÍNDICE GENERAL DE LA BOLSA DE COLOMBIA IGBC	14
ÍNDICE ACCIONARIO DE LIQUIDEZ COL20	15
ÍNDICE ACCIONARIO DE CAPITALIZACIÓN COLCAP	15
EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS ÍNDICES BURSÁTILES	16
ANÁLISIS DE VARIACIÓN DEL IGBC	17
SEGMENTACIÓN DE LA SERIE	17
APLICACIÓN DEL ICSS	18
ANÁLISIS DE LA SEGMENTACIÓN	24
SECCIÓN 4. CONSTRUCCIÓN DEL MERCADO ARTIFICIAL	26

ESTRATEGIAS	26
FORMACIÓN DE EXPECTATIVAS	27
COMPONENTES DE LA ECUACIÓN DE RETORNOS	27
COMPONENTE FUNDAMENTAL	28
COMPONENTE TÉCNICO	28
OFERTAS DE COMPRA Y VENTA	28
TRANSACCIONES Y FORMACIÓN DE PRECIOS	29
EXPANSIÓN Y CONTRACCIÓN DEL MERCADO	30
CANTIDAD DE AGENTES Y ACCIONES	30
DISTRIBUCIÓN DE LA RIQUEZA INICIAL	31
TAMAÑO DEL PASO	31
LIQUIDEZ	31
SIMULACIÓN	31
SECCIÓN 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS	34
CALIBRACION DEL MODELO	34
SIGMA 1 Y SIGMA 2	34
EFFECTO N	38
EFFECTO K	39
CANTIDAD DE AGENTES INICIALES	39
LIQUIDEZ	40
CRECIMIENTO	41
DISTRIBUCIÓN DE LA RIQUEZA DE LOS AGENTES	42
TASA DE REFERENCIA	43
PROCEDIMIENTO DE AJUSTE DE PARÁMETROS	43
CONVERGENCIA	44
PRUEBAS DE NORMALIDAD Y ANÁLISIS DE VARIANZA	45
INTERPRETACION ECONOMICA DE LOS RESULTADOS	45
CARACTERIZACION DE LOS AGENTES	45
RENTABILIDAD DE LOS AGENTES	46
EFFECTOS EN LA RIQUEZA	47

GENERACIÓN DE CHOQUES	47
GENERACIÓN DE CRECIMIENTO	48
GENERACIÓN DE CRISIS	50
COMPARACION CON OTROS MERCADOS	52
<u>SECCIÓN 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</u>	<u>53</u>
<u>SECCIÓN 7. BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES ESTADÍSTICAS</u>	<u>55</u>

Lista de Cuadros

- Cuadro 1.** Resumen de los diversos modelos de mercados artificiales analizados en la revisión de la literatura
- Cuadro 2.** Comparación de los niveles a partir del ICSS en función de sus momentos estadísticos
- Cuadro 3.** Comparación de medias por pares utilizando la t de student
- Cuadro 4.** Clasificación de los niveles en etapas, a partir de sus momentos estadísticos
- Cuadro 5.** Comparación de los estadísticos de la serie sin y con crecimiento
- Cuadro 6.** Comparación de los estadísticos de la serie de retornos con crecimiento y bajo diferentes distribuciones de riqueza inicial
- Cuadro 7.** Resumen de parámetros elegidos
- Cuadro 8.** Participación de los agentes en el mercado artificial
- Cuadro 9.** Efecto en el crecimiento sostenido y su duración según la magnitud
- Cuadro 10.** Efecto en el decrecimiento sostenido y su duración según la magnitud
- Cuadro 11.** Caracterización de diversos mercados artificiales

Lista de figuras

- Figura 1.** Evolución de los índices de la BVC
- Figura 2.** Retornos diarios de la serie IGBC
- Figura 3.** Suma de cuadrados de los retornos diarios del IGBC centrados y normalizados
- Figura 4.** Segmentación de la suma cuadrada de los retornos del IGBC
- Figura 5.** Segmentación de la serie de los retornos del IGBC a partir del ICSS
- Figura 6.** Representación de la serie de retornos del IGBC luego de aplicar el ICSS
- Figura 7.** Pantalla del mercado artificial construido en NetLogo
- Figura 8.** Gráfico de retornos en cada configuración inicial a partir de sigma 1 y sigma 2
- Figura 9.** Evolución de los retornos de la serie original del IGBC en etapa estable
- Figura 10.** Evolución de los momentos estadísticos de la serie de retornos del mercado
- Figura 11.** Relación entre n y los momentos estadísticos de los retornos
- Figura 12.** Relación entre k y los momentos estadísticos de los retornos
- Figura 13.** Relación entre la cantidad de agentes iniciales y los momentos estadísticos de los retornos
- Figura 14.** Relación entre la liquidez y los momentos estadísticos de los retornos
- Figura 15.** Relación entre la tasa de referencia y los momentos estadísticos de los retornos
- Figura 16.** Evolución de precios y retornos en el mercado artificial construido
- Figura 17.** Evolución de la rentabilidad por tipo de agente
- Figura 18.** Evolución del precio frente a diferentes magnitudes de choques positivos
- Figura 19.** Evolución del precio frente a diferentes magnitudes de choques negativos

Lista de Anexos

- Anexo 1. Algoritmo de calce de subasta explicado con ejemplo**
- Anexo 2. Código de programación utilizado en NetLogo**
- Anexo 3. Pruebas de normalidad y test no paramétricos**
- Anexo 4. Evolución de la distribución de la riqueza en los agentes**
- Anexo 5. Momentos estadísticos de algunos índices bursátiles seleccionados**

Sección 1. Introducción

Los mercados financieros requieren del desarrollo constante de herramientas que permitan a sus usuarios una mejor comprensión de estos, la identificación de los estados, el entendimiento de sus históricos y la tendencia de los mismos. Estos instrumentos deben a su vez servir como parámetros de referencia a los inversionistas que planeen entrar y/o evaluar su permanencia en el mercado. Históricamente, estos mercados se han caracterizado por contar con una serie de indicadores destinados a apoyar a los interesados en la toma de decisiones, indicadores que generalmente son mediciones que al compararse con referencias predefinidas permiten establecer el estado del sistema y sugerir acciones generales o específicas para minimizar las pérdidas. No obstante, existen pocas herramientas para establecer el porqué del estado actual y las repercusiones del mismo.

La bolsa de valores de Colombia cuenta con tres indicadores fundamentales: el IGBC, el COL20 y el COLCAP. De todos, el IGBC (índice general de la bolsa de Colombia) es el más antiguo (existe desde la fusión de las bolsas de Bogotá, Medellín y Occidente que dio origen a la BVC en Julio de 2001), con una mayor información y por tanto muy utilizado por profesionales y académicos. Su metodología de cálculo es relativamente sencilla, se basa en la ponderación de los precios de las acciones con mayor frecuencia de negociación de cada trimestre.

A pesar de no existir muchos emisores y acciones transadas en la BVC en comparación con otros mercados internacionales, el comportamiento de cada acción está influenciado por un sinnúmero de factores internos y externos, lo que genera una serie de valores del IGBC bastante volátil y por ende de difícil modelación y pronóstico bajo las metodologías tradicionales. Adicionalmente, la bolsa de valores de Colombia atraviesa por su segunda fase de expansión gracias a la integración de las bolsas de Colombia, Chile y Perú, la cual prevé aumentar la cantidad de emisores a más de 550 para finales de 2012, convirtiendo este mercado en uno de los más grandes de la región, hecho que plantea una serie de retos en cuanto a la comprensión del mercado, para aquellos que pretenden invertir en la bolsa.

El presente trabajo simula el comportamiento del índice general de la bolsa de valores de Colombia (IGBC) mediante una técnica de reciente desarrollo y rápido crecimiento como es la Modelación Basada en Agentes (ABM o ABS por sus siglas en inglés). Esta metodología se basa en la utilización de agentes computacionales autónomos que siguiendo diferentes reglas según el rol establecido, interactúan al interior de un modelo artificial de compra y venta de acciones en busca de una maximización de utilidades, lo que genera diferentes comportamientos emergentes (aprendizaje, caos, etc.) y que a largo plazo puede resultar en un equilibrio del modelo. La oferta y demanda de activos por parte de los agentes conforma el precio del mercado, el cual es en sí mismo una serie con valores de características similares a las series financieras reales. Al analizar los retornos de esta serie se puede encontrar que bajo ciertos parámetros y a la luz de la teoría económica y financiera, existe una gran similitud entre este resultado y el índice IGBC en periodos específicos. Interesantes conclusiones pueden ser obtenidas de este estudio desde el punto de vista de la caracterización de los agentes y sus percepciones sobre el mercado, responsables en gran medida del delicado equilibrio de la bolsa e incluso de los momentos de agitación bursátil, representado en crecimientos y crisis financieras tanto en el plano nacional como internacional.

Sección 2. Marco Teórico

Este trabajo se enmarca en los desarrollos matemáticos y computacionales de las últimas tres décadas (80's en adelante) en la teoría de sistemas complejos y su aplicación específica hacia los mercados financieros mediante la simulación basada en agentes computacionales (abreviada como ABM, ACE o ACF según el grado de especialización). La ACE se define como el estudio computacional de procesos económicos modelados como sistemas dinámicos de agentes interactuando entre sí, más específicamente nos referimos a ACF si estos agentes son de índole financiera y si los resultados experimentales pueden calibrarse mediante técnicas econométricas (Tsfatsion 2002). Gracias al reciente desarrollo de los lenguajes de computación (principalmente los orientados a objetos) y la creciente capacidad de cómputo de los ordenadores modernos, es cada vez más fácil emular el comportamiento de una serie de agentes autónomos mediante algoritmos que determinan las acciones a tomar en cada período, acciones encaminadas a maximizar la utilidad de cada actor sujeta a unas restricciones presupuestales (LeBaron 2006). El resultado de estas transacciones arroja un estado al final de cada período en un equilibrio transitorio, que sirve a su vez como estado inicial para el siguiente período y así sucesivamente. Los resultados de estas iteraciones consecutivas producen un equilibrio dinámico en términos de oferta y demanda. Como el propósito de este trabajo es replicar diferentes estados del índice general de la bolsa de valores de Colombia (IGBC) en cuanto a momentos estadísticos se refiere, dichos resultados pueden ser interpretados como una serie de precios y volúmenes de transacciones, que a su vez puede calibrarse econométricamente en busca de similitudes experimentales comparables con el índice objeto de estudio. A continuación, se hará una descripción del estado del arte de esta modelación y sus antecedentes para el caso colombiano.

Revisión de la literatura

Diversos trabajos se han elaborado en busca de entender y modelar el comportamiento de los indicadores bursátiles. En el caso colombiano se encontraron dos grandes tendencias en la literatura consultada. Por una parte existen los estudios enfocados a al pronóstico utilizando

modelos econométricos de varianza condicional, como es el caso de Pérez y Grajales (2007a), Rodríguez (2007), Alonso y Garcia (2008), y Ospina y Caicedo (2008), y otro grupo de estudios que emplean metaheurísticas complejas tales como redes neuronales y algoritmos genéticos para realizar la modelación, como es el caso de Ayala (2006) y Cruz, Restrepo et al. (2009). Adicionalmente, trabajos importantes desde el punto de vista de la caracterización y el entendimiento del mercado accionario colombiano han sido fundamentales para comprender aún mejor el mercado de capitales, tal es el caso de Uribe (2007).

En cuanto a los resultados de estos trabajos, se concluye en la mayoría de ellos que no solo existe una gran dificultad en la modelación sino también en la estimación y predictibilidad de la serie dado el comportamiento no lineal en la media de los retornos, la varianza condicional y los choques externos que afectan la tendencia. Se evidencia entonces la necesidad de explorar otras técnicas de modelación que permitan replicar series de gran importancia como el IGBC.

Con respecto a la simulación basada en agentes aplicadas a los mercados financieros, numerosos aportes se han realizado desde el nacimiento de la disciplina 20 años atrás, ninguno de ellos hasta ahora aplicados al caso colombiano ni a otra economía latinoamericana. A continuación se hará una minuciosa revisión de esta literatura ordenada por el tipo de técnica utilizada. En cada modelo se indica la teoría desarrollada de manera general, así como las características más importantes y los resultados obtenidos. Todos estos modelos fueron aplicados con éxito en algún mercado financiero específico, encontrando uno o más momentos estadísticos a replicar.

Modelo de simulación estocástica (SSM)

Presentado por Chen, Lux y Marchesi (2001). El SSM está basado en un enfoque no lineal, donde los agentes se agrupan según sus estrategias como fundamentalistas y agentes de ruido, y se incluye una serie de probabilidades de transición según un proceso de Poisson mediante las cuales los agentes pueden cambiar de posición al interior de la estrategia (optimistas y pesimistas), o incluso de estrategia como tal. Los agentes toman sus decisiones de inversión

según la tendencia en precios y un factor de afectación por noticias, esto es, noticias positivas y negativas llegan al mercado siguiendo un proceso de Poisson y según un factor de susceptibilidad los agentes pueden o no contagiarse de esta información. Los precios son determinados por un creador de mercado (*market maker*, un tercer tipo de agente) basado en un proceso estocástico cuya probabilidad de transición (de incremento o decremento) dependen de un factor de ajuste, una probabilidad de transición exógena y una variable aleatoria. El modelo se asemeja a los modelos de negociación con subasta de precio único. El objetivo de este modelo es investigar las propiedades de las series de tiempo resultantes y su relación con los mercados reales, así como la dependencia de los resultados con la configuración del modelo.

Modelo de expectativas adaptativas (ABS)

Modelo presentado por Brock y Hommes (1998), el cual es un mercado dinámico no lineal con diferentes tipos de agentes agrupados según sus estrategias (fundamentalistas, agentes de ruido y técnicos), y probabilidades de transición mediante las cuales los agentes pueden cambiar de posición al interior de la estrategia (optimistas y pesimistas), o de estrategia. En general es muy similar al modelo SSM (simulación estocástica), solo que en este las probabilidades de transición son determinísticas. Adicionalmente el precio se ajusta mediante métodos numéricos por igualdad de oferta y demanda y no de acuerdo a un creador de mercado. Las expectativas de los agentes se ajustan de acuerdo a los resultados anteriores. Los resultados señalan que las creencias heterogéneas pueden conducir a la inestabilidad del mercado: una gran parte de los fundamentalistas tienden a estabilizar los precios, mientras que una gran parte de los técnicos tiende a desestabilizarlos.

Modelo de órdenes de mercado basado en agentes heterogéneos (ODMHA)

Presentado por Chiarella e Iori (2002), es un mercado artificial con agentes heterogéneos que deciden su estrategia de forma aleatoria según ciertos parámetros. Estas estrategias les

permiten ser fundamentalistas, técnicos o agentes de ruido, y a cada período cada agente recalcula sus valores aleatorios y por ende su posición. Basado en esta posición, los agentes elaboran su expectativa teniendo en cuenta un valor fundamental y un pronóstico de precios, y lo comparan con el precio actual. Si es superior compran y en caso contrario venden. Los precios de compra y venta son almacenados en un libro de órdenes y cuando hay una coincidencia entre valores de compra y venta se ejecuta la transacción y se ajusta el precio del mercado, si no hay coincidencia el precio de mercado se ajusta utilizando el valor promedio de las ofertas de compra y venta. Los resultados del modelo permiten replicar múltiples momentos estadísticos de las series financieras reales. Recientemente este modelo ha sido complementado con el aporte de Yamamoto y LeBaron (2009), en el cual se adiciona a esta dinámica, la alternativa de fraccionar ordenes en busca de optimizar portafolio. De esta manera los agentes pueden colocar múltiples opciones de compra e ir ejecutando en la medida que los precios del mercado cambian. El resultado de este modelo es un comportamiento más racional con tendencias de precios sostenibles en el tiempo.

Modelo de microsimulación de Levy y Solomon (LLS)

Presentado por Levy, Levy y Solomon (1994) y posteriormente complementado por Zschischang y Lux (2001). Es uno de los primeros modelos en aplicar el enfoque de la microsimulación a mercados financieros. Agentes con características relativamente homogéneas en cuanto a sus funciones de utilidad y sin estrategias, pero con diferentes grados de aversión al riesgo y amplitud de memoria, transan un activo en el mercado, estableciendo qué fracción de su riqueza invertir a partir de su función de utilidad. La decisión de compra y venta está dada por el capital disponible y una tasa de inversión libre de riesgo relativamente baja la cuál es comparada con los rendimientos esperados del activo dado el histórico de precios. El precio de mercado se actualiza en cada período por igualdad de oferta y demanda.

Este modelo tiene una gran dependencia de los factores iniciales, haciendo que en ocasiones no se converja a una representación real del mercado, sin embargo, sus hallazgos han sido muy importantes, como por la generación de ciclos, burbujas y caídas de precios. Si hay diferentes

amplitudes de memoria, se encuentra dominancia en los grupos con mayor tamaño de memoria, no obstante, si el grupo de agentes con menor memoria es significativamente mayor, habrá una mayor propensión a crisis financieras, lo que contrasta con la realidad de los mercados financieros cuando existe un gran número de agentes especuladores.

Mercado financiero basado en opiniones, medios e historia (OMP)

Modelo presentado por Matassini y Franci (2001), utiliza un número fijo y finito de agentes que cuentan con una distribución desigual de recursos al comienzo siguiendo una distribución de Zipf³. Los agentes no tienen una diferenciación en cuanto a estrategias, solo forman su criterio de acuerdo a su riqueza (liquidez disponible), sus pronósticos de precios y las noticias que reciben de otros agentes (según una distribución de agentes aleatoria en un plano), formando su propia expectativa. Estos tres aspectos son ponderados por unos factores parametrizables en el modelo, generando sus valores de compra y venta. Estos precios son almacenados en un libro de órdenes y cuando hay una coincidencia se ejecuta la transacción y se ajusta el precio del mercado. Uno de los resultados más interesantes de este modelo es que logra replicar varios momentos estadísticos de los mercados financieros sin necesidad de diferenciar a los agentes por estrategias, solo con una distribución desigual de recursos y diferencias en las expectativas formadas según la posición y vecindad.

Modelo de puntos de crisis (CPM)

Presentado por Johansen, Ledoit y Sornette (2000), parte de la teoría de expectativas racionales para explicar la formación de crisis en los mercados financieros. En este mercado se cuenta con una serie de agentes formadores de ruido los cuáles poseen una cantidad finita de recursos. Los agentes forman su expectativa según la tendencia en precios, un factor aleatorio y una influencia dada por un factor de propagación que induce a cada agente a adoptar en mayor o

³ Muchos agentes con pocos recursos y unos cuantos con muchos recursos, similar a la distribución Pareto aunque con colas más largas.

menor medida el comportamiento de otros agentes. De esta manera si un agente entra en pánico y el factor de propagación es alto, es posible replicar el mismo comportamiento en los agentes de manera acelerada, generando burbujas especulativas y caídas de precios. El mecanismo de fijación de precios es mediante excesos de demanda. La contribución más importante de este modelo es que logra identificar previamente los puntos de crisis a partir de los cuales se pueden derivar estas propagaciones colectivas de manera efectiva al compararlo con las crisis de 1929, 1962, 1987 y 1997 del mercado bursátil estadounidense.

Mercado artificial de Genua (GASM)

En este modelo presentado por Raberto et al. (2001), se crean agentes heterogéneos dotados con una cantidad finita de dinero así como la cartera de activos, quienes intercambian un solo tipo de bien mediante órdenes de compra y venta basada en precios límites, los cuáles se calculan con ecuaciones que incluyen términos aleatorios y un factor basado en la volatilidad histórica del precio. De esta manera los límites se ajustan según la variación del precio. La formación de precios se hace mediante ajuste de las curvas de oferta y demanda, las cuáles se actualizan en cada período t a partir de la cantidad de órdenes de compra y venta generadas al precio p_t . En este modelo no existe un proceso de creación de dinero, el efectivo disponible total se conserva en el tiempo. El modelo es capaz de reproducir la forma leptocúrtica de la densidad de probabilidad de los rendimientos de precios de registro y la volatilidad agrupada de diversas series financieras.

Modelo de juego mixto basado en agentes (ABMGM)

Desarrollado por Chengling Gou (2006a; 2006b; 2006c; 2007; 2008). Estos modelos parten de los desarrollos realizados por Arthur (1994) en el problema del bar El Farol, y Challet y Zhang (1997) en juegos minoritarios. En todos, el objetivo fundamental es crear un mercado artificial con dos tipos de agentes, los mayoritarios y los minoritarios. La diferencia entre ambos grupos radica en los parámetros de memoria y la dimensión de la matriz de estrategias (matrices de

decisión formadas aleatoriamente). El precio del mercado se fija mediante excesos de demanda. Al variar las dimensiones del arreglo de precios y la amplitud de memoria, se logra modificar la serie de precios resultante, llegando así a replicar hechos estilizados de series financieras reales. En Gou (2006c), se encuentra un arreglo óptimo que permite modelar el índice de la bolsa de Shanghái. La conclusión de este modelo es que el mercado debe estar gobernado por los agentes minoritarios para garantizar supervivencia y que la estabilidad del mercado depende de la velocidad de aprendizaje de los agentes, principalmente en los que tienen el rol mayoritario.

Gran juego minoritario canónico (GCMG)

Presentado por Hart, Lamper y Johnson (2002). Combina el concepto de juegos minoritarios descritos por Arthur (1994) y Challet y Zhang (1997) con los modelos de crisis de Sornette y Johansen (1997). Al igual que en los juegos minoritarios simples, existen dos grupos de agentes, los mayoritarios y los minoritarios, cuya diferencia es la cantidad de datos históricos (amplitud de memoria) y la dimensión de las estrategias. Adicionalmente utilizan unas reglas de transacción diferentes según las cuales es posible ignorar información irrelevante del pasado y/o dar mayor importancia a ciertos hechos, asemejándose más a los agentes de un mercado financiero real. La contribución más importante de este modelo es que logra modelar los posibles estados del mercado mediante cadenas de Markov, entre ellos las crisis, sugiriendo posibles medidas con las cuales se podrían controlar las caídas de precios.

Mercado artificial de valores del instituto Santa Fe (SF-ASM)

Fue uno de los primeros mercados artificiales y uno de los más completos desde su concepción. Este modelo fue creado por un grupo de interdisciplinario de investigadores del instituto Santa Fe en 1989 como respuesta a una controversia entre Ramon Mariomon y Thomas Sargent con

John Holland y Brian Arthur⁴, sobre la racionalidad de los agentes en mercados financieros y si estos agentes inteligentes artificiales convergían o no a un equilibrio de expectativas racionales homogéneas (Tomado de Ehrentreich 2008). El modelo consta en un grupo de al menos 25 agentes con múltiples estrategias de negociación que evolucionan con el tiempo, donde en cada período de tiempo los agentes deben elegir entre invertir en un activo o dejar el dinero en un fondo libre de riesgo con bajos intereses (o cero). Los agentes no utilizan estrategias fijas (técnicos o fundamentalistas), sino que incluyen ambas estrategias dentro de la matriz de decisión en busca de la mejor alternativa. Los agentes utilizan funciones de utilidad con aversión absoluta al riesgo (CARA), y basados en los parámetros fijados y en las estrategias que cada uno posea, toman la decisión. Estas estrategias están dadas por los pronósticos y los valores fundamentales. Los pronósticos son realizados por diferentes metodologías (promedio móvil, promedio simple, series de tiempo, etc.) y los valores fundamentales parten de la expectativa de los dividendos utilizando información histórica. Ambos criterios son considerados en unas matrices de decisión las cuáles evolucionan a lo largo de la simulación como producto del algoritmo genético implementado. A cada período, la decisión de compra, venta o espera, surge de estas matrices (Tomado de LeBaron, Arthur et al. 1999). El precio de mercado se ajusta en cada período de acuerdo a igualdad de oferta y demanda, considerando un número finito de acciones en el mercado. El resultado del modelo es una serie de agentes que aprenden y evolucionan sus estrategias y pronósticos, con niveles de precio y volatilidad diferente según los parámetros, convergiendo a mercados específicos.

Este modelo fue desarrollado inicialmente en lenguaje C, luego en C++ y posteriormente en 1999 en Swarm (2005). Otras modificaciones han sido realizadas al modelo, añadiendo mayor sofisticación a la racionalidad de los agentes y mejorando los algoritmos genéticos (Tay and Linn 2001). Adicionalmente como fue sugerido por LeBaron, es posible realizar calibraciones para interpretar económicamente diferentes mercados financieros a partir de este modelo (LeBaron 2002; Rogers and Von Tessen 2004).

⁴ Brian Arthur (economista), John Holland (científico computacional), Richard Palmer (físico), Blake LeBaron (teórico financiero), Paul Tayler (trader). Tomado de Casti, J. (2004). "The Simply Complex." Complexity 4(4).

Resumen de modelos

Se puede observar que no siempre los modelos analizados cuentan con una diferenciación de agentes a partir de las estrategias, sin embargo criterios como la maximización de utilidades por agente y la racionalidad limitada, están presentes en todos ellos. Los mecanismos de fijación de precios así como los procesos de toma de decisión son diferentes aunque con algunas similitudes entre algunos modelos. En todos los casos ha sido posible replicar diferentes hechos estilizados de mercados financieros reales. En el cuadro 1 se presenta un resumen de estos modelos resaltando los aspectos más importantes así como los hechos estilizados modelados.

Modelos a considerar en este estudio

En el desarrollo de este estudio se evaluaron todos los modelos y la teoría involucrada, sin embargo, se tomarán como referencia los trabajos desarrollados por LeBaron (2005; 2009), Chiarella & Iori (2002), Matassaini & Franci (2001), Johansen, Ledoit & Sornette (2000), en los cuáles se encontraron modelos de mercados artificiales con características replicables al mercado financiero colombiano. En la sección 4 de este documento se explica con detalle la aplicación de estos modelos al estudio propuesto.

N	Abreviatura	Diferencias entre agentes	Estrategía por tipología de agentes		Formación de precios	Factores estilizados hallados
1	SSM	Estrategias: Fundamentalistas, Agentes de ruido y Creador de mercado	Fundamentalistas: Información y ruido	Técnicos: Opiniones y tendencia en precios	Incremento/decremento estocástico dependiendo de los excesos de demanda y el riesgo de inversión	GARCH
2	ABS	Estrategias: Fundamentalistas, Técnicos (chartistas) y Agentes de ruido	Fundamentalistas: Información	Técnicos: Tendencia en precios	Igualdad entre oferta y demanda por métodos numéricos	Ciclos caóticos Colas gruesas Volatilidad agrupada
3	ODMHA	Estrategias: Fundamentalistas, Técnicos (chartistas) y Agentes de ruido	Fundamentalistas: Información	Técnicos: Promedio móvil	Libro de órdenes	Correlación entre volatilidad y volumen
4	LLS	Estrategias: N/A Otros aspectos: Amplitud de memoria y aversión al riesgo	Asumen que los retornos pasados ocurrieran con igual probabilidad		Igualdad entre oferta y demanda	Burbujas y crisis
5	OMP	Estrategias: N/A Otros aspectos: Distribución de riqueza inicial desigual	Liquidez por agente, opiniones y tendencia en precios		Libro de órdenes	Colas gruesas Volatilidad agrupada
6	CPM	Estrategias: N/A Otros aspectos: Expectativas de precio diferentes según susceptibilidad y factor de propagación	Tendencia en precios y opiniones		Libro de órdenes	Burbujas y crisis
7	GASM	Estrategias: N/A Otros aspectos: Diferentes grados de aversión al riesgo	Volatilidad histórica, promedio y tendencia en precios		Libro de órdenes mediante intercepción entre curvas de oferta y demanda	Colas gruesas Volatilidad agrupada
8	ABMGM	Mayoritarios y minoritarios con diferentes tamaños de memoria y dimensiones de estrategias	Tendencia en precios y resultados históricos de la matriz de estrategias		Igualdad entre oferta y demanda	Volatilidad agrupada
9	GCMG	Mayoritarios y minoritarios con diferentes tamaños de memoria y dimensiones de estrategias	Tendencia en precios comparados con la matriz de estrategias que es adaptada solo a resultados positivos. Nivel de certeza		Igualdad entre oferta y demanda	Burbujas y crisis
10	SF-ASM	Estrategias: Fundamentalistas, Seguidores de tendencia y Creador de mercado	Fundamentalistas: Expectativa basada en dividendos y tasa de interés	Técnicos: Promedio móvil	Igualdad entre oferta y demanda con restricción en cantidad de acciones disponibles	Colas gruesas Volatilidad agrupada Correlación entre volatilidad y volumen

Cuadro 1. Resumen de los diversos modelos de mercados artificiales analizados en la revisión de la literatura

Fuente: Elaboración propia

Sección 3. Caracterización del IGBC

Un mercado de capitales tiene como función principal la asignación y distribución de recursos de capital de los que dispone la economía (Uribe, 2007). La entidad a través de la cual se realizan estas transacciones es la bolsa de valores, la cual es un mercado organizado y especializado en la que se realizan transacciones con títulos valores por medio de intermediarios autorizados. En el caso colombiano existe la bolsa de valores de Colombia (en adelante la BVC), la cual es una entidad de carácter privado-público, que nace como resultado de la integración de las bolsas de Bogotá, Medellín y Occidente a partir del 3 de julio de 2001, en la cual se administran los mercados accionarios, cambiario, de derivados y de renta fija del país⁵. A continuación, se analizarán los principales componentes de la BVC.

Emisores

Un emisor es una empresa que emite títulos valores que pueden ser transados a través de la bolsa de valores, directamente o a través de intermediarios. Actualmente la BVC cuenta con 227 emisores. Es importante resaltar que a partir de mayo de 2011 la BVC inició su etapa I de integración con otros mercados, en la cual, se adicionarán cerca de 200 firmas chilenas y 251 peruanas, lo que aumentará la oferta de emisores en el mercado de capitales colombiano a cerca de 560 emisores activos⁶⁷, lo que se conoce con el nombre de Mercado Integrado Latinoamericano (MILA) y que a su vez lo convierte en el segundo mercado latinoamericano en términos de capitalización⁸.

⁵ Tomado de: <http://www.bvc.com.co/pps/tibco/portalbvc/Home/AcercaBVC/conozcanos?action=dummy>, consultada el 10 de junio de 2010.

⁶ Tomado de http://www.portafolio.com.co/economia/economiahoy/se-multiplicara-la-oferta-de-acciones-en-bolsa_7731018-3, consultado el 16 de junio de 2010.

⁷ Tomado de <http://www.americaeconomia.com/economia-mercados/finanzas/bolsas-de-colombia-chile-y-peru-comenzaran-integracion-el-30-de-mayo>, consultado el 1 de marzo de 2012.

⁸ Tomado de <http://www.mercadointegrado.com/news/first-mover-advantage-bloomberg-mila-conference/>, consultado el 1 de marzo de 2012.

Índices bursátiles

Todo mercado financiero requiere de una serie de indicadores que permitan capturar las características y los movimientos de valor de los activos más representativos que lo componen. La BVC cuenta básicamente con tres índices bursátiles, el IGBC, el COL20 y el COLCAP. A continuación se explicará cada uno de ellos.

Índice general de la bolsa de Colombia IGBC

Es el índice más representativo de la BVC. Describe el comportamiento de las acciones más líquidas de la Bolsa de Valores de Colombia. Se calcula desde julio de 2001 y su re-balance es trimestral.

Metodología de cálculo

Trimestralmente se define una canasta que incluye las acciones con rotación mayor o igual al 0.5% en los últimos 180 días o cuya frecuencia de negociación sea superior al 40% en el período de los últimos 90 días. Este ponderador se mantendrá fijo durante los 90 días de vigencia de la canasta. El IGBC es entonces la sumatoria del producto de los ponderadores por el precio corriente de cada acción incluida en la canasta.

Ponderador	Índice
$W_i^k = \frac{\sum_j C_{ji}}{A^k}$	$I_{IGBC}^k(t) = \sum_i W_i^k P_i(t)$

Donde:

I = Índice

W = Ponderador

P = Precio

E = Enlace

K = Identifica el trimestre vigente

I = Cada acción de la canasta

J = Cada operación en el período de un año

C_{ji} = Número de acciones transadas en las operaciones del último año por acción

A^k = Sumatoria anual del total de las acciones de la canasta transadas

Índice accionario de liquidez COL20

Es un indicador de rentabilidad o liquidez que refleja las variaciones de los precios de las 20 acciones más líquidas de la BVC, donde el nivel de liquidez de cada compañía determina su ponderación. Se calcula desde enero de 2008 y su re-balance es trimestral.

Metodología de cálculo

Trimestralmente se define una canasta con las 20 acciones con mayor resultado en la función de liquidez F(L). La función de liquidez mide la liquidez para cada una de las acciones del mercado considerando la frecuencia de participación del último trimestre, la cantidad de acciones negociadas en el último semestre y el valor total en dinero que se transó en el último año. Cada una de estas variables equivale a la tercera parte del índice, y su sumatoria ponderada es ordenada de mayor a menor en busca de los 20 primeros que serán en adelante los integrantes de la canasta. Posteriormente, es necesario calcular el ponderador, el cual es equivalente a la participación porcentual de cada índice de liquidez sobre la sumatoria del mismo sub-grupo de 20. Este ponderador se mantendrá constante a lo largo del trimestre de la canasta. Con estos parámetros se actualiza el índice COL20, calculado como la sumatoria del producto de los ponderadores por el precio corriente de cada acción incluida en la canasta.

Índice

$$I_{COL20}^k(t) = \sum_i W_i^k P_i(t) E_i$$

Índice accionario de capitalización COLCAP

Es un indicador que refleja las variaciones de los precios de las 20 acciones más líquidas de la BVC, donde el valor de la Capitalización Bursátil Ajustada de cada compañía determina su nivel de ponderación. Las acciones de la COL20 son las mismas de la COLCAP. Al igual que el COL20, el COLCAP se calcula desde enero de 2008 con re-balance trimestral.

Metodología de cálculo

La metodología es similar a la del COL20, salvo en el cálculo del ponderador. Trimestralmente se eligen las 20 compañías con mayor índice de liquidez y se calcula el ponderador. Este ponderador es equivalente al número de acciones (en miles de millones de pesos) de la compañía, consideradas como capitalización ajustada, es decir, del porcentaje de la compañía

que no se encuentra en poder de accionistas con situación de control al interior de la empresa. Tanto la canasta como el ponderador se mantendrán constantes a lo largo del trimestre de canasta. Con estos parámetros se actualiza el índice COLCAP, calculado como la sumatoria del producto de los ponderadores por el precio corriente de cada acción incluida en la canasta.

Índice

$$I_{COLCAP}^k(t) = \sum_i W_i^k P_i(t) E_i$$

Evolución histórica de los índices bursátiles

A continuación se muestra la evolución de cada uno de estos índices, tomando como fecha de inicio la más antigua, es decir el 1 de julio de 2001, hasta el 29 de febrero de 2012.

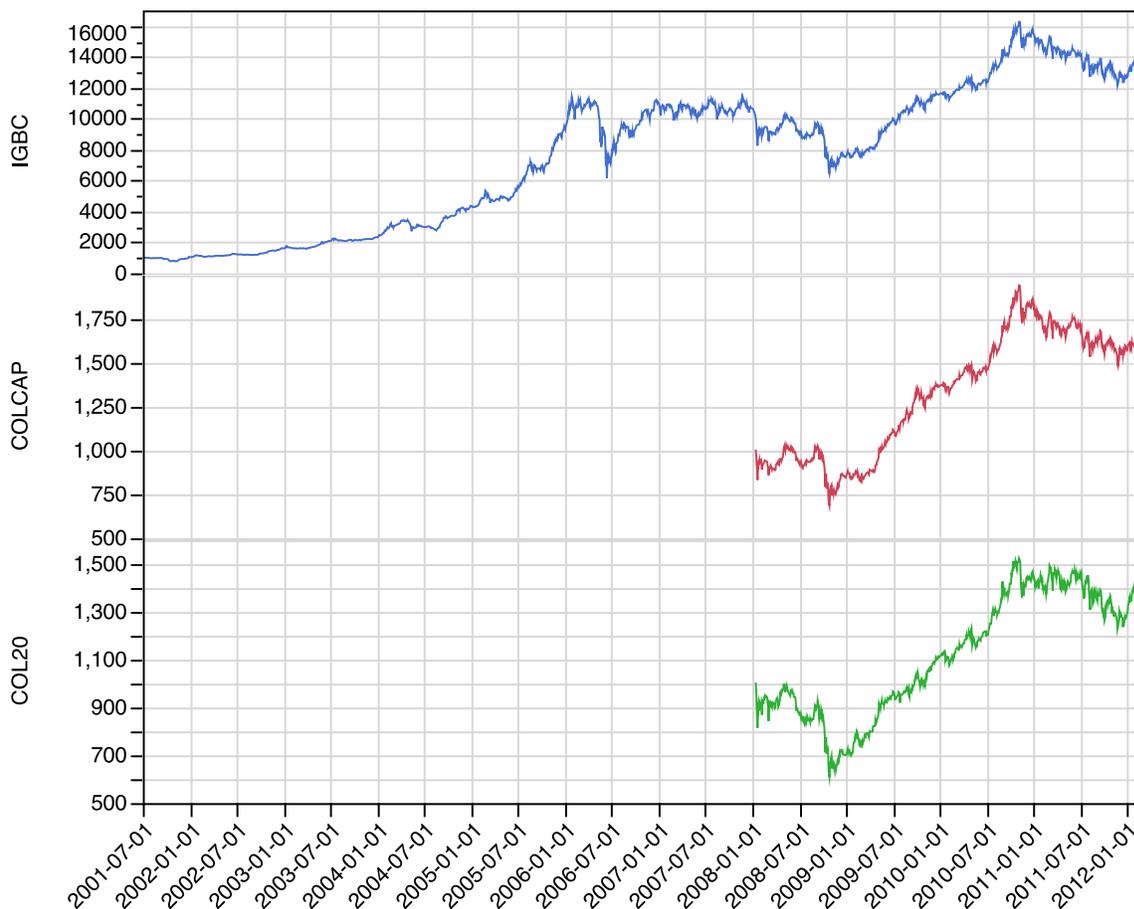


Figura 1. Evolución de los índices de la BVC.

Fuente: Elaboración propia basado en las series tomadas del sitio web de la BVC

Dada la ausencia de suficiente información histórica para los indicadores COL20 y COLCAP, centraremos nuestro interés a partir de ahora solo en el IGBC.

Análisis de variación del IGBC

Las series financieras son series temporales de naturaleza $I(1)$, razón por la cuál es necesario analizar solo los retornos de la serie mediante la transformación $\ln(p_t/p_{t-1})$, como se muestra en la siguiente gráfica.

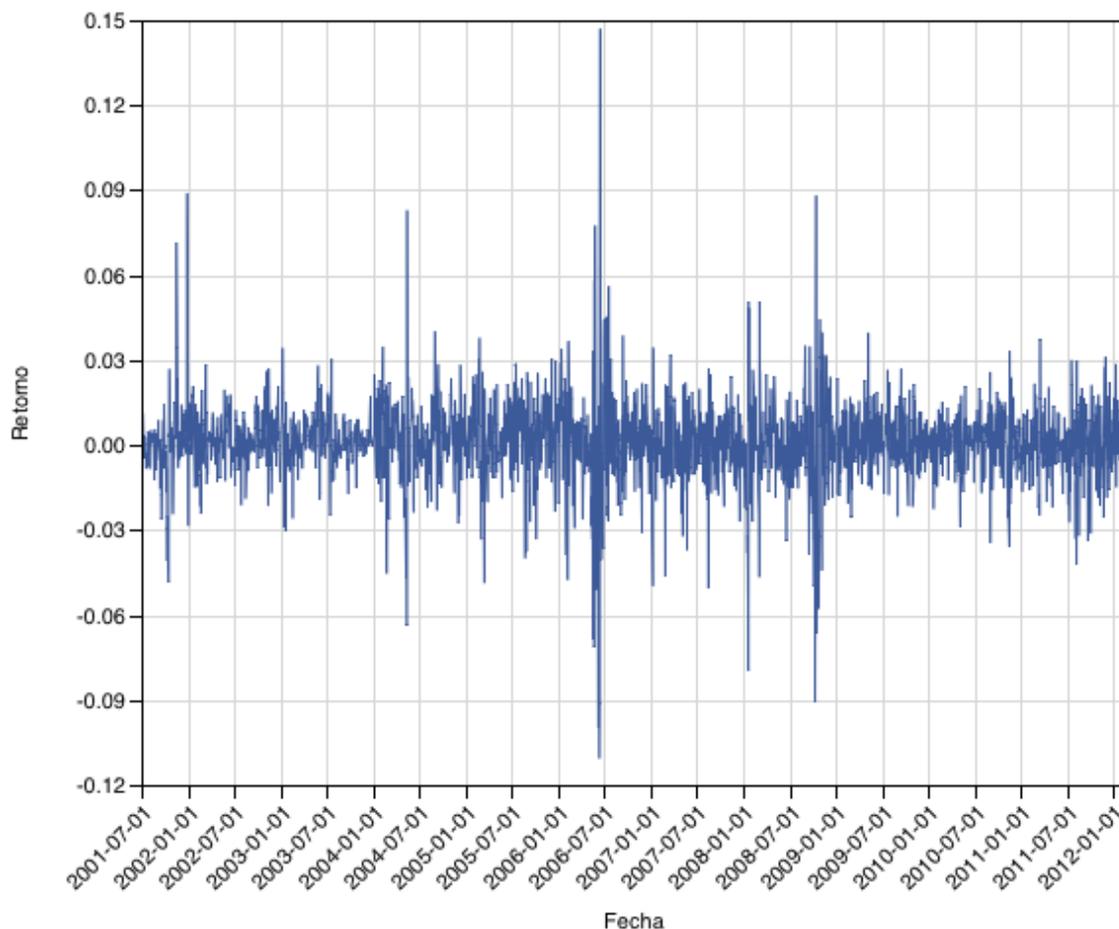


Figura 2. Retornos diarios de la serie IGBC

Fuente: Elaboración propia basado en las series tomadas del sitio web de la BVC

Segmentación de la serie

Teniendo en cuenta que la serie cuenta con una varianza no constante, es necesario identificar los diferentes valores de la varianza a lo largo del tiempo. Para ello utilizaremos el algoritmo de suma de cuadrados acumulativos iterativa (ICSS por sus siglas en inglés *iterated cumulative*

sums of squares) propuesto por Inclán y Tiao (1994) y aplicada posteriormente por Aggarwal, Inclán y Leal (1999) en diferentes mercados y complementada exitosamente con metodologías ARCH y GARCH. Este algoritmo busca encontrar la tendencia de los retornos de una serie de manera que si existen cambios en la varianza, cambiará la tendencia de los mismos. A continuación se desarrolla este algoritmo.

Aplicación del ICSS

Sea $C_k = \sum_{t=1}^k a_t^2$ la suma acumulada de los cuadrados de una serie no correlacionada de variables aleatorias a_t con media 0 y varianzas σ^2 , y sea:

$$D_k = \frac{C_k}{C_T} - \frac{k}{T}, \quad k = 1, \dots, T, \quad \text{con } D_0 = D_T = 0$$

La suma de los cuadrados acumulados normalizados. La gráfica de D_k contra k oscilará entonces alrededor de 0 para series con varianza homogénea. Cuando hay cambios repentinos en la varianza, la línea de tendencia de D_k cambia también por fuera de los límites de control. Estos límites de control son calculados a partir de las desviaciones estándares de la serie original.

Al aplicar la metodología a la serie de retornos del IGBC encontramos:

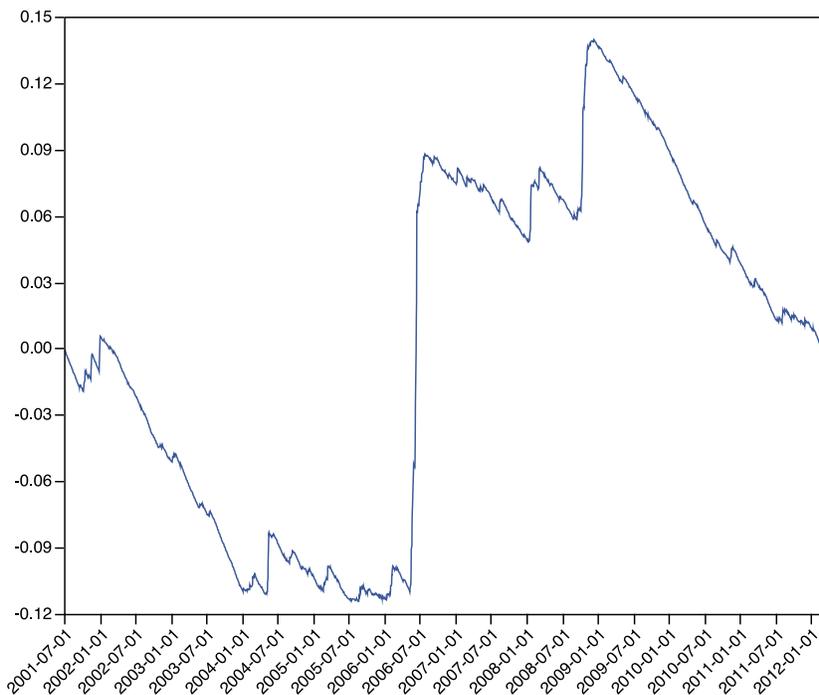


Figura 3. Suma de cuadrados de los retornos diarios del IGBC centrados y normalizados

Fuente: Elaboración propia

Lo que nos permite determinar 11 diferentes segmentos de varianza en la serie del IGBC en los cuales la pendiente de los retornos normalizados es relativamente lineal y estable (ver figura 4).

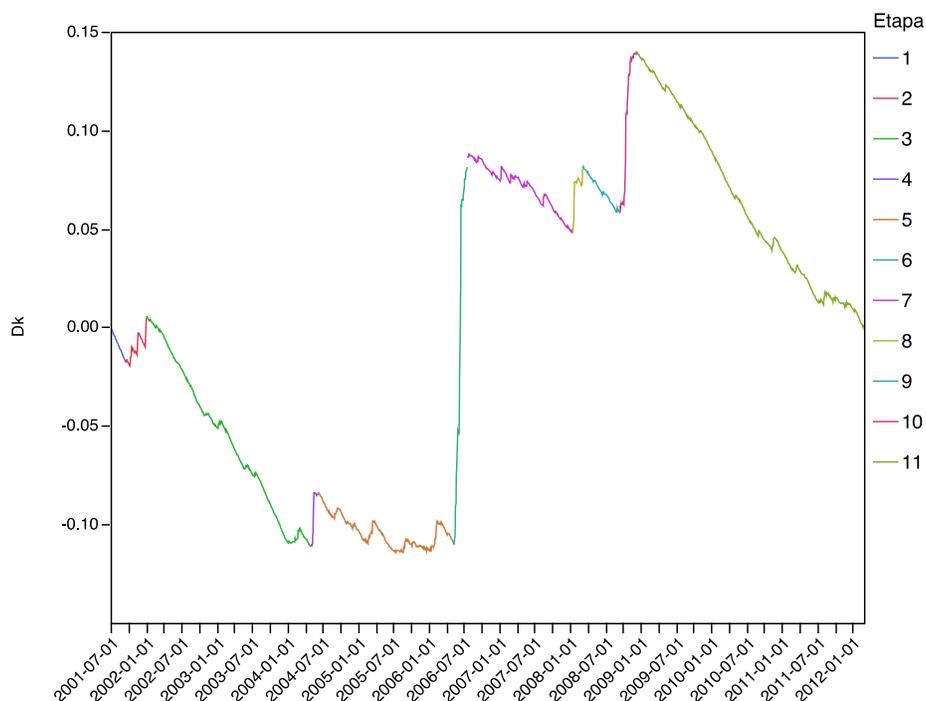


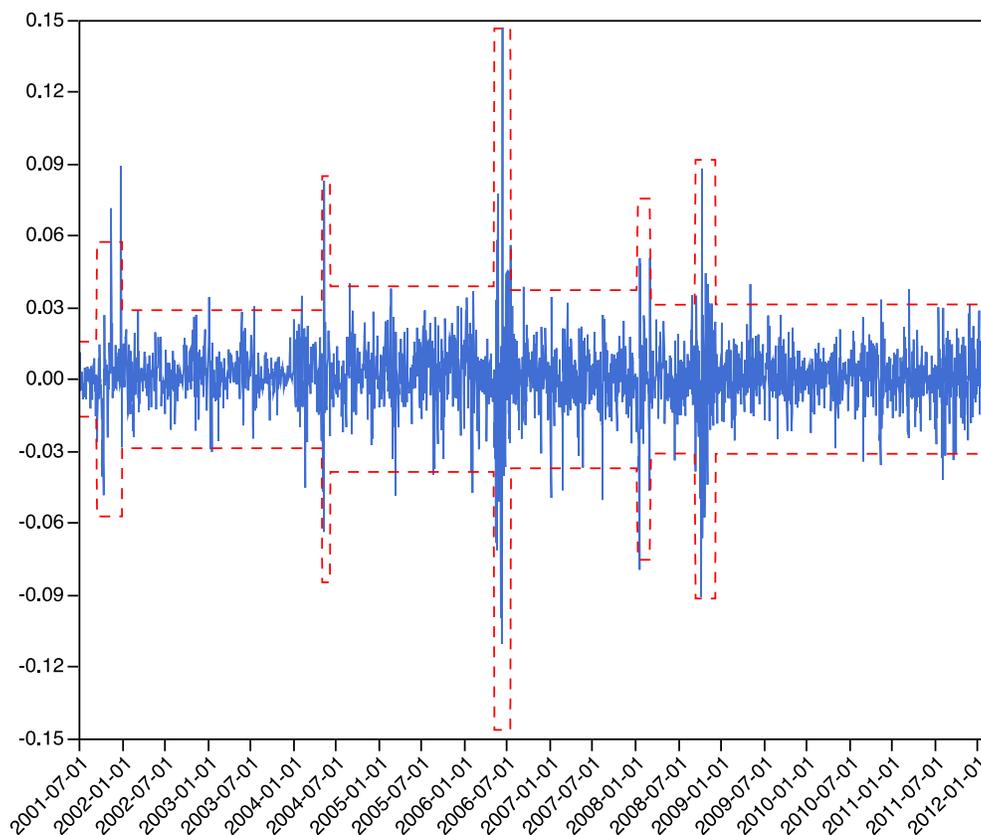
Figura 4. Segmentación de la suma cuadrada de los retornos del IGBC
Fuente: Elaboración propia

Estos niveles son nuevamente contrastados con la serie de retornos del IGBC encontrando que en efecto cada uno demarca segmentos de varianza diferente, como se muestra en el cuadro 2 y en la figura 5.

Nivel	Promedio	Desviación estándar	Varianza	Asimetría	Curtosis	Desde	Hasta
1	-0.000373669	0.005217744	2.72248E-05	-0.552820255	0.630422576	03-07-2001	18-09-2001
2	0.001238031	0.01910415	0.000364969	1.646893091	8.246211626	19-09-2001	03-01-2002
3	0.001977009	0.009608152	9.23166E-05	-0.235611847	1.884321155	04-01-2002	06-05-2004
4	-0.002477231	0.028266954	0.000799021	0.627296992	3.079163725	07-05-2004	10-06-2004
5	0.002615436	0.012919546	0.000166915	-0.45332133	1.340583217	11-06-2004	11-05-2006
6	-0.006636847	0.048815686	0.002382971	0.377870037	1.227359356	12-05-2006	21-07-2006
7	0.000762779	0.012392925	0.000153585	-0.271473411	2.700883587	22-07-2006	14-01-2008
8	-0.003771214	0.025145534	0.000632298	-0.163026504	1.692683994	15-01-2008	10-03-2008
9	0.000707781	0.010356564	0.000107258	0.179907316	1.074993691	11-03-2008	16-09-2008
10	-0.004458465	0.030529898	0.000932075	-0.054403712	1.09390154	17-09-2008	11-12-2008
11	0.000868115	0.010396872	0.000108095	-0.221482483	1.382673596	12-12-2008	29-02-2012

Cuadro 2. Comparación de los niveles del IGBC en función de sus momentos estadísticos

Fuente: Elaboración propia



Los límites representados por líneas punteadas son generadas con 3 desviaciones estándar del mismo segmento

Figura 5. Segmentación de la serie de los retornos del IGBC a partir del ICSS

Fuente: Elaboración propia

A partir de esta segmentación, es necesario ahora determinar si existen o no similitudes que nos permitan re-agrupar los niveles así como tipificar dichos clústeres. Esto se realiza mediante un análisis de varianza (ANOVA). En la tabla siguiente se presentan los resultados obtenidos utilizando el software especializado JMP.

Nivel	Grupo*	Promedio
5	A	0.0026742
3	A B	0.0020367
2	A B C D	0.0008553
11	B C	0.0008440
7	B C	0.0005767
9	A B C D	0.0003418
1	A B C D E	-0.0002808

8		C	D	E	-0.0028532	
4		B	C	D	E	-0.0037032
10			D	E	-0.0037702	
6				E	-0.0055047	

* Niveles no conectados con la misma letra indican que son significativamente diferentes

Cuadro 3. Comparación de medias por pares utilizando la t de student

Fuente: Elaboración propia utilizando el software JMP

Este análisis nos permite concluir que existen como mucho 5 grupos que agrupan los 11 segmentos de la serie de retornos del IGBC. Al analizar detalladamente sus características, se logra finalmente establecer cuatro grupos o etapas (A, B, C y D), tal como se muestran en el cuadro siguiente⁹:

Nivel	Promedio	Desviación estándar	Varianza	Asimetría	Curtosis	Etapas	Días
5 3	0.0022647	0.0112208	0.0001259	-0.3667478	1.8298222	A	1043
11 7 9	0.0008124	0.0109806	0.0001206	-0.2111987	2.0612294	B	1272
1 4 8 10	-0.0028065	0.0238080	0.0005668	-0.0833339	3.1304014	C	174
6	-0.0066368	0.0488157	0.0023830	0.3778700	1.2273594	D	46

Cuadro 4. Clasificación de los niveles en etapas, a partir de sus momentos estadísticos

Fuente: Elaboración propia

A continuación se explican las características de cada una de estas etapas:

⁹ El nivel 2 ha sido excluido de esta tabla debido a que su cuarto momento estadístico es demasiado diferente al resto de los niveles (curtosis = 8.24). Este segmento particular es asociado a los tres meses posteriores a los atentados de septiembre 11 de 2001 y dada su particularidad circunstancial se puede considerar como un segmento aislado de la serie.

- **Etapa A:** Representa un periodo de crecimiento en el índice, caracterizado un promedio positivo y relativamente alto de los retornos así como una varianza baja. La asimetría negativa indica una acumulación a la derecha de la distribución, y la curtosis refleja una alta acumulación de los valores alrededor de su media.
- **Etapa B:** Representa un estado de estabilidad. Durante esta etapa se cuenta con un promedio de los retornos también positivo pero mucho más cercano a cero, así como una desviación estándar en general más baja en comparación a la de la etapa A, lo que quiere decir que el mercado está creciendo en forma estable y que no existen variaciones significativas. Su asimetría es positiva, indicando colas largas hacia la derecha, confirmando la presencia de valores muy superiores al promedio de forma esporádica (crecimientos no sostenidos). El concepto de estabilidad es también confirmado por el índice de curtosis que al ser el más elevado de todos, indica una muy alta concentración de retornos con valores cercanos a la media.
- **Etapa C:** Representa un estado inestable o de nerviosismo. En esta etapa el promedio de los retornos tiende a ser más bajo que cero y la variación es mayor en comparación a los periodos A y B, lo que quiere decir que la serie es más errática. La curtosis es nuevamente similar a la etapa A, sin embargo, su asimetría es negativa, indicando colas largas hacia la izquierda de la curva o dicho de otra forma, la aparición esporádica de valores muy inferiores a la media (decrecimientos no sostenidos).
- **Etapa D:** Representa un estado de crisis o de caída generalizada de precios. Etapa de promedio de los retornos muy negativos en relación a las demás etapas, con altas varianzas, lo que ocasiona caídas súbitas en el valor del índice. La inestabilidad de la serie es confirmada por el bajo valor de curtosis que indica un poco concentración de los valores alrededor de la media. Esta etapa se caracteriza además por ser muy corta, ya que representa el choque que genera la crisis, mas no necesariamente todo un periodo de malos resultados (es posible que luego haya estabilidad o de nuevo nerviosismo).

En la figura 6a se ilustran de forma agrupada todas estas etapas en cuanto a su media y variación, donde se puede observar como disminuye el promedio de los retornos al tiempo que

aumenta la variabilidad de los mismos. En la figura 6b se muestra nuevamente la serie de retornos del IGBC indicando en escala de colores cada una de estas etapas. Finalmente, en la figura 6c se muestra toda la serie del IGBC segmentada bajo el mismo criterio.

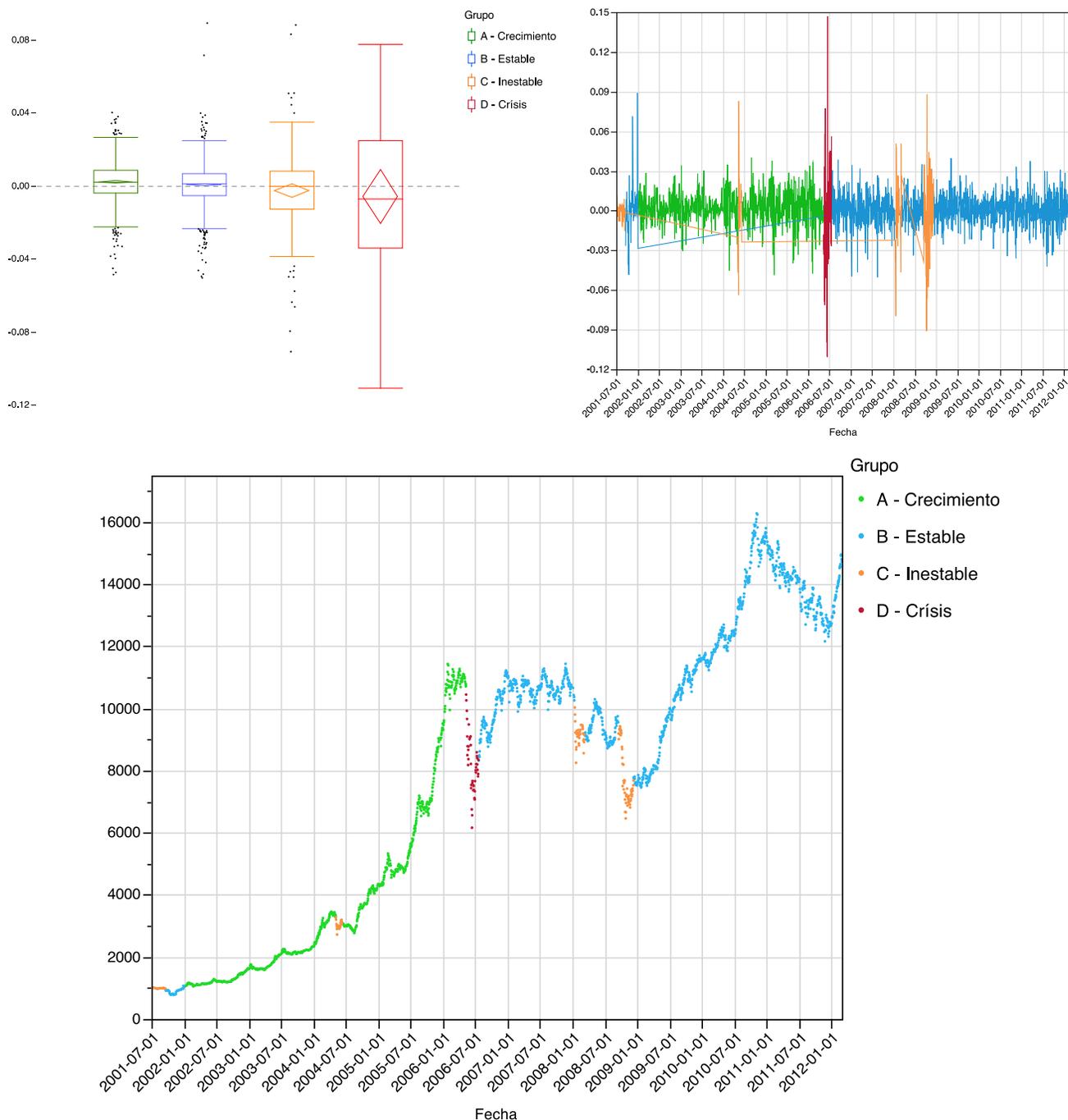


Figura 6. Representación de la serie de retornos del IGBC luego de aplicar el ICSS 6a (izquierda). Diagrama de caja de los retornos agrupados por etapa. 6b (derecha). Retornos del IGBC agrupados por etapa. 6c (centro). Evolución histórica del IGBC segmentado por etapas.

Fuente: Elaboración propia

Análisis de la segmentación

Mediante la aplicación retrospectiva del algoritmo ICSS se pudieron identificar diferentes periodos de notable trascendencia para el mercado bursátil colombiano. En primer lugar, se identificaron 3 extensos periodos de estabilidad (7, 9 y 11), durante los cuales el mercado no presentó variaciones significativas con un crecimiento estable. En segundo lugar, se observan dos periodos de marcado crecimiento (3 y 5) ocurridos de forma casi ininterrumpida entre el enero de 2002 hasta mayo de 2006, momento a partir del cual se presentaron varios acontecimientos que generaron inestabilidad en el mercado colombiano.

En cuanto a las etapas negativas, se encontraron 4 periodos de inestabilidad (1, 4, 8 y 10) y un periodo de crisis (6), donde el primero (periodo 1) se explica como la etapa de puesta en marcha del mercado consolidado, periodo durante el cual los inversionistas no invierten plenamente en espera de señales de estabilización. Un segundo periodo (periodo 4) durante el año 2004 (una caída de 217 puntos en 34 días) al que muchos analistas atribuyeron como el final de una burbuja de crecimiento sostenido en el IGBC (aumento del 340% sostenido en el valor del índice en poco menos de 3 años, cifra que no coincidía con el verdadero crecimiento de la economía colombiana), sumado al hecho del anuncio de la reserva federal de los estados unidos de aumentar las tasas de interés y las recomendaciones de varios fondos de inversión mundiales sobre la conveniencia de vender acciones de países emergentes¹⁰, lo que propicio la caída de precios. Posteriormente, luego de un prolongado periodo de crecimiento sostenido, y ocurre la crisis más significativa hasta entonces del IGBC (periodo 6, entre el 12 de mayo y el 21 de julio de 2006, con una caída de 2600 puntos en solo 55 días). Dicha crisis fue el resultado de una serie de eventos económicos y políticos, como el incremento de las tasas de interés por parte de la reserva federal en estados unidos (alcanzando valores del 5.25%) lo que generó nuevamente una salida masiva de capitales de las economías emergentes para focalizarse en

¹⁰Tomado de: <http://www.dinero.com/coyuntura/edicion-impres/articulo/mercados-vuelve-volatilidad/22974>, y de: <http://www.dinero.com/edicion-impres/la-grafica/articulo/relacion-muy-cercana/26986>.

bonos norteamericanos (mas fuerte aun que la ocurrida en el año 2004), el fortalecimiento de las bolsas asiáticas especialmente en China y Japón y la caída del índice de la construcción estadounidense que para ese entonces alcanzó una baja del 40% luego de un asenso sostenido desde el 2001. Todos estos factores generaron una crisis bursátil mundial que en el caso colombiano pudo verse aumentada por causa de la incertidumbre generada alrededor de la reelección presidencial de mayo del mismo año. Finalmente se presentan dos últimos periodos de inestabilidad (8 y 10) los cuales coinciden con la crisis mundial de 2008¹¹, cuya caída ocurre como resultado de la crisis inmobiliaria generada por el súbito crecimiento de la deuda hipotecaria *subprime*, lo que llevó al cierre y fusión de varios bancos internacionales¹².

¹¹ Es necesario aclarar que la crisis de 2008 no fue un suceso puntual sino una serie de eventos que se vinieron presentando a partir del año 2006, y cuyas repercusiones en el mundo bursátil comenzaron a partir de enero de 2008.

¹² Como la compra de Bear Stearns por parte de la financiera JP Morgan, y la quiebra de Lehman Brothers y el Bank of America.

Sección 4. Construcción del mercado artificial

Retomando lo enunciado en la sección de revisión de literatura, el presente documento toma cinco trabajos como referencia para su desarrollo. El procedimiento planteado en todos ellos consiste en la creación de un mercado artificial en el cual existe una acción que cuenta con una serie de precios históricos generada por un paseo aleatorio, y un grupo de agentes computacionales autónomos, heterogéneos y con racionalidad limitada, es decir que solo pueden analizar una parte de toda la información disponible, y que dadas las características individuales de cada agente es posible encontrar la formación de diferentes expectativas entre ellos. Cada agente cuenta a su vez con unos recursos específicos con los cuáles pueden comprar acciones o venderlas (si posee) de acuerdo a una estimación futura de precios que cada uno hace basado en su estrategia, en busca de establecer un portafolio que maximice su utilidad. Estas estrategias están definidas según el tipo de agente.

Estrategias

Existen básicamente tres tipologías establecidas en la literatura:

1. Fundamentalistas: Consideran que el precio tiende hacia un valor fundamental, de manera que si el valor actual es superior a este fundamental venden y de lo contrario compran.
2. Técnicos (o chartistas): Utilizan técnicas de regresión para establecer el valor futuro del activo. Así, si este valor es superior al actual, compran y de lo contrario venden. Existe una variación adicional de esta categoría llamada “Seguidores de tendencia” (*Trend Followers*), en la cual se utiliza también regresión para establecer el valor futuro del precio, sin embargo solo consideran series con correlación positiva (Farmer and Joshi 2002).
3. Agentes de ruido (*noise traders*): Operan sin una lógica aparente de negocio. Las ventas se realizan de manera aleatoria con una probabilidad dada (normalmente del 0.5), mientras que las compras se realizan solo si existe una seguridad en la venta futura, esto es, comparando el valor de compra con el valor promedio del histórico de ventas.

Intuitivamente, un agente fundamentalista es aquel que posee un mejor conocimiento de las condiciones macroeconómicas y que da mayor ponderación a estas, independientemente del

comportamiento observado en el mediano plazo. Los agentes técnicos por el contrario, dan menor importancia a estas condiciones y se basan en su estimación matemática para formular sus ofertas. El modelo aquí planteado considera todas estas estrategias en su desarrollo.

Formación de expectativas

Cada agente hace una estimación del valor futuro de la acción basado en un cálculo individual de los retornos. Así, el valor futuro de un activo para el agente i en el período $t+1$ estará dado por:

$$E(p_{t+1}^i) = p_t e^{r_{t+1}^i} \quad (1)$$

Donde r_{t+1}^i es el retorno estimado en el período $t+1$ por el agente i . La estimación individual de los retornos estará dada por la ecuación:

$$r_{t+1}^i = g^i \frac{(p^f - p_t)}{p_t} + g_2^i \bar{r}_{L_i} + n_i \epsilon_t \quad (2)$$

Componentes de la ecuación de retornos

La primera parte de la ecuación representa el componente fundamentalista, la segunda parte el componente técnico (seguidor de tendencia) y la tercera es un término aleatorio. Los pesos asignados a cada componente se realizan en función de las variables aleatorias g_1 , g_2 y n , donde $g_1^i \sim |N(0, \delta_1)|$, $g_2^i \sim N(0, \delta_2)$, $n_i \sim |N(0, n_0)|$, y $\epsilon \sim N(0, 1)$. De esta forma, si $|g_1| > |g_2| + \xi$ (donde ξ es un valor muy pequeño), significa que el agente da mayor importancia al análisis fundamental que al chartista y se podrá calificar el agente como fundamentalista, y viceversa, si $|g_2| > |g_1| + \xi$ se podrá decir que el agente es chartista o seguidor de tendencia. Existe además una fracción adicional de agentes en los cuales el valor de g_1 y g_2 no difiere significativamente, es decir que $||g_2| - |g_1|| \leq \xi$. En estos agentes se asumirá que no hay realmente una clara diferenciación de estrategias, y se caracterizarán por ser agentes de ruido (*noise traders*).

Componente fundamental

En cuanto a la funcionalidad de cada segmento, en el componente fundamentalista de la estimación de precios, se hace un cálculo de la variación esperada de los precios actuales frente al valor fundamental (p_f). Este valor se fija desde el inicio del modelo y marca la tendencia del mercado. Si p_f es alto, los agentes fundamentalistas asumen una expectativa alzista y viceversa. Cuando el mercado es estatico (sin crecimiento), el valor de p_f se mantiene fijo a lo largo de la simulacion, y si el mercado es dinamico, el fundamental es calculado periodicamente proyectada a mediano plazo a partir del historico de precios del mercado.

Componente técnico

La segunda parte de la ecuación de retornos se refiere al componente técnico, el cuál pondera los retornos de los últimos L períodos¹³ del indice. La ecuación que lo define está dada por:

$$\bar{r} L_i = \frac{1}{L_i} \sum_{j=1}^{L_i} \frac{p_{t-j} - p_{t-j-1}}{p_{t-j-1}} \quad (3)$$

La última parte de la ecuación corresponde a un componente aleatorio que genera cierto nivel de ruido en la formación de las expectativas de los agentes según el valor definido para n_0 .

Ofertas de compra y venta

Una vez un agente actualiza su precio esperado para el siguiente período, elabora su oferta de compra o venta según si su expectativa es al alza o a la baja. Las ofertas se realizan basados en la siguiente ecuación:

$$oferta_i = p_{t+1}^i (1 \pm k_i) \quad (4)$$

Donde k_i es un valor aleatorio distribuido uniformemente entre 0 y k^{14} . El signo positivo o negativo se asigna según si se realiza una oferta de venta o compra respectivamente.

¹³ L es un valor parametrizable

¹⁴ K es un valor parametrizable

Transacciones y Formación de precios

Al final de cada período todas las ofertas de compra y venta se registran en los libros de compra y venta tal como se propone en Chiarella & Iori (2002) y en Yamamoto & LeBaron (2009). El cálculo del precio de cierre se realiza mediante el algoritmo de precio de equilibrio o calce de subastas el cual permite calcular un precio del mercado que maximice la cantidad de agentes que transan, al tiempo que minimiza la cantidad de agentes que deciden no transar dado el posible precio¹⁵ como se explica mediante un ejemplo en el anexo 1 de este documento.

Con el precio calculado, se realizan todas las transacciones al mismo valor y posteriormente se limpian los libros de compra y venta. Si no hay transacciones, el precio del mercado se ajusta con el valor promedio entre el máximo valor del libro de ventas y el mínimo valor del libro de compra.

La utilización de este algoritmo marca una diferencia fundamental con los modelos encontrados en la revisión de la literatura, los cuales requieren de calces exactos entre compra y venta para ejecutar las transacciones, lo que exige la utilización de tiempos límite en las ofertas para asegurar un mínimo de transacciones. Este planteamiento tiene dos inconvenientes: en primer lugar impide que agentes maximicen su utilidad cuando su estimación de precios cambia durante el tiempo que su oferta ha sido elaborada y se encuentra vigente, contrariando los mecanismos de ofertas límites existentes en los mercados financieros reales. En segundo lugar, exige un alto número de agentes en el mercado para asegurar que periódicamente nuevas ofertas sean agregadas a los libros (al tiempo que otras caducan) y que se asegure la coincidencia en precios para realizar la transacción, lo que implica una alta exigencia computacional y limita la experimentación. El mecanismo aquí planteado corrige estos dos inconvenientes y se aproxima al mercado colombiano en la medida que es el algoritmo en el cual se basa la bolsa de valores de Colombia.

¹⁵ Tomado del sitio web de la bolsa de valores de Colombia, explicado en

http://www.bvc.com.co/cursos/administracion/editor/homeFiles/Modelo_Mercado_de_Acciones.pdf

Expansión y contracción del mercado

Los mercados artificiales tradicionales contemplan una cantidad fija de agentes y acciones a transar a lo largo de la simulación, lo cual asegura mayores condiciones de control sobre la experimentación y los parámetros. Sin embargo, este planteamiento no permite garantizar que los resultados obtenidos sean un buen reflejo de la serie de referencia ya que no permite el incremento sostenido en precios. En busca de una mejor modelación del mercado financiero colombiano, considerando que este tiene un acceso libre por parte de los inversionistas, el modelo artificial aquí planteado contempla la posibilidad de crecimiento (expansión y contracción) durante la simulación, es decir que los agentes entren o salgan del mercado. Para ello se establece una medición por parte de los agentes de su propia rentabilidad basados en el dinero con el cual ingresan al mercado y su patrimonio en un momento dado (dinero + valoración de acciones al precio del mercado), relación que denota la rentabilidad del agente i . Esta rentabilidad es comparada con un valor global T_REF el cuál es parametrizable y se interpreta económicamente como la tasa de renta fija del gobierno (transacciones libres de riesgo y de baja rentabilidad) el cuál será preferido por los agentes cuando la rentabilidad del mercado sea inferior a dicha tasa y en consecuencia, liquidarán sus posiciones si tienen o simplemente salen del mercado si no poseen títulos. En este modelo se evaluará el efecto de diferentes configuraciones de esta tasa sobre el resultado del mercado. Por otra parte, las tasas de interés pueden ser utilizadas para incentivar la entrada o salida de agentes si su valor disminuye o aumenta drásticamente, es decir que puede servir para modelar crecimientos y crisis.

Cantidad de agentes y acciones

La cantidad de agentes iniciales puede fijarse entre 100 y 1000 inversionistas. Todos estos comienzan con una acción disponible para transar al inicio de la simulación. Un agente puede llegar a tener múltiples acciones al mismo tiempo y por ende formular una o más ofertas de venta en un momento específico. En la medida que nuevos agentes entren se crearán nuevas

acciones a precio de mercado sin un propietario particular (emisiones), lo que significa que el mercado podrá expandirse también en cuanto títulos disponibles.

Distribución de la riqueza inicial

En los mercados reales la distribución de la riqueza no es igual en todos los agentes, encontrando gran acumulación de recursos en unos pocos y pocos recursos en otros tal como se explicó en Matassini y Franci (2001). Este mercado artificial evaluará diferentes tipos de distribución de riqueza (Constante, Uniforme, Normal, Log normal y Pareto), donde se evaluará si hay efecto de la distribución de la riqueza con respecto a los estadísticos de la serie de retornos y si esta contribuye o no a una convergencia hacia un estado específico.

Tamaño del paso

Otro aspecto a considerar es el tamaño del paso (τ), es decir múltiplo al cuál los precios serán ajustados. Existe una relación directa entre el valor del paso y la volatilidad del mercado, de manera que si este valor es muy alto, también lo serán las variaciones.

Liquidez

Finalmente se considera el parámetro de liquidez (λ), el cual se modela como una probabilidad de participación en el mercado para cada agente. En cada jornada de transacción, los agentes son elegidos al azar basados en este valor, si λ aumenta, aumentará la cantidad de agentes participantes en el mercado y por ende la liquidez. Este parámetro juega además un papel importante al momento de representar expansiones y contracciones del mercado.

Simulación

El mercado artificial propuesto será elaborado mediante la utilización del programa NetLogo, el cual es un software especializado en la simulación basada en agentes creado en la universidad Northwestern en Chicago en 1999. Este programa permite realizar la representación de agentes autónomos que pueden interactuar entre ellos basados en parámetros globales (como λ , el

valor del fundamental, la tasa de referencia, etc.) e individuales (como σ_1 , σ_2 , n , κ , etc.), emulando las decisiones de los inversionistas en situaciones reales. En este mercado artificial se establecerá una cantidad N de agentes y una cantidad m de acciones, cada agente con una cantidad de recursos específicos según lo explicado en la sección de distribución de la riqueza inicial. Adicionalmente se creará un histórico de precios siguiendo un paseo aleatorio que permita a los agentes realizar sus estimaciones. Una vez comenzada la simulación, cada agente determina primero el tipo de estrategia a seguir (previamente se ha mencionado que las estrategias podrán ser: Fundamentalistas, Técnicos, que a su vez pueden ser chartistas o seguidores de tendencia, y Agentes de ruido). Estas estrategias son importantes en la medida en que cada una de ellas establece diferentes formas en la toma de decisiones sobre la compra y venta. A continuación las ofertas de compra y venta son compiladas en los respectivos libros y se aplica el algoritmo de equilibrio de mercado, se realizan las transacciones y se actualizan expectativas. La simulación será realizada por un período de tres años (732 días hábiles) utilizando diversas combinaciones de los parámetros con múltiples repeticiones siguiendo una técnica de exploración de resultados¹⁶ que represente los estados de referencia. Es importante señalar que los estados de referencia para este caso son los mismos que se presentaron en la sección 3 de este documento (*Cuadro 4. Clasificación de los niveles en etapas, a partir de sus momentos estadísticos*), donde se intenta replicar principalmente la etapa B (estabilidad) y encontrar bajo qué circunstancias, es posible cambiar de etapa.

El código fuente del mercado artificial se presenta en el anexo 2 de este documento. En la figura 7 se presenta una imagen del mercado artificial construido. En él se observa una serie de controles ubicados en la parte izquierda que corresponden a los parámetros del modelo explicados a lo largo de esta sección. En la parte central se observa la plataforma de interacción de los agentes, es decir el lugar donde físicamente se encuentran los agentes para comprar y

¹⁶ Dada la gran cantidad de combinaciones de parámetros a analizar se vuelve muy exigente en términos computacionales evaluar todo el universo. Se hará uso del programa *BehaviorSearch* que permite utilizar algoritmos genéticos que permiten optimizar la exploración de grandes universos dados unos valores objetivos de búsqueda. Mas información sobre este método en : <http://behaviorsearch.org/index.htm>

vender. En la parte inferior se encuentran unos monitores que permiten observar la evolución de ciertas variables tales como el precio, la cantidad de agentes, la cantidad de acciones emitidas y la rentabilidad por tipo de agente. Adicionalmente se encuentran los botones de ejecución inicial (SETUP) y secuencial (GO). Finalmente, en la parte derecha se encuentran las gráficas dinámicas de precios, retornos y convergencia de la serie de retornos.

En la sección 5 de este documento se explicará la calibración, experimentación y resultados de este mercado artificial.

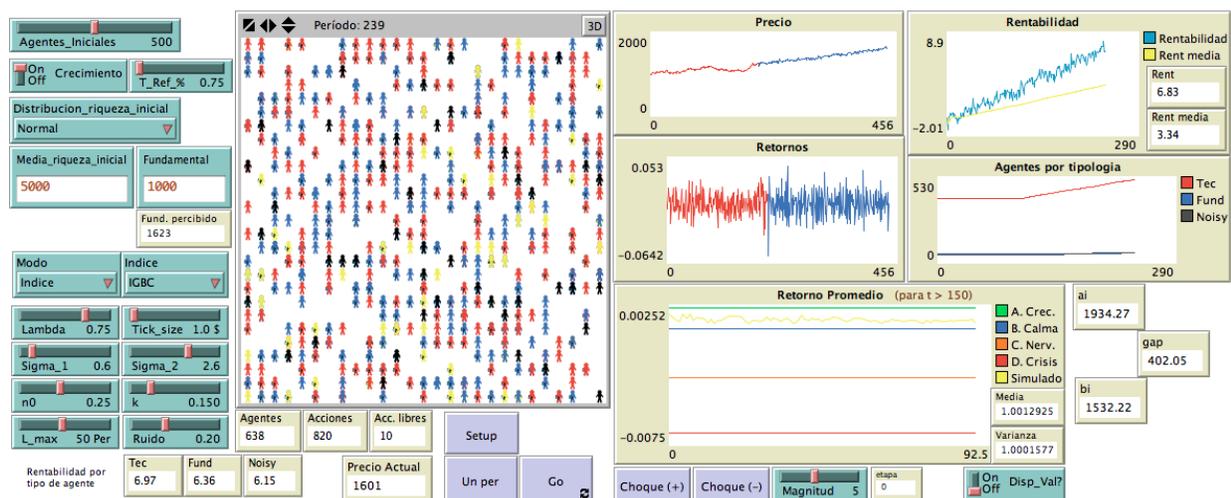


Figura 7. Pantalla del mercado artificial construido en NetLogo

Fuente: Elaboración propia

Sección 5. Resultados y Análisis

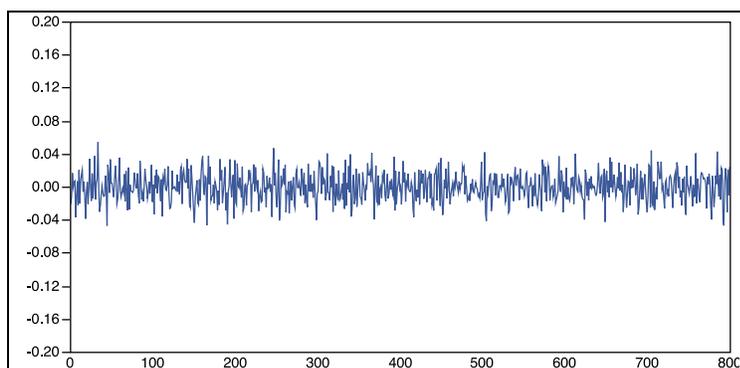
En la presente sección se establece la combinación de los mejores parámetros para representar el índice del IGBC y posteriormente realizar diversos experimentos que nos permitan determinar bajo qué condiciones el mercado puede cambiar de estados.

Calibración del modelo

Antes de proceder con el análisis general del mercado artificial, es necesario comprender la relación de cada uno de los parámetros con los resultados en las series de precios y retornos. A continuación se explorarán cada uno de estos parámetros.

Sigma 1 y Sigma 2

Como se explicó en la sección 4, los parámetros sigma 1 y sigma 2 asignan pesos diferentes a los componentes fundamentales y técnicos de la ecuación de estimación de retornos. Inicialmente partimos de un mercado compuesto por solo agentes de ruido ($\sigma_1 = \sigma_2 = 0$), donde encontramos un valor promedio de los retornos negativo así como una baja volatilidad (ver figura 8a). A continuación, introducimos los agentes técnicos al mercado ($\sigma_1 = 0, \sigma_2 = 3.5$) y encontramos una situación similar, un mercado a la baja y baja volatilidad (ver figura 8b). Un planteamiento similar se puede hacer invirtiendo los valores asignados a σ_1 y σ_2 , obteniendo un mercado compuesto por solo agentes fundamentalistas y de ruido ($\sigma_1 = 3.5, \sigma_2 = 0$), encontrando esta vez unos retornos positivos y una volatilidad es mucho más alta (ver figura 8c). Finalmente, podemos incluir los tres tipos de agentes en el mercado en proporciones similares en cuanto a técnicos y fundamentalistas se refiere ($\sigma_1 = 1.5, \sigma_2 = 1.5$), encontrando nuevamente retornos positivos aunque un poco inferiores con una volatilidad más baja (ver figura 8d). Este último resultado es similar a la serie objetivo de referencia (ver figura 9), aunque con promedios más bajos y varianza más elevada. Adicionalmente, los momentos estadísticos tres y cuatro tienen también cierta concordancia, lo que permite inferir que la presencia de los tres tipos de agentes en el mercado es necesaria ($(\sigma_1 > 0$ y $\sigma_2 > 0)$).

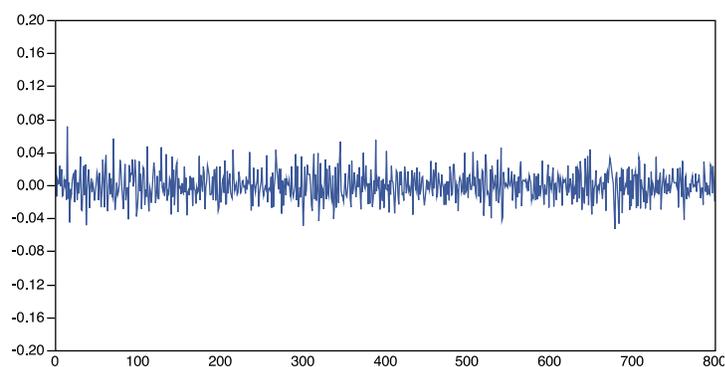
**Figura 8a.**Parámetros: $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$ **Momentos estadísticos**

Promedio: -0.000359

Varianza: 0.000322

Asimetría: -0.000401

Curtosis: -0.064109

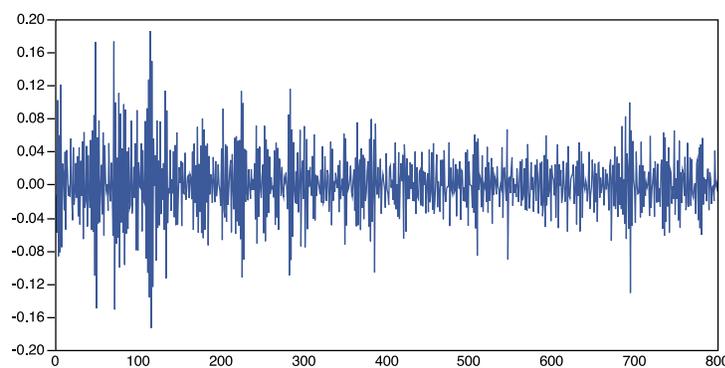
**Figura 8b.**Parámetros: $\sigma_1 = 0, \sigma_2 = 3.5$ **Momentos estadísticos**

Promedio: -0.000327

Varianza: 0.000441

Asimetría: 0.109608

Curtosis: 0.601924

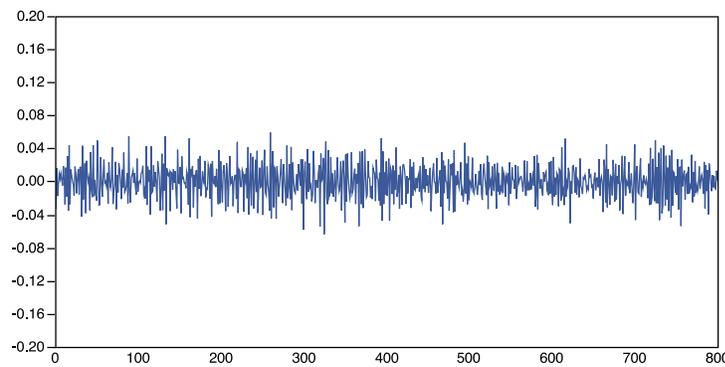
**Figura 8c.**Parámetros: $\sigma_1 = 3.5, \sigma_2 = 0$ **Momentos estadísticos**

Promedio: 0.000565

Varianza: 0.001823

Asimetría: 0.074754

Curtosis: 1.116625

**Figura 8d.**Parámetros: $\sigma_1 = 1.5, \sigma_2 = 1.5$ **Momentos estadísticos**

Promedio: 0.000116

Varianza: 0.000492

Asimetría: -0.036104

Curtosis: 0.097527

Figura 8. Gráfico de retornos en cada configuración inicial a partir de sigma 1 y sigma 2**Fuente: Elaboración propia**

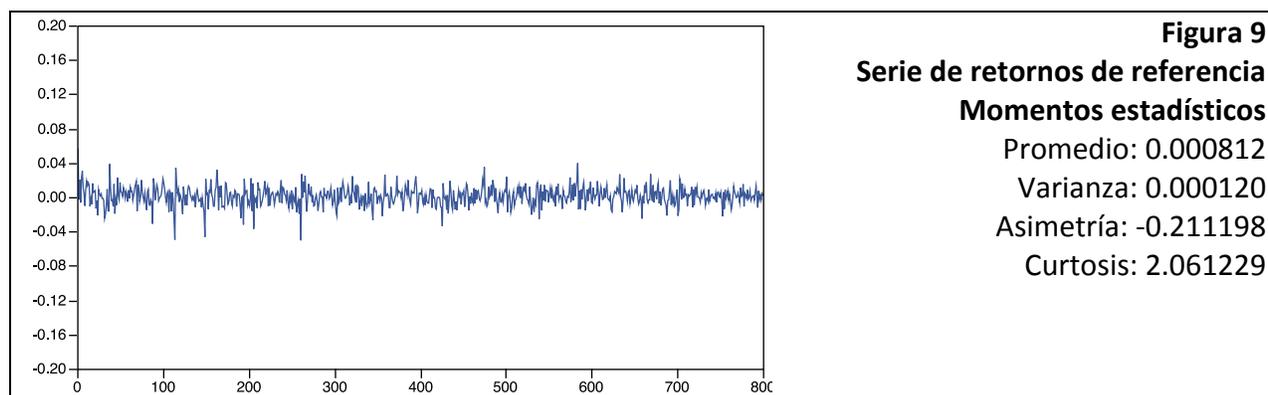


Figura 9. Evolución de los retornos de la serie original del IGBC en etapa estable

Fuente: Elaboración propia

Este primer resultado nos permite concluir que el mercado colombiano cuenta con la presencia de los tres tipos de agentes en su etapa de estabilidad, resultados que concuerdan con los hallazgos realizados por Brock y Hommes (1998), Chen, Lux et al (2001) y Chiarella e Iori (2002) en otros mercados financieros. Otro hallazgo resultante de esta primera etapa es el papel de cada tipo de agente, donde los técnicos contribuyen a una baja volatilidad y bajos promedios, contrario a los fundamentalistas quienes aumentan el valor promedio del mercado con volatilidades mucho mayores. Dicho de otra manera los agentes que dan más peso al componente fundamental contribuyen a una expansión del mercado pero a su vez aumentan la volatilidad del mismo, por esta razón es necesaria la presencia de los agentes técnicos quienes compran y venden a valores más bajos dado que su estimación futura se basa mayoritariamente en una proyección de los precios históricos, los cuales no tienen mayores sobresaltos generalmente.

A partir de esta idea, exploramos entonces las diferentes combinaciones posibles de estas tres tipologías de agentes en el mercado artificial en función de σ_1 y σ_2 . Luego de una extensa simulación bajo diferentes configuraciones (más de 1000 experimentos), se pudo establecer que el valor de σ_1 es directamente proporcional al valor de los momentos 1, 2 y 4, e inversa al momento 3. σ_2 en cambio no muestra una relación evidente con los momentos 1 y 4, sin embargo es inversa al tercer momento y directa al segundo momento estadístico, tal como se muestra en las gráficas 10a, 10b, 10c y 10d. Partiendo del hecho que la

serie de referencia tiene una varianza y asimetría baja (segundo y tercer momento estadístico respectivamente) y que la curtosis es alta, se puede inferir que el valor de sigma 1 debe ser relativamente bajo con respecto a sigma 2, más específicamente, se puede suponer que sigma 1 debe estar entre 0.5 y 1.5, y que sigma 2 debe estar entre 2 y 3. Esto debido a la necesidad de promedios relativamente altos con varianzas bajas. Es necesario entonces continuar con el análisis de los demás parámetros a fin de establecer la configuración definitiva del mercado artificial construido.

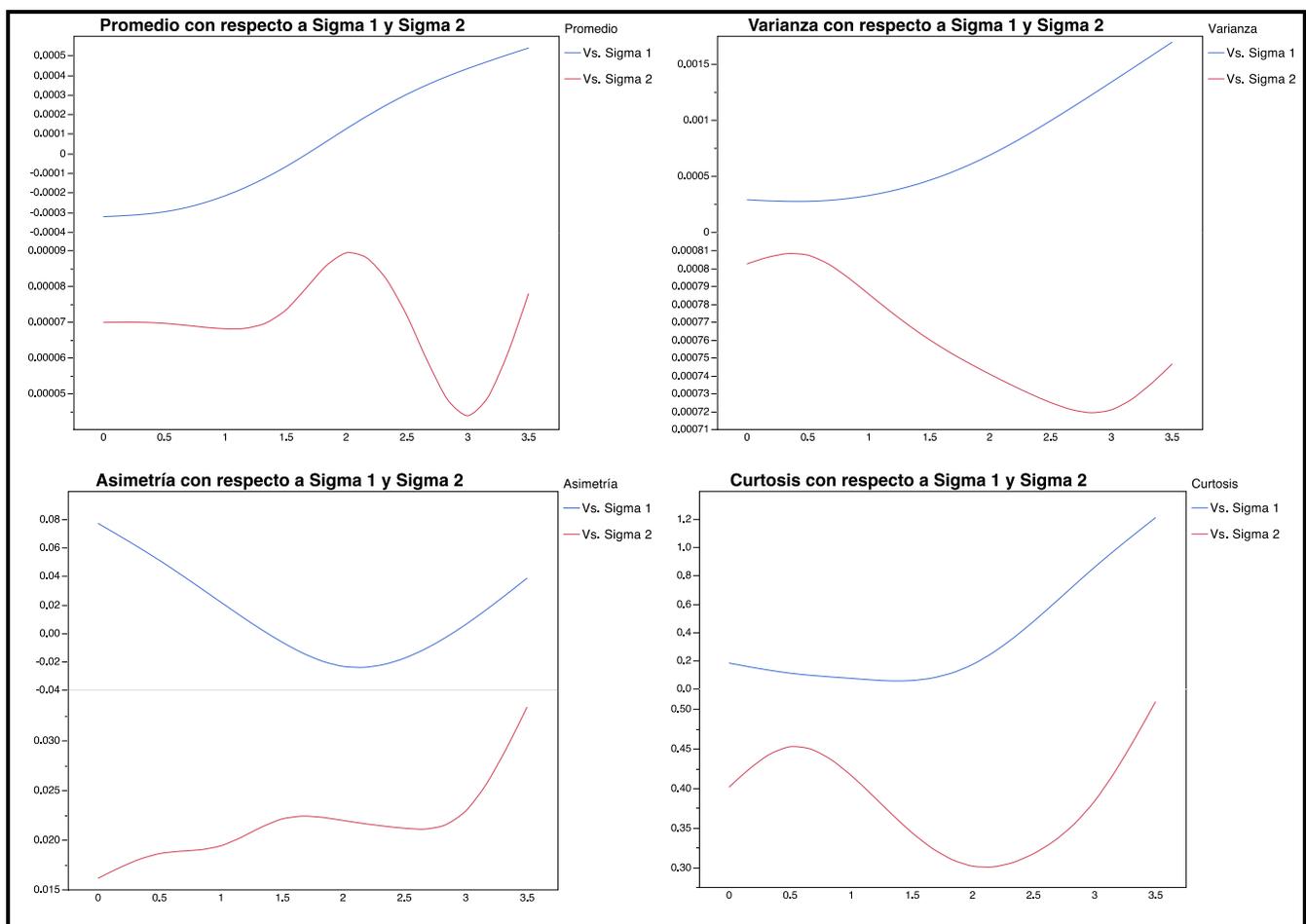


Figura 10. Evolución de los momentos estadísticos de la serie de retornos del mercado artificial bajo diferentes configuraciones de sigma 1 y sigma 2.

Fuente: Elaboración propia

Efecto n

Otro parámetro incluido en la ecuación de retornos es n_0 , el cual afecta directamente el componente aleatorio de la estimación. La figura 11 muestra la relación entre los cuatro momentos estadísticos y el parámetro n , donde se evidencia que dicha variable afecta en forma directa la varianza de la serie de retornos y en forma indirecta el promedio de los mismos. Por otra parte, la relación con los momentos estadísticos 3 y 4 no es clara.

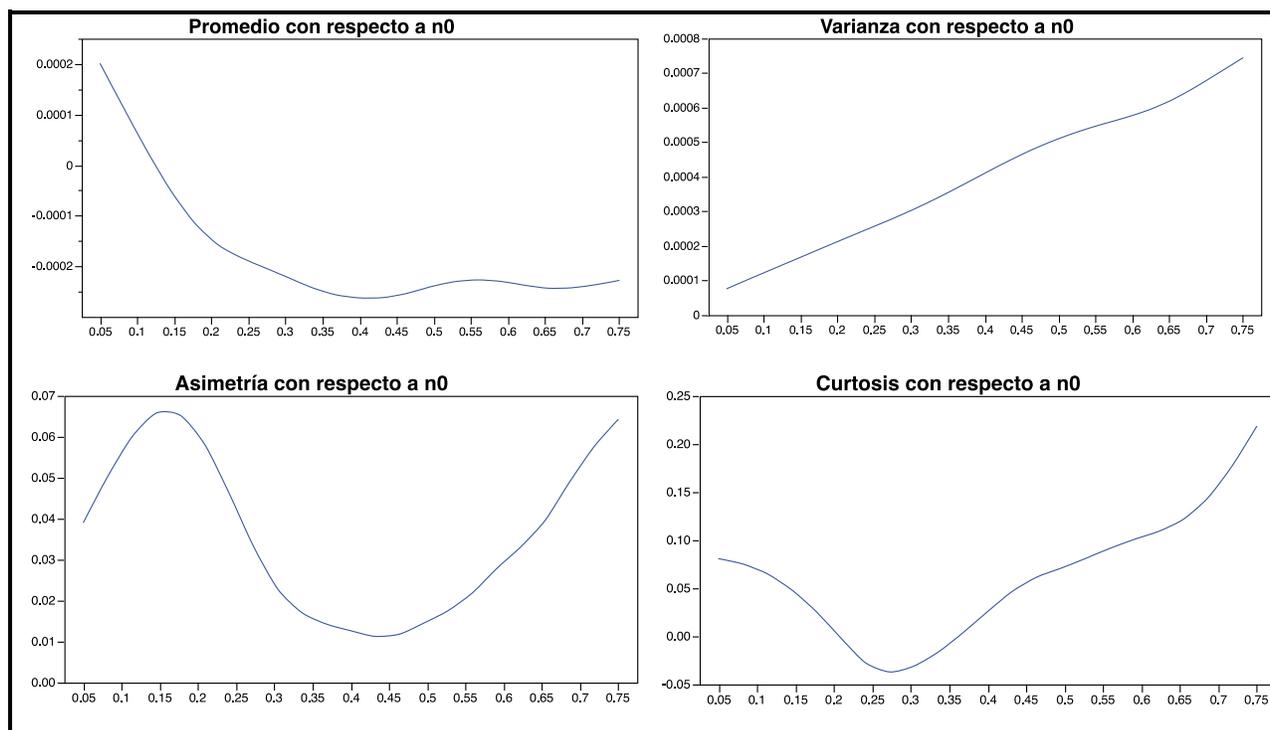


Figura 11. Relación entre n y los momentos estadísticos de los retornos
Fuente: Elaboración propia

A continuación se explorarán otros parámetros del mercado artificial que afectan factores externos más que la percepción de los agentes como tal, lo que a su vez repercute en la serie de retornos de precios y por tanto deben ser también calibrados.

Efecto k

Como se explicó en la sección 4, el parámetro k determina la proporción de descuento o incremento que los agentes incluyen en sus ofertas de compra o venta a partir de su estimación de precios futuros. Intuitivamente, mayores valores de k implican un gap superior entre los libros de compra y venta, y por ende una mayor varianza, como se evidencia en la figura 12. En cuanto al promedio, se observa una relación inversa con respecto a k . Los demás momentos no muestran una relación evidente.

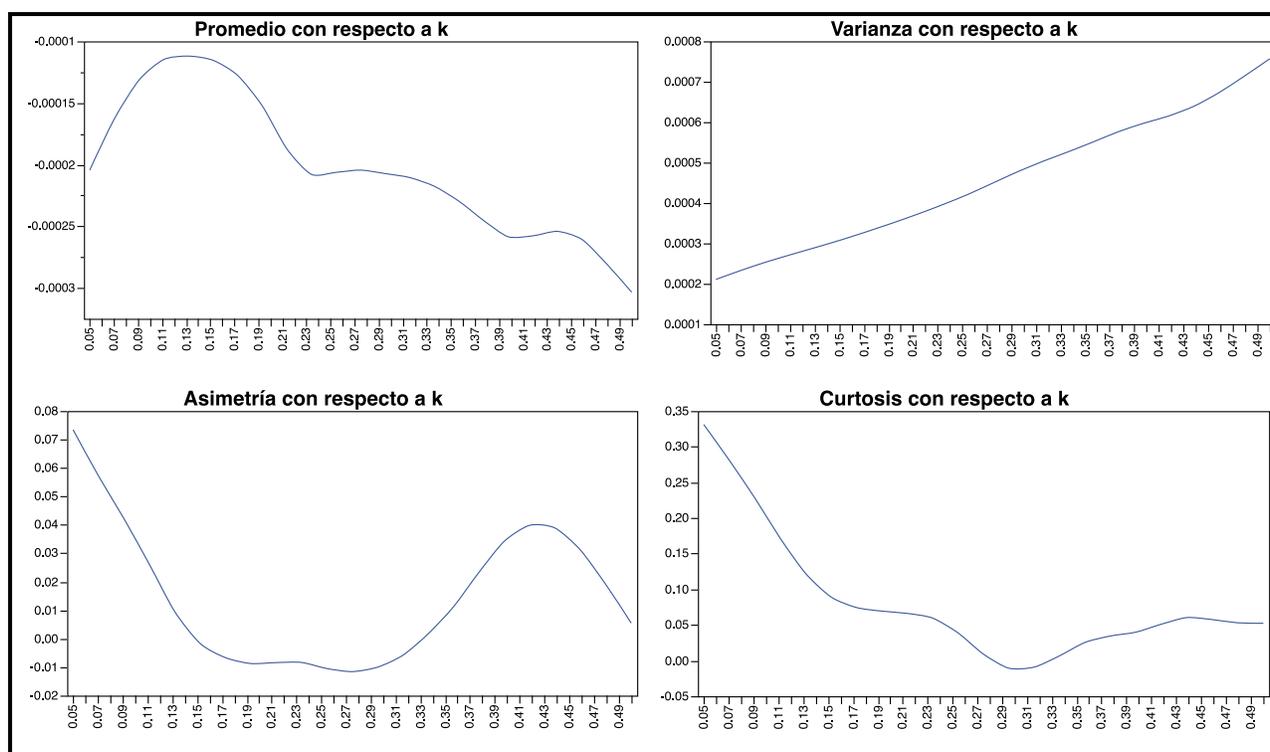


Figura 12. Relación entre k y los momentos estadísticos de los retornos

Fuente: Elaboración propia

Cantidad de agentes iniciales

Otro parámetro a explorar es la cantidad de agentes N . Si N es muy bajo, se corre el riesgo de tener pocas transacciones y por ende una alta volatilidad. En la medida que N aumente, se disminuye esta variabilidad, sin embargo, un valor muy elevado de N puede afectar la efectividad de la plataforma de simulación debido a la multiplicidad de cálculos. En la figura 13 se muestra la relación entre los cuatro momentos estadísticos y N , donde se observa que a

partir de 500 agentes iniciales, el mercado tiende a converger en los momentos uno, dos y cuatro.

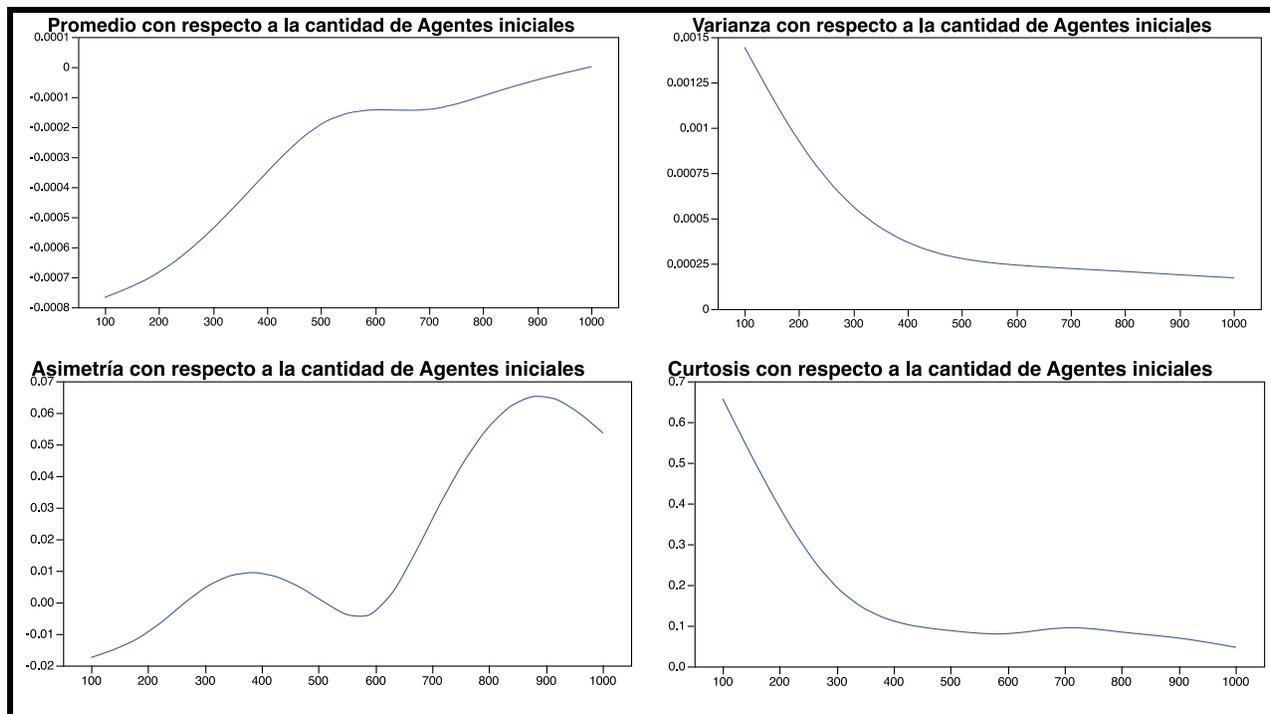


Figura 13. Relación entre la cantidad de agentes iniciales y los momentos estadísticos de los retornos

Fuente: Elaboración propia

Liquidez

Diariamente los agentes evalúan si transan o no en el mercado en función de su estimación de precios, de su restricción presupuestal y de un factor de liquidez denotado por Lambda. Si este valor es muy bajo, pocos agentes podrán invertir y por ende habrá una fuerte oscilación de precios. En consecuencia, la liquidez esta en relación inversa con la variabilidad del precio como se puede apreciar en la figura 14. En estas graficas se puede además observar que a partir de cierto nivel de liquidez, es posible obtener valores relativamente constantes en los momentos 1 y 4, lo que permite inferir que la liquidez debe ser superior o igual a este punto, es decir que $\lambda \geq 0.5$.

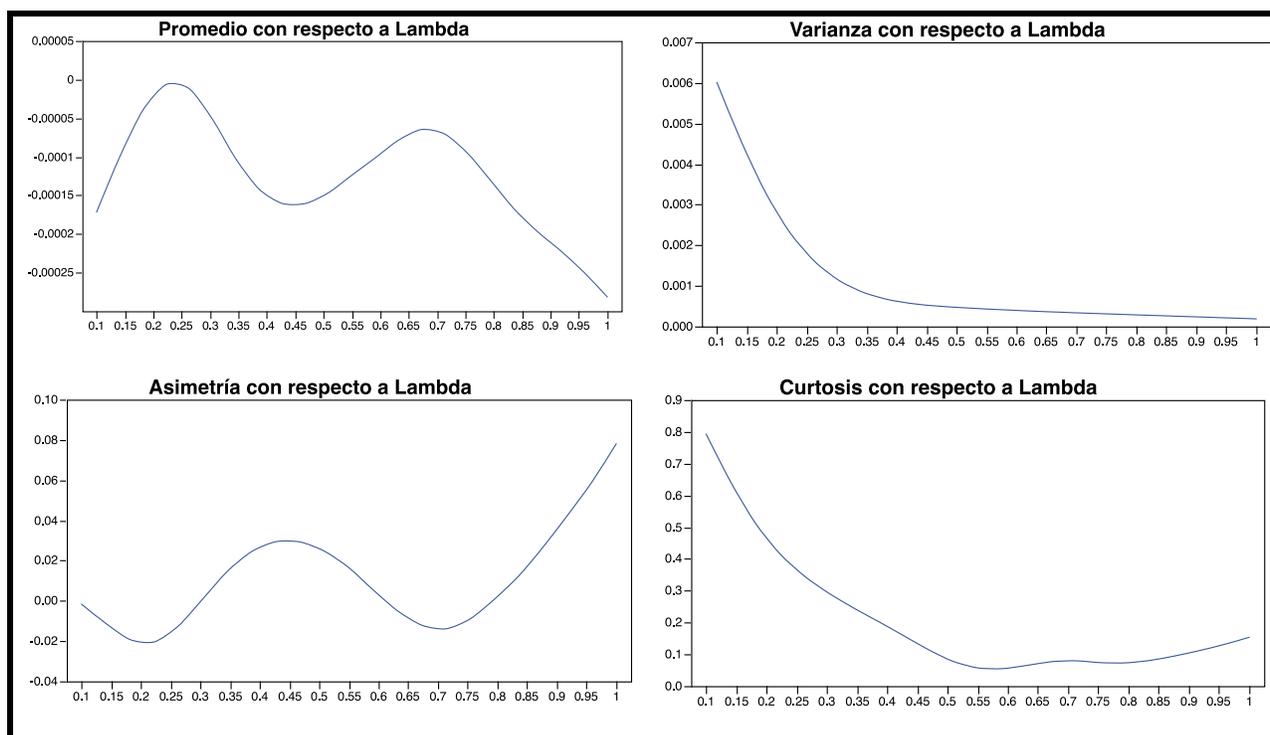


Figura 14. Relación entre la liquidez y los momentos estadísticos de los retornos
Fuente: Elaboración propia

Crecimiento

Como se mencionó anteriormente, este mercado incluye el crecimiento como una característica innovadora frente a los modelos encontrados en la revisión de la literatura. Este crecimiento es incorporado según el procedimiento explicado en la sección 4, en función de la rentabilidad percibida por los agentes. Cuando hay crecimiento y la rentabilidad es atractiva, nuevos agentes entran al mercado y por ende aumenta la disponibilidad de recursos transar, lo que contribuye a un crecimiento sostenido en el precio de las acciones, es decir un promedio positivo de los retornos. El cuadro 5 muestra la diferencia fundamental de los cuatro momentos estadísticos entre un mercado sin y con crecimiento, con una tasa de referencia del 0% (mas adelante se explorará este parámetro con mayor detenimiento). Este cuadro permite deducir la necesidad de crecimiento en el mercado en busca de aproximarnos a la serie de retornos de referencia del IGBC en periodo de estabilidad.

	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>	<i>Asimetría</i>	<i>Curtosis</i>
<i>Sin crecimiento</i>	-0.000378248	0.00027637	0.026505208	0.070263136
<i>Con crecimiento</i>	0.000865781	0.00016883	0.050913635	0.461002897

Cuadro 5. Comparación de los estadísticos de la serie sin y con crecimiento
Fuente: Elaboración propia

Distribución de la riqueza de los agentes

Hasta ahora se ha explorado el mercado bajo condiciones de igualdad en cuanto a la riqueza de los agentes, sin embargo, los mercados financieros reales se caracterizan entre otros aspectos por heterogeneidad en cuanto a los recursos de sus agentes, incluso por la presencia de agentes con patrimonios muy elevados, los cuales pueden eventualmente influir en la formación de precios y de ser necesario absorber los excesos de demanda, tal como se demostró en Matassini y Franci (2001).

Basados en esta idea, se exploraron cinco diferentes tipos de distribución de la riqueza inicial, cuyos resultados al simularlos en escenarios de crecimiento con tasa de referencia cero, se muestran en el cuadro 6.

<i>Distribución riqueza inicial</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>	<i>Asimetría</i>	<i>Curtosis</i>
<i>Constante</i>	0.0007647	0.0002584	0.0404607	0.2720881
<i>Uniforme</i>	0.0007813	0.0002581	0.0482622	0.3565842
<i>Normal</i>	0.0007395	0.0002358	0.0254482	0.1914701
<i>Log normal</i>	0.0007495	0.0002562	0.0084352	0.2502592
<i>Pareto</i>	0.0009726	0.0002788	0.0102467	0.2153505

Cuadro 6. Comparación de los estadísticos de la serie de retornos con crecimiento y bajo diferentes distribuciones de riqueza inicial
Fuente: Elaboración propia

Al analizar los resultados se encuentra que no existen diferencias significativas entre ellas, de manera que no es posible establecer si una distribución particular de la riqueza se aproxima más a la serie de retornos de referencia del IGBC. Por facilidad se trabajará en adelante con la distribución uniforme.

Tasa de referencia

El último parámetro a considerar es la tasa de interés de referencia, a partir de la cual los agentes toman decisiones de permanecer o marcharse del mercado en caso que la tasa sea superior a la rentabilidad percibida, o incluso permite que nuevos agentes entren al mercado artificial si este es más atractivo. En la figura 15 se evalúan diferentes escenarios de tasas de referencia, donde se muestra que no existe una relación clara entre el valor de la tasa y el resultado del mercado en cuanto a sus momentos estadísticos. Esto no descarta la utilidad de este parámetro, principalmente en la generación de escenarios de crecimiento y crisis, sin embargo demuestra que su valor no es crucial al momento de calibrar el mercado.

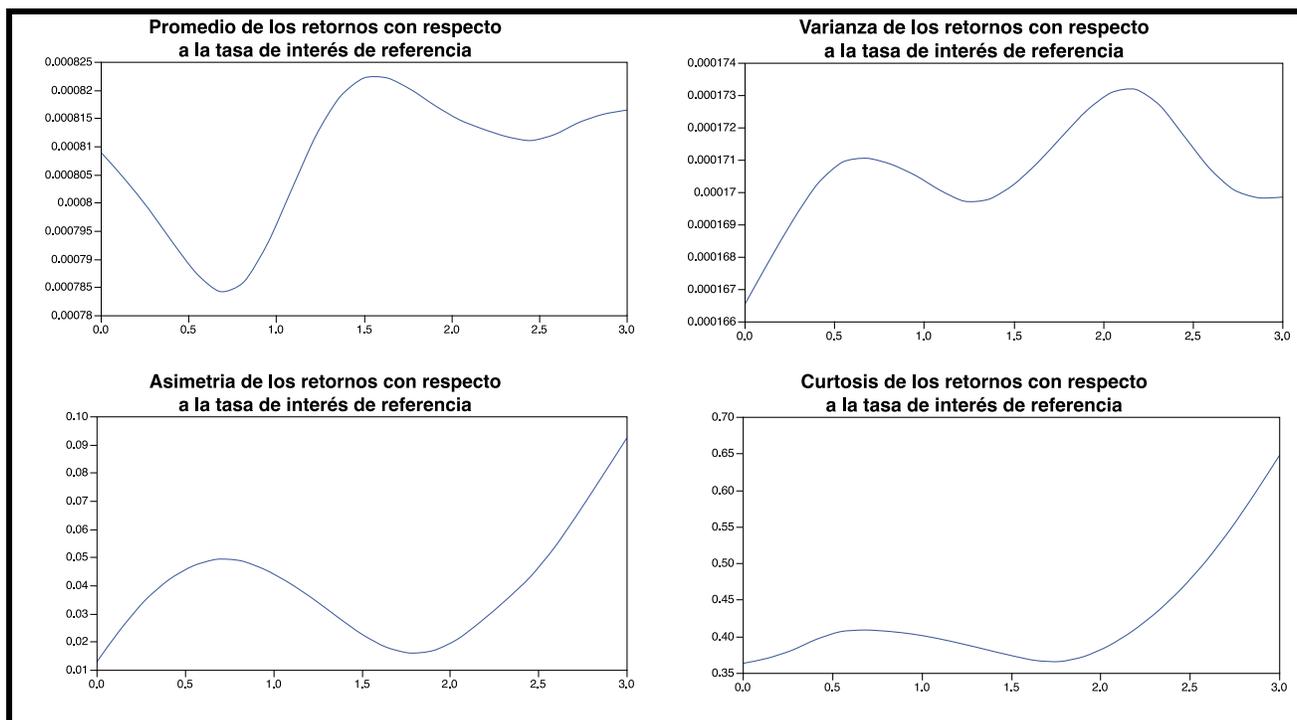


Figura 15. Relación entre la tasa de referencia y los momentos estadísticos de los retornos
Fuente: Elaboración propia

Procedimiento de ajuste de parámetros

Luego de comprender la relación entre todos los parámetros y su resultado en el mercado simulado, se puede establecer un procedimiento general para la calibración de este y cualquier

otro mercado artificial con unos momentos estadísticos definidos. Los pasos generales para el ajuste son las siguientes:

1. A partir de una serie de referencia se establece si el promedio de los retornos a simular son positivos o negativos, lo que indicará si el mercado artificial debe tener o no crecimiento.
2. Luego, dada la relación encontrada entre los momentos 1, 2 y 4, y los parámetros externos lambda y la cantidad de agentes iniciales, es posible generar una configuración inicial del mercado en función de la serie de referencia.
3. Como última etapa, se fijan los parámetros relacionados con los agentes. En una primera instancia se ajustan los relacionados con la ganancia esperada de los agentes (n_0 y k), los cuales tienen relación inversa con el promedio y directa con la varianza. Finalmente, se ajustan los parámetros relacionados con las expectativas de crecimiento del mercado, es decir sigma 1 y sigma 2.

Utilizando estas reglas, ha sido posible calibrar el mercado colombiano en cuanto a sus momentos estadísticos se refiere, con la configuración presentada en el cuadro siguiente.

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
<i>Lambda</i>	0.75
<i>Cantidad de agentes iniciales</i>	500
<i>n_0</i>	0.25
<i>k</i>	0.15
<i>Sigma 1</i>	0.6
<i>Sigma 2</i>	2.6

Cuadro 7. Resumen de parámetros elegidos

Fuente: Elaboración propia

Convergencia

Con la configuración mencionada arriba se obtiene una evolución de precios estable tal como se presenta en la figura 16, donde los momentos estadísticos muestran gran similitud con los de la serie de referencia del mercado colombiano en periodo estable.

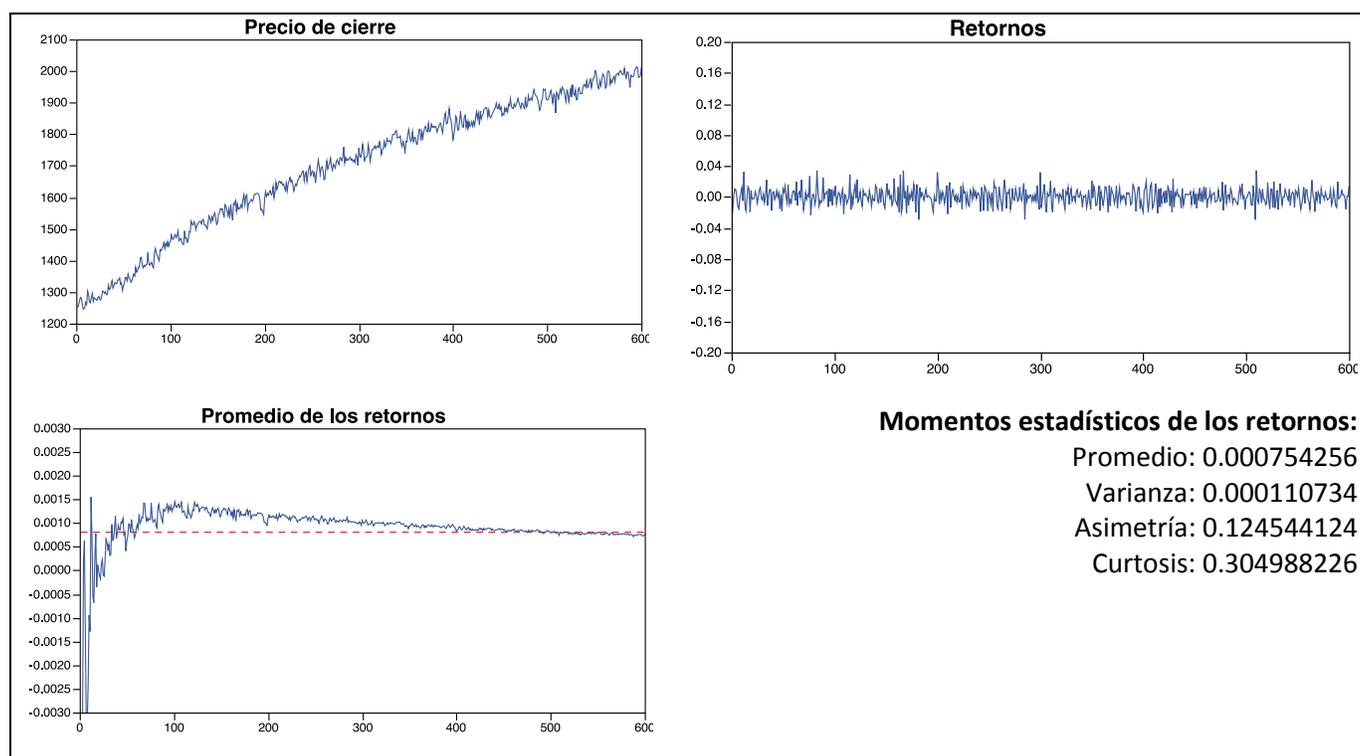


Figura 16. Evolución de precios y retornos en el mercado artificial construido

Fuente: Elaboración propia

Pruebas de normalidad y análisis de varianza

La serie de retornos obtenida mediante la simulación es comparada con la serie de referencia utilizando la prueba no paramétrica de Wilcoxon dada la no normalidad de los retornos. En el anexo 2 de este documento se presenta dicho análisis encontrando que no existen argumentos estadísticos para rechazar la hipótesis nula de que las series son iguales.

Interpretación económica de los resultados

El mercado artificial aquí construido permite realizar diversos experimentos y obtener conclusiones sobre sus características principales.

Caracterización de los agentes

Uno de los objetivos de este estudio es la identificación de los agentes por tipología en el mercado artificial que represente el IGBC, el cual es definido a partir de sigma 1 y sigma 2. El

cuadro 8 muestra la proporción de cada una de las tipologías (Técnicos, Fundamentalistas y de Ruido) presentes en el mercado artificial. Dicha caracterización constituye un aporte único de este estudio al compararlo con la literatura consultada.

<i>Tipo de Agente</i>	<i>%</i>
<i>Técnicos</i>	79.4%
<i>Fundamentalistas</i>	9.6%
<i>Ruido</i>	11.0%

Cuadro 8. Participación de los agentes en el mercado artificial
Fuente: Elaboración propia

Esta representación nos permite concluir que en el mercado colombiano en estado estable, la presencia de agentes técnicos es mucho más acentuada y que los agentes fundamentalistas no representan más del 10% de la población, es decir que el mercado colombiano está estructurado de forma mayoritaria por agentes que invierten a corto plazo y con expectativas de ganancias fijas, y no por agentes cuya estrategia es la diversificación de inversiones, con una propensión al riesgo menor dado que su horizonte es mucho mayor, partiendo de una expectativa previamente definida en cuanto a los valores fundamentales se refiere. Esta composición particular tiene como ventaja la presencia de periodos de alto crecimiento, lo que se traduce en un mercado dinámico y en desarrollo, coherente con nuestra economía emergente, sin embargo, si las condiciones externas cambian, los capitales en él presentes pueden migrar fácilmente, generando momentos de crisis que repercuten en toda la economía nacional.

Rentabilidad de los agentes

Otro aspecto evaluado es la rentabilidad de los agentes por tipología, donde se encontró que no existe un tipo de agentes que genere mayores ganancias obteniendo en todas, una rentabilidad real al final de entre 15 y 16% luego de 3 años. Un aspecto a resaltar en este punto es que los agentes de ruido tienen generalmente una ganancia superior a la de los agentes fundamentalistas, lo que se explica por la poca diferencia existente entre el peso asignado al componente fundamental y el técnico, es decir que un agente de ruido más que no valorar

estos dos componentes, los pondera iguales, lo que le permite obtener una rentabilidad relativamente mayor a la de los otros dos tipos de agentes como se muestra en la figura 17.

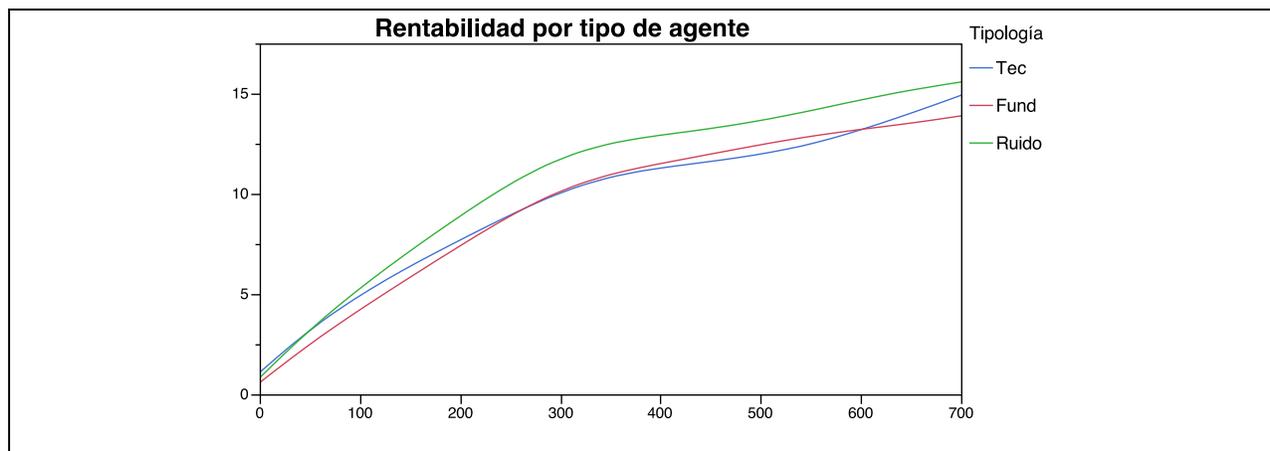


Figura 17. Evolución de la rentabilidad por tipo de agente
Fuente: Elaboración propia

Efectos en la riqueza

En cuanto a la distribución de la riqueza, la experimentación realizada demostró que sin importar si existe o no una distribución definida desde el inicio de la simulación, luego de una cantidad específica de periodos (aproximadamente 500), la distribución de la riqueza converge a Log Normal, es decir que a medida que avanza la simulación, se observa una mayor concentración de la riqueza en un número muy pequeño de agentes (como se muestra progresivamente en el anexo 4). Es por esta razón que la distribución de la riqueza inicial sirve más como factor acelerador de la convergencia a la serie de referencia, que como un diferenciador del mercado.

Generación de choques

Los parámetros estudiados hasta ahora permiten crear un mercado artificial en estado estable, sin embargo, los mercados financieros están expuestos a un sinnúmero de sucesos externos que afectan su comportamiento y por ende su resultado en términos del valor del índice y sus

retornos. Nos interesa entonces encontrar la manera de generar choques que permitan replicar estos sucesos y obtener como resultado un cambio de estado en el mercado.

Dado que los parámetros permanecen constantes a lo largo de la simulación, los choques solo pueden ser generados a partir de la percepción de los agentes. A continuación se explicará la manera de generar estos choques para producir crecimiento y crisis.

Generación de crecimiento

Intuitivamente el crecimiento es ocasionado por una percepción alcista por parte de los agentes, a partir de la cuál sus ofertas de compra y venta aumentan de valor, lo que repercute en un incremento generalizado y sostenido en los precios. Como consecuencia de este fenómeno, se aumenta el ingreso de agentes dado que la rentabilidad percibida es mas atractiva que la tasa de referencia. En este modelo artificial la percepción se afectará mediante el valor fundamental, que como se explicó en la sección 4, es actualizada periódicamente como una proyección futura del valor del índice. Simultáneamente, se disminuye el valor de la tasa de referencia para asegurar que la rentabilidad del mercado artificial sea mejor que la externa. Los choques son medidos con una variable llamada Impacto, la cual mide la proporción del incremento en el fundamental. Los resultados son analizados en forma segmentada utilizando el algoritmo ICSS (explicado en la sección 3) en busca de segmentos con varianza estable una vez ocurrido el choque. Este segmento posterior al choque debe tener un retorno promedio superior con alguna duración. Una vez transcurrido el periodo de optimismo, el mercado debe retornar a su estado estable. En la figura 18 se presenta la serie de precios y retornos afectados por choques de diferente magnitud, donde se muestra que existe una relación directa entre el impacto y el aumento sostenido en precios. Este crecimiento promedio en el valor de los retornos es presentado en forma numérica en el cuadro 9, de donde se puede deducir que la magnitud del impacto requerido para generar un crecimiento que permita pasar de la etapa B a la etapa A del IGBC, que como se explicó en la sección 3 equivale a un incremento de 0.001486 puntos, es de 4. Es importante resaltar que el objeto de este punto es identificar las condiciones necesarias para producir cambios de estado a partir de choques, más que explicar la significación y el origen de los mismos en el contexto nacional.

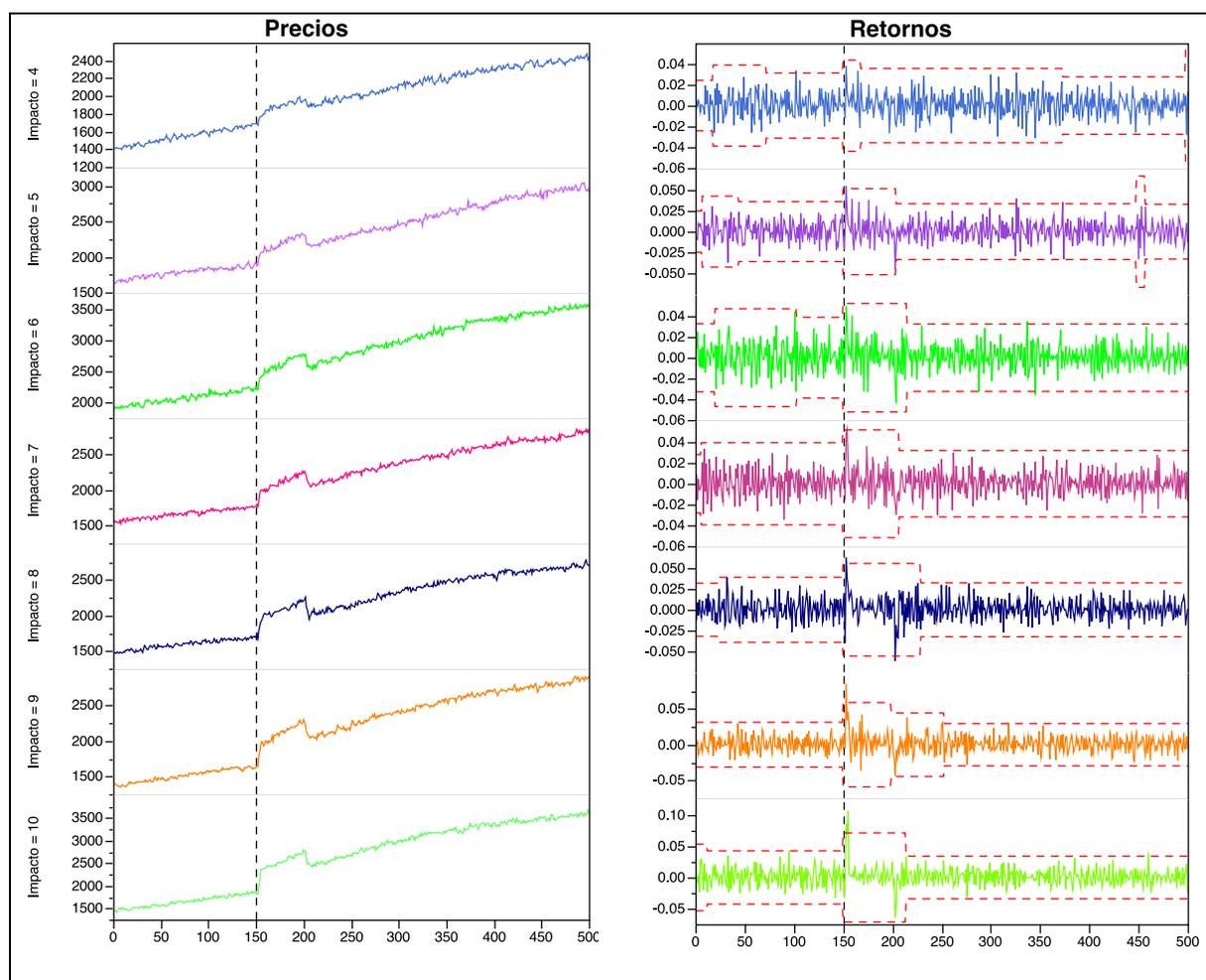


Figura 18. Evolución del precio frente a diferentes magnitudes de choques positivos
Fuente: Elaboración propia

<i>Impacto</i>	<i>Puntos de crecimiento en el promedio de los retornos</i>	<i>Duración del choque (días)</i>
2	0.0009610	48
3	0.0011000	49
4	0.0012591	51
5	0.0014098	54
6	0.0016886	65
7	0.0019108	57
8	0.0021615	58
9	0.0022952	60
10	0.0029191	64
11	0.0032502	69
12	0.0037312	72

Cuadro 9. Efecto en el crecimiento sostenido y su duración según la magnitud
Fuente: Elaboración propia

Generación de crisis

Utilizando una metodología similar a la del crecimiento, aumentando la tasa de interés de referencia y reduciendo el valor del fundamental, es posible ocasionar una caída generalizada en los precios del mercado, la cual tiene como consecuencia una salida gradual de agentes. Esta salida se da en primer lugar por los agentes que no poseen acciones y que estiman una caída futura del índice (pesimistas). Por otra parte, los agentes que poseen títulos imprimen una señal negativa en sus portafolios, la cual se representa con el parámetro individual k , que como se explicó en la sección 4, marca el gap entre la estimación futura del precio y la oferta de compra y venta. Así, un agente poseedor de un título cuya señal sea negativa, afectará su oferta de venta disminuyendo el gap, incluso vendiendo al mismo valor que supone estará el mercado ($k = 0$), afectando su rentabilidad. Al quedar sin títulos, y si su expectativa aun es bajista, saldrá del mercado. La figura 19 muestra la evolución de los precios y los retornos bajo diferentes magnitudes de impacto negativo. Apoyados en el algoritmo ICSS, es posible segmentar los retornos y establecer que efectivamente existe un decremento sostenido en los precios posterior al choque, lo que se traduce en un cambio de estado.

En cuanto a la caída en puntos, se observa una relación directa con respecto a la magnitud, similar a la encontrada en el caso del crecimiento. A partir de la información presentada en el cuadro 10, y dado que los estados definidos como nerviosismo y crisis en el IGBC exhiben promedios en los retornos de -0.002701 y -0.006636, es decir una caída de 0.0035 y 0.0074 puntos, lo que se traduce en choques negativos de magnitud 8 y 10 respectivamente.

Por último, se evaluó la cantidad de agentes por tipología antes y después de un choque negativo, encontrando que la proporción se mantiene, lo que significa que los agentes que salen por efecto de sus expectativas, no tienen relación alguna con su tipología.

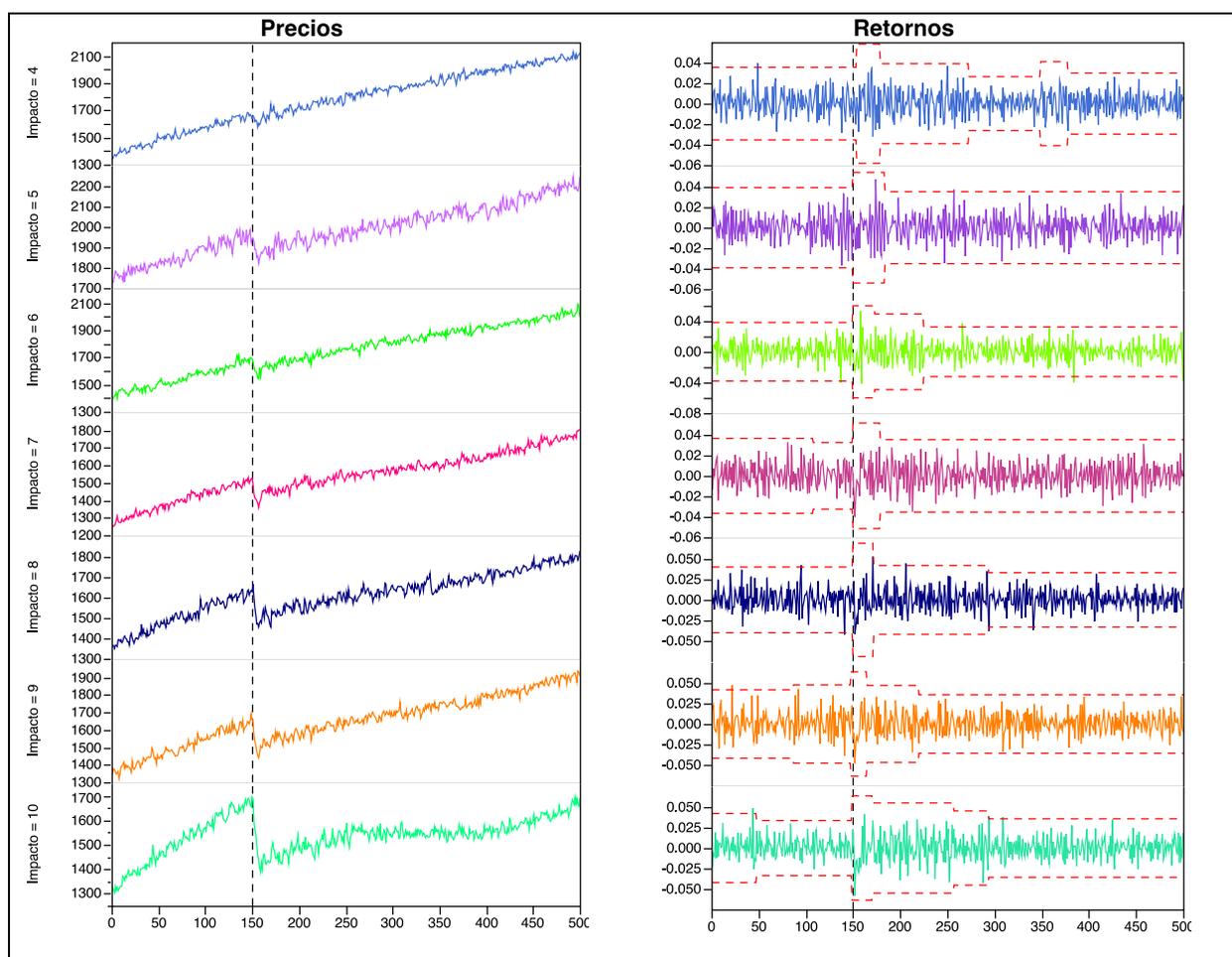


Figura 19. Evolución del precio frente a diferentes magnitudes de choques negativos
Fuente: Elaboración propia

Magnitud	Puntos de crecimiento en el promedio de los retornos	Duración del choque (días)
2	0.000419	43
3	0.000607	40
4	0.000698	25
5	0.001429	34
6	0.003184	23
7	0.002690	29
8	0.004060	22
9	0.005619	17
10	0.008179	22
11	0.011711	23
12	0.016955	21

Cuadro 10. Efecto en el decrecimiento sostenido y su duración según la magnitud
Fuente: Elaboración propia

Comparacion con otros mercados

Tomando como referencia las series de precios y retornos de otros mercados internacionales, y a partir del algoritmo ICSS, es posible generar la segmentación e identificación de las etapas de crecimiento, estabilidad, nerviosismo y crisis (A, B, C y D respectivamente). Dicha segmentación se presenta en el anexo 5 de este documento. Posteriormente, basados en el procedimiento explicado en la subsección de calibración, es posible identificar los parámetros correctos que permitan modelar dichos mercados en etapa de estabilidad. Estos parámetros pueden entonces ser comparados con los mismos encontrados en el mercado artificial del IGBC tal como se muestra en el cuadro 11, donde se compran con Standard and poors 500 (Estados Unidos), Bovespa (Brasil) e IPSA (Chile).

<i>Parámetro</i>	<i>IGBC</i>	<i>S&P</i>	<i>BOVESPA</i>	<i>IPSA</i>
<i>Lambda</i>	0.75	0.75	0.90	0.75
<i>Cantidad de agentes iniciales</i>	500	700	600	600
<i>n₀</i>	0.25	0.15	0.15	0.15
<i>K</i>	0.15	0.45	0.42	0.20
<i>Sigma 1</i>	0.6	0.5	0.5	0.5
<i>Sigma 2</i>	2.6	1.5	2.0	2.0
<i>% Agentes</i>				
<i>Técnicos</i>	79.4%	67.2%	71.4%	76.4%
<i>Fundamentalistas</i>	9.6%	20.4%	17.6%	9.8%
<i>Ruido</i>	11.0%	12.4%	11.0%	13.6%

Cuadro 11. Caracterización de diversos mercados artificiales

Fuente: Elaboración propia

En este cuadro se puede apreciar el IGBC es el mas pequeño de todos los mercados. Adicionalmente, en cuanto a la caracterización de los agentes, se observa que mercados de mayor tamaño y mas desarrollados como el S&P o BOVESPA, cuentan con una mayor cantidad de agentes fundamentalistas. Esta diferencia puede explicarse a partir de las características de los mercados emergentes, los cuales tienen mayores rentabilidades pero al mismo tiempo mayor riesgo, volatilidad y una percepción generalizada de corrupción y falta de transparencia, lo que genera que los inversionistas tomen decisiones basados mas en los argumentos técnicos que en la información fundamental de las empresas y la economía como tal (Bruner, Conroy et al. 2002). En la medida que una economía se desarrolla y se aumenta la confianza en las empresas y las instituciones, crece la cantidad de agentes fundamentales.

Sección 6. Conclusiones y recomendaciones

En este estudio se construyó un mercado artificial que permite replicar los momentos estadísticos del índice general de la bolsa de valores de Colombia IGBC, para lo cual se segmentó la serie utilizando el algoritmo ICSS, el cual permitió identificar cuatro estados: Crecimiento, Estabilidad, Nerviosismo y Crisis. El mercado artificial permite replicar los retornos del IGBC en estado estable y utilizar choques positivos y negativos de diferente magnitud para generar cambios de estados.

Entre los diferentes hallazgos obtenidos se encuentra que para asegurar la convergencia de la serie, es necesaria la presencia de fenómenos de expansión y contracción, los que aseguran un crecimiento sostenido del valor del índice y un promedio de los retornos positivo. En este aspecto se encontró que la tasa de interés de referencia no es un parámetro indispensable para replicar el IGBC.

Por otra parte se identificó que es indispensable la presencia de los tres tipos de agentes (técnicos, fundamentales y de ruido) para replicar el mercado colombiano en condiciones de estabilidad, lo que corroboró los hallazgos realizados por Brock y Hommes (1998), Chen, Lux et al (2001) y Chiarella e Iori (2002) en otros mercados financieros.

En cuanto a la composición, se encontró que el IGBC en etapa de estabilidad cuenta con un 80% de agentes técnicos, 9% fundamentalistas y 11% de ruido. En cuanto a la rentabilidad de los agentes se encontró que si bien no existe una diferencia significativa entre la rentabilidad de los agentes y su tipología, los agentes de ruido tienden a obtener ingresos levemente superiores, es decir que una estrategia que conlleva a la maximización de ingresos es la ponderación equivalente de ambas estrategias, técnica y fundamentalista.

Otra conclusión de gran importancia está relacionada con la distribución de la riqueza, la cual se descartó como parámetro indispensable para asegurar que el mercado sea replicado. No obstante este hecho, se encontró que una vez converge la serie, la distribución de los recursos es log normal, lo que significa gran acumulación de recursos en pocos agentes. Esta situación se repite independientemente de la distribución de partida.

En cuanto a los cambios de estado, se encontró que mediante el mecanismo de choques positivos y negativos de diferente magnitud, es posible generar cambios de etapa del mercado entre estabilidad y crecimiento, y entre estabilidad y crisis. En esta generación de choques se encontró además que el mercado no cambia su composición de agentes al momento de crisis. Finalmente se comparó el mercado colombiano con otros mercados internacionales encontrando que mercados mas desarrollados cuentan con mayor cantidad de agentes fundamentales, lo que podría explicarse en la confianza de los agentes en los fundamentales del mercado, la cuál aumenta en la medida que las economías se encuentran mas desarrolladas.

Futuras contribuciones a este modelo podrían incluir diferentes tipos de acciones, de manera que los agentes incorporen mecanismos de administración de portafolio. Otra contribución puede ser la caracterización de los agentes partiendo en etapas diferentes a la estabilidad, como el crecimiento o la crisis.

Finalmente se sugiere que modelos mas avanzados permitan medir y calibrar impactos positivos y negativos con hechos específicos de la economía nacional e internacional, de manera que permita entender la significación de los choques e incluso anticipar el resultado del mercado frente a un suceso específico.

Sección 7. Bibliografía y Fuentes Estadísticas

- Alonso, J. C. and J. C. García (2008). "¿Qué tan buenos son los patrones del IGBC para predecir su comportamiento?: Una aplicación con datos de Alta Frecuencia." Borradores de Economía y Finanzas(14).
- Arthur, B. (1994). "Inductive Reasoning and Bounded Rationality." The American Economic Review **84**(2).
- Ayala Sánchez, M. (2006). "Usando redes neuronales en espacios no estándar para la predicción en series de tiempo financieras." Documentos de trabajo, Universidad Sergio Arboleda(004990).
- Brock, W. and C. Hommes (1998). "Heterogeneous Beliefs and Routes to Chaos in a Simple Asset Pricing Model." Journal of Economic Dynamics and Control **22**: 1235-1274.
- Bruner, R. F., R. M. Conroy, et al. (2002). "Introduction to 'Valuation in Emerging Markets'." Emerging Markets Review **3**(4): 310-324.
- Casti, J. (2004). "The Simply Complex." Complexity **4**(4).
- Challet, D. and Y. C. Zhang (1997). "Emergence of cooperation and organization in an evolutionary mix game." Physica A **246**: 407-418.
- Chen, S.-H., T. Lux, et al. (2001). "Testing for non-linear structure in an artificial financial market." Journal of Economic Behavior & Organization **46**: 327-342.
- Chiarella, C. and G. Iori (2002). "A simulation analysis of the microstructure of double auction." Quantitative Finance **2**(5): 346-353.
- Cruz, E. A., J. H. Restrepo, et al. (2009). "Pronóstico del índice general de la bolsa de valores de Colombia usando redes neuronales." Scientia et Technica, Universidad Tecnológica de Pereira **XV**(41): 129-134.
- Ehrentreich, N. (2008). Agent-Based Modeling: The Santa Fe Institute Artificial Stock Market Model Revisited. Berlín, Springer-Verlag.
- Farmer, D. and S. Joshi (2002). "The Price dynamics of common trading strategies." Journal of Economic Behavior and Organization **49**: 149-171.

- Gou, C. (2006). "Deduction of initial strategy distributions of agents in mix-game models." Physica A **371**: 633–640.
- Gou, C. (2006). Predictability of Shanghai Stock Market by Agent-based Mix-game Model.
- Gou, C. (2006). "The Simulation of Financial Markets by an Agent-Based Mix-Game Model." Journal of Artificial Societies and Social Simulation.
- Gou, C. (2007). "The relations between agent performances and their intellectual abilities in mix-games." Physica A **378**: 459-464.
- Gou, C., F. Chen, et al. (2008). "Prediction of stock markets by the evolutionary mix-game model." Physica A **387**: 3594-3604.
- Hart, M. L., D. Lamper, et al. (2002). "An investigation of crash avoidance in a complex system." Physica A(316): 649-661.
- Johansen, A., O. Ledoit, et al. (2000). "Crashes as Critical Points." International Journal of Theoretical and Applied Finance **3**(2): 219-255.
- LeBaron, B. (2002). Calibrating an Agent-based Financial Market. Waltham, MA, Brandeis University.
- LeBaron, B. (2005). Agent-based Computational Finance. Waltham, MA.
- LeBaron, B. (2006). Agent-based Computational Finance. Handbook of Computational Economics. L. T. K. L. Judd, Elsevier. **2**: 1187-1233.
- LeBaron, B., B. Arthur, et al. (1999). "Time Series Properties of an Artificial Stock Market." Journal of Economic Dynamics & Control **23**: 1487-1516.
- Levy, M., H. Levy, et al. (1994). "A microscopic model of the stock market: Cycles, booms, and crashes." Economics Letters **45**(1): 103–111.
- Matassini, L. and F. Franci (2001). "On Financial markets trading." Physica A **289**: 526-542.
- Ospina Holguín, J. H. and E. Caicedo Cerezo (2008). "Un modelo estocástico sobre la predictibilidad del signo del retorno y su relación con la no linealidad en media." Cuadernos de Administracion **21**(36): 11-35.
- Pérez Ramirez, F. O. and C. A. Grajales Correa (2007). "Métodos Discretos y Continuos para modelar la Volatilidad Estocástica de los rendimientos de series financieras." Cuadernos de Administracion **21**(36).

- Raberto, M., S. Cincotti, et al. (2001). "Agent-based simulation of a financial market." Quantitative Finance Papers.
- Rodríguez Restrepo, A. (2007). "Análisis de la volatilidad del IGBC en época de crisis." Revista de Economía & Administración **4**(2).
- Rogers, A. and P. Von Tessen (2004). Multi-objective calibration for agent-based models. Erlangen, San Diego (CA), Publishing House.
- Sornette, D. and A. Johansen (1997). "Large Financial Crashes." Physica A **245**: 411-422.
- Tay, N. and S. C. Linn (2001). "Fuzzy Inductive Reasoning, Expectation Formation and the Behavior of Security Prices." Journal of Economic Dynamics & Control **25**: 321–362.
- Tesfatsion, L. (2002). "Agent-based computational economics: growing economies from the bottom up." Artificial Life **8**(1): 55-82.
- Uribe, J. M. (2007). "Caracterización del Mercado Accionario Colombiano 2001-2006: Un Análisis Comparativo." Borradores de Economía.
- Yamamoto, R. and B. LeBaron (2009). "Order-splitting and long-memory in an order-driven market." The European Physical Journal B **73**: 51-57.
- Zschischang, E. and T. Lux (2001). "Some new results on the Levy, Levy and Solomon microscopic stock market model." Physica A **291**: 563–573.

Índices de Bolsa de Valores de Colombia <http://www.bvc.com.co>

Anexo 1 – Algoritmo de calce de subasta explicado con ejemplo

1. El algoritmo determina como precio de equilibrio aquel al cual se maximiza la cantidad adjudicada.

Libro Público

Qc	Pc	Pv	Qv
1,000	9,300		
		9,250	1,000
1,000	9,200		
1,000	9,100	9,100	3,500

Precio	Qc	Qv	Calce
9,300	1,000	4,500	1,000
9,250	1,000	4,500	1,000
9,200	2,000	3,500	2,000
9,100	3,000	3,500	3,000

2. Si existe más de un precio que cumple con el primer objetivo, escoge el precio que genera el menor desbalance entre compra y venta, es decir, la menor diferencia entre el volumen ofrecido y el demandado susceptible de ser negociado al mismo precio.

Libro Público

Qc	Pc	Pv	Qv
500	9,350		
1,000	9,300		
		9,250	1,000
1,000	9,200		
1,000	9,100	9,100	3,500
1,000	9,000	9,000	3,500

Precio	Qc	Qv	Calce	Desbalance
9,350	500	8,000	500	7,500
9,300	1,500	8,000	1,500	6,500
9,250	1,500	8,000	1,500	6,500
9,200	2,500	7,000	2,500	4,500
9,100	3,500	7,000	3,500	3,500
9,000	4,500	3,500	3,500	1,000

3. En caso que el remanente sea igual se evalúa la siguiente situación en el mercado:

- Sobre oferta: Precio más bajo.
- Sobre demanda: Precio más alto.

Libro Público

Qc	Pc	Pv	Qv
1,200	9,300		
300	9,300		
500	9,250		
		9,200	1,000
		9,200	800
		9,300	2,500
		9,300	500

Precio	Qc	Qv	Calce	Desbalance
9,300	1,500	4,800	1,500	3,300
9,250	2,000	1,800	1,800	200
9,200	2,000	1,800	1,800	200

4. En caso que exista un balance entre la oferta y la demanda, el precio de equilibrio será el precio promedio entre los precios que se encuentren en disputa.

Libro Público

Qc	Pc	Pv	Qv
1,200	9,300		
300	9,300		
500	9,250		
		9,200	700
		9,200	1,300
		9,300	2,500
		9,300	500

Precio	Qc	Qv	Calce	Desbalance
9,300	1,500	5,000	1,500	3,500
9,250	2,000	2,000	2,000	0
9,200	2,000	2,000	2,000	0

9,225

Anexo 2 – Código de programación utilizado en NetLogo

```
1 extensions [matrix table]
2 breed [Acciones Accion]
3 breed [Agentes Agente]
4
5 globals [
6   choque?
7   t_choque
8   array_ref
9   historic_price
10  historic_rent
11  historic_trans
12  book_buy
13  book_sell
14  daily_book
15  lin_trend_fund
16  actual_price
17  actual_volume
18  ret_price
19  ret_db
20  ret_medio
21  number_agents
22  number_acciones
23  min_agentes
24  global_fund
25  fund?
26  rent_db
27  index_array]
28
29
30 Acciones-own [
31  precio
32  estado
33  propietario]
34
35 Agentes-own [
36  dinero_inic
37  dinero
38  patrimonio
39  mi_rendimiento
40  tipo
41  g1
42  g2
43  Li
44  ki
45  rLi
46  ni
47  ei
48  ri
49  pt+1
50  ai
51  bi
52  portafolio
53  desde
54  senal]
55
56 to setup
57   __clear-all-and-reset-ticks
58   file-close-all
59   set historic_price []
60   set historic_rent []
61   set ret_db []
62   set rent_db []
63   set index_array []
64   set choque? 0
65   set array_ref [] ;Fund_perc, Tasa_ref
```

```

66 ;if Crecimiento = true [set fund? true]
67 set fund? true
68 set min_agentes int(Agentes_Iniciales / 2)
69 set global_fund Fundamental
70 set historic_trans [] ;Formato por posiciones:
71           ; 0      1      2      3      4
72           ;Periodo De Para Titulo Valor
73 set book_buy [] ;Formato por posiciones
74           ; 0      1      2      3
75           ;Valor Agente Cantidad Vigente_Hasta
76 set book_sell [] ;Formato por posiciones
77           ; 0      1      2
78           ;Valor Agente Titulo
79 ask patches [set pcolor white]
80 setup_plots
81 gen_hist_price
82 setup_indice
83 set-default-shape turtles "Person"
84 create-Agentes Agentes_Iniciales [
85   setxy random-pxcor random-pycor
86   set portafolio []
87   update_atributos
88   update_expectations
89   allocate_money
90   set desde ticks]
91 foreach [who] of agentes [
92   create-Acciones 1 [
93     set hidden? true
94     set size 0.1
95     set estado "vendida"
96     let ac who
97     set propietario ?
98     ask agente ? [
99       set dinero dinero - last(historic_price)
100      let tempar []
101      set tempar lput(ac) tempar
102      set tempar lput(last(historic_price)) tempar
103      set tempar lput(ticks) tempar
104      set portafolio lput(tempar) portafolio
105      set shape "person student"
106      ]
107     set precio last(historic_price)]
108   ]
109   update_patrimonio
110   update_plots 2
111   set actual_price last(historic_price)
112 end
113
114 to go
115   if ticks = 0 and Modo = "Traza" [
116     file-close-all
117     if file-exists? "ASM.txt" [file-delete "ASM.txt"]
118     file-open "ASM.txt"
119     file-write "Per"
120     file-write "Tasa"
121     file-write "Tec"
122     file-write "Fund"
123     file-write "Ruido"
124     file-write "Pt"
125     file-write " "
126     file-print "Ret"]
127   if Disp_val? = True
128   [print (word"Periodo " ticks)]
129   if ticks = 0 and Disp_val? = True
130   [print (word"El precio inicial es de " last(historic_price))]
131   ask agentes [update_expectations]

```

```

132 start_bids
133 transar
134 update_price
135 update_patrimonio
136 update_plots 3
137 collect_statistics
138 clean_db
139 if count(Acciones with [estado = "libre"]) = 0
140 [crear_titulos]
141 if choque? != 0 [
142     ifelse t_choque = 0 [
143         set choque? 0
144         set global_fund lin_trend_fund
145         set T_Ref_% item 1 array_ref] [
146         if choque? = 1 [
147             set global_fund (lin_trend_fund * 1.1)
148             repeat 2 [create_new_agents]]
149         set t_choque t_choque - 1]]
150 tick
151 end
152
153 to create_new_agents
154     create-Agentes 1 [
155         setxy random-pxcor random-pycor
156         set portafolio []
157         update_atributos
158         update_expectations
159         allocate_money
160         let tt length(portafolio) * last(historic_price)
161         set patrimonio int(dinero + tt)
162         set desde ticks]
163 end
164
165 to update_atributos
166     set ni abs(random-normal 0 n0) ;chiarella lo usa solo y LeBaron con ABS
167     set g1 abs(random-normal 0 sigma_1)
168     set g2 random-normal 0 sigma_2
169     set ki 0.001 + random-float k
170     set ei random-normal 0 1 ;Este valor se re-calcula a cada instante
171     set li 1 + random L_max
172     ifelse abs(abs(g1) - abs(g2)) <= ruido
173     [set tipo "Noisy"]
174     [ifelse abs(g1) > abs(g2) [set tipo "Fundamentalista"]
175         [ifelse g2 > 0
176             [set tipo "Trend Chasing"]
177             [set tipo "Chartist"]]]]
178     if tipo = "Fundamentalista"
179     [set color Yellow]
180     if tipo = "Noisy"
181     [set color black]
182     if tipo = "Trend Chasing"
183     [set color blue]
184     if tipo = "Chartist"
185     [set color red]
186
187 end
188
189 to gen_hist_price
190     let j 0
191     let p0 Fundamental
192     let p1 p0
193     while [j < 200]
194     [
195         let randval random-normal 0.000812358520455973 0.0109806285398027
196         if length(index_array) > 0 [
197             set randval random-normal (item 1 index_array) sqrt (item 4 index_array)]

```

```

198   ifelse j != 199 [
199     set historic_rent lput(randval) historic_rent
200     set p1 p0 + p0 * last(historic_rent)
201     set historic_price lput(p1) historic_price]
202   [set p1 aprox (p0 + p0 * randval) tick_size
203     set historic_price lput(p1) historic_price
204     set historic_rent lput(ln(p1 / p0)) historic_rent]
205   set p0 p1
206   update_plots 1
207   set j j + 1]
208 end
209
210 to setup_plots
211   set-current-plot "Precio"
212   set-plot-y-range (Fundamental - 1000) (Fundamental + 1000)
213   set-current-plot "Retornos"
214   set-plot-y-range -.03 .03
215   set-current-plot "Retorno Promedio"
216   set-plot-y-range 0 .002
217   set-current-plot "Rentabilidad"
218   set-plot-y-range 0 5
219 end
220
221 to allocate_money
222   let m 0
223   let d 1
224   ifelse Media_riqueza_inicial > global_fund * 4
225   [set m Media_riqueza_inicial]
226   [set m global_fund * 4]
227   set d m / 10
228   if Distribucion_riqueza_inicial = "Constante" [set dinero m]
229   if Distribucion_riqueza_inicial = "Normal" [set dinero round(random-normal m d)]
230   if Distribucion_riqueza_inicial = "Uniforme"
231   [set dinero round( m * 3 / 4 + random-float (1 / 2 * m))]
232   if Distribucion_riqueza_inicial = "Pareto"
233   [set dinero round((m * 0.9) / ((random-float 1) ^ (1 / 5)))]
234   if Distribucion_riqueza_inicial = "Lognormal"
235   [set dinero round(exp(ln(m) - (1 / 2) * ln(1 +
236     (d / m) ^ 2) + (random-normal 0 1) * (ln(1 + (d / m) ^ 2)) ^ (1 / 2)))]
237   set dinero_inic dinero
238 end
239
240 to update_expectations
241   let flag 0
242   let q 0
243   while [flag = 0] [
244     set ei random-normal 0 1 ;Actualiza el error a cada instante
245     set rLi update_L Li
246     set ri g1 * ln(global_fund / last(historic_price)) + g2 * rLi + ni * ei
247     set pt+1 last(historic_price) * exp(ri)
248     if (pt+1 >= 0 and pt+1 <= last(historic_price) * 50) [
249       ifelse senal = 0 [
250         set bi aprox int(pt+1 * (1 - ki)) tick_size
251         set ai aprox int(pt+1 * (1 + ki)) tick_size
252         set flag 1] [
253         let ktemp random-float ki
254         ;Quien compra quiere comprar solo si es muy barato
255         set bi aprox int(pt+1 * (1 - 1 * ki)) tick_size
256         ;Quien vende quiere vender asi sea perdiendo
257         set ai aprox int(pt+1 * (1 - 0.5 * ki)) tick_size
258         set flag 1]]
259   ]
260 end
261
262 to start_bids
263   set book_buy []

```

```

264 set book_sell []
265 ask agentes [
266   let rr random-float 1
267   if rr <= lambda [
268     if length(portafolio) > 0
269     [let i 0
270      while [i < length(portafolio)]
271        [let pa item 1 (item i portafolio)
272         ;Si el valor de compra de la accion es mayor que el precio futuro => VENDE
273         if (pa > pt+1 or (senal < 0 and ai < pa))
274           [let a2 first(item i portafolio)
275            let tempar []
276            set tempar lput(ai) tempar
277            set tempar lput(who) tempar
278            set tempar lput(a2) tempar
279            set book_sell lput(tempar) book_sell]
280            set i i + 1]]
281     ]]
282
283 if count(acciones with [estado = "libre"]) > 0 [
284   let tempar [who] of acciones with [estado = "libre"]
285   let i 0
286   while [i < length(tempar)] [
287     let acc item i tempar
288     let my_array []
289     set my_array lput([precio] of accion acc) my_array
290     set my_array lput("B") my_array
291     set my_array lput(item i tempar) my_array
292     set book_sell lput my_array book_sell
293     set i i + 1]]
294
295 ask agentes [
296   let rr random-float 1
297   if (rr <= lambda or senal > 0) and length(book_sell) > 0 [
298     let book_temp map [first ?] book_sell
299     if (pt+1 > min(book_temp) or senal < 0) and (dinero > bi and bi > 0)
300     [ ;Si hay acciones a la venta a menor precio que su expectativa => COMPRA
301      let tempar []
302      set tempar lput(bi) tempar
303      set tempar lput(who) tempar
304      set tempar lput(int(dinero / bi)) tempar
305      set tempar lput(ticks + 1) tempar
306      set book_buy lput tempar book_buy]
307     ]
308   ]
309
310 set book_buy sort-by [first ?1 < first ?2] book_buy
311 set book_sell sort-by [first ?1 < first ?2] book_sell
312 set book_buy filter [first ? > 0] book_buy
313 set book_sell filter [first ? > 0] book_sell
314
315 if Disp_Val? = true [
316   print (word "El libro de compra es ")
317   print book_buy
318   print (word "El libro de venta es ")
319   print book_sell]
320 end
321
322 to transar
323 let t ticks
324 set actual_volume 0
325 if length(book_buy) > 0 [
326   ;Aquí debemos comenzar con el algoritmo de calce de subastas
327   ;1) Ordenar todas las ofertas de compra y venta de mayor a menor
328   let tempar_prix []
329   let filter_book_sell (filter [? <= (max(map [first ?] book_buy))] map[first ?] book_sell)

```

```

330 set tempar_prix reverse(sort(sentence (map [first ?] book_buy) filter_book_sell))
331 set tempar_prix remove-duplicates tempar_prix
332
333 ;2) Por cada precio, crear un arreglo temporal que contenga 5 posiciones:
334 ;2.1 Precio
335 ;2.2 Qc
336 ;2.3 Qv
337 ;2.4 Calce
338 ;2.5 Desbalance
339 let tempar_prix_3 []
340 let i 0
341 let meanprix 0
342 while [i < length(tempar_prix)] [
343   let tempar_prix_2 [0 0 0 0 0]
344   set tempar_prix_2 replace-item 0 tempar_prix_2 (item i tempar_prix)
;Precio
345   set tempar_prix_2 replace-item 1 tempar_prix_2 sum(map [item 2 ?] (filter [first ? >= (item i
tempar_prix)] book_buy)) ;Qc
346   set tempar_prix_2 replace-item 2 tempar_prix_2 length(filter [? <= (item i tempar_prix)] (map
[first ?] book_sell)) ;Qv
347   let calce item 1 tempar_prix_2
348   if item 2 tempar_prix_2 < calce [set calce item 2 tempar_prix_2]
349   set tempar_prix_2 replace-item 3 tempar_prix_2 calce
;Calce
350   let maxq item 1 tempar_prix_2
351   if item 2 tempar_prix_2 > maxq [set maxq item 2 tempar_prix_2]
352   set tempar_prix_2 replace-item 4 tempar_prix_2 (maxq - calce)
;Desbalance
353   set tempar_prix_3 lput tempar_prix_2 tempar_prix_3
354   set i i + 1]
355
356 ;Ahora se elige el mayor calce con el menor desbalance.
357 ifelse length(tempar_prix) > 0 [
358   set daily_book matrix:from-row-list tempar_prix_3
359   if Disp_Val? = true
360   [print matrix:pretty-print-text daily_book]
361   let col_max matrix:get-column daily_book 3
362   let max_val max(col_max)
363   if Disp_Val? = true
364   [print (word "El calce maximo es " max_val)]
365   let tempar_prix_5 []
366   set i 0
367   while [i < length(tempar_prix_3)] [
368     if item 3 (item i tempar_prix_3) = max_val
369     [set tempar_prix_5 lput(item i tempar_prix_3) tempar_prix_5]
370     set i i + 1]
371   if Disp_Val? = true [print (word "El libro depurado es")]
372   let daily_book2 matrix:from-row-list tempar_prix_5
373   if Disp_Val? = true
374   [print matrix:pretty-print-text daily_book2]
375   let col_min matrix:get-column daily_book2 4
376   let min_val min(col_min)
377   if Disp_Val? = true
378   [print (word "El valor minimo es " min_val)]
379
380   let tempar_prix_6 []
381   set i 0
382   while [i < length(tempar_prix_5)][
383     if item 4 (item i tempar_prix_5) = min_val
384     [set tempar_prix_6 lput(item i tempar_prix_5) tempar_prix_6]
385     set i i + 1]
386   if Disp_Val? = true
387   [print (word "Finalmente")]
388   let daily_book3 matrix:from-row-list tempar_prix_6
389   if Disp_Val? = true
390   [print matrix:pretty-print-text daily_book3]

```

```

391
392   let temp_ar_prix_7 []
393   set i 0
394   while [i < length(temp_ar_prix_6)] [
395     set temp_ar_prix_7 lput(item 0 (item i temp_ar_prix_6)) temp_ar_prix_7
396     set i i + 1]
397   set mean_prix aprox mean(temp_ar_prix_7) tick_size
398 ]
399 [set mean_prix last(historic_price)]
400 if Disp_Val? = true [print (word "El precio final de mercado debe ser " mean_prix)]
401 let book_buy2 filter [first ? >= mean_prix] book_buy
402 let temp_book []
403 foreach (filter [first ? > mean_prix] book_buy2) [
404   set i 0 while [i < item 2 ?]
405   [let temp_ar replace-item 2 ? 1
406     set temp_book lput(temp_ar) temp_book
407     set i i + 1]]
408 set book_buy2 sort-by [first ?1 > first ?2] temp_book
409 let book_sell2 sort-by [first ?1 < first ?2] (filter [first ? <= mean_prix] book_sell)
410 if length(book_buy2) > 0 and length(book_sell2) > 0 [
411   set i 0
412   let l1 length(book_buy2)
413   if length(book_sell2) < l1
414   [set l1 length(book_sell2)]
415   while [i < l1] [
416     let ac (item 2 (item i book_sell2))
417     let vendedor (item 1 (item i book_sell2))
418     let comprador (item 1 (item i book_buy2))
419     ;La Accion
420     ask accion (item 2 (item i book_sell2)) [
421       set estado "vendida"
422       set precio mean_prix
423       set propietario comprador]
424     ;El que vende
425     if vendedor != "B" [
426       ask agente vendedor [
427         set dinero dinero + mean_prix
428         let p position ac (map [first ?] portafolio)
429         set portafolio remove-item p portafolio
430         if length(portafolio) = 0
431         [set shape "person"]]
432     ;El que compra
433     ask agente comprador [
434       set dinero dinero - mean_prix
435       let temp_ar []
436       set temp_ar lput(ac) temp_ar
437       set temp_ar lput(mean_prix) temp_ar
438       set temp_ar lput(ticks) temp_ar
439       set portafolio lput(temp_ar) portafolio
440       set shape "person student"]
441     let temp_ar []
442     set temp_ar lput(ticks) temp_ar
443     set temp_ar lput(vendedor) temp_ar
444     set temp_ar lput(comprador) temp_ar
445     set temp_ar lput(ac) temp_ar
446     set temp_ar lput(mean_prix) temp_ar
447     set historic_trans lput temp_ar historic_trans
448     set i i + 1]
449   ]
450 set actual_volume length(map [last ?] (filter [first ? = ticks] historic_trans))
451 if Disp_Val? = true [print (word "El total de transacciones es de " actual_volume)]
452 ]
453 end
454
455 to update_price
456 let pm 0

```

```

457 let lp last(historic_price)
458 ifelse actual_volume > 0
459 [set pm last(last(historic_trans))]
460 [
461   ifelse length(book_sell) > 0 and length(book_buy) > 0 [
462     let am max(map [first ?] book_buy)
463     let bm min(map [first ?] book_sell)
464     set pm aprox ((am + bm) / 2) tick_size]
465   [set pm last(historic_price)]
466 ]
467 let ren ln(pm / lp)
468 set historic_price lput pm historic_price
469 set historic_rent lput ren historic_rent
470 if length historic_rent >= 300
471 [set ret_db lput ren ret_db]
472 if Disp_val? = true
473 [print (word"Y el nuevo precio al terminar transacciones es de " last(historic_price))]
474 let forecast matrix:forecast-linear-growth historic_price
475 ifelse fund? = true [
476   set lin_trend_fund aprox first(forecast) tick_size
477   if choque? = 0 [
478     set global_fund lin_trend_fund
479     set array_ref []
480     set array_ref lput global_fund array_ref
481     set array_ref lput T_Ref_% array_ref]
482 ]
483 [set lin_trend_fund global_fund]
484 end
485
486 to clean_db
487   if length(historic_price) > 300 [
488     set historic_price sublist historic_price (length(historic_price) - 300) (length(historic_price))
489     set historic_rent sublist historic_rent (length(historic_rent) - 300) (length(historic_rent))]
490   set historic_trans []
491   set daily_book []
492   set book_buy []
493   set book_sell []
494 end
495
496 to update_plots [a]
497 if a = 1 [
498   set-current-plot "Retornos"
499   set-current-plot-pen "default"
500   if length(historic_price) > 200
501   [set-plot-pen-color 105]
502   plot last(historic_rent)]
503
504 set-current-plot "Precio"
505 if length(historic_price) > 200
506 [set-plot-pen-color 105]
507 plot last(historic_price)
508
509 if a = 2 or a = 3
510 [
511   set-current-plot "Retornos"
512   set-current-plot-pen "default"
513   if length(historic_price) > 200
514   [set-plot-pen-color 105]
515   plot last(historic_rent)
516
517   if Modo = "Traza" and ticks > 100 [
518     file-write ticks
519     file-write T_Ref_%
520     file-write (count agentes with [tipo = "Trend Chasing"])
521     + count agentes with [tipo = "Chartist"])
522     file-write count agentes with [tipo = "Fundamentalista"]

```

```

523   file-write count agentes with [tipo = "Noisy"]
524   file-write last(historic_price)
525   file-write " "
526   file-print last(historic_rent)]
527
528   set-current-plot "Agentes por tipologia"
529   set-current-plot-pen "Tec"
530   plot (count agentes with [tipo = "Trend Chasing"])
531   + count agentes with [tipo = "Chartist"])
532   set-current-plot-pen "Fund"
533   plot count agentes with [tipo = "Fundamentalista"]
534   set-current-plot-pen "Noisy"
535   plot count agentes with [tipo = "Noisy"]
536   set-current-plot "Retorno Promedio"
537   if ticks >= 150 [
538     if length(index_array) > 0 [
539       set-current-plot-pen "A. Crec."
540       plot item 0 index_array
541       set-current-plot-pen "B. Calma"
542       plot item 1 index_array
543       set-current-plot-pen "C. Nerv."
544       plot item 2 index_array
545       set-current-plot-pen "D. Crisis"
546       plot item 3 index_array]
547     set-current-plot-pen "Simulado"
548     plot ret_medio]
549
550   set-current-plot "Rentabilidad"
551   set-current-plot-pen "Rentabilidad"
552   plot mean([mi_rendimiento] of agentes) * 100
553   set-current-plot-pen "Rent media"
554   ifelse length(rent_db) > 0 and ticks > 0 [plot mean rent_db]
555   [plot 0]
556 ]
557 end
558
559 to update_patrimonio
560   ask agentes [
561     let tt length(portafolio) * last(historic_price)
562     set patrimonio int(dinero + tt)
563     set mi_rendimiento ((patrimonio / dinero_inic) - 1; * (ticks - desde) / 244) - 1]
564 ;Ahora evaluamos la expansion y contraccion del mercado;
565 set rent_db lput (mean([mi_rendimiento] of agentes) * 100) rent_db
566 if Crecimiento = True and ticks > 100 [
567   let ren mean([mi_rendimiento] of agentes) * 100
568   if mean(rent_db) > ren [set ren mean rent_db]
569   if count(agentes with [length(portafolio) = 0 and pt+1 < actual_price]) > 0 and
570   count(agentes) > min_agentes [
571     if (ren < T_Ref_% ) [
572       let n int((T_Ref_% - ren) / 100 * count(agentes)) + 1
573       if n > count(agentes with [length(portafolio) = 0]) [set n count(agentes with
574       [length(portafolio) = 0])]
575       if count(agentes) - n < min_agentes [set n count(agentes) - min_agentes]
576       ask n-of n agentes with [length(portafolio) = 0] [die]
577     ]
578   ]
579   if (update_rent >= (T_Ref_% / 100)) [
580     create_new_agents
581     ask agentes [set senal 0]]
582 ]
583 end
584
585 to collect_statistics
586   set actual_price last(historic_price)
587   set ret_price last(historic_rent)
588   ifelse length rent_db > 0

```

```

589 [set ret_medio mean(ret_db)]
590 [set ret_medio 0]
591 set number_agents count(agentes)
592 set number_acciones count(acciones)
593 end
594
595
596 to crear_titulos
597   create-Acciones 10 [
598     set size 0.1
599     set hidden? true
600     set estado "libre"
601     set propietario "B"
602     set precio last(historic_price)]
603 end
604
605 to generar_pos
606   ifelse choque? = 0 [
607     set choque? 1
608     set T_Ref_% T_Ref_% / 2
609     set t_choque 80]
610   [set choque? 0
611     set T_Ref_% item 1 array_ref]
612 end
613
614 to generar_neg
615   ifelse choque? = 0 [
616     set choque? -1
617     set global_fund (global_fund * 0.8)
618     set T_Ref_% int(mean([mi_rendimiento] of agentes) * 100) * 1.2
619     set t_choque 10]
620   [set choque? 0
621     set global_fund lin_trend_fund
622     set T_Ref_% item 1 array_ref]
623 end
624
625 to setup_indice
626   if Indice = "IGBC" [
627     set index_array lput 0.00229 index_array
628     set index_array lput 0.0008123 index_array
629     set index_array lput -0.0027 index_array
630     set index_array lput -0.0066 index_array
631     set index_array lput 0.0001205 index_array
632     if modo = "Indice" [
633       set Distribucion_riqueza_inicial "Normal"
634       set Agentes_Iniciales 500
635       set Lambda 0.75
636       set Tick_size 1
637       set Sigma_1 0.6
638       set Sigma_2 2.6
639       set n0 0.25
640       set k 0.15
641       set L_max 50
642       set Ruido 0.2
643       set Crecimiento true
644       set T_Ref_% 0.75]]
645   if Indice = "S&P500" [
646     set index_array lput 0.00062 index_array
647     set index_array lput 0.0003008 index_array
648     set index_array lput -0.00073 index_array
649     set index_array lput -0.00177 index_array
650     set index_array lput 0.0001091 index_array
651     if modo = "Indice" [
652       set Distribucion_riqueza_inicial "Normal"
653       set Agentes_Iniciales 700
654       set Lambda 0.75

```

```

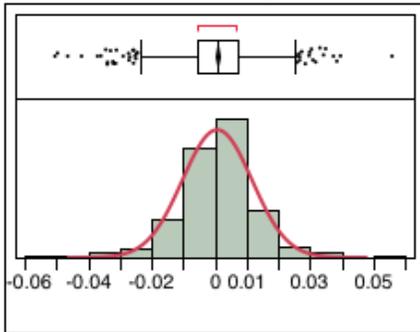
655     set Tick_size 1
656     set Sigma_1 0.5
657     set Sigma_2 1.5
658     set n0 0.15
659     set k 0.45
660     set L_max 50
661     set Ruido 0.2
662     set Crecimiento true
663     set T_Ref_% 1.0]]
664   if Indice = "BVSP" [
665     set index_array lput 0.00153 index_array
666     set index_array lput 0.0004266 index_array
667     set index_array lput -0.00063 index_array
668     set index_array lput -0.00040 index_array
669     set index_array lput 0.0002106 index_array
670     if modo = "Indice" [
671       set Distribucion_riqueza_inicial "Uniforme"
672       set Agentes_Iniciales 600
673       set Lambda 0.90
674       set Tick_size 1
675       set Sigma_1 0.5
676       set Sigma_2 2.0
677       set n0 0.15
678       set k 0.42
679       set L_max 50
680       set Ruido 0.2
681       set Crecimiento true
682       set T_Ref_% 1.0]]
683   if Indice = "IPSA" [
684     set index_array lput 0.00180793 index_array
685     set index_array lput 0.00091044 index_array
686     set index_array lput -0.00025778 index_array
687     set index_array lput -0.00227601 index_array
688     set index_array lput 0.00006301 index_array
689     if modo = "Indice" [
690       set Distribucion_riqueza_inicial "Uniforme"
691       set Agentes_Iniciales 600
692       set Lambda 0.75
693       set Tick_size 1
694       set Sigma_1 0.5
695       set Sigma_2 2.0
696       set n0 0.15
697       set k 0.2
698       set L_max 50
699       set Ruido 0.2
700       set Crecimiento true
701       set T_Ref_% 1.0]]
702   end
703
704
705   to-report aprox [a b]
706     let temp a
707     if (a / b) != int(a / b) [
708       ifelse (a / b) - int(a / b) < 0.5
709         [set temp int(a / b) * b]
710         [set temp int(a / b) * b + b]]
711     report temp
712   end
713
714   to-report update_L [L]
715     let j 0
716     let subli_ret []
717     set subli_ret sublist historic_rent (length(historic_rent) - L) length(historic_rent)
718     report mean(subli_ret)
719   end
720

```

```
721 to-report update_rent
722   let dininic []
723   let dinactual []
724   ask agentes [
725     set dininic lput(dinero_inic) dininic
726     set dinactual lput(patrimonio) dinactual]
727   let rentact []
728   let i 0
729   while [i < length(dininic)][
730     ifelse item i dininic != 0
731       [set rentact lput((item i dinactual) / (item i dininic)) rentact]
732       [set rentact lput(0) rentact]
733     set i i + 1]
734   let rent mean(rentact) - 1
735   set rent rent * 244 / (ticks + 1)
736   report rent
737 end
```

Anexo 3 – Pruebas de normalidad y test no paramétricos

Prueba de normalidad para la serie de referencia (retornos del IGBC en etapa de estabilidad)



Moments

Mean	0.0008124
Std Dev	0.0109806
N	1272
Sum Wgt	1272
Sum	1.03332
Variance	0.0001206
Skewness	-0.211199
Kurtosis	2.0612294
CV	1351.6974
N Missing	0

Normal(0.00081,0.01098)

Fitted Normal, Parameter Estimates

Type	Parameter	Estimate	Lower 95%	Upper 95%
Location	μ	0.0008124	0.0002083	0.0014164
Dispersion	σ	0.0109806	0.0105699	0.0114248

-2log(Likelihood) = -7868.78826705763

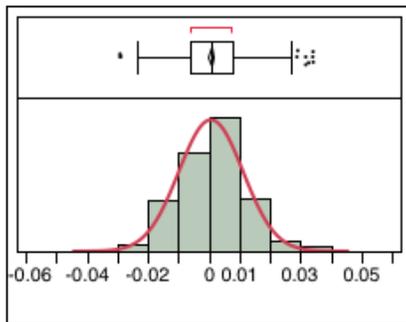
Goodness-of-Fit Test

Shapiro-Wilk W Test

W	Prob<W
0.979237	<.0001*

Note: Ho = The data is from the Normal distribution. Small p-values reject Ho.

Pruebas de normalidad para la serie de retornos simulada



Moments

Mean	0.0007543
Std Dev	0.010523
N	600
Sum Wgt	600
Sum	0.4525541
Variance	0.0001107
Skewness	0.1245439
Kurtosis	0.3049885
CV	1395.1484
N Missing	0

Normal(0.00075,0.01052)

Fitted Normal, Parameter Estimates

Type	Parameter	Estimate	Lower 95%	Upper 95%
Location	μ	0.0007543	-8.945e-5	0.001598
Dispersion	σ	0.010523	0.0099594	0.0111547

-2log(Likelihood) = -3763.3039304

Goodness-of-Fit Test

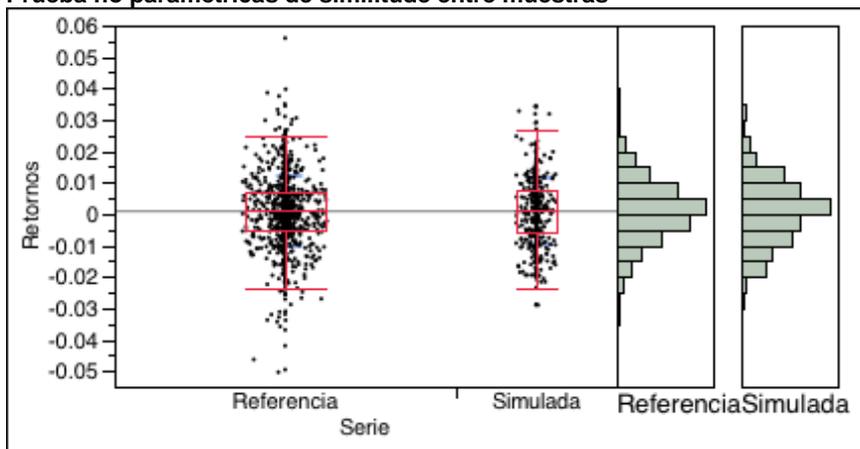
Shapiro-Wilk W Test

W	Prob<W
0.993927	0.0166*

Note: Ho = The data is from the Normal distribution. Small p-values reject Ho.

Interpretación: Existe evidencia estadística para rechazar la normalidad tanto en la serie original como en la simulada.

Prueba no paramétrica de similitud entre muestras



Wilcoxon / Kruskal-Wallis Tests (Rank Sums)

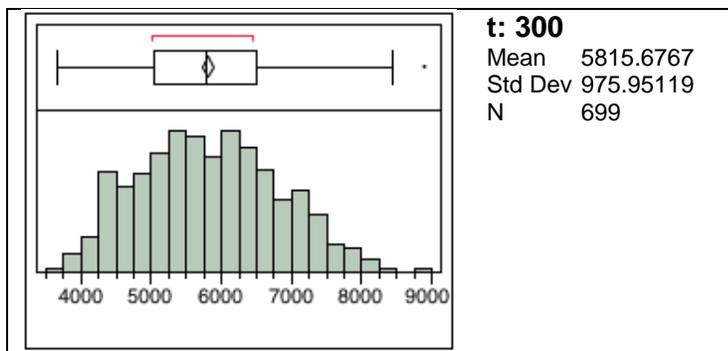
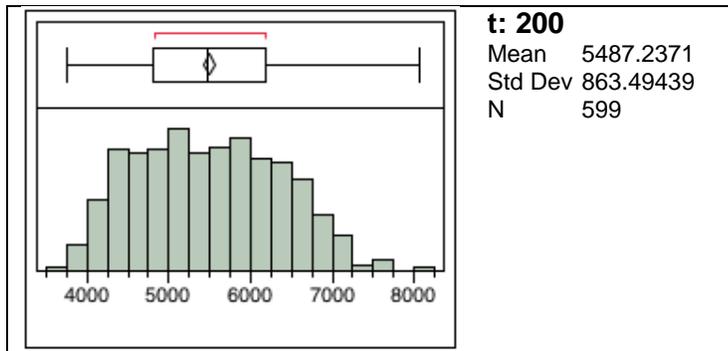
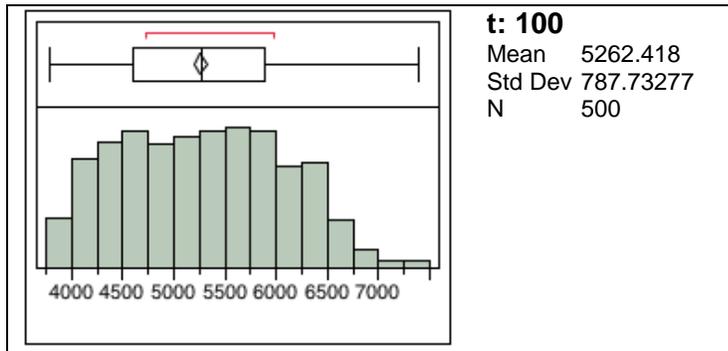
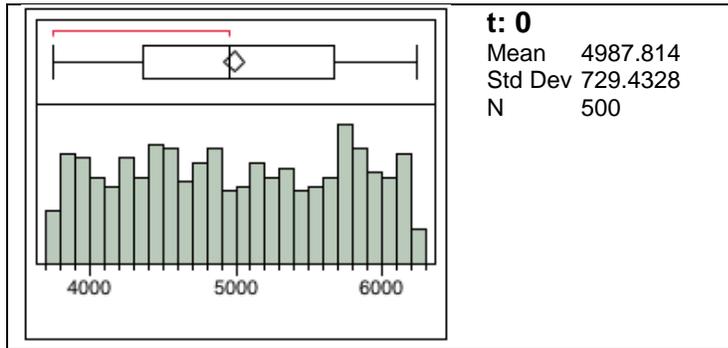
Level	Count	Score Sum	Expected Score	Score Mean	(Mean-Mean0)/Std0
Referencia	1272	1195521	1191228	939.875	0.393
Simulada	600	557607	561900	929.345	-0.393

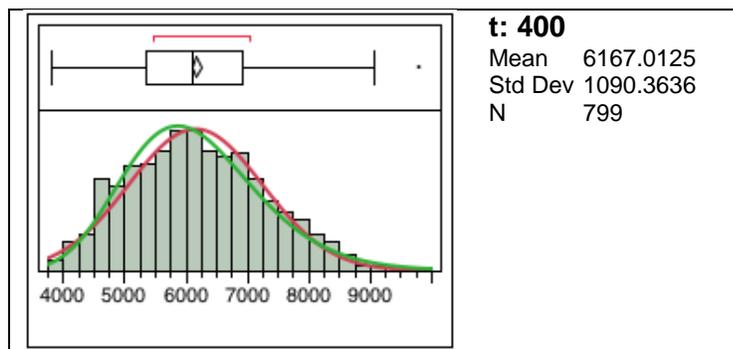
1-way Test, ChiSquare Approximation

ChiSquare	DF	Prob>ChiSq
0.1547	1	0.6941

Interpretación: Como la probabilidad es mayor que la probabilidad de referencia, se concluye que no hay diferencia estadística entre la serie original y la simulada

Anexo 4 – Evolución de la distribución de la riqueza en los agentes





Normal(6167.01,1090.36)
Fitted Normal
Parameter Estimates

Type	Parameter	Estimate	Lower 95%	Upper 95%
Location	μ	6167.0125	6091.2935	6242.7316
Dispersion	σ	1090.3636	1039.3975	1146.6247

-2log(Likelihood) = 13443.3015796282

Goodness-of-Fit Test
 Shapiro-Wilk W Test

W	Prob<W
0.990139	<.0001*

Note: Ho = The data is from the Normal distribution. Small p-values reject Ho.

LogNormal(8.71119,0.17859)
Fitted LogNormal
Parameter Estimates

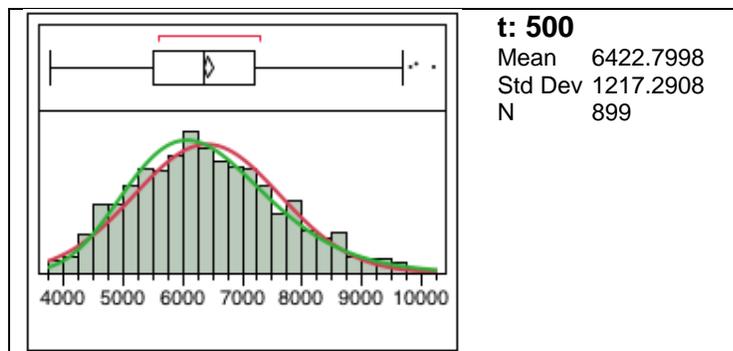
Type	Parameter	Estimate	Lower 95%	Upper 95%
Scale	μ	8.7111873	8.6987893	8.7235853
Shape	σ	0.1785891	0.1701783	0.1877164

-2log(Likelihood) = 13435.1185194818

Goodness-of-Fit Test
 Kolmogorov's D

D	Prob>D
0.031917	0.0480*

Note: Ho = The data is from the LogNormal distribution. Small p-values reject Ho.



Normal(6422.8,1217.29)
Fitted Normal
Parameter Estimates

Type	Parameter	Estimate	Lower 95%	Upper 95%
Location	μ	6422.7998	6343.12	6502.4796
Dispersion	σ	1217.2908	1163.5073	1276.3265

-2log(Likelihood) = 15323.9321794616

Goodness-of-Fit Test
 Shapiro-Wilk W Test

W	Prob<W
0.987880	<.0001*

Note: Ho = The data is from the Normal distribution. Small p-values reject Ho.

LogNormal(8.74963,0.19031)
Fitted LogNormal
Parameter Estimates

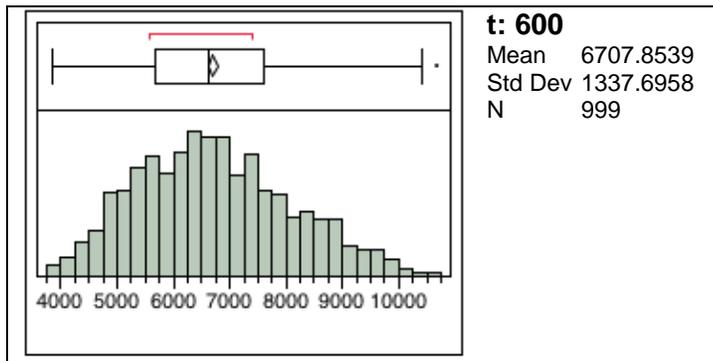
Type	Parameter	Estimate	Lower 95%	Upper 95%
Scale	μ	8.7496303	8.7371765	8.7620841
Shape	σ	0.1903132	0.1818442	0.1994607

-2log(Likelihood) = 15300.0536389801

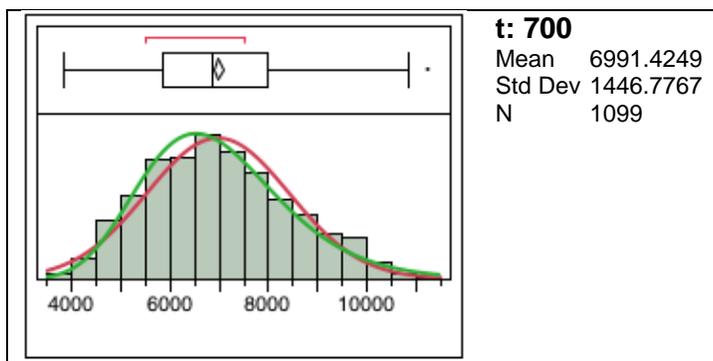
Goodness-of-Fit Test
 Kolmogorov's D

D	Prob>D
0.022809	> 0.1500

Note: Ho = The data is from the LogNormal distribution. Small p-values reject Ho.



t: 600
 Mean 6707.8539
 Std Dev 1337.6958
 N 999



t: 700
 Mean 6991.4249
 Std Dev 1446.7767
 N 1099

Normal(6991.42,1446.78)

Fitted Normal

Parameter Estimates

Type	Parameter	Estimate	Lower 95%	Upper 95%
Location	μ	6991.4249	6905.7942	7077.0557
Dispersion	σ	1446.7767	1388.7192	1509.9379

-2log(Likelihood) = 19112.8782320359

Goodness-of-Fit Test

Shapiro-Wilk W Test

W	Prob<W
0.986851	<.0001*

Note: Ho = The data is from the Normal distribution. Small p-values reject Ho.

LogNormal(8.83078,0.20948)

Fitted LogNormal

Parameter Estimates

Type	Parameter	Estimate	Lower 95%	Upper 95%
Scale	μ	8.8307804	8.8183847	8.8431761
Shape	σ	0.2094792	0.2010178	0.2185514

-2log(Likelihood) = 19093.1211582971

Goodness-of-Fit Test

Kolmogorov's D

D	Prob>D
0.023564	0.1426

Note: Ho = The data is from the LogNormal distribution. Small p-values reject Ho.

Anexo 5. Momentos estadísticos de algunos índices bursátiles seleccionados

Índice: **GSPC**

Nombre: Standard and Poors 500 composite index RTH

País: USA

Etapa	Promedio	Varianza	Asimetría	Curtosis	Días
A	0.00062290	0.00011084	-0.30326545	1.66685995	547
B	0.00030085	0.00010916	-0.32234589	4.00735048	1614
C	-0.00073813	0.00020821	0.27464575	0.99664451	709
D	-0.00177035	0.00105065	0.00733731	1.14035570	186

Índice: **BVSP**

Nombre: Bovespa

País: Brazil

Etapa	Promedio	Varianza	Asimetría	Curtosis	Días
A	0.00153030	0.00025248	-0.27041749	0.79596986	1169
B	0.00042668	0.00021068	-0.36212108	2.71930318	691
C	-0.00063119	0.00043206	-0.07296030	0.27277534	979
D	-0.00040491	0.00155246	0.16703617	1.50513795	165

Índice: **IPSA**

Nombre: Índice de precio selectivo de acciones

País: Chile

Etapa	Promedio	Varianza	Asimetría	Curtosis	Días
A	0.00180793	0.00010361	0.07110729	1.41745411	204
B	0.00091044	0.00006301	-0.19691333	1.15165904	1377
C	-0.00025778	0.00017423	-0.28805903	2.18277883	392
D	-0.00227601	0.00062040	0.45085535	3.69414102	139