



Colegio de Estudios
Superiores de Administración

Eficiencia en el comportamiento del mercado de criptomonedas estables a través de pruebas de caminata aleatoria.

Paula Andrea Neuto Yate
Jaiden Alfonso Varón Quiroga

Maestría en Finanzas Corporativas
Colegio de Estudios Superiores de Administración – CESA
Bogotá D.C
2022

Eficiencia en el comportamiento del mercado de criptomonedas estables a través de pruebas de caminata aleatoria.

Paula Andrea Neuto Yate
Jaiden Alfonso Varón Quiroga

Directores:
Javier Bernardo Cadena Lozano
Miller Janny Ariza Garzón

Maestría en Finanzas Corporativas
Colegio de Estudios Superiores de Administración – CESA
Bogotá D.C
2022

Contenido

Introducción	7
Revisión de Literatura	12
Marco teórico	19
Movimiento Browniano	19
Caminata aleatoria	21
Mercados Eficientes	22
Formas de Mercados Eficientes	25
Metodologías para evaluar la eficiencia del mercado	27
Coeficiente de Hurst	28
Metodología Rango Reescalado (R/S).	29
Criptomonedas	30
Criptomonedas Estables	31
Metodología	34
Pruebas de Inferencia	34
Prueba de Ljung & Box	35
Prueba de Cowles & Jones (1937)	35
Pruebas de Mood (1949)	37
Prueba de Lo y Mackinlay (1988)	38
Metodología Rango Reescalado (R/S) Hurst (1951)	39
Prueba de Annis y Lloyd 1976	41
Resultados	43
Referencias	52

Contenido de Tabla

Tabla 1. Tipos de Criptomonedas.....	32
Tabla 2. Resultados Prueba de Ljung & Box.....	45
Tabla 3. Resultados Prueba de Cowles & Jones.....	46
Tabla 4. Resultados Prueba Mood.....	46
Tabla 5. Resultados Prueba Lo & Mackinlay.....	47
Tabla 6. Resultados Prueba de Hurst	48
Tabla 7. Resultados Pruebas de Caminata Aleatoria.....	49

Contenido de gráficos

Gráfico 1. Precios y retornos USDT.....	44
Gráfico 2. Precios y retornos USDC.....	44
Gráfico 3. Precios y retornos TUSD.....	44
Gráfico 4. Precios y retornos EURS.....	44
Gráfico 5. Precios y retornos DGX.....	45
Gráfico 6. Precios y retornos PAGX.....	45

Contenido de figuras

Figura 1. Formas de Mercados Eficientes.....	26
--	----

Introducción

Los mercados financieros han tenido una gran evolución permitiendo una mayor amplitud y selección de nuevos instrumentos financieros que han brindado desarrollo a nuevas estrategias de inversión. Estas tendencias surgen a raíz de las crisis financieras que han permitido a los inversionistas tener diferentes alternativas de inversión, buscando garantizar confianza y seguridad en el mercado financiero.

Durante varios años de estudio, se ha cuestionado el comportamiento de los activos financieros, partiendo de aquellos modelos convencionales que asumen comportamientos eficientes en el sistema financiero y aquellos que refutan dichas hipótesis establecidas. Si los mercados financieros se comportaran de manera eficiente, en el mercado no existirían activos subvalorados o sobrevalorados, no habría oportunidades de arbitraje o beneficios, dado que serían eficientes para todo el mundo. Por ello, se ha estudiado desde tiempo atrás el comportamiento de los activos financieros para predecir nuevas tendencias y deducir nuevos enfoques y formas de inversión.

Desde mucho antes, Bachelier (1900) hablaba del juego justo demostrando empíricamente que los precios siguen una distribución Gaussiana de manera independiente e idénticamente distribuidos, asociando el concepto de un movimiento browniano o caminata aleatoria o incluso un proceso estocástico. Fama (1970) establece que un mercado es eficiente cuando el precio muestra toda la información disponible, reflejando un equilibrio de los precios y asumiendo una parte racional del inversionista; por otro lado, Robert (1967) afirma que un mercado no es tan eficiente, ya que los precios presentan ciertas volatilidades y que estas son descritas a través de caminatas aleatorias.

En los mercados financieros, los procesos estocásticos han evolucionado y marcado un grado de impacto en las series financieras, donde se evalúa si los mercados siguen un comportamiento aleatorio o presentan memoria de largo plazo en sus datos históricos. Por ello, la modelación

estocástica ha realizado pruebas de inferencia para validar si cumplen alguna de las dos condiciones anteriores. Para ampliar un poco el contexto, Einstein (1956) habló del movimiento y de la velocidad de las partículas, bajo el esquema del trabajo de Robert Brown, quien tuvo en cuenta el movimiento de unos granos de polen, cuyo movimiento era browniano y de forma aleatoria. Más adelante, Hurst (1951) basado en la teoría de Einstein propuso un modelo para la estimación del coeficiente de Hurst (H) para determinar dependencia de largo plazo en los datos registrados del río Nilo para la construcción de la represa en Egipto. Una vez conocida su metodología, Benoit (1972) aportó que estos comportamientos también podrían ser replicados en series financieras, determinando que los precios podrían ser persistentes y seguir ciertas tendencias del pasado, brindando mejores escenarios de oportunidad para los inversionistas.

Pero, si se dice que las series financieras se comportan de manera eficientes, los mercados no deberían reaccionar de manera agresiva con subidas o bajadas imprevistas ante un evento macroeconómico, geopolítico o ante una decisión ya sea de política monetaria, fiscal, entre otros, ocasionando incertidumbres, volatilidades y pérdidas en los portafolios de inversiones. Si fueran eficientes descontarían dicha información para todo el sistema financiero y no generarían un caos imprevisto. En estudios previos, se ha identificado que no todos los mercados cumplen con un grado de eficiencia, mostrando diferencias en los resultados empíricos. Autores como Cowles y Jones (1937), estudiaron los precios de las acciones de los ferrocarriles e identificaron cierta anomalía en la serie de datos; Lo y Mackinlay (1988), comprobaron empíricamente que los precios de las acciones de EE. UU, no cumplen con el supuesto de un mercado eficiente en el sentido débil; Mood (1949), comprobó que las series estudiadas en su investigación no seguían una caminata aleatoria.

Con las crisis financieras ocurridas a lo largo de la historia, se han evidenciado fraudes, especulaciones y fallas en el manejo regulatorio de los bancos; a su vez, la innovación en compañías tecnológicas, actualizaciones de plataformas en los sistemas bancarios, han generado nuevas visiones que han ido cambiando el esquema tradicional de una banca de inversión, brindando nuevas formas de pago digitalmente a través de plataformas de *blockchain*, que se originan como bloques de información monetaria de manera encadenada que se convierte en una base de datos descentralizada. Este mercado se denominó *criptomonedas*, que son monedas virtuales que generan operaciones o transacciones para pago de algún bien, sin intermediarios y basados en criptografía. La moneda más conocida es el Bitcoin (BTC), que fue creada en 2009 por Nakamoto (2008), como una moneda descentralizada que funciona con tecnología de cadenas de bloques.

En el marco de la evolución de los mercados financieros, aparecen nuevos instrumentos que tienen como objetivo facilitar el intercambio de activos electrónicos, los cuales utilizan claves criptográficas para su generación; estos fueron denominados criptomonedas o cripto activos. El BTC es una moneda digital encriptada en el formato P2P (Nakamoto, S. 2008). En principio, los usuarios de bitcoin pueden transferir dinero entre sí a través de una red entre iguales usando software libre y de código abierto.

El 3 de enero del 2009 se da el nacimiento oficial de Bitcoin con una emisión de un bloque de 50 BTC llamado Genesis. Fue la primera cripto famosa y después de esto la oferta empezó a crecer generando así más criptomonedas como el Litecoin, Ripple, Dogecoin, Ether, entre otras, que garantizaron crecimiento y confiabilidad en el mercado de las criptomonedas.

A lo largo de la evolución del mercado de criptomonedas se ha evidenciado un fuerte crecimiento, lo cual permitió la creación de más de 1.000 criptomonedas segmentadas en diversos nichos de

mercado. Riquelme (2020), habla acerca de la tendencia sistemática y el alcance masivo del Bitcoin y el Ether, entre otras, que al ser comparadas con una materia prima como el oro o Dólar/Euro, tienden a ser más competitivas, pero no son una moneda centralizada por un Banco central. De acuerdo con lo anterior, el mercado de las criptomonedas tiende a ser más volátil en ventanas de corta periodicidad.

Con el comportamiento de las criptomonedas y la volatilidad ocasionada, se generó cierto riesgo e incertidumbre en los inversionistas al no tener un precio estable y predecible, por lo cual surgen en el mercado las *monedas estables*, que son una subclase de criptomonedas, que proporcionan seguridad y estabilidad. Bulmann (2019), establece que las monedas estables son unidades digitales de valor, ya que son un conjunto de herramientas de estabilización, que tratan de minimizar las fluctuaciones en el precio de estas monedas.

Con la creación de las monedas estables, se propone realizar o introducir una estabilización mediante un tipo de cambio entre las criptomonedas y la moneda fiduciaria. Según Hassani et al. (2018) las *stablecoins* son un token digital que tendrá una baja volatilidad de precios como resultado de estar vinculada a alguna moneda fiduciaria. Generalmente los usuarios de *stablecoins* pueden canjear una unidad de esta moneda por un dólar. El origen de la *stablecoins* se dio por los síntomas de inestabilidad y volatilidad que generan las transacciones de las criptomonedas. Para mitigar este riesgo fue permitido el uso de las transacciones monetarias por *blockchain*, lo que generó una sensación de estabilidad a los inversores. La parte más importante es mantener el valor estable y esto se logra por el respaldo. Algunos ejemplos de respaldo se pueden ver a continuación.

De la revisión se encuentra que Latinoamérica, contrario a la Unión Europea, se ha volcado sobre una mirada negativa y de prohibición de las criptomonedas. Sin embargo, se destacan excepciones importantes como Brasil, o el caso de El Salvador, país que el día 7 de septiembre de

2021 adoptó el Bitcoin como moneda de curso legal, siendo la primera criptomoneda en adquirir tal reconocimiento. Incluso, este país quiere ahora construir la primera 'Bitcoin City', una ciudad financiada por bonos de la criptomoneda Tidy (2021). También se destaca el caso de Costa Rica, pues en 2021 el Banco Central de este país estableció que el uso de criptomonedas en Costa Rica no está prohibido por Ley, por ende, es permitido su uso. Leiton (2021).

Lansky (2018), confirma que hay riesgos que poco a poco se irán mitigando y esto generaría que los inversores aumentaran con el tiempo, de hecho, se ve como las nuevas generaciones están más interesadas en realizar inversiones de este tipo.

Por medio de esta investigación, se quiere comprobar empíricamente si las criptomonedas estables cumplen con la hipótesis de los mercados eficientes de forma débil. Para esto se aplican diversas pruebas con el fin de validar la hipótesis, y adicionalmente, por medio de la metodología del Rango Reescalado R/S se calcula el coeficiente de Hurst para posteriormente identificar dependencia de largo de plazo en las series seleccionadas de monedas estables.

Revisión de Literatura

Desde una conceptualización clásica, los mercados eficientes se pueden definir como aquellos en los cuales los activos que hacen parte de un mercado financiero reflejan toda la información disponible, y además están valorados de manera correcta en lo que tiene que ver con la relación que existe entre rendimiento y riesgo (Fama, 1970). En particular, existen tres características centrales de los mercados eficientes: 1) la inexistencia de costos de transacción; 2) el acuerdo entre los agentes del mercado en torno al hecho de que los precios actuales de los activos reflejan la información sobre las expectativas; y 3) la libre disposición de información de calidad en el mercado (Fama, 1970).

Sin embargo, Fama (1970), señala que estas son condiciones suficientes para que se genere como resultado un mercado eficiente, pero no se puede decir que las tres sean condiciones totalmente necesarias. Por ejemplo, puede darse el caso de que existan en el mercado costos de transacción, pero lo anterior no significa que los precios dejen de arrojar información para especular sobre el futuro. El punto clave de entender, a la hora de hablar de mercados eficientes, es que la pérdida de alguna de estas condiciones no genera como consecuencia inmediata el debilitamiento de la eficiencia en el mercado, ya que los precios siguen presentando un recorrido aleatorio.

Para comprender el origen de los mercados eficientes es preciso reconocer, en primera instancia, los aportes de los siguientes autores. En primer lugar, sobre Eugene F. Fama (1970), se puede decir que es considerado como el padre de la teoría de mercados eficientes, razón por la cual sus aportes se valoran en la actualidad como pilares centrales en la teoría económica y de las finanzas modernas. Su postura se enfoca en la racionalidad de los mercados, pues considera que el precio de los activos financieros recoge toda la información disponible en cada momento. Por su parte,

Shiller (1979) resalta la imperfección de los mercados. Su idea central se relaciona con la predicción de los precios, puesto que los retornos para los inversores siguen generalmente patrones predecibles.

También es importante hacer referencia a los aportes de autores como Hurst (1951), quien estableció una medida de dependencia a las series de tiempo, lo cual permite establecer análisis de la dependencia de los datos a través del tiempo por medio del uso de técnicas fractales. Además, las ideas de Hurst fueron retomadas por Benoit (1972), quien desarrolló un método estadístico llamado Rango Reescalado (R/S), el cual evalúa si, una serie financiera presenta dependencia de largo plazo. En conjunto, cabe tener en cuenta que la modelización de series temporales financieras se debe principalmente a la existencia de regularidades estadísticas comunes a un gran número de series financieras, que son difíciles de reproducir artificialmente empleando modelos estocásticos básicos (Martínez Jenkins, 2016).

El tema de la predicción de los precios en relación con el desarrollo de los mercados eficientes ha sido sumamente importante en el desarrollo económico, pues se ha relacionado con factores como la especulación, la posibilidad de obtener rendimientos superiores al promedio en un mercado particular, y la oportunidad de entender cómo puede evolucionar este mercado. En este sentido, es importante tener en consideración que en el marco de procesos como la globalización y el desarrollo tecnológico se han generado nuevas formas de intercambio económico, que generalmente se encuentran asociadas a altos niveles de aleatoriedad e imprevisibilidad (Sarmiento & Garcés, 2016). Se destaca principalmente el tema de las criptomonedas, que surgieron en el año 2009 debido al interés de crear una moneda mundial que facilitara las operaciones financieras, eliminara coberturas de divisas y redujera el riesgo de guerras monetarias (Sarmiento & Garcés, 2016).

Sin embargo, autores como Arango et al. (2018), señalan que las criptomonedas están sujetas a importantes niveles de volatilidad e imprevisibilidad en el desarrollo de transacciones digitalizadas, lo cual obliga a mejorar el análisis y desarrollo de métodos de valoración y predicción de esta clase de activos, no solo para garantizar la seguridad financiera de las personas que negocian con ellas, sino también para promover su desarrollo como moneda de intercambio económico.

Cabe destacar que no se encontraron en la literatura estudios que analizaran la eficiencia en el comportamiento del mercado de monedas estables a través de pruebas de persistencias. Sin embargo, sí se han realizado estudios en los cuales se predicen los precios del Bitcoin a través de diferentes procesos y metodologías. Por ejemplo, Ascanio y García (2020) analizaron los precios del Bitcoin aplicando los principios básicos de la técnica de las ondas de Elliott. Parten de reconocer que factores como la globalización y las nuevas tecnologías han promovido el crecimiento continuo del mercado de las criptomonedas, lo cual ha generado como resultado que sean incluidas dentro de los activos usuales de *trading*. En particular, los resultados muestran que la técnica de las ondas de Elliot¹, arroja un margen de efectividad en la predicción bastante aceptable, es una herramienta que puede utilizar cualquier inversor interesado en el mercado de las criptomonedas.

¹ El principio básico de esta técnica consiste en fijar un punto inicial de análisis para un cierto activo. Partiendo de dicho punto, sobre el azar de movimientos del activo trazados por la serie de tiempo, se construye una onda de ocho segmentos, dividida en cinco segmentos que marcan un ascenso en el precio, también denominada fase de impulso, seguida de tres segmentos que marcan un descenso en el precio, conocida como fase de corrección.

Autores como Gómez et al. (2018), analizaron el comportamiento de los índices CAC-40²; AEX³; BEL-20⁴ y el PSI-20, por su capitalización bursátil del mercado y porque son los más representativos del EURONEXT. Estudiaron los diferentes periodos de los índices bursátiles y cada una de las crisis abordadas, mostrando escenarios de altas y bajas fluctuaciones en los precios. Con los análisis de asimetrías y curtosis, identificaron periodos de posible fractalidad, determinando que los índices del EURONEXT no son estacionarios, y que no cumplen con los supuestos de una HME.

Por su parte, Martínez (2016) emplea la serie de precios en dólares USD del Bitcoin del mercado Coindesk³. Para el desarrollo de este modelo, tiene en cuenta la volatilidad y establece contrastes estadísticos de normalidad, estacionariedad y autocorrelación, estimando para ambas series dos modelos de varianza condicional: el modelo clásico GARCH y el modelo asimétrico EGARCH. Los resultados muestran que no se evidencian efectos asimétricos significativos, lo cual indica que, en la evolución de las criptomonedas, las fases de optimismo han sido al menos tan intensas como las fases de pesimismo. En este sentido, se plantea que la evolución y adopción de Bitcoin ofrece una oportunidad para contrastar diversas teorías económicas y promover el desarrollo de caminos interdisciplinarios con las ciencias de la computación.

Sensoy (2019), cuestiona si el comportamiento de los precios de las cripto es predecible a través de altas frecuencias y retornos, ya que esto no había sido cubierto por estudios previos. Se realizó una prueba de eficiencia de los precios del Bitcoin en términos no solo del dólar estadounidense (BTCUSD), sino también del euro (BTCEUR), y concluyeron que el BTCUSD es ligeramente más

² CAC-40: Índice bursátil que representa las 40 empresas por mayor capitalización y de mayor negocio de Francia en el Euronext.

³ AEX: Índice bursátil que representa las 25 empresas principales de la bolsa de Ámsterdam.

⁴ BEL-20: Índice bursátil que representa las 20 empresas principales de la bolsa de Bruselas

eficiente que el BTCEUR en cada frecuencia en el periodo de la muestra. Por otro lado, concluyó que los mercados BTCUSD y BTCEUR se han vuelto más eficientes en cuanto a la información a nivel intra diario desde principios de 2016, apoyando los hallazgos de la eficiencia informativa mejorada recientemente con la frecuencia diaria y, además, la liquidez (volatilidad) tendría un efecto positivo (negativo) significativo en la eficiencia informativa de los precios de Bitcoin.

Baur & Hoang (2019), buscaron examinar las criptomonedas estables como activos de refugio seguro frente a los retornos extremos del Bitcoin; en su estudio tomaron las siguientes monedas estables con mayor capitalización de mercado: Tether (USDT), USD Coin (USDC), TrueUSD, (TUSD), Paxos Standard Token (PAX), Dai (DAI) y Gemini Dollar (GUSD). Concluyeron que las monedas estables no se mueven conjuntamente con el Bitcoin en tiempos de volatilidad, proporcionando un refugio seguro.

Jarno & Kolodziejczyk (2021), compararon la volatilidad promedio que caracteriza a la principal moneda estable (Tether) con 19 monedas estables (Paxos, Moneda USD, USD estable (estable), TrueUSD, Gemini Dollar, Dai, Stasis euro, Terra, Aurora, PHI, BitShares, NuBits, Moneytoken (IMT), Steem, BridgeCoin (SweetBridge), MinexCoin, Alchemint, White Standard, bitUSD). Concluyeron que los datos tomados tienen una alta dispersión entre las monedas estables con una volatilidad que oscila entre 0,46% y 16,01%. Cinco de ocho de los fondos tokenizados han ocupado las posiciones más altas en el ranking y las monedas estables colateralizadas, se encuentran principalmente en la mitad inferior del ranking, como la Dai, que es la más exitosa en estabilizar su precio con baja volatilidad. Esta investigación subraya la importancia de la debida diligencia y precaución al elegir los activos para convertirlos a monedas estables debido a volatilidades significativamente diferentes de varias monedas estables.

Kochergin (2020), investiga la naturaleza económica y las características de varios tipos de monedas estables y su regulación en países desarrollados y así proporciona la interpretación y clasificación de estas. Analiza los principales indicadores de las monedas estables e identifica los posibles beneficios y riesgos asociados con el pago. Concluye que, actualmente no existe una interpretación unificada del nombre de monedas estables debido a su gran variedad de formas y métodos para asegurar la estabilidad de los valores de mercado.

Pernice et al. (2019), afirman que la volatilidad de los precios de las criptomonedas suele ser un obstáculo importante para la adopción, por lo cual han surgido varias criptomonedas estables, las cuales están respaldadas por algún activo financiero común como el oro, dólar americano o el euro. Se analizaron muestras de 24 monedas estables usando la unión entre características de diseño generalizadas y teorías monetarias, para el desarrollo de una taxonomía completa sobre enfoques de estabilización de criptomonedas, destinadas a un uso general como moneda, y proporcionar un documento técnico y un sitio web. Este estudio valida las técnicas de estabilización de las monedas estables, teniendo en cuenta el respaldo de cada moneda con el EUR y USD; concluye que el 38% de las monedas encuestadas promueven una fluctuación del tipo de cambio.

En cuanto a las relaciones entre criptomonedas y el modelo de mercado eficiente, se resaltan los aportes de Sarmiento & Garcés (2016) quienes realizan un estudio para comprender el grado de penetración de lo que llaman criptodivisas en Colombia, al asegurar que, a la fecha de su investigación, “no se tiene ningún tipo de estudio que permita reflejar la realidad colombiana sobre este aspecto” (p. 151); con lo cual se asegura que el análisis de las criptomonedas es un escenario reciente para la academia nacional. Para ello, los autores realizan en primer lugar una revisión cualitativa de prensa y documentos oficiales a lo largo del mundo para determinar su nivel de uso

Como se mencionó antes, no se encontraron investigaciones basadas en las criptomonedas estables para identificar comportamientos aleatorios o validar el primer supuesto de la HME. La mayoría de los estudios realizados sobre los activos financieros y criptomonedas demuestran que no cumplen con el supuesto de la HME, sino que demuestran cierta dependencia de largo plazo en los activos estudiados.

Marco teórico

Como se puede apreciar, para probar la eficiencia de los mercados en criptomonedas, es clave usar herramientas estadísticas que integren el análisis del comportamiento pasado y actual de los activos, relacionando además una serie de variables aleatorias relacionados con factores económicos, sociales, políticos y financieros. Por tanto, a continuación, se presenta un marco teórico en el cual se analiza la teoría de los mercados eficientes.

De acuerdo con Blume & Eugene (1966), en los mercados eficientes los precios de los activos reflejan su valor intrínseco, de tal forma que la posibilidad de obtener rendimiento superior al promedio es poco probable. En este caso, la información entra a jugar un papel determinante, pues es posible que se dé el caso en el cual la información disponible no esté equiparada con el comportamiento de los precios, de tal forma que algunos inversores podrían obtener como resultado beneficios superiores a los demás participantes del mercado. En este sentido, es importante analizar métodos e hipótesis asociadas que hacen diversos usos de la información disponible, dentro de las cuales se destacan el movimiento Browniano, la caminata aleatoria, mercados eficientes, el coeficiente de Hurst, la metodología Rango Reescalado (R/S), entre otros.

Movimiento Browniano

El movimiento browniano se entiende como un concepto asociado a la física, producto de las investigaciones del científico Robert Brown, quien en 1827 observó en el microscopio cómo las partículas de polen que se suspendían sobre líquidos se movían de manera aleatoria y de forma irregular y continua. Este movimiento se relacionó con una manifestación del movimiento térmico de las partículas, y se estableció un avance importante para el desarrollo de la teoría cinética de la materia. Este estudio ha sido utilizado para estudiar las fluctuaciones de los mercados.

En sus aportaciones, el movimiento Browniano no sólo permite el modelado adecuado de las fluctuaciones propias de diversas variables económicas y financieras, sino también representa una herramienta básica para incorporar elementos de riesgo e incertidumbre en la dinámica de dichas variables (Martínez, 2006).

Principalmente, se destacan los aportes de autores de Black & Scholes (1973) ya que lograron relacionar los principios físicos y matemáticos del movimiento browniano con la teoría económica y la predicción de los mercados. En particular, se reconocen los planteamientos de Bachelier (1900) quien presentó su tesis doctoral llamada *Teoría de la Especulación*, que incorpora por primera vez al análisis de los mercados financieros conceptos como el movimiento browniano. Su teoría parte de reconocer que las finanzas son una ciencia que depende del rigor matemático, y su estudio se enfocó en demostrar que los precios de los activos son proporcionales a la raíz cuadrada del tiempo en que fueron tomadas las observaciones, lo cual es una propiedad relevante de la teoría del movimiento browniano.

Gracias a los aportes de los autores mencionados, se han desarrollado modelos matemáticos que permiten entender cómo los procesos aleatorios ayudan a describir el comportamiento de un conjunto de variables a medida que se desplazan en el tiempo. Cuando se aplica al campo de las finanzas, el movimiento browniano ayuda a explicar la evolución de los precios, considerando para ello que cada cambio de precios es independiente de los cambios de precios anteriores. Por tal motivo, la teoría del movimiento browniano aplicada a las finanzas parte del supuesto de que el cambio de un periodo de tiempo al siguiente no está relacionado con el cambio de precios, y que la volatilidad de los precios es constante.

Como se puede apreciar, de acuerdo con el análisis que se ha planteado, la predicción del cambio en los precios se ha establecido como un tema sumamente importante en el desarrollo de las finanzas. Kendall & Bradford (1953) encontraron que los cambios que se generan dentro de una misma semana en los precios no pueden ser pronosticados por cambios pasados en las series de precios. Por su parte, autores como Robert (1967) explicaron que no son los precios absolutos los que son independientes entre sí, sino los cambios logarítmicos entre los precios, los cuales presentan una distribución normal. Estos estudios dieron como resultado la hipótesis según la cual los cambios en la diferencia logarítmica de los precios son independientes. A su vez, esta hipótesis se estableció como el eje central del modelo de la caminata aleatoria, la cual se explica a continuación.

Caminata aleatoria

Para explicar este modelo es importante recordar que un mercado eficiente es aquel en el cual los precios de los títulos reflejan toda la información disponible. En este sentido, cuando en un mercado eficiente los precios de los valores son impredecibles, se genera lo que se conoce como una caminata aleatoria. Cabe destacar que el modelo de la caminata aleatoria también es un modelo matemático, relacionado con procesos aleatorios en los cuales la posición de una partícula depende únicamente de su posición en un instante previo; y factores como la dirección que toma y la longitud de cada paso se encuentran determinados por variables aleatorias (Mota Aragón & Núñez Mora, 2019). Un ejemplo de caminata aleatoria es, precisamente, el movimiento browniano, asociado principalmente con distribuciones dispersas e imprevisibilidad.

El modelo de caminata aleatoria se asocia a los mercados cuando se reconoce que los retornos de los activos financieros siguen, precisamente, una caminata aleatoria a través de distribuciones

dispersas que dependen de variables aleatorias. Dos supuestos básicos sustentan el modelo de caminata aleatoria en el modelo económico: en primer lugar, el nivel débil de la eficiencia de los mercados, según el cual el análisis de los precios históricos no permite predecir los precios futuros ni obtener algún rendimiento sobresaliente frente a los demás inversores. En segundo lugar, la suposición de que los retornos siguen el patrón aleatorio del movimiento browniano, de tal manera que las variaciones de los precios se establecen como un factor independiente. (Uribe & Ulloa, 2011).

Para el desarrollo del modelo de caminata aleatoria se destacan los aportes de Kendall & Bradford (1953) quienes, a partir del desarrollo de estudios empíricos sobre los datos, explican que los patrones de comportamiento de los activos no eran predecibles ni se comportaban de manera sistemática y organizada. Teniendo en cuenta el modelo de la caminata aleatoria, se puede decir que el hecho de que algún agente obtenga rendimientos sobresalientes frente a los demás actores dependería de factores como la capacidad de actuar muy rápido, de obtener información privilegiada, o de la suerte.

Mercados Eficientes

Para comprender qué son los mercados eficientes es preciso, en primer lugar, hacer referencia al tema de las características que determinan la evolución y el desarrollo de los mercados financieros. De acuerdo con las apreciaciones de autores como Martínez (2006), la evolución de los mercados financieros se establece de acuerdo con el desarrollo de nuevas oportunidades de inversión en medio de un contexto cada vez más globalizado, en el cual la internacionalización económica juega un papel fundamental, no solo como eje del fortalecimiento de las economías locales, sino también

en la creación de dinámicas de intercambio a escala global que generan como resultado un aumento progresivo en la velocidad con la cual se desplaza el capital.

En palabras de Quiroga (2017), además de la globalización, otro factor que incide de manera determinante en la evolución, crecimiento y dinamización de los mercados financieros, es el avance constante en innovación asociada a los sistemas de información y la tecnología. En conjunto, estas herramientas ayudan a profundizar la interconexión de los mercados financieros, a apoyar la toma de decisiones, a llevar un mejor control en torno a los procesos y balances que determinan el crecimiento económico y las inversiones.

De acuerdo con el análisis que se ha planteado, se puede decir que: “Un mercado es eficiente cuando no existen oportunidades de arbitraje” (Quiroga, 2017). Como se ha visto, para evitar el arbitraje es preciso cumplir con dos condiciones esenciales: en primer lugar, que los activos que se negocian tengan como característica central la homogeneidad y, en segundo lugar, que los costos de transacción sean mínimos.

En este punto del análisis es importante el papel de los especuladores, pues al interior de los mercados financieros los actores buscan información que les permita obtener beneficios a partir de los comportamientos futuros de los activos en el mercado financiero. El tema de la información resulta ser sumamente importante en el mercado, ya que permite orientar los procesos de toma de decisión, anticipar el comportamiento de un activo, y prevenir los cambios que se pueden presentar en un mercado, determinando que puedan generar variaciones en los procesos de los activos (Marqués, 2018).

La información, sin embargo, no es la misma para todos los participantes del mercado, pues su disponibilidad depende de factores como el conocimiento del mercado, la experiencia, las

relaciones con otros inversores, el costo que se está dispuesto a incurrir para obtener datos privilegiados, el uso de tecnologías que permitan sistematizar los datos, y el acceso a diversos tipos de fuentes que permiten medir y predecir el comportamiento de los activos (Quiroga, 2017). En particular, estas diferencias entre la información disponible se conocen como asimetrías de la información, y juegan un papel sumamente importante en el desarrollo de la especulación.

Por lo tanto, el análisis que se ha planteado sobre globalización, desarrollo económico, tecnología, información y especulación, permite decir, finalmente, que un mercado es eficiente cuando los precios de sus activos reflejan toda la información disponible y se ajustan a la nueva información que puede seguir en el futuro (Navas, 2015). Se destaca, por tanto, el valor de la información como el eje central desde el cual se toman las decisiones, se orienta la especulación y se establecen dinámicas de previsión de los mercados. En este sentido, como lo explica Martínez (2006), la eficiencia de un mercado estará en gran medida dependiendo de la calidad de la información disponible.

Lo anterior permite reconocer un aspecto clave de los mercados eficientes, y es que, si la calidad y el uso de información tiene tanta importancia, es porque los precios de mercado son naturalmente impredecibles. De allí la importancia de contar con una buena información que permita tomar buenas decisiones ante mercados que no poseen un comportamiento predecible. Eficiencia, por tanto, es igual a eficiencia informacional (Quiroga, 2017).

En este punto del análisis, es importante examinar críticas concretas que se han desarrollado en contra de la teoría de los mercados eficientes. Por ejemplo, se destaca la teoría de French (1980) quien explica que en los mercados existen una serie de irregularidades, dentro de las cuales se destaca por ejemplo el “efecto fin de semana”, según el cual los precios de las acciones bajan

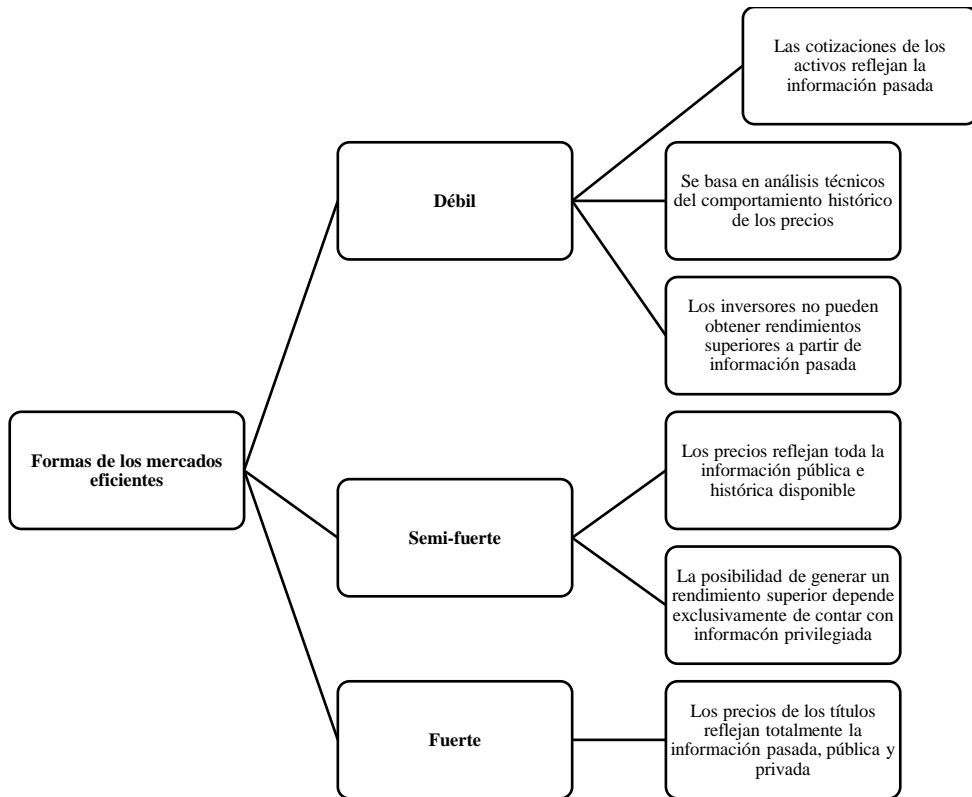
generalmente los lunes. Por su parte, Banz (1981) hace referencia al caso en el cual las acciones de las empresas pequeñas generan más rendimiento que las de las empresas grandes (fenómeno conocido como el “efecto tamaño”). Finalmente, Ritter (1988) habla del “efecto enero”, en el cual las empresas venden su posición en diciembre para volverla a comprar a principios de enero.

Formas de Mercados Eficientes

Para analizar las formas de los mercados eficientes, Robert (1967) define la existencia de tres niveles de eficiencia (débil, semi-fuerte o fuerte). En cada caso, el nivel depende de la calidad de la información, de la forma en la cual se logra relacionar con los precios y de las oportunidades que existen para que un inversor o un agente obtenga rendimientos superiores a los del promedio del mercado (entre más oportunidades tenga para ello, menor será el nivel de eficiencia).

En la siguiente figura se muestran características centrales de cada nivel.

Figura 1: Formas de Mercados Eficientes



Nota: Elaboración propia a partir de Robert (1967) (1967)

Teniendo en cuenta estos rasgos generales presentados en la figura 1, a continuación, se plantea una mayor especificación sobre cada nivel.

- Nivel de Eficiencia Débil:** En este nivel se puede acceder a la información asociada con las series históricas de los precios. Sin embargo, los participantes del mercado, a partir de información histórica de los precios, no pueden obtener como resultado rendimientos superiores al promedio del mercado. Por tanto, solo se pueden obtener rendimientos superiores si alguien posee información privilegiada del mercado, o se tiene la capacidad de sistematizar y usar información pública relevante.

$$p_t = \mu + p_{t-1} + \varepsilon_t \quad \varepsilon_t \sim iid(0, \sigma^2)$$

Donde μ corresponde a la media, ε_t a los residuos de las series y p_t al retorno .de la serie

Nivel de Eficiencia Semi-fuerte: en ningún caso un inversor puede obtener un rendimiento superior por medio del análisis de precios históricos, proyecciones, análisis del mercado o sistematización de información de dominio público. Por tanto, la información privilegiada se convierte en el único bien que podría ayudar a generar un rendimiento superior, y es en lo único que vale la pena para invertir en tiempo y en dinero.

$$p_t = \mu + p_{t-1} + \varepsilon_t \quad \varepsilon_t \sim \text{INID} (0, \sigma^2) \text{ es independiente}$$

- **Nivel de Eficiencia Fuerte.** En estos mercados ni la información histórica sobre los precios, ni el análisis del mercado, ni el análisis de información pública y ni siquiera la información privilegiada, pueden ayudar a generar un rendimiento superior por parte de algún agente. De hecho, no existe en estos mercados información privilegiada, ya que toda la información se encuentra reflejada en los precios. Sin embargo, como lo señala Robert (1967) un mercado de este tipo no es posible encontrarlo en la realidad.

$$p_t = \mu + p_{t-1} + \varepsilon_t \quad \varepsilon_t \sim \text{no es IID pero } COV(\varepsilon_t, \varepsilon_s) = 0$$

Metodologías para evaluar la eficiencia del mercado

Para la validación de la Hipótesis de Mercados Eficientes de forma débil, se utilizan pruebas estadísticas para evaluar si las series seleccionadas siguen una caminata aleatoria o tienen

dependencia de largo plazo. Para ello, se destacan las siguientes pruebas: Ljung & Box (1978) , prueba de Cowles y Jones (1937), prueba de Mood (1949), prueba de Lo y Mackinlay (1988), y metodología de rango Reescalado (Hurst, 1951). Es de aclarar que las pruebas mencionadas son explicadas a más profundidad en la próxima sección. Por lo anterior, es preciso desarrollar el análisis de un conjunto de metodologías tradicionales que pueden ayudar a medir la eficiencia de los mercados a través de distintos tipos de procedimientos; por lo que se quiso estudiar otro tipo de metodología que permita validar y contrastar las pruebas anteriores y tener otro medio de comprobación.

Coefficiente de Hurst

Esta metodología fue propuesta por Hurst (1951), quien desarrollo un estudio para la construcción de la represa Nilo, estimando una serie histórica del comportamiento del río. Para esto analizó las anomalías y las volatilidades que presentaba en época de creciente y de sequía. Con ello propuso la metodología del coeficiente de Hurst, el cual permite establecer una medida de independencia de las observaciones de una serie de tiempo, ya que, en aquellos fenómenos, en los cuales existe un comportamiento aleatorio, existe en el fondo cierta memoria a largo plazo, lo cual permite inferir que los eventos de un periodo de tiempo influyen en los siguientes (Uribe & Ulloa, 2011). Posterior a ello, Benoit (1972) desarrollo la metodología de Rango Reescalado a partir de los datos de Hurst y propuso que pudiese ser aplicado a los mercados financieros.

En particular, el coeficiente de Hurst puede explicarse de la siguiente manera:

- Caminata aleatoria: $H = 0$: cuando se evidencia en las series de tiempo un proceso aleatorio e independiente, en el cual además no existe correlación entre los rezagos de los retornos.
- Persistente: $0.5 < H < 1$: En este caso, se evidencia la existencia de series de tiempo con procesos persistentes, de tal manera que un periodo de crecimiento es similar al periodo pasado. En este sentido, se observa que en una serie persistente existe una memoria a largo plazo, de tal forma que lo que sucede en la actualidad tiene repercusiones concretas en los cambios y variaciones futuras. Siguiendo los principios del coeficiente de Hurst, se observa que las series persistentes se estableen como las más comunes.
- Anti – persistente: $0 < H < 0.5$: En los sistemas anti–persistentes se generan desigualdades importantes entre las series de tiempo. Por ejemplo, a un periodo de crecimiento económico le sigue un periodo de decrecimiento. Incluso, en un sistema anti–persistente, un incremento en los sucesos del pasado supone un descenso en los sucesos futuros, y viceversa. Se caracteriza por la irregularidad y la turbulencia.
- Determinístico: $H = 1$: Indica el desarrollo de procesos cíclicos de largo plazo, en los cuales todos los cambios presentes se correlacionan con los cambios futuros.

Metodología Rango Reescalado (R/S).

Las ideas de Hurst fueron retomadas por Benoit (1972) quien desarrolló un método estadístico llamada Rango Reescalado (R/S), el cual permite evaluar dependencia de largo plazo en series financieras. Este modelo estadístico ha sido ampliamente estudiado y utilizado en el desarrollo de procesos físicos y financieros. En particular, para el análisis financiero, la metodología de Rango

Reescalado (R/S), permite encontrar el parámetro o exponente de Hurst, entendido como el valor numérico que permite determinar la autocorrelación en una serie de datos.

La metodología de Rango Reescalado consiste en medir la dependencia dentro de series de tiempo que presentan fenómenos irregulares y que no contienen características de normalidad. Por lo tanto, permite analizar, a través del cálculo del promedio, la desviación estándar y el rango, la existencia de memoria de largo plazo o de sistemas persistentes o anti-persistentes en los datos históricos de los precios (Dage y García, 2020, p. 45).

Ya que se ha planteado un análisis sobre la hipótesis del mercado eficiente y los conceptos asociados, a continuación, es importante definir el mercado a estudiar, el cual es el de las criptomonedas, reconociendo las clases que existen y la forma en la cual han sido consideradas por diversos autores y entidades financieras.

Criptomonedas

El Banco Central Europeo (2015) define a las criptomonedas como una: “representación digital de valor, no emitida por un banco central, una institución de crédito o una institución de dinero electrónico, que en algunas circunstancias se puede utilizar como una alternativa al dinero”. Por su parte, Camargo (2017) reconoce el valor agregado de las criptomonedas en la medida en que se han establecido como sistemas de pago por internet a través del uso de sistemas *peer-to-peer*, lo cual favorece el intercambio económico sin necesidad de intermediarios, a través de sistemas de seguridad basados en la criptografía.

De acuerdo con Moreno y Villafradez (2018), el uso de las criptomonedas se ha venido extendiendo, hasta el punto en que ya no son solamente medios para realizar pagos por internet,

sino también activos electrónicos que poseen una elevada especulación. De acuerdo con lo anterior:

Las monedas digitales no son más que un código binario referente a las transacciones producidas, y que se conservan en una base de datos. De ahí deriva la primera gran característica de las criptomonedas, no existe en ningún tipo de formato, no existe algo a lo que referirse y denominar un simple bitcoin. Este concepto de no existencia es algo que no tiene comparación con lo conocido hasta hoy en día y que es crucial para entender la naturaleza de esta moneda. (p. 44). (Baldrés, 2018).

Criptomonedas Estables

Son criptomonedas que se encuentran respaldadas debido a procesos de auditoría de terceros, de tal forma que los usuarios están protegidos y cuentan con una garantía de sus activos. Además, los usuarios se encuentran protegidos legalmente, y pueden cambiar los tokens por dinero fiduciario (Dannen, 2017). Este tipo de activo sirve como refugio en momentos de volatilidad brindando mayor seguridad y confianza al inversionista en comparación con las criptomonedas tradicionales, que tienen un mayor riesgo frente a escenarios de noticias o eventos fundamentales. Existen tres tipos de monedas estables:

- Respaldo con moneda Fiat: Es un tipo de respaldo que consiste en que cada token está garantizado con una unidad monetaria (USD, EUROS). Algunos ejemplos son: USDC, BUSD, TRUEUSD, y TETHER (USDT).
- Respaldo con commodities: Está dado por un respaldo de materias primas como: diamantes, oro, petróleo.

- Respaldo con otras Criptomonedas: Está dado por reglas económicas y algoritmos, es totalmente descentralizado, no está sujeto a ningún gobierno. Ejemplo: DAI, Criptomoneda respaldada por el Ether.

Algunas ventajas que tienen las *stablecoins* son: Estabilidad del mercado, Liquidez de los tokens y esquemas dependientes de centralización. A continuación, se especifican la selección de las criptomonedas estables que se trabajarán en el documento:

Tabla 1. Tipos de criptomonedas.

Criptomoneda	Descripción
Criptomoneda Tether	Tether es una criptomoneda emitida por la compañía Tether Limited. Antes del 2019 cada Token estaba respaldado por un dólar americano. Sin embargo, desde el 14 de marzo de ese año, se cambió el respaldo con el fin de incluir préstamos a empresas afiliadas (Cadena & Rincón, 2018).
Criptomoneda USD Coin	USD Coin es una moneda estable asociada al dólar estadounidense en una base de 1:1. De esta forma, cada unidad que circula electrónica y digitalmente está respaldada por \$1 que se mantiene en reserva, en una combinación de efectivo y bonos del Tesoro de Estados Unidos a corto plazo (Dannen, 2017).

<p>Criptomoneda Trueusd</p>	<p>Fue desarrollada a través de la plataforma TrustToken, y es una criptomoneda estable respaldada por medio de la divisa dólar, generando una mayor confianza y seguridad cuando se invierte en este activo. (Carrascosa, 2020)</p>
<p>Criptomoneda Paxos Estándar</p>	<p>Paxos Standard es una moneda estable que permite a cualquier usuario cambiar dólares estadounidenses por los tokens de Paxos Standard. A través del uso de la tecnología <i>blockchain</i>, el principal objetivo de esta criptomoneda es la de estabilizar el dólar (Dannen, 2017).</p>
<p>Criptomoneda euro Stasis</p>	<p>Posee un conjunto de redes de cadena de bloques de código abierto, lo cual facilita el desarrollo de contratos financieros con otros usuarios dentro del sistema. Además, permite a los desarrolladores introducir el flujo de control en la programación de transacciones de criptomonedas (Dannen, 2017).</p>
<p>Criptomoneda Digix Gold:</p>	<p>Estos tokens son creados a través de contratos inteligentes que reciben tarjetas de prueba de activos (PoA) y van generando unidades de token por cada gramo de oro. Cada token DGX siempre representará 1 gramo de oro y es divisible a 0.001 gramos (Bouverety y Haksar, 2018).</p>

Nota: Elaboración propia

Metodología

En este capítulo se describen las metodologías utilizadas para evaluar la hipótesis de los mercados eficientes en el sentido débil aplicado a las criptomonedas estables. Para ello, se seleccionaron las monedas respaldadas con activos Fiat y *commodities*, de la siguiente manera: 3 vinculadas al dólar (Tether, USD Coin, True USD), una a la moneda euro (Euro Stasis) y dos al *commodities* oro (Digix Gold y Pax Gold). Esta selección tuvo presente las monedas con mayor antigüedad y capitalización en el mercado de criptomonedas. Las series de datos tienen periodicidad diaria hasta el 31 de marzo de 2022 y fueron descargadas por medio de Yahoo Finance. Para evaluar dicha hipótesis se realizan las pruebas de Ljung & Box (1978), prueba de Cowles y Jones (1937), prueba de Mood (1949), prueba de Lo y Mackinlay (1988); para identificar si las series seleccionadas siguen un proceso de caminata aleatoria. Una vez realizadas estas pruebas, se propone evaluar la aleatoriedad por medio del coeficiente de Hurst a través de la metodología de Rango Reescalado, el cual será evaluado por medio de inferencia por las pruebas de Annis & Lloyd (1976) y Lo (1991) para determinar si siguen un proceso aleatorio o presentan memoria de largo plazo.

Estas pruebas de caminata aleatoria fueron realizadas por códigos propios y por algunas funciones que previamente ya estaban determinadas en los softwares R Studio y Matlab. Para el cálculo del coeficiente de Hurst, se usó el código de Matlab de Chu Cheng (2008) quien incluye la metodología de Rango Reescalado.

Pruebas de Inferencia

En esta sección se explicará cada una de las pruebas a utilizar para evaluar la hipótesis de los mercados eficientes en el sentido débil, partiendo primero de los modelos convencionales. Estas pruebas se trabajaron bajo los retornos de las series seleccionadas.

Prueba de Ljung & Box

La prueba de Ljung & Box (1978) o de ruido blando, examina si los residuos de la serie replican el comportamiento de ruido blanco, donde la media es igual a cero, la varianza constante y la autocorrelación es nula en los k residuos de la serie (González , 2009). Por ello se estudia los coeficientes de autocorrelación y se plantea las siguientes hipótesis.

$$H_0 : \rho_1 = \rho_2 = \dots \rho_m = 0 \text{ Los residuos presentan ruido blanco}$$

$$H_1 : \rho_1 \neq \rho_2 = \dots \rho_m \neq 0 \text{ Hay autocorrelación en los residuos}$$

En donde la H_0 indica que los residuos de la serie no tienen autocorrelación, es decir, que es nula o igual a cero y si esta hipótesis se rechaza indica que por lo menos un residuo es diferente de cero.

Para evaluar estas hipótesis, se utiliza el siguiente estadístico de Ljung & Box (1978):

$$Q = n(n + 2) \sum_{k=1}^m \frac{\rho_k^2}{(n - m)} \sim \chi^2(n - m - p) \quad \mathbf{1}$$

Donde n es el número de observaciones de la serie, k el número de parámetros ρ a estimar, con una distribución Chi2. Esta prueba permite identificar en una serie de tiempo presencia de estacionariedad en varianza y que su media se mantenga constante en el tiempo. (González , 2009).

En conclusión, para probar la inexistencia del cumplimiento de la HME, se tendría que rechazar la H_0 de ruido blanco.

Prueba de Cowles & Jones (1937)

Esta prueba fue propuesta por los autores Cowles & Jones (1937), ellos estudiaron las secuencias y reversas en una serie de tiempo, a partir del cálculo del estadístico \widehat{CJ} . Esta prueba es utilizada

para identificar si los retornos de la serie siguen un proceso de caminata aleatoria. Para ello se estableció la siguiente prueba de hipótesis:

$$H_0 : \widehat{CJ} = 1 \text{ Los retornos siguen una caminata Aleatoria.}$$

$$H_1 : \widehat{CJ} \neq 1 \text{ Los retornos no siguen una caminata Aleatoria.}$$

Esta prueba tiene en cuenta las frecuencias de los retornos del mismo signo con la frecuencia de los retornos del signo contrario. (Torrado, 2009)

$$Si \ I_t = \begin{cases} 1, & r_t > 0 \\ 0, & r_t < 0 \end{cases}$$

A partir de ello, por medio de las siguientes ecuaciones propuesta por Fiorenzani et al. (2012), se calcula el número de secuencias N_s y de reversas N_r correspondiente a cada signo de los retornos de la serie, por medio de Y_t en función de I_t .

$$Y_t = I_t * I_{t+1} + (1 - I_t)(1 - I_{t+1})$$

$$N_s = N^\circ \text{ de secuencia} \quad N_r = N^\circ \text{ de Reversas} \quad T : N^\circ \text{ de Observaciones}$$

Una vez obtenido N_s y N_r , se calcula el estadístico de \widehat{CJ} por medio de los estimadores de probabilidad para secuencias y reversas, donde:

$$\widehat{\pi}_s = \frac{N_s}{T} ; \widehat{\pi}_r = \frac{N_r}{T} \quad \text{donde } \widehat{CJ} = \frac{\widehat{\pi}_s}{1 - \widehat{\pi}_s}$$

Para probar la significancia del valor se utiliza el siguiente estadístico para validar la H_0 y para ello se calcula la media y la varianza.

$$\widehat{CJ} \sim N\left(\frac{\pi_s}{1 - \pi_s}, \frac{\pi_s(1 - \pi_s) + 2(\pi^3 + (1 - \pi)^3 - \pi_s^2)}{1 - \pi_s}\right)$$

$$T_{CJ} = \sqrt{T} \left(\frac{\widehat{CJ} - m(\widehat{\pi})}{\sqrt{v(\widehat{\pi})}} \right) \sim N(0,1)$$

Una vez obtenido los resultados, se puede concluir si se rechaza o no se rechaza la H_0 para cada una de las series seleccionadas, comprobando si siguen un comportamiento de caminata aleatoria.

Pruebas de Mood (1949)

Otra forma de probar la existencia de caminata aleatoria es la prueba de Mood (1949) o de rachas. Estudia el número de secuencias de retornos positivos y negativos frente a un estadístico de tendencia central como en este caso, la mediana. Cada observación se le denota el valor de 1 o 0, dependiendo si es mayor o menor a la mediana. Esta prueba toma el número de las rachas de las series, y se define una racha como la secuencia de valores seguidos por un mismo signo y lo compara con el valor esperado de rachas, asumiendo una distribución normal. (Torres & Rodríguez, 2009). Esta prueba evalúa el cambio de frecuencias de las series y por medio del cálculo del valor z crítico se define si los retornos de la serie siguen un proceso de caminata aleatoria. Por lo cual, la hipótesis se define de la siguiente manera:

H_0 : *Los retornos se comportan de manera aleatoria*

H_1 : *Los retornos no se comportan de manera aleatoria*

A continuación, se define el estadístico de Z crítico:

$$z = \frac{R - E(R)}{\sigma(r)} \sim N(0,1)$$

$$E(R) = \frac{2 n_1 n_2}{n_1 n_2} + 1$$

$$Var(R) = \frac{2 n_1 n_2 * (2n_1 n_2 - n_1 - n_2)}{(n_1 n_2)^2 (n_1 + n_2 - 1)}$$

Donde R es igual al número de rachas, es decir, a los cambios de sucesión; n1 hace referencia al número de observaciones mayores a la mediana asignándosele el valor de 1 y n2 a las observaciones menores a la mediana con el valor de 0.

Prueba de Lo y Mackinlay (1988)

Esta prueba fue propuesta por Lo y Mackinlay (1988), para probar la eficiencia de los mercados en el sentido débil, demostraron empíricamente que la varianza en una serie de tiempo es finita o constante en un determinado periodo. Lo y Mackinlay (1988), propusieron que la varianza de q-rezagos crece proporcionalmente en diferentes periodos de la serie, por ello mediante la ecuación de razón de varianzas prueban si los retornos de la serie siguen un proceso de caminata aleatoria. Por ello se plantean la siguiente hipótesis:

$$H_0 : VR(q) = 1 \text{ Homocedasticidad en los retornos}$$

$$H_1 : VR(q) \neq 1 \text{ Heterocedasticidad en los retornos}$$

Para probar esta hipótesis, se utiliza la ecuación de razón de varianzas, para determinar si la varianza es constante durante el periodo de tiempo; si el resultado es igual a 1, la serie sigue un proceso aleatorio y los retornos no dependen históricamente del pasado. (Rodríguez, 2012).

$$VR(q) = \frac{var(r_t(q))}{q * var(r_t)} = 1 + \rho(1) = 1 + 2 \sum_{k=1}^{q-1} \left(1 - \frac{k}{q}\right) \rho(k) = 1$$

En la ecuación 30, el parámetro $\rho(k)$ es el coeficiente de autocorrelación y q son los rezagos para evaluar. Si $\rho(k)$ es igual a cero, $VR(q)$ sería igual a uno; pero para probar la significancia del valor se utiliza el siguiente estadístico para validar la H_0 .

$$\psi^*(q) = \frac{VR(q) - 1}{(\theta/nq)^{0.5}} \sim N(0,1)$$

Hay que tener presente de que, si el estadístico cae en la zona de rechazo, indica que la serie no sigue un proceso aleatorio; dado lo contrario, significa que sus rezagos son independientes e idénticamente distribuidos y no existe autocorrelación entre sus rezagos, definiendo un proceso de caminata aleatoria.

Las pruebas mencionadas anteriormente, han sido pruebas de forma convencional, las cuales han sido utilizadas empíricamente para evaluar si los mercados financieros siguen un comportamiento aleatorio; pero, en este trabajo de investigación se propone una nueva forma de evaluar la hipótesis RW1 bajo el cálculo del coeficiente de Hurst, por medio de la metodología de Rango Reescalado (R/S), que evalúa la dependencia a largo plazo en series financieras. Para realizar la inferencia se aplicarán las pruebas desarrolladas por Annis y Lloyd (1976) y Lo (1991).

Metodología Rango Reescalado (R/S) Hurst (1951)

En principio esta metodología fue propuesta por Hurst (1951) y más adelante modificada por Benoit (1972) donde la metodología de Rango Reescalado se calcula de la siguiente manera:

$$(R/S)_n = c * n^H$$

$$\text{Log} \left(\frac{R}{S} \right) = \text{Log} c + H \text{Log} (n)$$

Para llegar a esta ecuación, se tienen en cuenta los siguientes pasos:

1. Se toma la serie de datos y se divide en subgrupos (n) de igual longitud (T), donde cada $n * T = N$ siendo el total de datos.
2. A cada subgrupo se le calcula la media, la desviación y a cada dato perteneciente del subgrupo se hace la diferencia del retorno frente al \bar{x} .
3. Luego, para las diferencias obtenidas se va generando una suma acumulada hasta el N total de datos. Esta acumulación de los desvíos tiene que ser $1 \leq t \leq T$:

$$X_{(T,t_0,t)} = \sum_{i=t_0+1}^{t_0+t} (x_i - \bar{X}_{T,t_0})$$

4. Se define el Rango (Max y Min) para cada subgrupo.

$$R(\tau, t_0) = \max X(T, t_0, t) - \min X(T, t_0, t)$$

5. Se calcula la desviación típica muestral, y para cada subgrupo se divide el rango con la desviación calculada.

$$\frac{R}{S}(T) = \frac{R(\tau, t_0)}{\sigma(\tau, t_0)}$$

6. Por medio de una regresión de mínimos cuadrados, siendo como variable independiente el IN (tamaño de cada bloque) y variable dependiente el $\ln(R/S)$, se calcula el coeficiente de la regresión o la pendiente la cual corresponde al valor de H. (Aroutex & Pastor, 2017).

Prueba de Annis y Lloyd 1976.

Una vez calculado el coeficiente de Hurst, es importante mirar la significancia estadística de H y que tan cercano podría estar el valor obtenido respecto a 0.5. Es por ello que los autores Annis y Lloyd (1976), desarrollaron la siguiente ecuación basada en el cálculo del valor de esperado de (R/S) , para estimar de nuevo el valor esperado del nuevo H; el cual se obtiene por medio de una de una regresión de mínimos cuadrados ordinarios (Acuña & Álvarez , 2017). Pero primero se establece las siguientes hipótesis:

H_0 : *la serie de retornos no tiene memoria de largo plazo (RW1)*

H_1 : *la serie de retornos tiene memoria de largo plazo*

$$E \left[\frac{R}{S} \right]_n = \left(\frac{n - 0.5}{n} \right) \left(\frac{n * \pi}{2} \right)^{0.5} \sum_{r=1}^{n-1} \sqrt{\frac{n-r}{n}}$$

Una vez estimado el valor esperado de H, se calcula el valor del siguiente estadístico de prueba Z asumiendo una distribución normal, se concluye si se rechaza o no la H_0 , es decir, si el estadístico de prueba es mayor que el valor de la distribución se rechaza la H_0 , asumiendo que la serie no es una caminata aleatoria.

$$Z = \frac{H - E(H)}{\sigma E(H)} \sim N(0,1)$$

De acuerdo con lo que mencionan Leon & Vivas (2010), esta prueba permite estudiar una subestimación o sobreestimación de H para las series finitas, evaluando el impacto significativo en cada una de las series seleccionadas.

Por otro lado, se tiene la prueba de Lo (1991) que modifica la ecuación de R/S, dividiendo el rango sobre un factor que tiene en cuenta la varianza y la covarianza; desarrolló esta metodología ya que se generaba la duda si en un periodo de corto plazo existía memoria, afectando el proceso de estimación, para ello creó el estadístico de V_q , para validar dicha hipótesis.

H_0 : la serie de retornos no tiene memoria de largo plazo (RW1)

H_1 : la serie de retornos tiene memoria de largo plazo

Entonces él hace la siguiente modificación:

$$Q_{(T,t_0)} = \frac{1}{S(q)} (\max X (T, t_0, t) - \min X (T, t_0, t))$$

Para validar la eficiencia del coeficiente, se tienen en cuenta intervalos de acuerdo con el nivel de confianza dado, si el resultado del estadístico se encuentra dentro de los intervalos se asume que la serie de tiempo se comporta como caminata aleatoria.

$$Vn = \frac{1}{\sqrt{n}} Q_{(T,t_0)} = \frac{1}{\sqrt{n}} * \frac{R(\tau, t_0)}{S(q)}$$

$$NC 90\% = [0.861, 1.747]$$

$$NC 95\% = [0.809, 1.862]$$

$$NC 99\% = [0.721, 2.098]$$

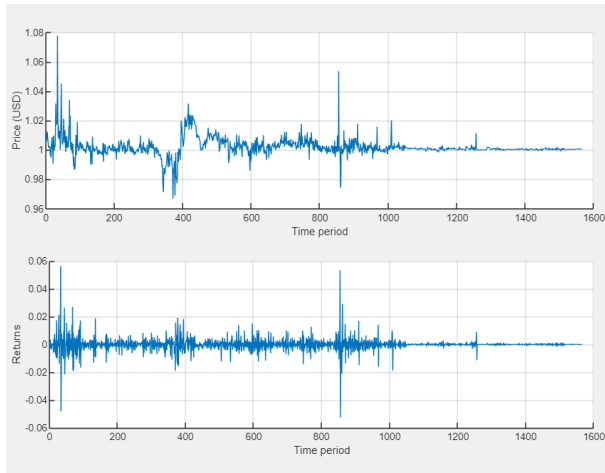
Resultados

A continuación, se muestran los resultados obtenidos por las diferentes pruebas realizadas para determinar si las criptomonedas estables seleccionadas cumplen con el primer teorema de la Hipótesis de los mercados eficientes en el sentido débil (RW1). Los resultados fueron obtenidos por medio de modelos convencionales como prueba de Ljung & Box (1978) , prueba de Cowles y Jones (1937), prueba de Mood (1949), prueba de Lo y Mackinlay (1988). Adicional a ello, se propuso por medio de otro modelo identificar memoria de largo plazo en las series a través del coeficiente Hurst (Hurst, 1951), y para probar su significancia se realizaron dos pruebas de inferencia de (Anis & Lloyd, 1976) y (Lo A. , 1991). Lo anterior para probar si el mercado de las criptomonedas estables, sigue un comportamiento de caminata aleatoria.

Gráficos de precios y retornos de los activos seleccionados

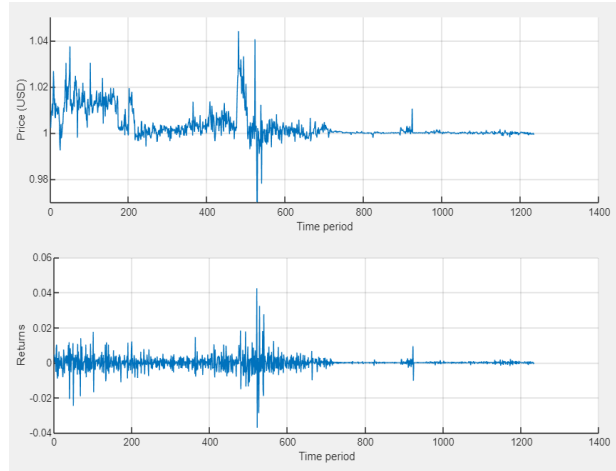
En esta sección se muestran las gráficas del comportamiento del precio y los retornos desde su origen hasta el 31 de marzo de 2022 para cada una de las criptomonedas estables. La serie USDT va desde 2017, las series USDC – TUSD – EURS – DGX desde 2018 y la serie de PAXG desde 2019. Se puede apreciar que las monedas ancladas al dólar y la DGX tienen un comportamiento con baja volatilidad y las monedas EURS y PAGX presentan comportamientos de tendencias en sus series de datos.

Gráfico 1: Precio y Retornos USDT



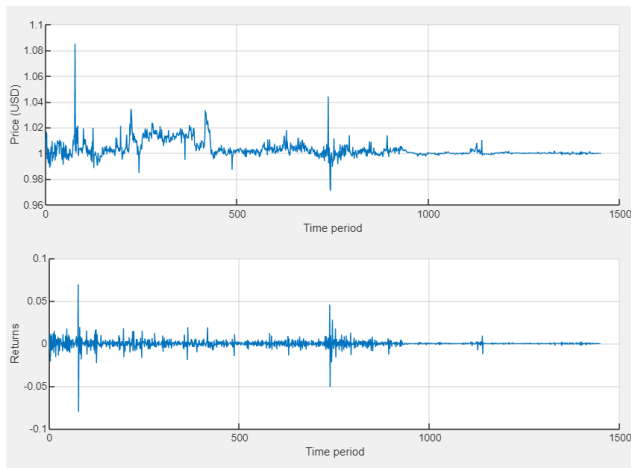
Fuente: Construcción propia en base de datos de Yahoo Finances – Matlab.

Gráfico 2: Precio y Retornos USDC



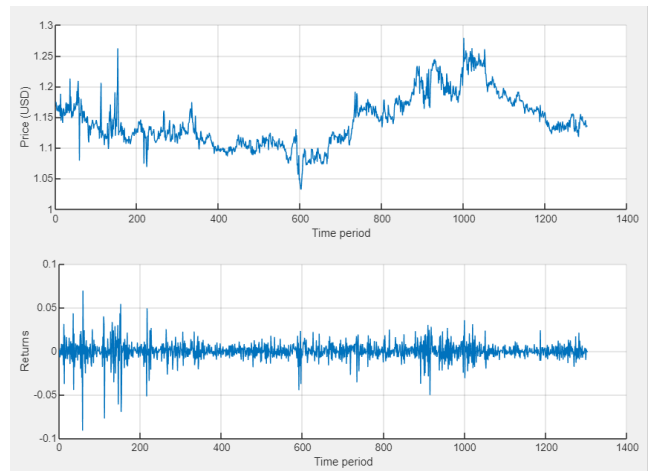
Fuente: Construcción propia en base de datos de Yahoo Finances – Matlab.

Gráfico 3: Precio y Retornos TUSD



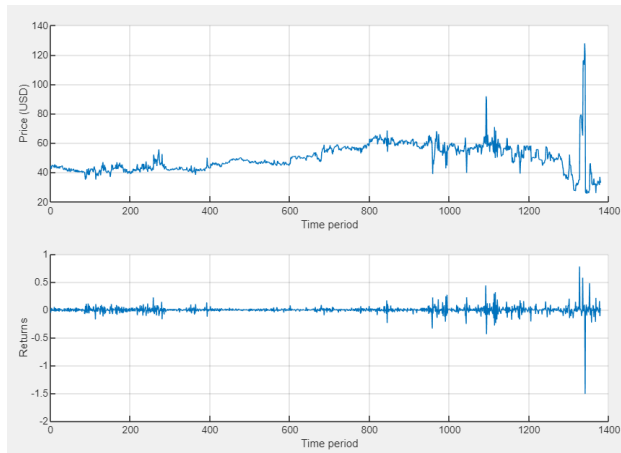
Fuente: Construcción propia en base de datos de Yahoo Finances. Matlab.

Gráfico 4: Precio y Retornos EURS



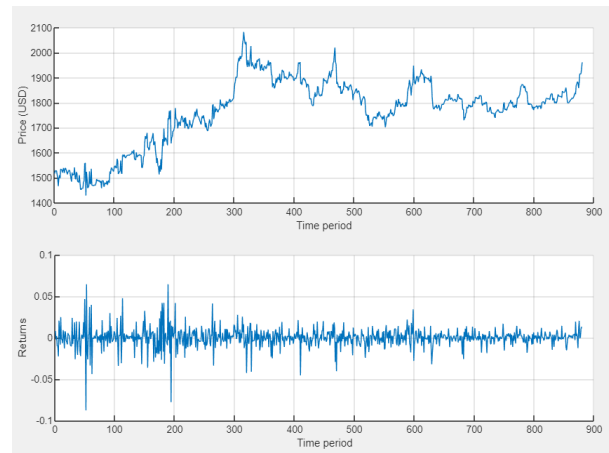
Fuente: Construcción propia en base de datos de Yahoo Finances.

Gráfico 5: Precio y Retornos DGX



Fuente: Construcción propia en base de datos de Yahoo Finances – Matlab.

Gráfico 6: Precio y Retornos PAGX



Fuente: Construcción propia en base de datos de Yahoo Finances.

Prueba de Ljung & Box, 1978.

En esta sección se muestra el test de Ruido Blanco, por cada una de las criptomonedas estables.

Tabla 2. Resultados Prueba de Ljung & Box

PRUEBA / CRIPTO		USDT	USDC	TUSD	EURS	DGX	PAGX
Ruido Blanco	Ho: Ruido Blanco	No	No	No	No	No	No

De acuerdo con los resultados obtenidos para la prueba de Ljung & Box (1978), se determinó que las seis monedas rechazan la H_0 , indicando que los rezagos de las series no se comportan como un ruido blanco.

Tabla 3. Resultados Prueba de Cowles & Jones

CRIPTO	T	Ns	Nr	CJ	Estadístico tCJ
USDT	1564	587	977	0,60082	-7,893 ***
USDC	1232	459	773	0,59379	-8,032 ***
TUSD	1448	538	910	0,59121	-8,083 ***
EURS	1302	505	797	0,63363	-7,244 ***
DGX	1378	580	798	0,72682	-5,401 ***
PAX	879	388	491	0,79022	-4,158 ***

Nota: Resultados obtenidos por medio Matlab.

En la tabla 3, se observa que, a cualquier nivel de significancia, se rechaza la H_0 de que las monedas siguen un comportamiento de caminata aleatoria en el sentido débil, ya que el número de secuencias para retornos positivos y negativos son equivalentes indicando que los retornos de la serie no están correlacionados.

Tabla 4. Resultados Prueba Mood

CRIPTO	Obs.	n_1	n_2	RACHAS	Estadístico Z
USDT	1544	772	772	960	9,5211 ***
USDC	1211	605	605	762	8,9731 ***
TUSD	1427	713	713	902	9,8545 ***
DGX	1356	678	678	782	5,5963 ***
EURS	1280	640	640	775	7,4938 ***
PAX	864	432	432	492	4,0167 ***

Nota: Resultados obtenidos por medio de Matlab

De acuerdo con los resultados de la tabla 4, se concluye que a cualquier nivel de significancia se rechaza la H_0 de que las criptomonedas siguen un comportamiento de caminata aleatoria en el sentido débil, ya que el número de secuencias para retornos positivos y negativos son equivalentes indicando que los retornos de la serie no están correlacionados.

Tabla 5. Resultados Prueba Lo & Mackinlay

Prueba	q				
	2	4	8	10	12
USDT					
VR	0.6210	0.3574	0.2168	0.1808	0.1538
Estadístico	- 3,201 ***	- 3,484 ***	-3,337 ***	-3,246 ***	- 3,165 ***
USDC					
VR	0.6147	0.3551	0.2342	0.2066	0.1751
Estadístico	- 4,130 ***	- 4,214 ***	-3,619 ***	-3,370 ***	-3,223 ***
TUSD					
VR	0.5059	0.3033	0.1937	0.1668	0.1423
Estadístico	-2,944 ***	- 2,715 ***	- 2,544 **	- 2,489 **	- 2,460 **
EURS					
VR	0.6483	0.4535	0.2955	0.2598	0.2437
Estadístico	- 5,117 ***	- 4,734 *	- 4,408	- 4,217	- 4,002
DGX					
VR	0.8979	0.7486	0.5470	0.5115	0.4839
Estadístico	- 2,351 **	- 2,663 ***	-2,645 ***	- 2,198 **	- 1,969 **
PAX					
VR	0.8110	0.7142	0.5792	0.5348	0.5347
Estadístico	- 3,523 ***	- 2,906 ***	- 2,830 ***	-2,772 ***	- 2,534 **

Nota: Resultados obtenidos por medio de Matlab

Para la prueba de razón de varianza, se tuvieron en cuenta intervalos de q siendo los rezagos de la serie en 2, 4, 8, 10 y 12 y se observa que a un nivel de significancia del 10% y del 5% para todas las monedas, excepto el EURS, se rechaza la Ho de que los retornos de estas series tienen una varianza constante, esto indica que las series no siguen un comportamiento de caminata aleatoria. Para el caso de la criptomoneda EURS, a partir del rezago 8, se observa que la varianza es constante, es decir, que a mayor q no se rechaza la Ho y se concluye que esta serie presenta caminata aleatoria.

Coeficiente De Hurst

Tabla 6. Resultados Prueba de Hurst

CRIPTO	H	Estadístico de Anis- Lloyd	Estadístico de Lo
USDT	0.4212	-6,548 ***	0.553 ***
USDC	0.3736	-6,958 ***	0.504 ***
TUSD	0.4664	-4,216 ***	0.537 ***
EURS	0.4152	-7,71 ***	0.575 ***
DGX	0.4064	-8,764 ***	0.598 ***
PAXG	0.5118	1,191	0.867

Nota: Resultados obtenidos por medio de Matlab

De acuerdo con los resultados obtenidos para el cálculo del coeficiente de Hurst, de las seis monedas cinco obtuvieron un resultado antipersistente menor a $H=0.5$ (USDT – USDC – TUSD – EURS – DGX) y PAXG obtuvo un resultado de persistencia débil cercano a $H=0.5$. Para validar los resultados obtenidos e identificar la significancia de cada H, se realizaron las pruebas de inferencia de (Anis & Lloyd, 1976) y (Lo A. , 1991).

De acuerdo a los resultados obtenidos de la prueba de (Anis & Lloyd, 1976) las siguientes monedas (USDT, USDC, TUSD, EURS y DGX), rechazan la H_0 , indicando que no siguen un comportamiento de caminata aleatoria, ya que en este caso, el coeficiente de H fue menor a 0.5 indicando antipersistencia, es decir, una reversión a la media; para el caso de la moneda PAGX indica que, aunque el valor de H es 0.5119 por encima de $H=0.5$, si se comporta como una caminara aleatoria, es decir, el valor de H no es significativo para tener memoria de largo plazo.

Para la Prueba de (Lo A. , 1991), se observa que las monedas (USDT, USDC, TUSD, EURS y DGX), rechazan la H_0 , indicando que el valor correspondiente a H, no es significativo para seguir un comportamiento de caminata aleatoria, sino que siguen un comportamiento antipersistente,

excepto la moneda PAXG cuyo H fue igual a 0.5118 indica que sigue un comportamiento de caminata aleatoria, ya que su valor se encuentra dentro del intervalo establecido.

Resumen de Pruebas

Tabla 7. Resultados Pruebas de Caminata Aleatoria

PRUEBA / CRIPTO	USDT	USDC	TUSD	EURS	DGX	PAXG
Ljung Box (1978)	No	No	No	No	No	No
Cowles & Jones (1937)	No	No	No	No	No	No
Mood (1949)	No	No	No	No	No	No
Lo y Mackinlay (1988)	No	No	No	Sí	No	No
Anys y Lloyd (1976)	No	No	No	No	No	Sí
Lo (1991)	No	No	No	No	No	Sí

Nota: Resultados obtenidos por medio de Matlab

Sí: es RWI No: No es RWI

De acuerdo con la tabla No. 7, se analiza que, en la mayoría de las pruebas realizadas se comprueba empíricamente que las monedas (USDT – USDC – TUSD – EURS Y DGX) no siguen un comportamiento de caminata aleatoria, ni cumplen con la primer hipótesis de los mercados eficientes, y por medio de la prueba propuesta de H, se comprueba empíricamente que estas series presentan memoria de largo plazo en sus datos, de manera antipersistente permitiendo ser estudiadas y pronosticadas a futuro; y para el caso de la moneda PAGX por medio de H si cumple con la Ho de caminata aleatoria tipo 1, de que es un mercado eficiente porque los precios reflejan toda la información del pasado

Conclusión

El objetivo de este trabajo de investigación es probar el primer teorema de la hipótesis en los mercados eficientes en el sentido débil, que asume que los mercados financieros se comportan de manera eficiente, no existirían activos subvalorados o sobrevalorados, no habría oportunidades de arbitraje ya que sería eficiente para todos los inversionistas. Es por ello que se decidió estudiar e identificar el comportamiento en las criptomonedas estables por medio de pruebas de manera convencional y se propuso identificar caminata aleatoria por medio del cálculo del coeficiente de Hurst en las criptomonedas estables seleccionadas de la siguiente manera: 3 vinculadas al dólar (Tether, USD Coin, True USD), una a la moneda euro (Euro Stasis) y dos al *commoditie* oro (Digix Gold y Pax Gold).

Se concluyen a través de los resultados obtenidos por medio de las pruebas de Ljung & Box (1978) , Cowles y Jones (1937) y Mood (1949), que las seis criptomonedas estables no siguen un comportamiento de caminata aleatoria y por medio de la prueba de Lo y Mackinlay (1988) la criptomoneda anclada al Euro, a partir del rezago 8 su varianza permanece constante presentando caminata aleatoria.

De acuerdo con la propuesta del coeficiente de Hurst, se demuestra empíricamente que cinco de seis monedas estables (USDT – USDC – TUSD – EURS Y DGX) presentan memoria de largo plazo en sus retornos de manera antipersistente permitiendo ser estudiadas y pronosticadas a futuro; excepto la moneda PAGX, que su serie si sigue una RW1. Por lo anterior, se concluye que las monedas estables sirven como activo refugio ya que este tipo de activo al estar anclado a un activo centralizado reduce las fluctuaciones y volatilidades comparadas con el comportamiento de las otras criptomonedas en sistema financiero.

Esta investigación se realizó con el fin de validar de que los precios del pasado son significativos para predecir los precios a futuro, no solo para un activo sino para un portafolio de inversiones, donde el inversionista pueda obtener mayores rendimientos frente al mercado, nuevas estrategias de inversión y anticiparse ante diversos escenarios de volatilidad y riesgo.

Se recomienda para próximos trabajos estudiar el coeficiente de Hurst o tener presente metodologías que permitan identificar memoria de largo plazo, con el fin de mitigar la incertidumbre y riesgo a la hora de invertir. Estas pruebas han sido aplicadas en los mercados financieros y en algunas criptomonedas, pero en esta investigación fueron aplicados a las criptomonedas estables para verificar su comportamiento aleatorio.

Referencias

- Acuña , C., & Álvarez , A. (2017). *Dependencia serial de largo plazo en el índice bursátil Chileno, a través del coeficiente de Hurst y Hurst ajustado*. Chile.
- Anis, A., & Lloyd, E. (1976). The Expected Value of the Adjusted Rescaled Hurst Range of Independent Normal Summands. *Biometrika*, 111-116.
- Arango, C., Becerra, M., Bernal, J., & Boada, A. (2018). *Criptoactivos*. Banco de la República.
- Aroutex, M., & Pastor, V. (2017). *Estudio del Exponente de Hurst*. La plata.
- Bachelier, L. (1900). Theory of speculation: The origins of modern finance. *Princeton: Princeton University Press*.
- Baldrés, A. (2018). *Monedas digitales: Origen y perspectivas desde un punto de vista social*. (Doctoral dissertation, Universidad Politécnica de Valencia).
- Banco Central Europeo. (2015). *Informe Anual 2014*. Frankfurt: Banco Central Europeo.
- Bank of England. (2018). *Digital currencies*. Obtenido de <https://www.bankofengland.co.uk/research/digital-currencies>
- Banz, R. (1981). The relationship between return and market value of common stocks. *Journal of Financial Economics*, 3-18.
- Bartolucci, S., & Kirilenko, A. (2020). A model of the optimal selection of crypto assets. *Royal Society Open Science*.
- Baur , D., & Hoang, L. (2019). A Crypto Safe Haven Against Bitcoin. *Finance Research Letters* .
- Benoit, M. (1972). Statistical methodology for nonperiodic cycles: from the covariance to r/s analysis. *Annals of Economic and Social Measurement*, 259 - 290.
- Bernardos, D. (2009). Creación y destrucción de la burbuja inmobiliaria en España. *Revista de Economía*, 23-40.

- Black, F., & Scholes, M. (1973). The Pricing of Options and Corporate Liabilities. *The Journal of Political Economy*, 637 - 654.
- Blume, M., & Eugene, F. (1966). Filter Rules and Stock-Market Trading. *The Journal of Business*, 226-241.
- Cadena, P. A., & Rincón, H. A. (2018). *¿Qué Son Las Criptomonedas?* Bogotá: Universidad La Gran Colombia.
- Camargo, L. (2017). *El efecto Bitcoin en la economía colombiana*. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.
- Carrascosa, J. (2020). Valor y futuro de las criptomonedas: Análisis crítico.
- Chu Cheng. (03 de 10 de 2008). *MathWorks*. Obtenido de <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/19148-hurst-parameter-estimate?focused=5098508&tab=function>
- Cowles, A., & Jones, H. (1937). Some a posteriori probabilities in stock market action. *Econometrica* , 280-294.
- Crowe, C., Dell'Araccia, G., Igan, D., & Rabanal, P. (2013). How to deal with real estate booms: Lessons from country experiences. *Journal of Financial Stability*, 300 -319.
- Dannen, C. (2017). *Introducing Ethereum and Solidity*. Berkeley: Apress.
- Dickey, D. A. (1979). Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root. *Journal of the American statistical association*, 74(366a), 427-431.
- Dikaiakos, C., Papageorgiou, P., Stratigakos, A., & Krommydas, K. (2019). Testing the Efficiency of Electricity Markets Using a New Composite Measure Based on Nonlinear TS Tools. *Energies*.
- Einsten, A. (1956). *Investigations on the Theory of the Brownian Movement*. New York : Dover Publications Inc .

- Elder, J., & Peter, E. K. (2001). Testing for Unit Roots: What Should Students Be Taught? *The Journal of Economic Education*, 32(2), 137-146.
- Fama, E. (1970). Efficient Capital Markets: A Review of Theory and Empirical Work. *The Journal of Finance*, 383-417.
- Fintech. (13 de junio de 2019). *Colombia fintech*. Obtenido de Colombia fintech: <https://www.colombiafintech.co/>
- Fiorenzani, S., Ravelli, S., & Edoli, E. (2012). *The Handbook of Energy Trading*.
- French, K. (1980). Stock Returns and the Weekend Effect. *Journal of Financial Economics*, 55-69.
- Garratt, R., & Bech, M. (2017). *Criptomonedas de bancos centrales, En Informe trimestral del BPI: septiembre de 2017 (pp. 1-20)*.
- Gómez, L., Soarez, V., Gama, S., & Matos, J. (2018). Long-term memory in Euronext stock indexes returns: An econophysics approach. *Business and Economic Horizons*, 862 - 881.
- González, M. (2009). *Análisis de series temporales: Modelos ARIMA*. España.
- GUILLERMO, M. A. (2003). RAÍZ UNITARIA Y CAMBIO ESTRUCTURAL EN LAS SERIES DE TIEMPO DE MÉXICO. *Denarius*, 08), 41-41.
- Hassani, H., Huang, X., & Silva, E. (2018). Banking with blockchain-ed big data. *Journal of Management Analytics*, 256-275.
- Hurst, H. E. (1951). Long-Term Storage Capacity of Reservoirs. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 770-799.
- Jarno, K., & Kolodziejczyk, H. (2021). Does the Design of Stablecoins Impact Their Volatility? *Journal of Risk and Financial Management*.
- Kendall, M., & Bradford, A. (1953). The Analysis of Economic Time-Series-Part I: Prices. *Journal of the Royal Statistical Society*, 11-34.

- Kochergin, D. A. (2020). Экономическая природа и классификация стейблкоинов / Economic Nature and Classification of Stablecoins. *Digital Finance Assets*.
- Kwiatkowski, D., Phillips, P., Schmidt, P., & Shin, Y. (1992). Testing the Null Hypothesis of Stationary Against the Alternative of a Unit-root . *Journal of Econometrics* , 159-178.
- Lansky, J. (2018). Possible State Approaches to Cryptocurrencies. *Journal of Systems integration*, 19.
- Leitón, P. (6 de 8 de 2021). *www.nacion.com*. Obtenido de Banco Central se declara tolerante y vigilante con las criptomonedas: <https://www.nacion.com/economia/finanzas/banco-central-se-declara-tolerante-y-vigilante-con/NVKDTJQMVRBSXBP37ZCSVPB6PI/story/>
- Leon , C., & Vivas, F. (2010). *Dependencia de largo plazo y la regla de la raíz del tiempo para escalar a volatilidad en el mercado colombiano*. Bogotá.: Borradores de economía, Banco de la República.
- Ljung, G., & Box, P. (1978). On a Measure of Lack of Fit in Time Series Models. *Biometrika*, 297-303.
- Lo, A. (1991). Long-Term Memory in Stock Market Prices. *The Econometric Society*, 1279-1313.
- Lo, A., & Mackinlay, C. (1988). Stock Market Prices Do Not Follow Random Walks: Evidence from a Simple Specification Test. *The Review of Financial Studies*, 41-66.
- Marcuzzo, M. (2013). Los mercados de materias primas: especulación, inestabilidad y perspectiva. *Ciclos Históricos, Económicos y Sociales*.
- Marqués, A. (2018). Criptomonedas ¿Evolución o Disrupción financiera? Una propuesta de previsión basada en las cadenas de Markov. *Universidad de León*.
- Martínez Jenkins, A. (2016). Modelo GARCH para la volatilidad de las criptomonedas Bitcoin y Ether. 30-46.

- Martínez, J. (2006). La hipótesis de los mercados eficientes, el modelo del juego justo y el recorrido aleatorio. *Revista Electrónica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA*.
- Mood, M. (1949). The Distribution Theory of Runs. *The Annals of Mathematical Statistics*, 367-392.
- Moreno, B., & Villafradez, R. (2018). Criptomonedas como alternativa de inversión, riesgos, regulación y posibilidad de monetización en Colombia. *Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano*.
- Mota Aragón, B., & Núñez Mora, J. A. (2019). Estimación de la distribución multivariada de los rendimientos de los tipos de cambio contra el dólar de las criptomonedas Bitcoin, Ripple y Ether. *Revista mexicana de economía y finanzas*, 10-21.
- Navas, S. (2015). Un mercado financiero floreciente: el del dinero virtual no regulado (Especial atención a los BITCOINS). *Revista CESCO de Derecho de Consumo*.
- Pernice, I., Henningsen, S., Proskalovich, R., Florian, M., Elendner, H., & Scheuermann, B. (2019). Monetary Stabilization in Cryptocurrencies-Design Approaches and Open Questions. *Crypto Valley Conference on Blockchain Technology* .
- Quiroga, E. (2017). Eficiencia en los mercados financieros y predicción de precios de los activos. *Ciencias Administrativas*, 10.
- Riquelme, E. (2020). *Monedas Virtuales y su impacto en el comercio electrónico*. Mendoza, Argentina.
- Ritter, J. (1988). The Buying and Selling Behavior of Individual Investors at the Turn of the Year. *The Journal of Finance*.
- Robert, H. (1967). Statistical versus Clinical Prediction of the stock markets. *Documento no publicado*.
- Rodríguez, K. (2012). *Evidencia de la forma de eficiencia débil en el mercado accionario colombiano*. Bogotá.

Sánchez Ascanio, L., & Arredondo García, J. (2020). Prediciendo el precio del Bitcoin, y más. *Suma de Negocios*, 42-52.

Sanchez, J. (2016). *Criptomonedas*. España: Universidad Internacional de la Rioja.

Sarmiento, J., & Garcés, J. (2016). Criptodivisas en el entorno global y su incidencia en Colombia. *Revista Le Bret*, 8, 151-171.

Sensoy, A. (2019). The inefficiency of Bitcoin revisited: A high-frequency analysis with alternative currencies. *Finance Research Letters*.

Shiller, R. J. (1979). The Volatility of Long-Term Interest Rates and Expectations Models of the Term Structure. *Journal of Political Economy*, 1190-1219.

Tidy, J. (10 de 07 de 2021). Bitcoin: El Salvador se convierte este martes en el primer país del mundo en adoptar la criptomoneda como divisa de curso legal. *BBC News Mundo*.

Torrado, J. (2009). *Eficiencia del Mercado Accionario en Colombia: un Benchmark Internacional*. . Bogotá.

Torres, Y., & Rodríguez, R. (2009). *Cálculos desarrollados de algunos coeficientes econométricos para contraste de hipótesis*. Santiago de Cuba.

Uribe, J., & Ulloa, I. (2011). Revisando la hipótesis de los mercados eficientes: Nuevos datos, nuevas crisis y nuevas estimaciones. *Cuadernos de Economía*.

Van der Merwe, A. (2021). A Taxonomy of Cryptocurrencies and Other Digital Assets. *Review of Business*, Pág. 30 - 43.

Vega Hevia, C. (28 de junio de 2018). *Xataka.com*. Obtenido de Xataka.com:
<https://www.xataka.com/aplicaciones/la-explasion-del-em-fintech-em-por-que-se-empieza-a-dudar-que-vayan-a-existir-bancos-en-diez-anos>

We are Social Hootsuite. (2018). London: Hootsuite.

Zapata, P. (2015). *Análisis y trazabilidad de operaciones en criptomonedas*. CDMX: UAM.
Departamento de Ingeniería Informática.