# ANALISIS DE LA PARIDAD PUT-CALL EN EL MERCADO EUROPEO DE DERECHOS DE EMISIÓN SOBRE $CO_2$

**David Tarín Bernad**

Trabajo de investigación 019/023

Máster en Banca y Finanzas Cuantitativas

Director/a: Vicente Medina Martínez
Fernando Palao Sánchez

Universidad Complutense de Madrid

Universidad del País Vasco

Universidad de Valencia

Universidad de Castilla-La Mancha

www.finanzascuantitativas.com

**Análisis de la Paridad Put-Call en el Mercado Europeo de Derechos de Emisión sobre $CO_2$**

**David Tarín Bernad**

Trabajo de investigación

Máster en Banca y Finanzas Cuantitativas

Tutores:

Vicente Medina Martínez

Fernando Palao Sánchez

Universidad Complutense de Madrid
Universidad del País Vasco
Universidad de Valencia
Universidad de Castilla-La Mancha

www.finanzascuantitativas.com

**Análisis de la Paridad Put-Call en el Mercado Europeo de Derechos de Emisión sobre $CO_2$**


## Resumen

El presente trabajo estudia la eficiencia del mercado de derechos de emisión de $CO_2$ a través de la paridad de las opciones put y call. Desde un punto de vista teórico, se analizará la existencia de posibles incumplimientos de la paridad put-call, lo que supondría una ineficiencia del mercado. Además, se determinará bajo qué factores es más probable la aparición de esta ineficiencia. Por último, se prueba si un inversor particular tiene la posibilidad de explotar estos desajustes, en un entorno real de mercado. Los resultados revelan que, a pesar de la aparición de algunos incumplimientos de la paridad put-call, el mercado de derechos de emisión sobre $CO_2$ se comporta de forma eficiente, cuando el inversor tiene en cuenta los costes de transacción.



**Palabras clave**: Derechos de emisión sobre $CO_2$, Parida Put-Call, Arbitraje, Opciones, Futuros, Mercados eficientes, inversor institucional

**JEL:** G1

## 1. Introducción

El Esquema de Intercambio de Emisiones de la Unión Europea (EU ETS por sus siglas en inglés) en el que se negocian los derechos de emisiones de dióxido de carbono ($CO_2$), han generado un gran interés entre inversores particulares, institucionales y académicos, que han tratado de comprobar el funcionamiento y comportamiento real del mercado.

El conocimiento de la eficiencia en los mercados con pocos años de existencia es de suma importancia para conocer el funcionamiento y desarrollo de los mercados financieros, ya que, en un mercado eficiente los precios de los activos deberían de reflejar toda la información existente, lo que favorecería una mejora de la reputación y la liquidez. La eficiencia puede probarse a través de modelos y relaciones de no arbitraje entre los distintos activos financieros, como es la paridad Put-Call (en adelante PCP). Fung & Draper (2002), utiliza este enfoque entre los futuros del índice FTSE-100 y las opciones, al igual que lo hace Garay, Ordoñez & González (2003) entre los futuros y opciones del índice S&P500, también utilizado por Belaire (2000) para el mercado de opciones sobre el IBEX 35.

En relación al estudio de la eficiencia del mercado de derechos de emisiones de $CO_2$ encontramos trabajos como el de Palao & Pardo (2012) donde se verifica la eficiencia del mercado en sentido débil, a través de la posible existencia de agrupamientos en los precios, o como analizan Montagnoli & Vries (2010), donde aplican determinados ratios para testar la eficiencia del mercado a través de la varianza y observar si sigue un camino aleatorio, es decir, si la varianza crece linealmente con el tiempo. El estudio de la eficiencia del mercado de emisiones a través de la relación de los precios de las opciones call y put ha sido abordado por autores como Krishnamurti & Hoque (2011).

En relación a la prueba de la eficiencia PCP, es una relación de no arbitraje que debe mantenerse entre los precios de una opción call y una opción put europea o americana sobre el mismo activo, y a un strike y vencimiento coincidente. Esta relación originalmente propuesta por Stoll (1969), fue probada y ampliada para las opciones americanas por Merton (1973).

Existen numerosos trabajos que han utilizado dicha metodología, entre ellos destaca Kamara & Miller (1995), donde se realiza el estudio de la PCP con datos intradiarios, probando la existencia de eficiencia entre el indice S&P 500 y sus opciones

europeas, analizando además aproximación del riesgo de liquidez (entendiéndose como el cociente entre el precio del índice y el precio de ejercicio), la volatilidad y el shock en el mercado, con el objetivo de observar cómo afectan los incumplimientos de dicha PCP. Hsieh, Lee & Yuan (2008) trata de descubrir el precio del índice del mercado de Taiwán, aplicando la PCP con el método de valoración de Black-Scholes, con el objetivo de reducir el riesgo de modelo y comprobar qué activo aporta una mayor información al mercado. Nissim & Tchachi (2011) comprueba la posible existencia de incumplimientos de la PCP que provoquen rendimientos por encima del tipo de interés libre de riesgo con diferentes regresiones, para el mercado de opciones call y put del índice de Tel Aviv (consiste en las 25 empresas con mayor valor negociado de la bolsa de valores de Tel Aviv).

La misma metodología también se ha aplicado a acciones, como lo hace Klemkosky & Resnick (1979) sobre quince compañías que poseen opciones put y call en el CBOE[1] del NYSE y PHLX (bolsa de valores de Filadelfia) donde prueba la eficiencia del mercado con una pequeña muestra (12 meses), a través de regresiones que prueban la equivalencia de la PCP con datos al minuto.

Hay que destacar, el analisis realizado por Vipul (2008) sobre la eficiencia del mercado indio a través de las opciones hallando sincronicidades en intervalos de un minuto y comparando el enfoque de tres tipos de inversores (institucional, general y miembro del mercado), tratando de probar la ocurrencia de incumplimientos con el estadístico Kruskal-Wallis entre diferentes variables. También mencionar el estudio realizado por Fung & Mok (2001) y Marshall & Lung (2002) sobre el mercado de futuros de Hong Kong. El primer estudio, se realiza sobre los precios Bid y Ask hallando sincronicidades a minuto, asumiendo el riesgo de que dichos precios no se hayan ejecutado, sin embargo, el segundo estudio, examina los posibles desajustes de los futuros y opciones, a través del modelo de valoración Black-Scholes y se realiza una serie de regresiones para comprobar la relación de los incumplimientos con el vencimiento, volatilidad y el desajuste en las opciones y futuros.

El objetivo principal de este trabajo reside en realizar un estudio acerca del cumplimiento de la relación PCP, en contrato de opciones sobre el mercado de futuros sobre derechos de emisión de $CO_2$, desde el inicio del mercado el 22 de abril de 2005

[1] CBOE: *Chicago Board Options Exchange*

hasta el 30 de abril del 2019. Para llevar a cabo el estudio, se seguirá la metodología empleada por Krishnamurti & Hoque (2011) que comprueba la eficiencia del mercado a través de la PCP. Además, se analizarán los factores y causas claves que más influyen en las ineficiencias halladas, así como las diferentes variables que puedan explicar la cuantía del beneficio de arbitrar. Por último, se realizará un ejercicio práctico para observar la capacidad de explotar los posibles desajustes por un inversor particular.

Este trabajo es de utilidad en el aspecto académico, puesto que permite documentar si se cumple la Teoría de los Mercados Eficientes, y asi, formar una cartera replica que permita obtener un beneficio sin riesgo. Este estudio es también de utilidad para los inversores que negocian con los derechos de emisión, ya que muestra aquellas circunstancias del mercado más propicias para la aparición de estas ineficiencias de mercado y poder así posicionar ordenes, consiguiendo ventajas en tiempo y precio. Además de ser de importancia para los inversores, también puede serlo para los reguladores, ya que son los encargados de revisar y garantizar el correcto funcionamiento del mercado. La mayoría de los estudios analizados y anteriormente comentados, demuestran indicios de existencia de eficiencia de los mercados.

En resto de trabajo se distribuye de la siguiente forma: La **sección 2** muestra el mecanismo de comercio de derechos de emisiones sobre $CO_2$ y los datos utilizados en el análisis, además de algunas particularidades. En la **sección 3,** se detalla la metodología que se utilizará y los resultados obtenidos**.** En la **seccion 4,** presentaremos un ejercicio práctico sobre el posible aprovechamiento de las ineficiencias del mercado con la estrategia de arbitraje estudiadas en el trabajo de un inversor particular. Por último, en la **sección 5,** se presentan las conclusiones finales extraídas de los análisis y se proponen futuras lineas de investigación.

## 2. Base de datos y características del mercado

### 2.1 El mercado de derechos de emisión sobre $CO_2$.

Desde la revolución industrial, la modificación en el proceso productivo de numerosas empresas, ha ocasionado un incremento del 40% en la concentración atmosférica de dióxido de carbono, tal y como se remarca en Manua (2008), y que los relaciona con la ignición de combustibles fósiles, la deforestaciones, la erosión de suelo y las explotaciones ganaderas. Esta concentración de dióxido de carbono en la atmósfera,

genera gases de efecto invernadero, que absorben y emiten radiación, lo que acaba ocasionando el calentamiento global. En respuesta a este aumento de contaminación y concentración atmosférica, el Protocolo de Kioto de 1997, estableció por primera vez objetivos de reducciones a través de 3 mecanismos de flexibilidad; el mecanismo de desarrollo limpio (MDL), el mecanismo de Aplicación Conjunta y el Comercio de Emisiones de $CO_2$. En el año 2000, se dieron las primeras ideas en relación al comercio de emisiones, con el diseño del ETS de la Unión Europea, lo que llevó a adoptar la Directiva 2003/87/CE[2], que se adoptó en 2003, y que finalmente acabaría con su inicio efectivo en 2005, siendo el principal objetivo, reducir y limitar las emisiones globales de gases de efecto invernadero.

El Mecanismo de Comercio de emisiones buscaba facilitar la transmisión y negociación de los derechos de emisión sobre $CO_2$, siendo el primer sistema internacional de comercio de emisiones del mundo y representando más de tres cuartos del comercio internacional de derechos de emisión, en el que participan todos los países de la UE más Islandia, Liechtenstein y Noruega. El funcionamiento del mercado se basa en un sistema "*Cap And Trade"*, es decir, existe un límite de emisiones y en función de ese límite, se reparten las unidades de emisión (*EUAs*), asignando un determinado número de derechos de emisiones por país e industria, pero que no pueden sobrepasar el techo (*Cap*) establecido en su conjunto. Facilitando además, un sistema de intercambio de derechos entre las empresas deficitarias y las excedentarias (*Trade*).

Es en las plataformas organizadas donde se negocia la mayor cantidad del volumen, entre los que destacan: ICE ECX, el más líquido y de mayor volumen, seguido de lejos por EEX. Adicionalmente, existen otras plataformas como Bluenext, Nordpool o SENDECO2 donde se pueden y pudieron negociar volúmenes de pequeña transcendencia.

En cada una de las plataformas anteriormente descritas, se puede acceder a distintos activos, de los cuales el más importante es el conocido como EUA, que como se menciona en Medina & Pardo (2013), no es un activo común y posee algunas particularidades que merece la pena destacar. El derecho tiene validez espacial, es decir, la capacidad de ser válido en cualquier instalación, y por tanto, la posibilidad de

[2] Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de octubre de 2003, por la que se establece un régimen para el comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero en la Comunidad y por la que se modifica la Directiva 96/61/CE del Consejo. (Directiva, 2003)

comercializar dichos derechos en un mercado único. También posee validez temporal a través de dos figuras importantes que dotan de flexibilidad al sistema, como es el *banking*, que dota al derecho con la oportunidad de ser empleado en periodos posteriores a su emisión, y el *borrowing*, permite a las instalaciones satisfacer sus obligaciones con derechos emitidos en periodos posteriores. Otra de las características relevantes del derecho, y que marca la tendencia del volumen de negociación, es el periodo de cumplimiento como año natural, lo que ocasiona un incremento en el volumen de negociación con vencimiento en diciembre, como se puede observar en la Figura 1, para los distintos vencimientos analizados.

[INSERTAR FIGURA 1]

## 2.2 Descripción de las fases

La primera fase, que abarca del 2005 al 2007, comenzó teniendo un carácter experimental, siendo una fase piloto de tres años. Una de las características claves de esta fase, fue que la misma cubría únicamente las emisiones de $CO_2$ realizadas por los generadores de energía y por las industrias que consumían mucha energía, dándose casi todas las concesiones de derechos de emisión de forma gratuita, a través del Plan Nacional de Asignación (PNA). Ésta fue la encargada de fijar el límite y suministrar los derechos de emisión a los diferentes sectores y empresas afectadas, considerando los datos de emisiones previos a dicha fase y para cada país. También se impuso una sanción a las empresas que no cumpliesen con sus obligaciones, de 40€ por tonelada de emisión de $CO_2$. El principal logro de esta fase fue establecer un precio de cotización, conseguir un libre comercio de derechos de emisiones en toda la UE y la creación de la infraestructura necesaria para monitorizar, informar y verificar las emisiones de las empresas. La primera fase se caracterizó por ser una fase de alta volatilidad, de un mayor riesgo y distorsión de los precios, motivada principalmente por la asignación gratuita de los derechos de emisión de los PNAs y la prohibición de realizar *banking* con la fase siguiente. Todo esto motivó que el derecho comenzase cotizando a un precio entre 25 y 30 €, y que al poco tiempo, cuando el mercado vio el gran excedente de derechos, provocado por la generosidad de la asignación gratuita, descendiese la cotización a 11€ y al final de la fase, tendiera a 0,01€ debido a la prohibición de realizar *banking*.

[INSERTAR FIGURA 2]

La segunda fase, coincidió con el primer periodo de compromiso del Protocolo de Kioto del 2008 al 2012, donde los países tenían objetivos concretos de reducción de emisiones. Las características claves de esta fase fueron la reducción de la asignación gratuita de los derechos y la realización de subastas en algunos países. También se incrementó la sanción en caso de no entregar los derechos, imponiendo una multa por el déficit de derecho de 100€ por tonelada, además de la entrega de los derechos. Gracias a la fase 1, se cuantificó la reducción de los derechos de emisión necesaria para cumplir con el objetivo de reducción en la fase 2, en torno al 6,5% con respecto al 2005. Sin embargo, la crisis económica en 2008 y las expectativas de producción frustradas del sector industrial, llevó a reducciones de emisiones que fueron mayores de lo esperado. Además la incertidumbre sobre la continuidad del Protocolo de Kioto, dió lugar a un gran excedente de derechos y repercutió en el precio durante toda la fase, dejando los precios muy por debajo de los que se observaron al comienzo de la vida del derecho de emisión, como se visualiza en la Figura 2.

En la actualidad, el mercado de las emisiones se encuentra en su tercera fase, que comprende el periodo desde 2013 a 2020. Esta fase es significativamente diferente a las dos anteriores. Entre los grandes cambios que se observa en la *Directiva 2009/29/CE* [3], encontramos un único límite de emisiones en toda la UE, a diferencia de las dos etapas anteriores. La asignación de derechos se hace mediante subasta, en lugar de ser asignaciones gratuitas, y se añaden algunos sectores económicos. Además, se trata de reducir las emisiones de los sectores cubiertos por el sistema en un 21%, con respecto al 2005. A principios del 2019, entró la llamada reserva de estabilidad, que aborda el problema del excedente actual de los derechos de emisión y la mejora de la resiliencia del sistema ante perturbaciones importantes, ajustando la oferta de derechos de emisión en subasta.

Para alcanzar el objetivo general de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero de la UE para el 2030, se prevé la entrada de una cuarta fase que se predice abarque del 2021 al 2030, con la principal finalidad de buscar reducir las emisiones en un 43% con respecto al 2005[4], a través de los recortes en la emisión. A partir de 2021, el

[3] Directiva 2009/29/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril del 2009 por la que se modifica la Directiva 2003/87/CE para perfeccionar y ampliar el régimen comunitario de comercio d derechos de emisión de gases de efecto invernadero.

[4] Comisión Europea del Régimen de Comercio de derechos de emisión de la UE (RCDE UE). Revisión de la Fase 4 (2021–2030). https://ec.europa.eu/clima/policies/ets/revision_es

número global de derechos de emisión descenderá a un ritmo anual del 2,2%, superior al actual 1,74%.

### 2.3 Base de datos

Para realizar el análisis de la eficiencia del mercado, se han extraído los datos del mercado de futuros y opciones sobre los derechos de emisiones de $CO_2$, desde abril del 2005 hasta abril del 2019, con frecuencia intradía, y con el principal objetivo de detectar los desajustes con precios reales de mercado, ya que observar los datos históricos a cierre de la cotización de la sesión, sería observar precios de subastas o calculados mediante el algoritmo de cierre. Sin embargo, los precios intradiarios reflejan el precio real al que se compran y venden los derechos a lo largo de una sesión y es donde se detectan los desajustes reales del mercado.

La contratación de un lote de futuro corresponde a la contratación de 1.000 contratos de derecho de emisión sobre $CO_2$, cada uno de estos derechos permite la emisión de una tonelada de dióxido de $CO_2$. El horario comercial del futuro es de lunes a viernes de 07:00 a 17:00 horas, GMT. La plataforma *ICE ECX,* está abierta para realizar *pretrading*, es decir, el periodo de preapertura de 15 minutos, a partir de las 06:45 horas anteriores al comienzo de la sesión de negociación, que permite a los miembros ingresar órdenes antes del comienzo de la sesión y permitiendo fijar un precio de apertura. El período de liquidación se extiende desde las 16:50:00 a las 16:59:59, con el fin de determinar los precios de cierre. Los datos extraídos de los futuros poseen las variables vencimiento, precio, volumen negociado, dirección de inicio de la transacción (*Bid* u *Offer*), tipo de negociación (ordinaria, por bloque, volumen oculto, …) y momento exacto en el que se ejecuta la orden.

Para poder comprobar la eficiencia del mercado a través de la PCP, se utiliza el histórico de negociación de los diferentes tipos de opciones y los distintos vencimientos. Para cada mes de contrato se incluye una gama de precios de ejercicio que puede cubrir el rango entre 1€ y 100€, con intervalos de 0,50€. El horario comercial es el mismo que el de los futuros, excepto el precio de liquidación designado para las opciones que se extiende desde las 16:00 hasta las 16:15, con el fin de determinar su precio de cierre. Los datos obtenidos de las opciones poseen las variables de vencimiento, precio, volumen

negociado, parte que inicia la transacción (*Bid* u *Offer*), *strike*, tipo de opción (europea o americana) y tipo de negociación u orden emitida al mercado.

En relación a la elección del activo libre de riesgo, multitud de autores recurren a las tasas de oferta interbancaria como Brunetti & Torricelli (2005), Medina & Pardo (2013) y Uhrig-Homburg & Wagner (2009). En este estudio se utiliza el Euribor (1, 3, 6 y 12 meses), de manera consistente con el vencimiento de las opciones. Puesto que las tasas de interés libre de riesgo son muy similares a las tasas de interés de recompra, se asume el mismo tipo de interés al realizar cualquiera de las estrategias disponibles (larga y corta). El dato de extracción de cada uno de los tipos de interés se ha extraído con una frecuencia diaria de EMMI (*European Money Markets Institute*).[5]

## 3. Metodología y resultados

En esta sección se describe las diferentes metodologías, cálculos y estadísticos, para determinar si el mercado de derechos de emisión se comporta de manera eficiente. Para ello comenzaremos analizando el enfoque de PCP.

### 3.1 Enfoque de la Paridad Put-Call

La PCP es una de las metodologías más utilizadas para comprobar el correcto funcionamiento de los mercados. Desarrollada inicialmente en Stoll (1969) se define como muestra la ecuación 1.

$$C_t + Ke^{-r_t(T-3)} = P_t + F_t e^{-r_t(T-3)} \qquad (1)$$

Siendo $F_t$ el precio de los futuros del derecho de emisión de $CO_2$, $K$ el precio de ejercicio, $P_t$ y $C_t$ los precios de las opciones put y call, respectivamente, $r_t$ el tipo de interés libre de riesgo en el horizonte de uno, tres, seis y doce meses, según el vencimiento de las opciones y futuros, y $T$ el tiempo hasta el vencimiento de la opción.[6]

Posteriormente dicha expresión fue ampliada por Merton (1973) para las opciones americanas, como se muestra en la ecuación 2.

$$F_t e^{-r_t(T-3)} - Ke^{-r_t(T-3)} \leq C_t - P_t \leq F_t e^{-r_t(T-3)} - Ke^{-r_t(T-3)} \qquad (2)$$

[5] https://www.emmi-benchmarks.eu/euribor-org/euribor-rates.html

[6] Notar que el vencimiento de la opción se produce 3 días laborables antes del vencimiento de los futuros.

Para poder realizar esta metodología se deben emparejar los futuros y opciones coincidentes en precio de ejercicio, vencimiento y momento de la negociación, suponiendo 3 escenarios en el análisis planteado. El primero, negociado en el mismo momento (intervalo de 0 segundos entre los activos) que significaría la oportunidad de arbitraje real,[7] como se puede observar en la Figura 3. El segundo escenario, con un intervalo de ± 5 segundos entre los tres activos que podría reflejar la automatización de la posibilidad de explotación de arbitraje. Por último, el tercer escenario posee una sincronicidad de 10 segundos (intervalo de ± 10 segundos entre los activos), lo que pretende reflejar al inversor como persona física que trata de realizar el arbitraje e introducir las órdenes de forma manual.

[INSERTAR FIGURA 3]

Una vez analizados todos los cruces posibles para cada uno de los intervalos, podemos observar en la Tabla 1, como los emparejamientos aumentan en los últimos años debido principalmente al aumento de la actividad del mercado, como se observa en la segunda columna de cada uno de los intervalos analizados y como también se puede analizar con el aumento de transacciones en los últimos años del Panel B en la Figura 2.

[INSERTAR TABLA 1]

Todos los emparejamientos hallados en el mercado de emisiones son de opción europea, lo que propicia el uso de la ecuación propuesta por Stoll (1969) para comprobar la posible existencia de desigualdades, que indicarán la posibilidad de que el inversor pueda obtener un rendimiento sin riesgo o explotar la existencia de arbitraje.

Para saber si el arbitraje fue rentable o no, en el trabajo se suponen dos escenarios. El primero, sin costes de transacción, y el segundo, incluyendo diversos costes reales. En el segundo caso, obviaremos los costes fijos de acceso al mercado, ya que supondremos que el agente es un inversor institucional activo del mercado, por lo que para el aprovechamiento de esta estrategia, no requiere de un coste adicional. Sin embargo, incluiremos todos los costes relacionados a la compra y venta de los futuros y opciones por el importe de 0,005€ por lote. Además de este coste, también se añade el coste del depósito del margen, desarrollado por Fung & Mok (2001) para el mercado chino, donde

[7] **Ejemplo**. Una opción call negociada el 19/02/2013 a las 17:47:19 y una put negociada el 19/02/2013 a las 17:47:19, con un mismo strike de 4,5 y un vencimiento a fecha de junio del 2013, podremos agruparlo con el futuro a mismo vencimiento y negociado en el mismo momento.

el importe del coste del depósito es $M$[8], $K$ representa el depósito total del margen, ambos en unidades monetarias, $t_2 - t_0$ es la distancia en días desde la fecha de negociación hasta la expiración del activo y $r$ el tipo de interés libre de riesgo, como se observa en la ecuación 3.

$$M = K\left[\left[\left(1 + \frac{r}{365}\right)\right]^{t_2 - t_0} - 1\right] \qquad (3)$$

En la tabla 2, se muestra la posibilidad de arbitraje para cada uno de los intervalos anteriormente descritos, separados en dos paneles. El Panel A, es el escenario en el que suponemos que no existen costes de transacción, y el Panel B es el escenario más realista, puesto que se incluyen los gastos de transacción y depósito.

[INSERTAR TABLA 2]

Analizando detalladamente los desajustes encontrados y representados en la Tabla 2, se puede observar que en el 75% de las ocasiones, se podría realizar algún arbitraje, sin embargo, si tenemos en cuenta los costes anteriormente mencionados, la posibilidad de arbitraje decrece en un 10%, existiendo alrededor de un 64% de posibilidad de existir un rendimiento libre de riesgo, cuando existe sincronicidad entre los tres activos. Hay que destacar que de todas las posibilidades de arbitraje halladas para las tres muestras a distintos intervalos, solo una de ellas posee un vencimiento distinto a diciembre, este hecho evidencia la particularidad propia del mercado que se ilustra en la Figura 1 y se detalla en la Sección 2.1.

Las estrategias para explotar dichos desajustes pueden ser con posicionamientos largos o cortos. El inversor optará por la estrategia corta, cuando la opción call esté infravalorada sobre la opción de venta. Esto supone vender la opción de venta y comprar su réplica. Sin embargo, optará por una estrategia larga, cuando la opción call estuviese sobrevalorada sobre la opción de venta, vendiendo la opción de compra y comprando su réplica. En la Tabla 3, se muestra la cuantía de los beneficios del arbitraje por año, separada por cada una de las estrategias que puede optar el inversor para aprovechar las oportunidades de arbitraje para cada uno de los intervalos. Como se puede observar, la

[8] Para realizar una simulación de llevar a cabo estrategias basadas en la ineficiencia de la PCP es necesario tener en cuenta coste el depósito, sin embargo, en el periodo en el que se ha realizado el estudio se han observado momentos donde el tipo de interés es negativo, suponiendo para estos casos, tipos de interés cero, puesto que en la práctica no tiene lugar este tipo de remuneración negativa en los depósitos.

gran mayoría de los desajustes se deberían de explotar con la estrategia corta, también hay que destacar, que gran parte de los arbitrajes se hallan entre el intervalo 0 y 40 €, y que tras incorporar los costes de transacción, algunos dejan de ser rentables.

[INSERTAR TABLA 3]

### 3.2 Prueba de eficiencia del mercado

Para probar la eficiencia del mercado se seguirá la metodología propuesta por Krishnamurti & Hoque (2011), donde se transforma la ecuación 1, en la ecuación 4 que se muestra más adelante, y que es muy similar a la que se aplica en Marshall & Lung (2002) para el principal índice bursátil chino (HSI).

$$C_t + Ke^{-r_t(T-3)} = P_t + F_t e^{-r_t(T-3)}$$

$$C_t - P_t = (F_t - K)e^{-r_t(T-3)}$$

Si $Y_t = (C_t - P_t)$ y $X_t = (F_t - K_t)e^{-r_t(T-3)}$, entonces:

$$Y_t = \lambda_0 + \lambda_1 X_t + \varepsilon_t \qquad (4)$$

La ecuación 4, trata de probar si la PCP posee algún desajuste, y por tanto, si existe alguna oportunidad de arbitraje bajo la hipótesis nula de los coeficientes de $\lambda_0$ $y$ $\lambda_1$que deberían de ser 0 y 1, respectivamente. Con ello se podría concluir que el mercado es eficiente. Para realizar dicha regresión representada anteriormente, se debe de asegurar la no presencia de estacionariedad en las principales variables que intervienen en la regresión, a través de la prueba de Dickey-Fuller Aumentado, para un nivel de significatividad del 5%, de las variables Strike, histórico de precios y tipo de interés libre de riesgo, como se muestra en el Panel A de la Tabla 4.

[INSERTAR TABLA 4]

Los contrastes realizados para cada una de las variables de la ecuación 1, arrojan la existencia de series no estacionarias en el precio del futuro para las tres muestras analizadas, el precio de ejercicio para el intervalo de 0 segundos, el precio de la opción call para el intervalo de 5 segundos y el precio de la opción put y tipo de interés para el intervalo de 10 segundos, todos ellos con niveles de significatividad del 5%. Puesto que las variables $Y_t$ y $X_t$, poseen variables no estacionarias, obtendremos las primeras

diferencias de $\Delta Y_t = (Y_t - Y_{t-1})$ y $\Delta X_t = (X_t - X_{t-1})$, proponiendo la ecuación 5 como la nueva regresión.

$$\Delta Y_t = \lambda_0 + \lambda_1 \Delta X_t + \varepsilon_t \qquad (5)$$

Como se observa en el Panel B de la Tabla 4, la ecuación 5 podría ser estimada como una regresión consistente, puesto que las variables presentan estacionariedad, sin embargo, uno de los problemas potenciales que se pueden encontrar es la posible existencia de autocorrelación y heterocedasticidad condicional en la regresión. Para obtener un buen estimador, se analizan las variables de la nueva ecuación $\Delta Y_t$ y $\Delta X_t$ en el Panel C de la Tabla 4, mediante el estadístico de *Durbin-Watson* (D-W).

Posteriormente, en el Panel D de la Tabla 4 se analiza la regresión de la ecuación 5 con el estadístico *Durbin-Watson*, donde se prueba para la muestra de sincronicidad de diez segundos, la existencia de autocorrelación, sin embargo, la prueba de *White* que permite analizar la heterocedasticidad, arroja que para todas las muestras analizadas hay altos valores de *p-valor*, lo que nos sugiere que se cumple el supuesto de homocedasticidad.

Para resolver el problema hallado en la ecuación 5, donde se observa la existencia de autocorrelación, se necesita aumentarla, tal y como se plantea en la ecuación 6.

$$\Delta Y_t = \lambda_0 + \lambda_1 \Delta X_t + \sum_{i}^{p} \varphi \Delta Y_{t-1} + \sum_{i}^{q} \theta\, \varepsilon_{t-1} + \varepsilon_t \qquad (6)$$

Para la detección de los retardos $p$ y $q$ que maximicen el criterio de información de Akaike (AIC), se realizan todas las regresiones en un rango de 0 a 3 para los regresores del autorregresivo y media móvil (ARMA) de la variable dependiente $\Delta Y_t$, como se observa en el Panel A de la Tabla 5, y que se detalla a continuación.

[INSERTAR TABLA 5]

Siguiendo la metodología utilizada por Bollerslev (1986), el error se descompondrá como un GARCH (r,s), como se representa en la ecuación 7, siendo $\omega > 0$ (una constante), $\alpha > 0$ (representa el término de la sensibilidad de la varianza condicional en relación a los residuos) y $\beta > 0$ (siendo el término que mide la sensibilidad de la varianza condicional del periodo anterior), con los retardos $r$ y $s$ que se determinarán con el mismo criterio de información anterior.

$$\varepsilon_t = \eta_t \sqrt{h_t}\,, \qquad \eta_t \approx iid(0,1)$$

$$h_t = \omega + \sum_{i=1}^{r} \alpha \varepsilon_{t-i}^2 + \sum_{i=1}^{s} \beta h_{t-i} \tag{7}$$

Una vez incorporados los efectos de ARCH, mejoramos la eficiencia de la estimación y obtenemos un modelo más robusto para estimar los distintos parámetros del ARMA (p, q) y GARCH (r, s) y sus valores iniciales. Los diferentes resultados para el modelo ARMA han sido corregidos con el modelo GARCH, ya que, resuelven el problema de correlación serial, adoptando correctamente los retardos sobre la regresión. Se puede observar cómo para el análisis de regresión presentado en la Tabla 5, los coeficientes de los parámetros $\boldsymbol{\lambda_0}$ **y** $\boldsymbol{\lambda_1}$ para cada una de las muestras, son muy próximos a 0 y 1, respectivamente, lo que nos indica que el mercado de derechos de emisiones de $CO_2$ posee indicios de eficiencia, como también lo demostraba Krishnamurti & Hoque (2011). En las próximas secciones, trataremos de analizar de forma detallada los pocos incumplimientos hallados durante toda la historia del mercado y analizaremos si las oportunidades encontradas son viables.

### 3.3 Análisis de variables causantes del arbitraje

Una vez analizada la eficiencia del mercado de emisiones, en este apartado se tratará de caracterizar y explicar las variables que puedan ser las causantes de una posible oportunidad de arbitraje. Para ello, se seleccionan diferentes variables como es la **estacionalidad trimestral**, donde Lucia, Mansanet-Bataller & Pardo (2015), identifican un mayor nivel de especulación en el primer trimestre de cada año.

También se analiza la **estacionalidad diaria**, caracterizada por el número de desajustes hallados por hora, como plantea Vipul (2008) para el índice bursátil indio compuesto por 50 activos, demostrando que se da un mayor número de desajustes en las primeras y últimas horas de apertura y cierre de la cotización, respectivamente. Según Fung & Draper (2002), se observa un patrón muy similar en el índice bursátil de referencia de la Bolsa de Valores de Londres (FTSE 100).

También se examina la variable **valor**, entendida como el coeficiente entre el precio del futuro y el precio de ejercicio (F/K). Esta aproximación trata de medir que tan lejos está el precio del futuro en porcentaje del precio de ejercicio, que como demuestra

Vipul (2008), Kamara & Miller, (1995), Tian & Ackert (1999) y Fung & Draper (2002) para los mercados de India, EE.UU y Reino Unido, existe un mayor número de ineficiencias y sincronicidad cuando la opción esta *At-the-money*, sin embargo, cuando la opción se encuentra en valores extremos con respecto al precio *spot*, se logra un mayor beneficio.

Además, se analizará si las posibles causas del arbitraje, las ocasiona en mayor o menor medida la opción call o la opción put, debido a una sobrevaloración o infravaloración del precio teórico, calculado con el modelo de *Black-Scholes*, como lo plantea en Marshall & Lung (2002) para el principal índice bursátil chino y donde se comprueba que la serie de precios con desajustes (diferencia entre el valor observado y teórico) posee autocorrelación, es decir, los desajustes no son aleatorios y tienden a persistir por debajo o por encima de cero.

Por último, se estudiará si **el tiempo a vencimiento** influye en la aparición de los desajustes entre los precios de las opciones call y put. Esto mismo lo demuestra Marshall & Lung (2002), hallando la existencia de correlación positiva y significativa entre el número de arbitrajes y el tiempo a vencimiento.

Para ello comenzaremos analizando la distribución del número de transacciones y cuantía de beneficio de la estacionalidad trimestral y diaria. Este análisis se puede observar en la Figura 4 para la muestra de sincronicidad de diez segundos.

[INSERTAR FIGURA 4]

Como se puede analizar en el Panel A de la Figura 4, se observa que existe un mayor número de transacciones y posibilidad de arbitraje durante el tercer y cuarto trimestre, sin embargo, si observamos la cuantía en euros del beneficio de arbitraje, observamos que la gran mayoría se concentra en el primer y cuarto trimestre, situándose en torno a los 4.000 €, muy por encima del segundo y tercer trimestre que no alcanzan los 500€. En el Panel B de la Figura 5, se observa la distribución de negociación diaria bastante repartida durante todas las horas del día, excepto a las 8:00, 12:00, 14:00 y 17:00 que está por debajo de la media. Hay que destacar que la mayor cuantía del beneficio por arbitraje se obtiene desde las 15:00 hasta el cierre de mercado (17.00), situándose muy por encima del resto de horas de negociación del día, esto reafirma lo demostrado por Vipul (2008) y Fung & Draper (2002), para las última horas de negociación.

En el caso de la variable valor, podemos observar como en el Panel C de la Figura 4, se agrupa un gran volumen de transacciones y la posibilidad de arbitrajes en valores *At-the-money*, es decir, valores del precio de ejercicio muy próximos al valor del futuro (entre $0.95 < \frac{F}{K} < 1.05$), aproximadamente un 50% del número de transacciones, sin embargo, dicho intervalo solo consigue explicar un 2% del total de la cuantía de arbitraje. Hay que destacar que el intervalo $\frac{F}{K} < 0.80$ reúne un 70% de la cuantía del beneficio, ocasionado principalmente por 4 transacciones que se encuentran muy *Out-the-money*. Obviando los cuatro valores extremos anteriormente descritos, hay que destacar que las siguientes agrupaciones poseen una cuantía de arbitraje entorno a los 750€, dándose entre un 20% y un 15% inferior al precio del Futuro (*Out-the-money*) y unos 400€ entre un 5% y un 10% por encima del valor del Futuro (*In-the-money*).

Para probar las posibles causas del arbitraje, se analizan las medianas con el estadístico *Kruskal-Wallis* como lo utiliza Vipul (2008), para las variables valor, hora de negociación del día, estacionalidad trimestral y tiempo a vencimiento, afirmando que el arbitraje es una variable dependiente de todas ellas, es decir, que con un nivel de significatividad del 5%, rechazan la hipótesis nula de que son muestras independientes, y por tanto, la variable arbitraje se comporta de forma distinta según la hora de negociación, trimestre, valor y vencimiento.

Otro de los principales motivos que pueden causar un desajuste, es la posible existencia de sobrevaloración o infravaloración del precio de la opción call o de la opción put, observado sobre el valor teórico. Para poder realizar dicha comparación se debe calcular el valor teórico de la opción call (Ecuación 8) y la opción put (Ecuación 9), y así observar la posible causa de la ineficiencia. Para ello se utiliza el modelo de *Black-Scholes*, propuesto en un principio por Black & Scholes (1973) y Merton (1973) y posteriormente adaptada para los futuros por Black (1976).

$$\widehat{C_{t,T}}^{9} = e^{-rT}\left[F_{t,T}N(d_1) - XN(d_2)\right] \qquad (8)$$

$$\widehat{P_{t,T}} = e^{-rt}\left[XN(-d2) - F_{t,T}N(-d_1)\right] \qquad (9)$$

Donde:

[9] $\hat{C}_{t,T}$ y $\hat{P}_{t,T}$, representan el valor teórico calculado por el modelo de Black-Scholes

$$d_1 = \frac{\ln\left(\frac{F_{t,T}}{X}\right) + (\sigma^2/2)T}{\sigma\sqrt{t}}$$

$$d_2 = d_1 - \sigma\sqrt{t}$$

Para observar la diferencia entre el precio observado y el valor teórico, lo definiremos de la siguiente manera:

$$M_c = \frac{C_{t,T} - \hat{C}_{t,T}}{\hat{C}_{t,T}} \quad (10)$$

$$M_p = \frac{P_{t,T} - \hat{P}_{t,T}}{\hat{P}_{t,T}} \quad (11)$$

Donde $C_{t,T}$ y $P_{t,T}$ son los valores observados y $\hat{C}_{t,T}$ y $\hat{P}_{t,T}$ son los valores teóricos de la fecha $t$, ambos con tiempo de expiración en T. Los valores que nos indicarán el posible desajuste entre el precio observado y el teórico serán $M_c$ y $M_p$, siempre que sean distintos de cero. En la Figura 6, se pueden observar las diferencias existentes entre el valor teórico y observado, para las opciones call ($M_c$ ) y las opciones Put ($M_p$).

[INSERTAR FIGURA 5]

Como se ilustra en la serie de desajustes de la opción call y opción put en el Panel A y B de la Figura 5, respectivamente, se observa claramente periodos de infravaloración de precios. La serie de desajuste de la opción call de media suele estar infravalorado entorno a un 45%, con respecto al valor teórico. Si observamos detalladamente el rango de sobrevaloración e infravaloración, vemos que de media está en torno a un 20% y un 55%. Algo similar sucede para el caso de la opción put, donde observamos que de media se encuentra infravalorada en un 40%, algo inferior a la opción call, encontrándose el rango de sobrevaloración e infravaloración en torno a un 35% y un 50%. Para tratar de observar estas diferencias, si son significativas, se realizan distintos contrastes, proponiendo como hipótesis nula $M_c = 0$ y $M_p = 0$, como se observa en el Panel A de la Tabla 6.

[INSERTAR TABLA 6]

Una vez observado los desajustes entre el precio teórico y precio observado, podemos analizar como para el caso de las opciones call y put, la variable desajuste ($M_c$ y $M_p$) posee un nivel de significatividad del 5%. En las regresiones realizadas podemos

observar la existencia de autocorrelación de *Durbin-Watson*, para las dos muestras analizadas y verificarlas con la Figura 6.

[INSERTAR FIGURA 6]

El gráfico arroja la existencia de una fuerte autocorrelación positiva en las series $M_c$ y $M_p$, siendo ligeramente superior la serie de desajustes de la opción call. La existencia de autocorrelación en la serie de desajustes, implica que no se distribuyen al azar y alrededor de cero, sino que tienden a persistir por encima (sobrevalorados) o por debajo (infravalorados). Esto puede venir ocasionado, por el inversor especulador que puede estar buscando la tendencia general y el sentimiento de mercado, siguiendo el movimiento de las opciones.

Por último, al analizar la regresión realizada para observar la relación entre el vencimiento y las series de desajustes de precio ($M_c$ y $M_p$), como se muestra en el Panel B de la Tabla 6, se puede observar que existe una relación positiva. Este hecho implica, que exista un mayor desajuste en la serie de precios de las opciones, cuanto mayor es el vencimiento. Esta conclusión ratifica, la relación hallada por Marshall & Lung (2002).

### 3.4 Análisis de las variables explicativas de la cuantía del arbitraje

Una vez analizadas las posibles causas de los incumplimientos hallados en el mercado de emisiones, en este apartado, se trata de analizar las variables que pueden maximizar el beneficio del arbitraje. Para realizar el análisis, hemos diferenciado las variables en dos grupos. El primero, son las variables de mercado que dependen de las decisiones propias de cada inversor, mientras que el segundo grupo corresponden a las variables que afectan al valor de las opciones.

En el grupo de las variables de mercado, se analiza la **cuantía del arbitraje** obtenido por cada uno de los desajustes. En análisis posteriores, será la variable dependiente, como se propone en Belaire (2000), con el fin de explicar el beneficio del arbitraje en el índice del mercado español.

En este grupo, también analizaremos el **volumen de negociación** en el momento de la oportunidad de arbitraje, para observar si un mayor volumen proporciona un mayor beneficio, como demuestra Garay, Ordoñez & Gonzalez (2003) afirmando que posee una

influencia clara sobre la obtención de un mayor beneficio, y por tanto, una relación positiva respecto a la cuantía del arbitraje, para uno de los índices más relevantes de Estados Unidos (S&P 500).

Otra de las variables que se examina, es el posicionamiento que debe optar el inversor en el mercado para explotar el posible desajuste, esta variable es conocida como la **estrategia** y tiene como principal objetivo, probar si el posicionamiento corto o largo proporciona de forma sistemática un mayor beneficio, como analiza Belaire (2000) para el principal índice español, resultando ser una variable no significativa.

Por último, en dicho grupo incluiremos el **tipo de orden** que emite el inversor al mercado, para explotar dicha oportunidad de arbitraje. Las órdenes pueden ser ordinarias, protegidas, bloque, etc., o desde el lado en el que se inicia la transacción como es ***bid*** o ***ask***.

También se incluye la **variación del Interés Abierto**, que se relaciona con la entrada o salida de posibles compradores, como indica Sørhus (2018) para el mercado de derechos de emisión de $CO_2$. Un aumento de dicho indicador se puede interpretar como una señal alcista, implicando un aumento del precio o por el contrario, un decremento en este indicador nos puede indicar un descenso en el precio. Esta variable es de suma importancia, si tratamos de observar si la cuantía del beneficio puede venir reflejada por una posible tendencia alcista o bajista del mercado.

En el segundo grupo, caracterizado por las variables propias de las que depende el valor de la opción, se estudia el **tiempo a vencimiento** (calculado como la diferencia en días desde la fecha de negociación, hasta la fecha de expiración) de la opción, que como demuestra Fung & Draper (2002), los incumplimientos de la PCP aumentan con el tiempo de expiración.

En este mismo grupo se analiza la variable **valor**, entendiéndola como la diferencia entre el futuro y el precio de ejercicio, con el objetivo de ver qué sucede cuando la opción está muy *In-the-money* (el precio del futuro está por encima del strike de la opción), *At-the-money* (el precio del futuro es cercano al strike de la opción) u *Out-of-the-money* (el precio del futuro está por encima del strike de la opción). Esta última variable, es analizada por Misra & Misra (2005) para el principal índice bursátil indio, donde se confirma que existe una mayor oportunidad de arbitraje, cuando la opción se encuentra muy dentro o fuera de dinero.

Por último, en este grupo tambien se analiza la **volatilidad** propuesta por Parkinson (1980), aplicándose esta medida para datos intradiarios y calculados de la siguiente manera:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{4ln2}(lnH_t - lnL_t)^2} \qquad (13)$$

Donde $H_t$ y $L_t$, es el precio máximo y mínimo para cada día, respectivamente. Se puede interpretar que la variable volatilidad podría tener una relación positiva con la oportunidad de arbitraje, ya que, un incremento en la volatilidad, aumenta el valor de las opciones y puede generar valores extremos que den lugar a mayores magnitudes en las ineficiencias. Belaire (2000) prueba que dicha variable no es significativa para explicar la cuantía de arbitraje.

En un primer análisis exploratorio, se analizan los arbitrajes encontrados en el escenario más conservador (con costes de transacción), para la muestra de intervalos de cero, cinco y diez segundos, el tipo de órdenes que ha emitido el inversor al mercado y desde donde se han iniciado dichas transacciones, como se puede observar en la Tabla 7.

[INSERTAR TABLA 7]

En el Panel A de la tabla 7, podemos remarcar que en el caso de las opciones call y put, el inicio de la transacción se produce por parte del comprador, o *Bid* (B), en un 90% y 70% de las ocasiones, respectivamente. Sin embargo, si se analiza para el futuro, los intervalos de cero, cinco y diez segundos se sitúan en el 80%, 65% y 55%, respectivamente.

Analizando el tipo de orden emitida por el inversor, en el Panel B de la Tabla 7 observamos que para el caso de las opciones put y call las órdenes más comunes son las de bloque ("K"), siendo operaciones que negocian grandes volúmenes, mientras que el resto son emitidas de forma ordinaria ("O"), lo que implica que las operaciones son estándar y realizadas a través de *Market Makers* y tratadas con fecha de liquidación el día de contratación. Sin embargo, si se analizan los futuros, se observa que existe una mayor disparidad en el tipo de órdenes que suelen emitirse al mercado, como son, las ordenes por bloque ("K"), en un 40%, 19%, y 12%, y las transacciones protegidas ("T"), dándose en un 17%, 59% y 74%, para los intervalos de cero, cinco y diez segundos, respectivamente. El resto de órdenes emitidas son ordinarias.

Este mismo análisis se ha realizado para las distintas fechas de expiración como se observa en la Tabla 1 del Anexo, detectándose que en los últimos vencimientos se han incrementado las transacciones iniciadas desde el *Offer* (O). También se ha comprobado con la Tabla 2 del Anexo, que para los últimos vencimientos, el tipo de ordenes emitidas por el inversor en el mercado, han cambiado, ya que en los primeros vencimientos para los que se ha detectado la posibilidad de arbitraje, predominaban las ordenes ordinarias ("O"), sin embargo, en los últimos años se observa que el tipo de órdenes que están generando una mayor posibilidad de arbitraje, son las ordenes que se negocian por bloques ("K").

Una vez caracterizada la posibilidad de arbitraje, tal y como se ha visto en la Sección 3.1, con las posibilidades de arbitraje y el posicionamiento del inversor, y una vez definida de forma descriptiva el tipo de orden emitida por el inversor y el lado desde el que se inicia la transacción de arbitraje, se analizan de forma más detallada las principales variables de los arbitrajes, tal y como se muestran en la Tabla 8. Dividida a su vez en dos paneles, donde se representa por un lado el escenario con costes de transacción, y por otro, el escenario libre de costes, distribuidas según la estrategia utilizada por el inversor para las distintas muestras analizadas. Para realizar dicho análisis se han obviado aquellos cruces de los que no se ha podido obtener un beneficio y algunas transacciones que mostraban valores extremos.

[INSERTAR TABLA 8]

Como se observa en la Tabla 8, la variable **arbitraje** posee en media, un mayor número de observaciones y beneficio para la estrategia corta, tanto para el escenario con costes, como sin ellos. Si analizamos la variable **vencimiento**, vemos que no existe una gran diferencia entre el valor mostrado para cada una de las estrategias. Se puede afirmar, que el vencimiento promedio con el que se suele dar un mayor porcentaje de arbitraje, para las muestras analizadas, es entorno a los cinco y siete meses previos a la expiración de los activos utilizados para la PCP.

En relación a la variable **volumen negociado**, se observa que la estrategia corta, es la que permite obtener un mayor beneficio, con un menor número de contratos, sin embargo, cuando incluimos los costes de transacción, el número de contratos negociados aumenta y con ello la posibilidad de obtener un mayor beneficio. Por último, cabe destacar para la variable **valor,** que existe una mayor distancia entre el precio de ejercicio de las opciones y el precio del futuro, en para la estrategia corta. A priori puede ser uno

de los principales motivos que ocasiona un mayor beneficio en el arbitraje. En relación a las variables **interés** y **volatilidad**, no se observan grandes diferencias a destacar entre los diferentes escenarios y estrategias analizadas.

Una vez observada todas las variables de forma descriptiva en la Tabla 8, se analizará en el Panel A de la Tabla 9 si existen diferencias significativas en media (con el estadístico t-student), mediana (con el estadístico *Kruskal-Wallis*) y varianza (F-Test), para cada una de las variables entre los escenarios sin costes y con costes. También se analizará en el resto de los paneles de la Tabla 9, y para cada una de las muestras, las diferentes relaciones existentes a través de la correlación de Spearman, entre las variables del grupo de mercado y las propias de las opciones, para determinar las posibles relaciones significativas y su signo.

[INSERTAR TABLA 9]

Como se puede observar en el Panel A de la Tabla 9, no existen diferencias significativas entre los escenarios sin costes y con costes de transacción, en media, mediana y varianza, para las distintas series de variables, excepto para la varianza de la variación del open interest de la muestra de cero y cinco segundos.

En cuanto a la relación de las diferentes variables explicativas que observamos con respecto a la variable arbitraje en el resto de paneles de la Tabla 9, hay que destacar que conserva la misma relación, tanto para el escenario con costes de transacción, como sin ellos. Analizando detalladamente la variable volumen y valor, se puede afirmar que son significativas al 95%, excepto para la muestra sin costes de transacción en el intervalo de cero segundos, que la variable valor es no significativa. También hay que destacar, que la relación existente entre la variable arbitraje y la variable valor es negativa, es decir, cuando la diferencia entre el precio del futuro y el precio de ejercicio sea negativa (*out-of-the-money*), mayor será la cuantía del arbitraje. Se concluye por tanto, que cuanto más fuera de dinero se encuentra la opción, mayor será el beneficio que el inversor pueda obtener, como ya se adelantó anteriormente.

Conviene destacar que la variable volumen posee una relación positiva con respecto a la variable arbitraje, como se puede observar con la correlación de Pearson en la Tabla 9. Esto implica que un incremento en el volumen negociado se puede traducir en un mayor número de operaciones. Por último, la variable de volatilidad es significativa al 95% para ambos escenarios, manteniendo una relación positiva con el arbitraje, indicando

que a mayor volatilidad, mayor es la posibilidad de que haya valores extremos (*out-of-the-money* o *in-the-money*), que generan importantes incrementos en la cuantía del beneficio de arbitraje. Respecto al resto de variables, como es el vencimiento, tipo de interés y variación del *open interest*, no se observa significatividad de las mismas.

Por último, una vez detectado el comportamiento de las principales variables propias del mercado y de las opciones, se realiza un análisis exhaustivo de la variable arbitraje, para explicar con diferentes técnicas econométricas la cuantía del beneficio. Para ello comenzamos analizando el comportamiento de la variable arbitraje, y si responde a la hipótesis de normalidad e independencia.

[INSERTAR TABLA 10]

El Panel A de la Tabla 10 muestra que se rechaza la hipótesis de normalidad, para ambos escenarios, en base al contraste de Jarque-Bera, esto además se confirma con los resultados del tercer y cuarto momento (asimetría y curtosis) de la variable. Para solucionar dicha problemática se suaviza la serie, reformulándola en logaritmos y ajustándola a la hipótesis de la normal. Como se muestra en el Panel B de la Tabla 10, el estadístico Jarque-Bera y los parámetros de asimetría y curtosis son más próximos a una posible región de aceptación de la normalidad, también verificable en la Figura 7.

[INSERTAR FIGURA 7]

Una vez asumida la existencia de normalidad en la variable dependiente, procede a seleccionar las variables independientes anteriormente descritas y se proponen una serie de regresiones, donde la variable dependiente será la cuantía del beneficio de arbitraje incluyendo los costes y sin ellos. Las variables explicativas se seleccionarán a través de la técnica econométrica *Stepwise-forward*, que es un modelo de regresión en el que incorporan variables que sean significativas con un *p-valor* mínimo del 25%. Posteriormente maximizaremos el $R^2$ a través de la técnica *Swapwise-Max*, para optimizar los valores obtenidos en la regresión. El coeficiente de determinación solo coincidirá para las dos técnicas, cuando las variables introducidas en la regresión posean el *p-valor* mínimo exigido por la técnica *Stepwise-forward*, ya que si no cumple con el umbral exigido, impedirá incorporar alguna variable al modelo.

[INSERTAR TABLA 11]

La Tabla 11 muestra las regresiones con los dos escenarios de costes y para cada uno de los intervalos, mostrando un coeficiente de determinación entre un 65% para la muestra con menos observaciones (intervalo de cero segundos), y alrededor de un 50% y 40% para la muestra de intervalos de 5 y 10 segundos, respectivamente. Adicionalmente se puede observar que con la técnica *Swapwise-Max,* se maximiza el coeficiente de determinación, pero el incremento que se logra del $R^2$ es muy reducido, respecto a la técnica alternativa *Stepwise-forward,* que elimina aquellas variables que poseen *p-valor* superior al 25%, con el fin de no tener problemas de sobrestimación en las regresiones analizadas. Hay que destacar que en las seis regresiones analizadas, en todas ellas, las variables volumen y volatilidad muestran significatividad al 95%, conservando una relación positiva con la variable dependiente. Por tanto, se puede concluir que cuando existe una mayor volatilidad diaria en el mercado, o bien el agente de mercado realiza una operación de mayor volumen, la cuantía de beneficio que puede explotar es mayor.

## 4. EJEMPLO PRÁCTICO DE UN INVERSOR INDIVIDUAL

En este estudio, se valorarán todos los costes necesarios de acceso al mercado que debe de incurrir un inversor particular para poder negociar en el mercado de emisión de $CO_2$ y la inversión media que debería de realizar para poder llevar a cabo una oportunidad de arbitraje.

Para poder comercializar los futuros y opciones, el inversor debe ser un miembro general, comercial o participante, y tener acceso a un usuario electrónico o ser titular del derecho de negociación de comercio de emisiones.[10]

Los inversores que tengan intención de negociar o liquidar futuros y/o opciones en ICE ECX, deberá de aportar un importe de 2.500€ para poseer el derecho de comercio de emisiones, y una vez satisfecho este importe, se deberá de pagar la inscripción de 2.500€ adicionales para tener acceso al mercado anualmente. En el mercado existe, el participante general, al cual se le permite liquidar sus propias negociaciones y las de sus clientes, y el participante comercial, que se le limita la comercialización a únicamente por cuenta propia. Adicionalmente, ambos participantes deberán establecer un acuerdo de

[10] Guía de Usuario ICE ECX: https://www.theice.com/publicdocs/ICE_ECX_user_guide.pdf

compensación con un miembro compensador o tener un requisito de patrimonio neto de 5 M€.

Con todo, suponiendo los costes fijos anuales de participación en el mercado de 5.000€ y los desajustes hallados para los inversores institucionales en la Sección 3.1, no existirían oportunidades reales de arbitraje cuya cuantía de beneficio fuera superior al coste fijo. Cabe mencionar también, que el beneficio acumulado de arbitraje para el volumen hallado de los activos, es inferior al coste fijo acumulado durante los años analizados. Una vez detectadas las ineficiencias se evalúa cuál hubiera sido el volumen medio de contratos necesario para alcanzar el punto muerto, es decir, aquel punto a partir del cual una negociación adicional proporciona beneficio al inversor.

[INSERTAR TABLA 12]

Como se observa en la Tabla 12, el volumen de contratación para aprovechar las ineficiencias del mercado por un inversor particular, contando con todos los costes de transacción de acceso al mercado, debería de incrementarse en gran media, en relación al volumen observado por el inversor institucional. A continuación, se ilustra en la Figura 8 un ejemplo de la cantidad de contratos que debería de negociar un inversor particular, y un inversor institucional, para aprovechar las oportunidades de arbitraje.

[INSERTAR FIGURA 8]

Todo ello nos ayuda a concluir, que el inversor particular que quiera arbitrar el mercado de derecho de emisiones de $CO_2$, tendrá grandes dificultades para ello por diversas razones. En primer lugar, los desajustes son escasos al principio del periodo analizado, lo que ocasiona que el inversor pueda correr el riesgo de estar pagando una cuota fija de acceso al mercado y que no tenga la posibilidad de explotar ninguna oportunidad de arbitraje. En segundo lugar, y ligado a los escasos desajustes existentes, el inversor debería de contar con un gran volumen de liquidez durante todo el periodo, para poder ejecutar la orden en el momento en el que se genere la ineficiencia en el mercado. Esto implica una acumulación de recursos ociosos hasta que exista la posibilidad de arbitraje.

También cabe mencionar, que el inversor particular pese a tener acceso al mercado y tener un gran volumen de liquidez, corre el riesgo de que un inversor institucional, con

posibilidad de contratar volúmenes muy superiores y con mejor acceso al mercado, pueda corregir los desajustes antes de que pueda percibirlos el inversor particular.

## 5. CONCLUSIONES

Este trabajo tiene como objetivo, el estudio de la eficiencia del mercado de derechos de emisión de $CO_2$, a través del enfoque PCP. Además, de analizar los principales factores que puedan provocar ineficiencias y las diferentes variables que puedan explicar la cuantía del beneficio de arbitraje.

A pesar del gran tamaño de la muestra del estudio, comprendido entre abril de 2005 y mayo del 2019, el número de arbitrajes detectados es inferior al observado en otros trabajos de investigación, focalizados en otros mercados. Esto puede venir motivado por el intervalo de sincronicidad entre los distintos activos, ya que, en muchos de los trabajos de investigación son al minuto y en el caso del presente trabajo, se han supuesto tres escenarios más restrictivos (0, 5 y 10 segundos), ocasionando que el número de coincidencias de negociación sea inferior.

El número de oportunidades de arbitraje se sitúan entre 100 y 350 posibilidades de arbitraje, durante los 14 años analizados, dándose la posibilidad de arbitraje en la fase II y III, y sin experimentar grandes diferencias de arbitraje de un año a otro, es decir, no encontramos un patrón claro de reducción del número de arbitrajes con el tiempo.

Cabe destacar que todos los registros que dan la posibilidad de arbitraje, excepto uno (vencimiento junio), poseen una fecha de expiración a diciembre. Esto como ya se comentó anteriormente se debe principalmente al propio funcionamiento del mercado de emisiones de $CO_2$, ya que se concentra el mayor volumen de negociación de futuros y opciones en los vencimientos de diciembre.

En relación a la estrategia más frecuente de explotación de arbitraje, se relaciona con la estrategia corta, es decir, por una infravaloración de la opción de compra y la sobrevaloración de la opción de venta, aunque se ha comprobado que el tipo de estrategia no es significativa para ninguno de los casos de inclusión y exclusión de costes de transacción.

Como principal novedad, se ha incorporado al estudio la búsqueda de posibles variables que puedan causar dichas ineficiencias en el mercado, investigando el número

de transacciones y la cuantía del beneficio de arbitraje por trimestre, dándose una mayor rentabilidad en el primer y último trimestre. También se ha analizado la temporalidad diaria en intervalos de una hora, resultando dar una mayor cuantía de beneficio desde las 15:00 hasta la hora de cierre del mercado. El mismo análisis se ha llevado a cabo para observar el arbitraje por valor (cociente entre el precio de ejercicio de las opciones y el precio del futuro), arrojando un mayor número de transacciones cuando las opciones están *at-the-money*. Sin embargo, donde se observa una mayor cuantía de arbitraje, es para los casos extremos donde se observa la opción muy *out-the-money*. Otra de las metodologías utilizadas en el análisis de las causas de las ineficiencias, es la comparación del precio observado de la opción put y la opción call, en relación a su valor teórico calculado con el modelo de *Black-Scholes*, donde se observa que en términos generales, habitualmente existe una infravaloración de las opciones call y put con respecto a su valor teórico. Además, se ha observado una fuerte autocorrelación cuando existe un desajuste entre el valor de la opción y su valor teórico. Este hecho implica que el inversor especulador puede estar buscando el sentimiento de mercado siguiendo el movimiento de las opciones.

De manera paralela, se ha analizado la relación existente entre el beneficio de la cuantía de arbitraje y las diferentes variables que pueden afectar a la valoración de la opción o a las variables generadas por el propio mercado. La gran mayoría de los signos son coherentes con la teoría económica.

Por último, se ha demostrado que el inversor particular que quiera arbitrar el mercado, debería de disponer de un volumen elevado de efectivo para poder explotar dichos desajustes, además de soportar los elevados costes fijos, no haciendo viable económicamente la estrategia.

Por lo tanto, podemos concluir que el inversor particular podría percibir el mercado de derecho de emisiones como eficiente desde un punto de vista PCP, ya que, las oportunidades de arbitraje son escasas, y si se encuentran, el coste de explotarlas, por parte del inversor particular, es muy elevado.

Este análisis es de gran utilidad para los principales agentes del mercado, como son los inversores institucionales y particulares, que pretendan arbitrar o especular sobre el mercado de emisiones de $CO_2$. Además sería de gran provecho para los reguladores, que son los encargados de asegurar el correcto funcionamiento del mercado.

Como futuras líneas de investigación, se propone realizar el mismo estudio anteriormente desarrollado, pero con otro enfoque de arbitraje entre la variable spot y el futuro, cuando el mercado se encuentra en *contango* o *backwardation*. Otra línea de investigación relacionada con el resultado del trabajo, es realizar otros análisis y pruebas de eficiencia alternativos sobre el mercado de derechos de emisiones o realizar la misma metodología para otros mercados de *commodities* puesto que gran parte de la documentación e investigaciones, realizan estudios sobre los principales índices o mercados bursátiles.

## 6. Bibliografía


Belaire, M. B. (2000). Analisis Empirico de la paridad put-call en opciones sobre el Ibex35. *Revista Española de Financiacion y Contabilidad, XXIX*(106), 991-1014.

Black, F. S. (1976). The Pricing of commodity contracts. *Financial Economics*, 167-179.

Bollerslev, T. (1986). Generalized Autorregresive Conditional Heteroskedasticity. *Journal of Econometrics* , 307-327.

Europea, D. O. (13 de 10 de 2003). *Diario Oficial de la Unión Europea*. Obtenido de EUR-Lex: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=celex:32003L0087

Black, F. & Scholes, M. (1973). The Pricing of Options and Corporate Liabilities. *Journal of Political Economy*, 637-659.

Fung, J. K. & Draper, P. (2002). A study of arbitrage efficiency between the FTSE-100 Index Futures and options contracts. *The Journal of Futures Markets*, 31-58.

Fung, J. K. & Mok, H. M. (2001). Index Options-Futures Arbitrage: A comparative Study with Bid/Ask and Transaction Data. *The Financial Review*, 71-94.

Garay, U., Ordoñez, M. C. & Gonzalez, M. (2003). Tests of the put-call parity relation using options on futures on the S&P 500. *Derivatives Use, Trading & Regulations, 9*(3), 259-280.

Hsieh, W.-L. G., Lee, C.-S. & Yuan, S.-F. (2008). Price Discovery in the Option Markets: An application of Put-Call Parity. *The Journal of Futures Markets*, 354-375.

Kamara, A., & W.Miller, T. (1995). Daily and Intradaily Test of European Put-Call Parity. *The Journal of Financial Quantitative Analysis*, 519-539.

Klemkosky, R. C. & Resnick, B. G. (1979). Put-Call Parity and Market Efficiency. *The Journal of Finance*, 1141-1155.

Krishnamurti, C. & Hoque, A. (2011). Efficiency of European emissions markets: Lessons and implications. *Energy Policy*, 6575-6582.

Lucia, J. J., Mansanet-Bataller, M. & Pardo, Á. (2015). Speculative and hedging activies ion the European carbon market. *Energy Policy*, 342-351.

Manua, L. (2008). *Earth System Reserch Laboratory*. Obtenido de Hawaii Obsservatory: https://www.esrl.noaa.gov/gmd/obop/mio

Marshall, A. & Lung, K. L. (2002). A Study of Mispricing and Parity in the Hang Seng Futures and Options Markets. *Review of Pacific Basin Financial Markets and Policies*, 373 - 394.

Medina, V. & Pardo, A. (2013). Is the EUA a new asset class? *Quantitative Finance*, 637-653.

Merton, R. (1973a). Theroy of Rational Option Princing. *Bell Journal of Economics and Management Science*, 141-183.

Merton, R. C. (1973b). The Relationship between Put and Call Option Prices: Comment. *The Journal Finance*, 183-184.

Misra, D. D. & Misra, D. S. (2005, February 15-16). Determinants of violation of Put-Call Parity Theore: A study of NSE Nifty Options.

Montagnoli, A. & Vries, F. P. (2010). Carbon trading thickness and market efficiency. *Energy Economics*, 1331-1336.

Nissim, B. D. & Tchachi, T. (2011). An empirical test of 'Put Call Parity'. *Applied Financial Economics*, 1661-1664.

Palao, F. & Pardo, A. (2012). Assessing price clustering inEuropean Carbon Markets. *Applied Energy*, 51-56.

Parkinson, M. (1980). The extreme value method for estimating the variance of the rate of return . *The Journal of Business*, 61-65.

Sørhus, Y. Q. (29 de Mayo de 2018). *How bullish are EUA Option traders at the moment?* Obtenido de Thomson Reuters.

Stoll, H. R. (1969). The Relationship Between Put and Call Option Prices . *The Journal of Finance*, 801-824.

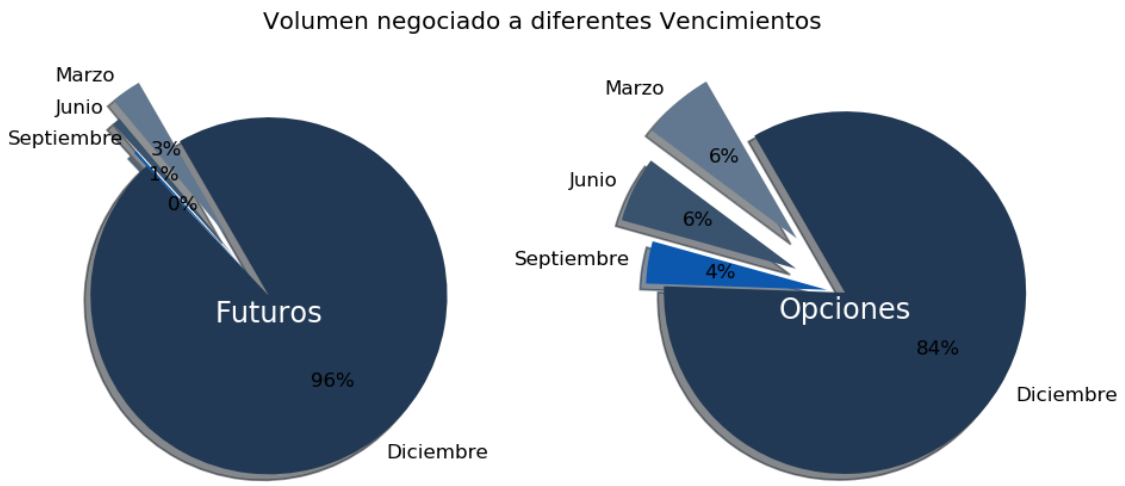
Tian, L. & Ackert, Y. (1999). Efficiency in index options markets and trading in stock baskets. *Atlanta, US;Federal Reserve Bank of Atlanta*, 99-105.

Vipul. (2008). Cross-Market Efficiency in the Indian Derivates Market: A Test of Put-Call Parity. *The Journal of Futures Markets*, 889-910.

## 7. Apéndice de figuras

### Figura 1: VOLUMEN DE NEGOCIACION DE DERECHOS DE EMISION A VENCIMIENTO TRIMESTRAL DE FUTUROS Y OPCIONES (2005-2019)

En la figura 1, se muestra el volumen de transacciones de los futuros y opciones a distintos vencimientos en el intervalo del 2005 al 2019.




Fuente: Elaboración propia.

**Figura 2: EVOLUCION DEL PRECIO Y VOLUMEN DEL FUTURO (2005-2019)**

En la figura 2, se presenta dos paneles. En el Panel A la evolución del precio del futuro y en el Panel B el volumen de transacciones, sobre los derechos de emisión para cada una de las tres fases.

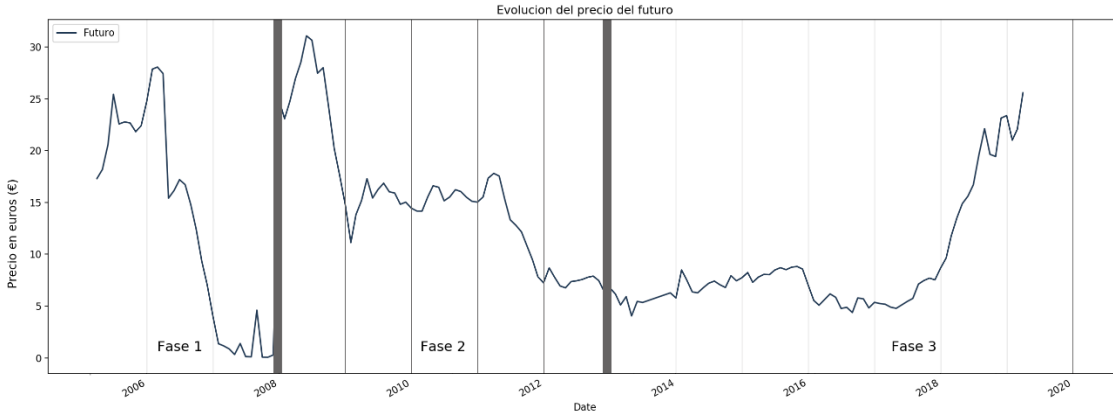
Para graficar la primera fase hemos escogido la serie de precios del futuro del derecho de emisión de $CO_2$, a fecha de vencimiento, diciembre del 2007.

Para la Fase II se ha seleccionado la serie de precios con fecha de expiración diciembre del 2012 que coincide con la fecha de finalización de la fase.

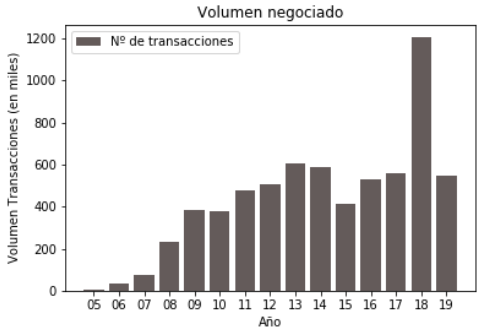
Por último, para ilustrar la Fase III se ha escogido la serie de precios del futuro con vencimiento en diciembre del 2019 que es el contrato con vencimiento diciembre más cercano hasta la fecha del trabajo.

Para graficar la evolución del volumen, se ha observado el numero de transacciones por año.

**PANEL A: EVOLUCION DEL PRECIO DEL FUTURO**




**PANEL B: EVOLUCION DEL VOLUMEN DEL FUTURO**




Fuente: Elaboración propia

**Figura 3: EJEMPLO DE SINCRONICIDAD REAL ENTE LOS TRES ACTIVOS**

La Figura 3, demuestra cómo se han hallado las sincronicidades entre los futuros, opciones call y opciones put. Para encontrar la sincronicidad, primero debe de existir una coincidencia entre el vencimiento y el precio de ejercicio de la opción put y la opción call. Éstas a su vez deben de coincidir con el vencimiento del futuro.

| Futuro | | |
|---|---|---|
| **Fecha** | **Vto** | **Strike (K)** |
| ... | ... | ... |
| 19-DEC-11 13:16:33 | 27/12/2011 | 6,61 |
| 19-DEC-11 13:16:40 | 27/12/2011 | 6,61 |
| 19-DEC-11 13:16:40 | 25/12/2011 | 7,03 |
| 19-DEC-11 13:21:29 | 25/12/2012 | 7,03 |
| 19-DEC-11 13:21:38 | 25/12/2012 | 7 |
| 19-DEC-11 13:29:29 | 25/12/2012 | 7,02 |
| 19-DEC-11 13:31:31 | 25/12/2011 | 6,62 |
| 19-DEC-11 13:31:52 | 25/12/2012 | 7,06 |
| ... | ... | .. |

| Call | | | |
|---|---|---|---|
| Fecha | Vto | Strike (K) | Precio |
| ... | ... | ... | ... |
| 16-DEC-11 11:29:12 | 27/03/2012 | 13 | 0.18 |
| 16-DEC-11 13:59:42 | 25/12/2012 | 15 | 0.28 |
| 16-DEC-11 13:59:42 | 25/12/2012 | 10 | 0.88 |
| 16-DEC-11 15:10:46 | 25/12/2012 | 15 | 0.26 |
| 16-DEC-11 16:51:47 | 25/12/2012 | 16 | 0.2 |
| 19-DEC-11 13:21:29 | 25/12/2012 | 13 | 0.4 |
| 19-DEC-11 16:43:14 | 25/12/2012 | 100 | 0.01 |
| 19-DEC-11 17:31:04 | 25/12/2012 | 15 | 0,41 |
| ... | ... | ... | ... |

| Put | | | |
|---|---|---|---|
| Fecha | Vto | Strike (K) | Precio |
| ... | ... | ... | ... |
| 15-DEC-11 16:16:16 | 25/12/2012 | 8 | 2.2 |
| 16-DEC-11 15:10:46 | 25/12/2012 | 15 | 8.1 |
| 16-DEC-11 16:51:47 | 25/12/2012 | 16 | 8.6 |
| 19-DEC-11 13:21:29 | 25/12/2012 | 13 | 6.25 |
| 19-DEC-11 16:42:35 | 25/12/2012 | 15 | 7.85 |
| 19-DEC-11 16:43:14 | 25/12/2012 | 8 | 2.34 |
| 19-DEC-11 16:43:14 | 25/12/2012 | 8 | 2.33 |
| 21-DEC-11 15:01:50 | 27/03/2012 | 7 | 0.77 |
| ... | ... | ... | ... |

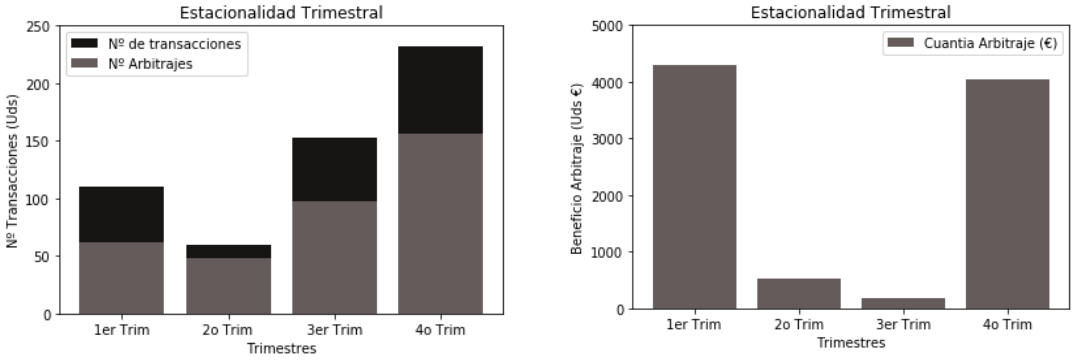
| SINCRONICIDAD | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Fecha | Vto | Strike (K) | Precio Futuro | Precio Call | Precio Put |
| 19-DEC-11 13:21:29 | 25/12 | 13 | 7.03 | 0.4 | 6.25 |

Fuente: Elaboración propia.

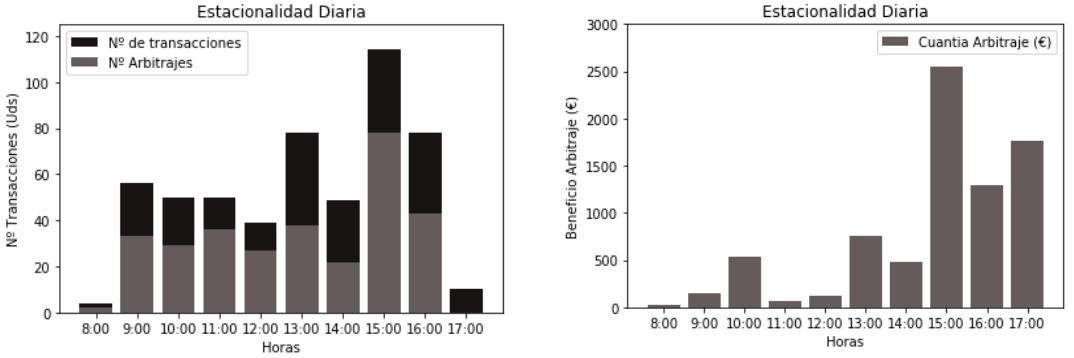
**Figura 4: DISTRIBUCION DE VARIABLES**

La figura 4, muestra la distribución trimestral, la estacionalidad diaria por hora de negociación y la distribución del cociente entre el precio del futuro y el precio de ejercicio. En cada uno de los paneles encontramos en la primera columna la distribución del total de número de transacciones (gris oscuro) y la distribución del número de desajustes hallados (gris claro) y en la segunda columna encontramos la cuantía de arbitraje para cada uno de los intervalos analizados.

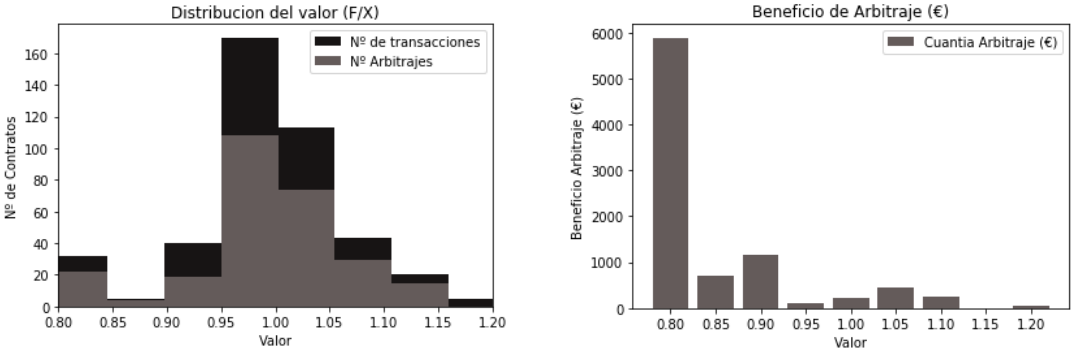
**PANEL A: DISTRIBUCION DE LA ESTACIONALIDAD TRIMESTRAL**




**PANEL B: DISTRIBUCION DE LA ESTACIONALIDAD DIARIA**




**PANEL C: DISTRIBUCION DEL VALOR**

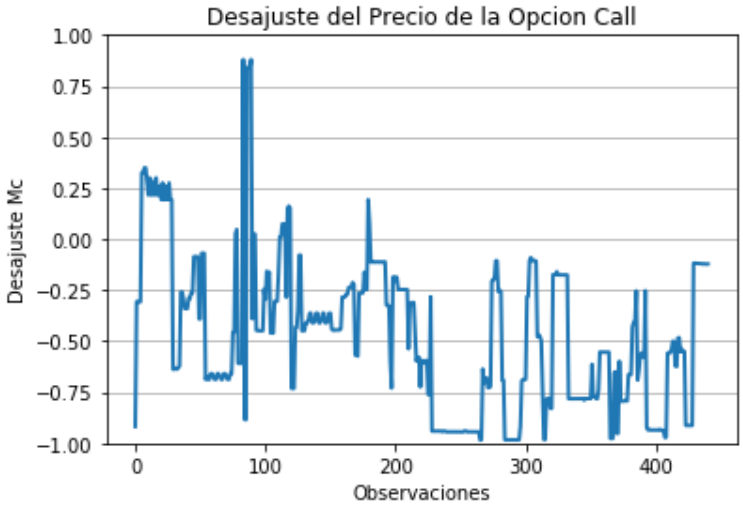



Fuente: Elaboración propia

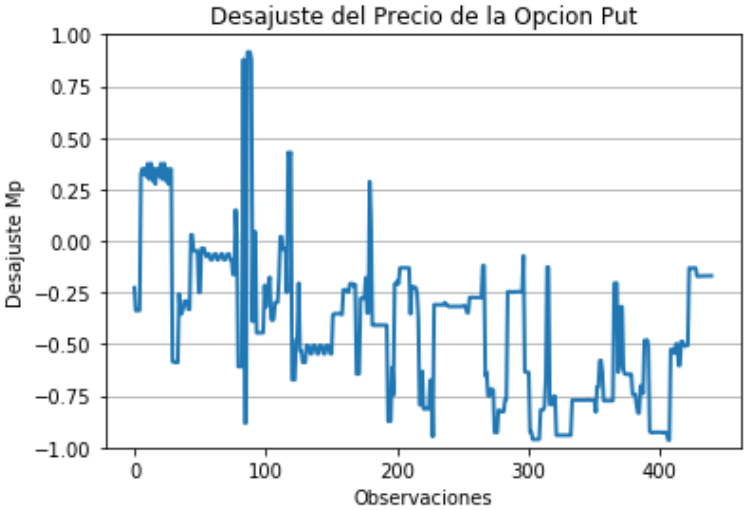
**Figura 5: DESAJUSTE EN EL PRECIO DE LAS OPCIONES**

La figura 5 se divide en Panel A y Panel B, donde se ilustra la evolución de los desajustes existentes entre el valor observado y teórico de las opciones call ($M_c$) y put ($M_p$), respectivamente. Ambos están calculados como la variación porcentual, tal y como se muestra en las ecuaciones 10 y 11.

**PANEL A: DESAJUSTE DEL PRECIO DE LAS OPCIONES CALL**




**PANEL B: DESAJUSTE DEL PRECIO DE LAS OPCIONES PUT**

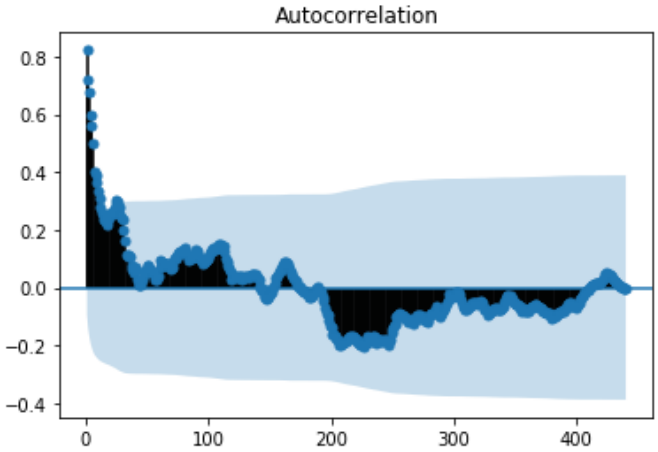



Fuente: Elaboración propia

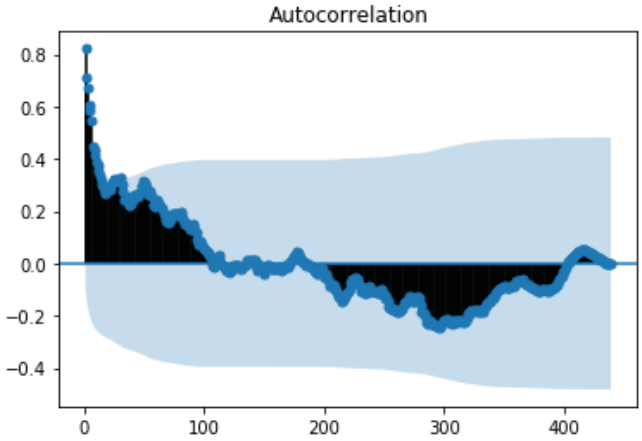
**Figura 6: AUTOCORRELACION DE LA SERIE DE DESAJUSTES**

En la figura 6 se presenta dos paneles. En el Panel A y B, se muestra la autocorrelación de la diferencia entre el precio observado y teórico (calculado con el Modelo de Black-Scholes, adaptado para futuros) para las opciones call ($M_c$) y opciones put ($M_p$), respectivamente.

**PANEL A: DESAJUSTE DEL PRECIO DE LAS OPCIONES CALL**




**PANEL B: DESAJUSTE DEL PRECIO DE LAS OPCIONES PUT**



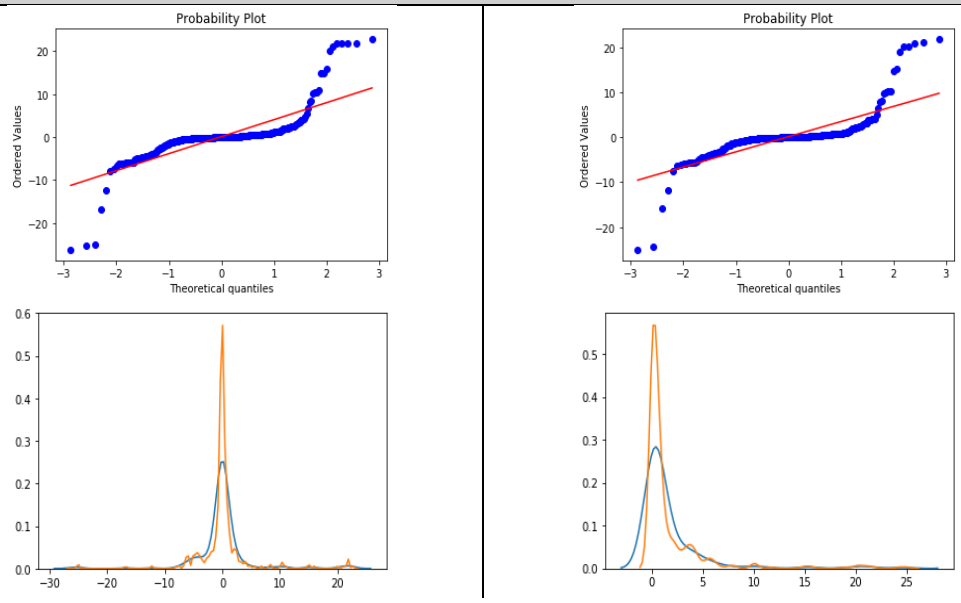

Fuente: Elaboración propia

## Figura 7: ESTUDIO GRÁFICO DE LA NORMALIDAD

En la figura 7 se representa en el Panel A, las distintas graficas en las que se observa la normalidad de la serie de arbitraje, para el escenario con costes de transacción y libre de costes, y en el Panel B, se muestra una aproximación a la distribución normal de la serie de arbitraje, obteniendo los logaritmos para ambos escenarios. [11]

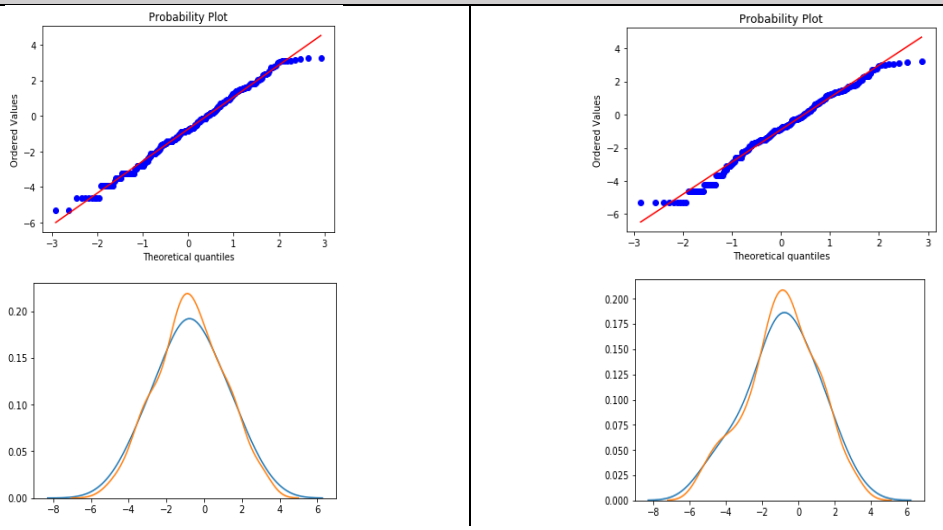
**PANEL A: PRUEBA DE NORMALIDAD DE ARBITRAJE**

| Serie sin costes de transacción | Serie con costes de transacción |
|---|---|




**PANEL A: PRUEBA DE NORMALIDAD DEL LOGARITMO DEL ARBITRAJE**

| Serie sin costes de transacción | Serie con costes de transacción |
|---|---|




Fuente: Elaboración propia

[11] En la muestra escogida se han obviado 10 transacciones (percentil 95 sobre el total de la muestra) que ocasionaban valores extremos debido a la diferencia entre el precio de ejercicio de las opciones y el precio del futuro.

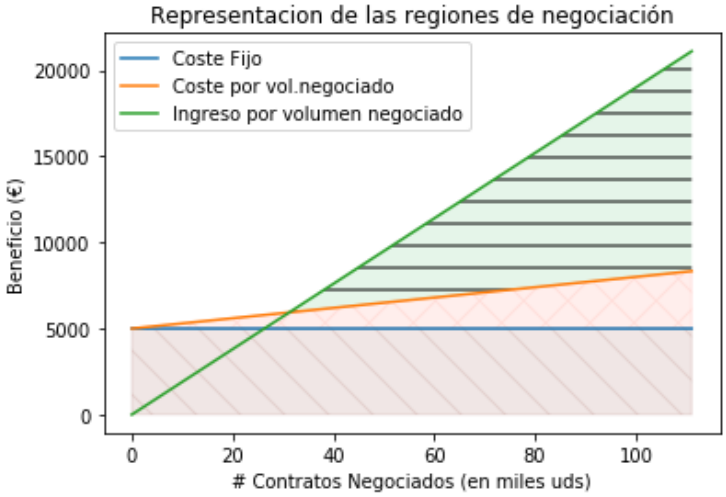
**Figura 8: REPRESENTACION DE LAS REGIONES DE NEGOCIACION**

En la figura 8, se ilustran dos paneles, en el panel A se observa el volumen de negociación que debería de tener un inversor particular y en el panel B, el volumen negociado de un inversor institucional para empezar a obtener beneficio.

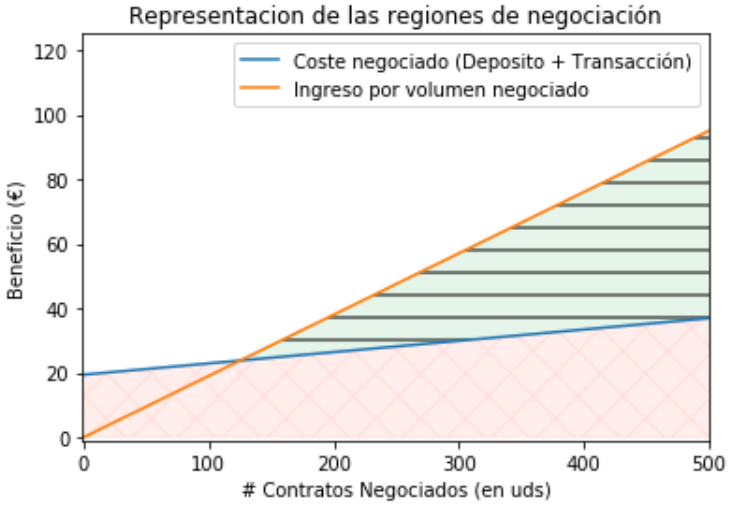
El Panel A muestra en rojo la región de perdidas por no superar el coste fijo de acceso al mercado y por el coste asociado al volumen negociado. La región verde es el punto a partir del cual el inversor obtiene beneficios por explotar el arbitraje.

Por último, en el Panel B se representan las mismas líneas obviando la línea de costes fijos y su región, debido a que suponemos que el inversor institucional es un agente participante del mercado y aprovecha la estrategia PCP para obtener rentabilidades adicionales.

**PANEL A: NEGOCIACIÓN DE UN INVERSOR PARTICULAR**




**PANEL B: NEGOCIACIÓN DE UN INVERSOR INSTITUCIONAL**




Fuente: Elaboración propia

## 8. Apéndice de tablas

### Tabla 1: DISTRIBUCION DE SINCRONICIDAD PARA LOS FUTUROS Y OPCIONES A DIFERENTES INTERVALOS

En la tabla 1 se muestra la sincronicidad para el intervalo de 0, 5 y 10 segundos, por año y fase entre los diferentes activos. El estudio de la posibilidad de arbitraje se realizará sobre estos cruces para cada uno de los escenarios con costes de transacción y sin costes.

En la tabla se puede observar la distribución del 2009 al 2019 para cada uno de los intervalos divididos en dos columnas. La primera columna (Frecuencia), representa el número de sincronicidades y la segunda columna (Volumen), representa el volumen negociado. En los últimos años se ha incrementado el volumen negociado, lo que ha permitido encontrar un mayor número de sincronicidades entre las opciones y los futuros.

| | | **Número de Emparejamientos** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **Intervalos de tiempo** | | | | | |
| | | (0 seg) | | (5 seg) | | (10 seg) | |
| **Año** | **Fase** | **Frecuencia** | **Volumen** | **Frecuencia** | **Volumen** | **Frecuencia** | **Volumen** |
| **2009** | II | - | - | - | - | 1 | 82 |
| **2010** | II | 1 | 4 | 2 | 19 | 3 | 23 |
| **2011** | II | 14 | 8.738 | 16 | 8.839 | 18 | 8.845 |
| **2012** | II | 19 | 2.204 | 22 | 2.220 | 36 | 2.269 |
| **2013** | III | 12 | 1.356 | 18 | 1.425 | 24 | 1.510 |
| **2014** | III | 7 | 3.527 | 11 | 3.531 | 14 | 3.534 |
| **2015** | III | 3 | 64 | 5 | 122 | 11 | 216 |
| **2016** | III | 61 | 8.111 | 80 | 8.314 | 97 | 8.443 |
| **2017** | III | 23 | 4.928 | 30 | 5.019 | 60 | 5.305 |
| **2018** | III | 115 | 23.525 | 189 | 23.985 | 264 | 24.599 |
| **2019** | III | 8 | 248 | 17 | 268 | 26 | 313 |
| **TOTAL** | | **263** | **52.705** | **390** | **51.744** | **544** | **53.780** |

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 2: NUMERO DE ARBITRAJES POR AÑO**

En la tabla 2 se representan las posibles oportunidades de arbitraje, distribuidas por año natural, es decir, el año en el que se realiza la transacción. En el Panel A se muestra el escenario sin costes de transacción, y en el Panel B, el escenario en el que se incluyen los costes, para cada uno de los intervalos estudiados. Ambos paneles se dividen en dos columnas, la primera (Desajuste), es el número de desajustes encontrados por año, y la segunda columna (%), es el porcentaje de desajustes hallados sobre el total de la muestra.

| | Panel A: ESCENARIO SIN COSTES DE TRANSACCION | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | (0 seg) | | (5 seg) | | (10 seg) | |
| **Año** | **# Desajuste** | **(%)** | **# Desajuste** | **(%)** | **# Desajuste** | **(%)** |
| **2009** | - | - | - | - | 1 | 100% |
| **2010** | 1 | 100% | 2 | 100% | 3 | 100% |
| **2011** | 14 | 100% | 16 | 100% | 18 | 100% |
| **2012** | 19 | 100% | 22 | 100% | 36 | 100% |
| **2013** | 12 | 100% | 18 | 100% | 24 | 100% |
| **2014** | 7 | 100% | 11 | 100% | 13 | 93% |
| **2015** | 3 | 100% | 5 | 100% | 11 | 100% |
| **2016** | 31 | 51% | 50 | 63% | 66 | 68% |
| **2017** | 5 | 22% | 12 | 40% | 40 | 67% |
| **2018** | 43 | 37% | 117 | 62% | 189 | 72% |
| **2019[12]** | 6 | 75% | 15 | 88% | 24 | 92% |
| **TOTAL** | **141** | **66%** | **268** | **73%** | **425** | **79%** |

| | Panel B: ESCENARIO CON COSTES DE TRANSACCION | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Año** | (0 seg) | | (5 seg) | | (10 seg) | |
| | **# Desajuste** | **(%)** | **# Desajuste** | **(%)** | **# Desajuste** | **(%)** |
| **2009** | - | - | - | - | 1 | 100% |
| **2010** | 1 | 100% | 2 | 100% | 3 | 100% |
| **2011** | 14 | 100% | 16 | 100% | 18 | 100% |
| **2012** | 19 | 100% | 22 | 100% | 36 | 100% |
| **2013** | 11 | 92% | 17 | 94% | 23 | 96% |
| **2014** | 7 | 100% | 11 | 100% | 13 | 93% |
| **2015** | 3 | 100% | 5 | 100% | 11 | 100% |
| **2016** | 20 | 33% | 38 | 48% | 49 | 51% |
| **2017** | 1 | 4% | 3 | 10% | 25 | 42% |
| **2018** | 22 | 19% | 91 | 48% | 161 | 61% |
| **2019[11]** | 5 | 63% | 14 | 82% | 23 | 88% |
| **TOTAL** | **103** | **66%** | **219** | **66%** | **363** | **71%** |

Fuente: Elaboración propia.

[12] Año en curso, última fecha de actualización 30 de abril del 2019.

**Tabla 3: DISTRIBUCIÓN DE LOS BENEFICIOS DEL ARBITRAJE INCORPORANDO LOS COSTES DE TRANSACCIÓN**

En la tabla 3 se exponen dos paneles. En el Panel A se puede observar el escenario sin costes, y en el Panel B, el escenario con costes. En cada uno de los escenarios se expone la frecuencia de los arbitrajes hallados, distribuidos por la cuantía de beneficio del arbitraje y la estrategia que debería de optar el inversor para explotarlo.

| | **Panel A: ESCENARIO SIN COSTES DE TRANSACCION** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 seg | | 5 seg | | 10 seg | |
| **Beneficio Arbitraje** | Posiciones largas | Posiciones cortas | Posiciones largas | Posiciones cortas | Posiciones largas | Posiciones cortas |
| 0€-40€ | 50 | 68 | 97 | 139 | 152 | 238 |
| 40€-80€ | 5 | 1 | 5 | 1 | 5 | 1 |
| 80€-120€ | 1 | - | 1 | - | 1 | - |
| 120€-160€ | - | - | - | - | - | - |
| 160€-200€ | 1 | - | 1 | - | 1 | - |
| >200€ | - | 15 | - | 15 | - | 15 |
| **Total** | **57** | **84** | **104** | **155** | **159** | **254** |

| | **Panel B: ESCENARIO CON COSTES DE TRANSACCION** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 seg | | 5 seg | | 10 seg | |
| **Beneficio Arbitraje** | Posiciones largas | Posiciones cortas | Posiciones largas | Posiciones cortas | Posiciones largas | Posiciones cortas |
| 0€-40€ | 30 | 51 | 77 | 111 | 132 | 197 |
| 40€-80€ | 5 | - | 5 | - | 5 | - |
| 80€-120€ | 1 | - | 1 | - | 1 | - |
| 120€-160€ | 1 | - | 1 | - | 1 | - |
| 160€-200€ | - | - | - | - | - | - |
| >200€ | - | 15 | - | 15 | - | 15 |
| **Total** | **37** | **66** | **84** | **126** | **139** | **212** |

Fuente: Elaboración propia.

## Tabla 4: TABLAS DE CONTRASTES Y ESTADISTICOS

En la tabla 4 se exhiben cuatro paneles, con diferentes pruebas realizadas, para observar y contrastar la posible existencia de particularidades que pueden arrojar regresiones inconsistentes. En el Panel A y B, se realiza una prueba de estacionariedad de Dickey Fuller con el estadístico-t para un nivel de significación al 5% y el p-valor, con el objetivo de comprobar la posible estacionariedad de las variables que representan la equivalencia de la PCP y la ecuación 4 y 5 que prueban la eficiencia del mercado. En el Panel C, se muestra contraste realizado para probar la autocorrelación de las variables que integran la ecuación 5 y, por último, en el Panel D se realizan la prueba de heterocedasticidad y autocorrelación sobre la misma ecuación.

Los valores señalados con un *, ** o ***, muestran significatividad al 10%, 5% y 1%, respectivamente.

**Panel A: TEST DE DICKEY FULLER (VARIABLES)**

| Variables | Intervalo 0 segundos | Intervalo 5 segundos | Intervalo 10 segundos |
|---|---|---|---|
| *Precio Futuro* | 0,0123 | -0,1826 | -0,2282 |
| *Precio Call* | -2,9478** | -2,2435 | -5,1268*** |
| *Precio Put* | -7,5243*** | -7,5851*** | -0,2281 |
| Precio ejercicio | -0,4428 | -3,9650*** | -3,5314*** |
| *Tipo de interés* | -3,3889** | -4,4500*** | -2,7923* |

**Panel B: TEST DE DICKEY FULLER (ECUACIÓN)**

| Variables | Intervalo 0 segundos | Intervalo 5 segundos | Intervalo 10 segundos |
|---|---|---|---|
| $Y_t$ | -8,7981*** | -7,8773*** | -6,4469*** |
| $X_t$ | -8,9940*** | -7,9062*** | -6,4211*** |
| $\Delta Y_t$ | -11,5133*** | -10,1110*** | -18,7331*** |
| $\Delta X_t$ | -11,5127*** | -10,2620*** | -24,1138*** |

**Panel C: TEST DE AUTOCORRELACION (Durbin Watson)**

| Variables | 0 seg | | 5 seg | | 10 seg | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | D-W | Resultado | D-W | Resultado | D-W | Resultado |
| $\Delta Y_t$ | 2,2338 | Autocorrelación débil | 2,0976 | No existe | 2,0503 | No existe |
| $\Delta X_t$ | 2,2389 | Autocorrelación débil | 2,0979 | No existe | 2,2055 | No existe |

**Panel D: TEST DE EFICIENCIA ($\Delta Y_t = \lambda_0 + \lambda_1 \Delta X_t + \varepsilon_t$)**

| Estadísticos | Durbin Watson (Autocorrelación) | | Test de White (Heterocedasticidad) | |
|---|---|---|---|---|
| | LM Test | Comentario | P-valor | Comentario |
| **0 seg** | 2,2236 | Autocorrelación débil | 0,9746 | No Rechazo Homocedasticidad |
| **5 seg** | 2,2447 | Autocorrelación débil | 0,9661 | No Rechazo Homocedasticidad |
| **10 seg** | 1,0038 | Existe autocorrelación | 0,9824 | No Rechazo Homocedasticidad |

**Tabla 5: RESULTADOS DEL MODELO SOBRE LA PRUEBA DE EFICIENCIA**

En la Tabla 5 se presentan los principales resultados del modelo una vez solucionados los problemas de inconsistencia, heterocedasticidad y autocorrelación.

Podemos observar para cada una de las muestras la regresión realizada sobre la variable dependiente para hallar los regresores del modelo ARMA. En el resto de la tabla se presentan los coeficientes y *p-valor* (*) para cada una de las variables, de cada muestra analizada con el modelo GARCH. Las variables analizadas son la constante del modelo GARCH ($\omega$), la sensibilidad de la varianza condicional en relación a los residuos ($\alpha$), el término que mide la sensibilidad de la varianza condicional del periodo anterior ($\beta$), la sensibilidad de la persistencia del autorregresivo de orden uno de la variable dependiente ($\varphi$) y las variables $\lambda_0$ y $\lambda_1$ que determinaran la eficiencia del mercado.

Los valores señalados con un *, ** o ***, muestran significatividad al 10%, 5% y 1%, respectivamente.

**REGRESION DE EFICIENCIA DEL MERCADO**

$$\Delta Y_t = \lambda_0 + \lambda_1 \Delta X_t + \sum_{i}^{p} \varphi \Delta Y_{t-1} + \sum_{i}^{q} \theta\, \varepsilon_{t-1} + \varepsilon_t$$

$$h_t = \omega + \sum_{i=1}^{r} \alpha \varepsilon_{t-i}^2 + \sum_{i=1}^{s} \beta h_{t-i} \;\; ; \;\; \varepsilon_t = \eta_t \sqrt{h_t}\,, \qquad \eta_t \approx iid(0,1)$$

| Intervalo | 0 seg | 5 seg | 10 seg |
|---|---|---|---|
| **ARMA** | (2,3) | (2,0) | (2,1) |
| **GARCH** | (1,1) | (1,1) | (1,1) |
| $\boldsymbol{\omega}$ | 0 | 0 | 0 |
| $\boldsymbol{\alpha}$ | 0,8481*** | 0,1158*** | 0,0763*** |
| $\boldsymbol{\beta}$ | 0,1519*** | 0,8842*** | 0,9237*** |
| $\boldsymbol{\varphi}$ | 0,0001** | -0,1984*** | -0,2179*** |
| $\boldsymbol{\lambda_0}$ | 0*** | 0,0056*** | -0,0005 |
| $\boldsymbol{\lambda_1}$ | 1*** | 0,9884*** | 0,9992*** |
| $\mathbf{R^2}$ | 1 | 0,9776 | 0,9770 |
| **AIC** | -15,6210 | -0,8532 | -0,9029 |

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 6: REGRESIÓN DE LOS DESAJUSTES DE PRECIO DE LAS OPCIONES**

En la tabla 6 se muestran dos paneles. En el panel A, se observa la regresión de la serie de desajustes de precio (diferencia entre los precios observados de las opciones y los teóricos), con respecto a la variable dependiente del precio observado, con el objetivo de probar la significatividad de la variable, así como la autocorrelación de la serie. En el panel B, se trata de probar como afecta el tiempo de expiración de la opción, en relación a la serie de desajustes (diferencias entre el precio observado de las opciones observado y teórico).

Los valores señalados con un *, ** o ***, muestran significatividad al 10%, 5% y 1%, respectivamente.

| PANEL A: REGRESION DE LOS DESAJUSTES DE LAS OPCIONES | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Regresión** | **Coeficiente** | **Desviación Típica** | **Estad. t** | **Durbin-Watson** |
| $C_t = c + M_{c,t}$ | -2,1535 | 0,4860 | -4,4307*** | 0,1568 |
| $P_t = c + M_{p,t}$ | -0,7318 | 0,8434 | -0,8678*** | 0,1816 |

| PANEL B: REGRESION DE LOS DESAJUSTES SEGUN EL VENCIMIENTO | | | |
|---|---|---|---|
| **Regresión** | **Coeficiente** | **Desviación Típica** | **Estadístico t** |
| $M_{c,t} = c + \beta_1(timpo\ a\ vto) + \varepsilon_1$ | 0,0005 | 0,0001 | 3,6045*** |
| $M_{p,t} = c + \beta_2(timpo\ a\ vto) + \varepsilon_2$ | 0,0004 | 0,0001 | 2,9893*** |

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 7: ANALISIS DE DISTRIBUCIÓN DE TIPOS DE ORDEN E INICIO DE TRANSACCION**

La tabla 7 muestra las diferentes oportunidades de arbitrajes, distinguiendo si el inicio de la transacción es B (*Bid*) u O (*Offer*), así como el tipo de orden emitida por el inversor al mercado. Para el Panel A y el Panel B se puede observar la distribución del inicio de la transacción y el tipo de ordenes emitidas para cada uno de los intervalos y activos estudiados. Cada uno de los activos se divide en dos columnas, la primera (#), es la frecuencia que se ha detectado, y la segunda columna (%), es el porcentaje de desajustes hallados sobre el total de la muestra.

| | **Panel A: Inicio de la transacción** | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **0 seg** | | | | | | **5 seg** | | | | | | **10 seg** | | | | | |
| | **Futuro** | | **Call** | | **Put** | | **Futuro** | | **Call** | | **Put** | | **Futuro** | | **Call** | | **Put** | |
| | **#** | (%) | **#** | (%) | **#** | (%) | **#** | (%) | **#** | (%) | **#** | (%) | **#** | (%) | **#** | (%) | **#** | (%) |
| **B** | 81 | 79% | 102 | 99% | 93 | 90% | 143 | 65% | 202 | 92% | 155 | 71% | 201 | 55% | 326 | 90% | 235 | 65% |
| **O** | 22 | 21% | 1 | 1% | 10 | 10% | 76 | 35% | 17 | 8% | 64 | 29% | 162 | 45% | 37 | 10% | 128 | 35% |
| **Total** | **103** | **100%** | **103** | **100%** | **103** | **100%** | **219** | **100%** | **219** | **100%** | **219** | **100%** | **363** | **100%** | **363** | **100%** | **363** | **100%** |

| | **Panel B: Tipo de ordenes emitidas al mercado** | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 seg | | | | | | 5 seg | | | | | | 10 seg | | | | | |
| | **Futuro** | | **Call** | | **Put** | | **Futuro** | | **Call** | | **Put** | | **Futuro** | | **Call** | | **Put** | |
| **Tipo de Orden** | **#** | (%) | **#** | (%) | **#** | (%) | **#** | (%) | **#** | (%) | **#** | (%) | **#** | (%) | **#** | (%) | **#** | (%) |
| K | 41 | 40% | 58 | 56% | 58 | 56% | 42 | 19% | 163 | 74% | 163 | 74% | 42 | 12% | 286 | 79% | 286 | 79% |
| T | 17 | 17% | 0 | 0% | 0 | 0% | 130 | 59% | 3 | 1% | 3 | 1% | 270 | 74% | 4 | 1% | 4 | 1% |
| O | 44 | 43% | 45 | 44% | 45 | 44% | 46 | 21% | 53 | 24% | 53 | 24% | 47 | 13% | 73 | 20% | 73 | 20% |
| X | 1 | 1% | 0 | 0% | 0 | 0% | 1 | 1% | 0 | 0% | 0 | 0% | 3 | 1% | 0 | 0% | 0 | 0% |
| Z | 0 | 0% | 0 | 0% | 0 | 0% | 0 | 0% | 0 | 0% | 0 | 0% | 1 | 0% | 0 | 0% | 0 | 0% |
| **Total** | **103** | **100%** | **103** | **100%** | **103** | **100%** | **219** | **100%** | **219** | **100%** | **219** | **100%** | **363** | **100%** | **363** | **100%** | **363** | **100%** |

## Tabla 8: ESTADISTICOS DESCRIPTIVOS

En la tabla 8 se presentan 6 paneles de estadísticos descriptivos de las principales variables que pueden afectar a la cuantía del arbitraje. En los paneles se supone el escenario sin costes de transacción e incluyéndolos para cada una de las muestras de cero, cinco y diez segundos.

En cada uno de los paneles se representan tres columnas que indican la estrategia elegida por el inversor, pudiendo ser larga o corta, y la tercera columna es el total de todas las estrategias. Cada una de estas columnas poseen la media y la desviación típica (Desv.Tip.) de las variables principales que afectan al valor de una opción para explicar la cuantía del arbitraje, como es la magnitud del arbitraje, el vencimiento, el tipo de interés, el volumen de contratación, el valor y la volatilidad, además de la variación del interés abierto (ΔIA).

### PANEL A: ESCENARIO SIN COSTE DE TRANSACCION (0 seg)

| | Largas | | Cortas | | Total | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Sin costes de transacción** | Media | Desv.Tip | Media | Desv.Tip | Media | Desv. Tip |
| Arbitraje | 14,61 | 30,31 | 609,23 | 2.475,27 | 361,20 | 1..941,11 |
| Vencimiento | 227,39 | 167,79 | 235,97 | 177,33 | 232,56 | 173,05 |
| Volumen | 67,73 | 298,75 | 176,38 | 359,09 | 176,60 | 363,20 |
| Valor | 2,12 | 3,91 | 1,65 | 3,38 | 1,84 | 3,59 |
| Tipo de interés | 0,31 | 0,48 | 0,42 | 0,65 | 0,38 | 0,59 |
| Volatilidad | 0,10 | 0,07 | 0,10 | 0,12 | 0,10 | 0,10 |
| ΔIA Futuro | 283,87 | 1.541,79 | 360,17 | 1.947,95 | 329,88 | 1.791,83 |
| ΔIA Call | 132,64 | 911,76 | 163,46 | 240,36 | 151,13 | 602,80 |
| ΔIA Put | 372,25 | 837,87 | 0,00 | 267,98 | 178,90 | 594,92 |
| N.º Observaciones | 56 | | 84 | | 140 | |

### PANEL B: ESCENARIO CON COSTE DE TRANSACCION (0 seg)

| | Largas | | Cortas | | Total | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Sin costes de transacción** | Media | Desv.Tip | Media | Desv.Tip | Media | Desv. Tip |
| Arbitraje | 19,14 | 30,73 | 775,28 | 2.773,63 | 508,41 | 2.254,58 |
| Vencimiento | 247,25 | 174,00 | 242,39 | 178,02 | 244,09 | 175,79 |
| Volumen | 177,44 | 424,21 | 200,21 | 398,30 | 192,25 | 405,61 |
| Valor | 1,37 | 2,96 | 1,98 | 3,71 | 1,76 | 3,47 |
| Tipo de interés | 0,48 | 0,53 | 0,53 | 0,69 | 0,51 | 0,64 |
| Volatilidad | 0,12 | 0,08 | 0,12 | 0,13 | 0,12 | 0,11 |
| ΔIA Futuro | - 66,56 | 1.537,23 | 598,48 | 1.730,06 | 376,80 | 1.689,77 |
| ΔIA Call | 154,59 | 1.112,09 | 189,68 | 235,06 | 177,86 | 666,77 |
| ΔIA Put | 464,28 | 671,93 | 28,27 | 206,88 | 175,34 | 469,02 |
| N.º Observaciones | 36 | | 66 | | 102 | |

**PANEL C: ESCENARIO SIN COSTE DE TRANSACCION**
**(5 seg)**

| | Largas | | Cortas | | Total | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Sin costes de transacción** | Media | Desv.Tip | Media | Desv.Tip | Media | Desv. Tip |
| Arbitraje | 7,98 | 22,33 | 77,70 | 312,74 | 41,51 | 241,28 |
| Vencimiento | 191,44 | 148,10 | 194,51 | 160,00 | 193,20 | 154,74 |
| Volumen | 98,15 | 281,59 | 62,89 | 141,89 | 77,98 | 213,44 |
| Valor | 2,16 | 3,67 | 2,28 | 4,26 | 2,23 | 4,01 |
| Tipo de interés | 0,25 | 0,44 | 0,21 | 0,48 | 0,23 | 0,46 |
| Volatilidad | 0,10 | 0,06 | 0,09 | 0,07 | 0,09 | 0,06 |
| ΔOI Futuro | - 72,95 | 1.377,94 | - 852,13 | 2.911,68 | - 536,51 | 2.437,31 |
| ΔIA Call | 231,58 | 832,35 | 71,77 | 306,25 | 136,78 | 584,58 |
| ΔIA Put | 290,14 | 664,98 | 25,29 | 227,50 | 133,02 | 475,79 |
| N.º Observaciones | 113 | | 151 | | 264 | |

**PANEL D: ESCENARIO CON COSTE DE TRANSACCION**
**(5 seg)**

| | Largas | | Cortas | | Total | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Sin costes de transacción** | Media | Desv.Tip | Media | Desv.Tip | Media | Desv. Tip |
| Arbitraje | 8,13 | 20,96 | 96,11 | 345,64 | 58,05 | 263,91 |
| Vencimiento | 191,40 | 147,72 | 188,70 | 162,16 | 189,87 | 155,73 |
| Volumen | 81,40 | 283,52 | 63,41 | 152,00 | 71,19 | 218,40 |
| Valor | 1,88 | 3,28 | 2,65 | 4,64 | 2,32 | 4,12 |
| Tipo de interés | 0,30 | 0,47 | 0,26 | 0,52 | 0,28 | 0,50 |
| Volatilidad | 0,11 | 0,06 | 0,10 | 0,07 | 0,10 | 0,07 |
| ΔOI Futuro | - 314,40 | 1.272,02 | - 842,00 | 2.976,77 | - 632,06 | 2.454,06 |
| ΔIA Call | 266,87 | 904,39 | 90,55 | 314,14 | 161,08 | 625,36 |
| ΔIA Put | 307,28 | 526,61 | 49,69 | 181,63 | 152,73 | 381,81 |
| N.º Observaciones | 93 | | 122 | | 215 | |

**PANEL E: ESCENARIO SIN COSTE DE TRANSACCION**
**(10 seg)**

| | Largas | | Cortas | | Total | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Sin costes de transacción** | Media | Desv.Tip | Media | Desv.Tip | Media | Desv. Tip |
| Arbitraje | 6,01 | 4,98 | 33,61 | 183,14 | 21,43 | 141,80 |
| Vencimiento | 173,52 | 123,29 | 165,61 | 148,98 | 168,84 | 142,77 |
| Volumen | 67,73 | 298,75 | 38,76 | 109,92 | 50,58 | 171,35 |
| Valor | 2,75 | 4,07 | 2,98 | 5,74 | 2,89 | 5,10 |
| Tipo de interés | 0,21 | 0,42 | 0,15 | 0,40 | 0,18 | 0,41 |
| Volatilidad | 0,10 | 0,05 | 0,09 | 0,07 | 0,09 | 0,06 |
| ΔIA Futuro | - 201,74 | 1.264,78 | - 486,53 | 2.757,92 | - 371,83 | 2.288,35 |
| ΔIA Call | 289,31 | 808,41 | 124,96 | 517,89 | 191,52 | 655,29 |
| ΔIA Put | 276,78 | 575,77 | - 33,47 | 348,99 | 92,17 | 478,85 |
| N.º Observaciones | 171 | | 248 | | 419 | |

**PANEL F: ESCENARIO CON COSTE DE TRANSACCION (10 seg)**

| | Largas | | Cortas | | Total | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Con costes de transacción** | Media | Desv. Tip | Media | Desv.Tip | Media | Desv. Tip |
| Arbitraje | 5,78 | 19,59 | 39,21 | 200,39 | 25,07 | 153,35 |
| Vencimiento | 171,11 | 131,04 | 160,46 | 147,82 | 164,97 | 140,88 |
| Volumen | 53,38 | 225,09 | 36,29 | 115,16 | 43,52 | 170,46 |
| Valor | 2,65 | 3,86 | 3,48 | 6,17 | 3,13 | 5,32 |
| Tipo de interés | 0,24 | 0,43 | 0,18 | 0,43 | 0,21 | 0,43 |
| Volatilidad | 0,10 | 0,06 | 0,10 | 0,07 | 0,10 | 0,06 |
| ΔIA Futuro | - 366,50 | 1.212,86 | - 449,35 | 2.846,45 | - 415,30 | 2.316,21 |
| ΔIA Call | 319,52 | 847,72 | 150,93 | 550,25 | 220,67 | 692,77 |
| ΔIA Put | 284,94 | 464,93 | - 23,92 | 353,71 | 103,85 | 430,59 |
| N.º Observaciones | 151 | | 206 | | 357 | |

Fuente: Elaboración propia.

## Tabla 9: ANALISIS DE DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE ESCENARIOS Y CORRELACIONES DE SPEARMAN

La tabla 9 se divide en diferentes paneles. En el panel A se representa el estudio realizado para la media (con el estadístico t-student), mediana (*Kruskal-Wallis*) y varianza (F-Test) de cada una de las variables para analizar, y si existen diferencias significativas entre el escenario sin costes y con costes.

En el Panel B, C y D se presenta los valores de las correlaciones de spearman entre las variables estudiadas y su nivel de significatividad, para las diferentes muestras analizadas. En la parte superior de la diagonal se puede observar las correlaciones entre las distintas variables para el escenario sin costes de transacción y en la parte inferior de la diagonal se encuentran las correlaciones que incluyen los costes de transacción. Las variables que se incluyen en esta tabla son: la cuantía del arbitraje, el volumen de contratación, la variación del *open interest*, vencimiento (distancia en días del día de negociación a la fecha de expiración), valor (diferencia entre el precio de ejercicio de las opciones y el valor del futuro), volatilidad y tipo de interés libre de riesgo.

Los valores señalados con un *, ** o ***, muestra significatividad al 10%, 5% y 1%, respectivamente.

**Panel A: DISTINCCIÓN DE SIGNIFICATIVIDAD DE LA MEDIA, MEDIANA Y VARIANZA PARA EL ESCENARIO CON COSTES Y SIN COSTES DE TRANSACCION**

| Muestra | Estad. | Arbitraje | Vencimiento | Volumen | Valor | Tipo Interés | Volatilidad | OI Fut | OI Call | OI Put |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 Seg | Media | 0,4840 | 0,4693 | 0,2577 | -0,2151 | 1,6804* | 0,2888 | 0,2143 | -0,3141 | 0,3591 |
| | Mediana | 0,8883 | 0,2556 | 0,4341 | 0,1639 | 1,8786* | 1,0398 | 0,1329 | 0,6044 | 0,4748 |
| | Varianza | 1,3591 | 1,0404 | 1,2525 | 1,0783 | 1,1697 | 1,2381 | 1,1131 | 1,2235 | 1,6089** |
| 5 Seg | Media | 0,4749 | -0,3154 | 0,3964 | 0,2531 | 1,1422 | 1,4639 | -0,4019 | 0,4134 | 0,4633 |
| | Mediana | 0,0468 | 0,3577 | 1,1276 | 0,3608 | 1,1850 | 1,6697* | 0,5577 | 0,3507 | 0,4520 |
| | Varianza | 1,2201 | 1,0195 | 1,0341 | 1,0588 | 1,1672 | 1,0710 | 1,0138 | 1,1444 | 1,5528*** |
| 10 Seg | Media | 0,3032 | -0,5038 | -0,6305 | 0,6698 | 0,9711 | 1,6150 | -0,2444 | 0,5589 | 0,3294 |
| | Mediana | 0,4369 | 0,4647 | 1,4033 | 0,9939 | 1,0322 | 1,9279* | 0,3208 | 0,4997 | 0,5146 |
| | Varianza | 1,6519 | 1,0250 | 1,0297 | 1,0932 | 1,1374 | 1,0311 | 1,0245 | 1,1176 | 1,2367 |

**Panel B: CORRELACION DE PEARSON SPEARMAN (Intervalo de 0 segundos)**

| Variables | Arbitraje | Vencimiento | Volumen | Valor | Tipo Interés | Volatilidad | ΔIA Futuro | ΔIA Call | ΔIA Put |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Arbitraje** | **1** | -0,0198 | 0,7506*** | 0,07161 | 0,7230*** | 0,6486*** | -0,0250 | -0,004862 | -0,2288*** |
| **Vencimiento** | 0 | **1** | -0,0905 | 0,2003** | 0,1323 | 0,1376 | 0,1894** | 0,0333 | 0,2413 |
| **Volumen** | 0,8370*** | -0,0571 | **1** | 0,0338 | 0,3456*** | 0,4315*** | 0,0284 | -0,1453* | -0,2736*** |
| **Valor** | 0,2295** | 0,2517** | -0,0353 | **1** | 0,1131 | 0,2512*** | 0,4240*** | -0,2385*** | 0,0569 |
| **Tipo Interés** | 0,7223*** | 0,0459 | 0,4935 | 0,2502** | **1** | 0,8152*** | 0,1162 | -0,1477* | -0,1421 |
| **Volatilidad** | 0,6388*** | 0,1593 | 0,4509*** | 0,3233*** | 0,8531*** | **1** | 0,1048 | -0,1744** | -0,0089 |
| **ΔIAFuturo** | 0,0944 | 0,2043** | 0,0157 | 0,4659*** | 0,1608 | 0,1383 | **1** | -0,2866*** | 0,0871 |
| **ΔIA Call** | -0,0820 | -0,0510 | -0,0911 | -0,0911* | -0,2943*** | -0,2522** | -0,4190*** | **1** | 0,1873** |
| **ΔIA Put** | -0,3600*** | 0,2054** | -0,3931*** | -0,0066 | -0,2797*** | -0,0307 | -0,0307 | 0,1726* | **1** |

**Panel C: CORRELACION DE PEARSON SPEARMAN (Intervalo de 5 segundos)**

| Variables | Arbitraje | Vencimiento | Volumen | Valor | Tipo Interés | Volatilidad | ΔIA Futuro | ΔIA Call | ΔIA Put |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Arbitraje** | **1** | 0,0051 | 0,7748$^{***}$ | -0,1619$^{**}$ | 0,5646$^{***}$ | 0,4918$^{***}$ | -0,0273 | 0,1453$^{**}$ | -0,1740$^{***}$ |
| **Vencimiento** | 0,0723 | **1** | 0,0821 | -0,0588 | 0,3056$^{***}$ | -0,0968 | 0,2688$^{***}$ | 0,1495$^{**}$ | 0,2824$^{***}$ |
| **Volumen** | 0,8240$^{***}$ | 0,1131 | **1** | -0,2753$^{***}$ | 0,3439$^{***}$ | 0,1458$^{**}$ | 0,1601$^{**}$ | 0,1151$^{*}$ | -0,1773$^{***}$ |
| **Valor** | -0,2059$^{***}$ | -0,1067 | -0,3512$^{***}$ | **1** | -0,2045$^{***}$ | 0,1608$^{**}$ | 0,0883 | -0,1611$^{**}$ | 0,1133$^{*}$ |
| **Tipo Interés** | 0,5882$^{***}$ | 0,3487$^{***}$ | 0,4746$^{***}$ | -0,2514$^{***}$ | **1** | 0,5876$^{***}$ | 0,1583$^{**}$ | -0,0008 | -0,1502$^{**}$ |
| **Volatilidad** | 0,4867$^{***}$ | -0,0641 | 0,2090$^{***}$ | 0,1199$^{*}$ | 0,5825$^{***}$ | **1** | -0,1502$^{**}$ | -0,1745$^{***}$ | -0,0939 |
| **ΔIA Futuro** | -0,0206 | 0,3045$^{***}$ | 0,1061 | 0,1230$^{*}$ | 0,2207$^{***}$ | -0,1338$^{*}$ | **1** | -0,0996 | 0,1975$^{***}$ |
| **ΔIA Call** | 0,1523$^{**}$ | 0,1709$^{**}$ | 0,1551$^{**}$ | -0,1347$^{*}$ | -0,0291 | -0,2284$^{***}$ | -0,1623$^{**}$ | **1** | 0,2333$^{***}$ |
| **ΔIA Put** | -0,2354$^{***}$ | 0,2989$^{***}$ | -0,2003$^{***}$ | 0,1227$^{*}$ | -0,2210$^{***}$ | -0,2047$^{***}$ | 0,1582$^{**}$ | 0,2327 | **1** |

**Panel D: CORRELACION DE PEARSON SPEARMAN (Intervalo de 10 segundos)**

| Variables | Arbitraje | Vencimiento | Volumen | Valor | Tipo Interés | Volatilidad | ΔIA Futuro | ΔIA Call | ΔIA Put |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Arbitraje** | **1** | 0,0706 | 0,7643$^{***}$ | -0,1068$^{**}$ | 0,4474$^{***}$ | 0,3902$^{***}$ | -0,0651 | 0,1048$^{**}$ | -0,1057$^{**}$ |
| **Vencimiento** | 0,1258$^{**}$ | **1** | 0,1138$^{**}$ | -0,0756 | 0,3217$^{***}$ | -0,1619$^{***}$ | 0,1631$^{***}$ | 0,1120$^{**}$ | 0,3081$^{***}$ |
| **Volumen** | 0,7894$^{***}$ | 0,1238$^{**}$ | **1** | -0,2569 | 0,2269$^{***}$ | 0,0105 | 0,0614$^{*}$ | 0,0269 | -0,0960$^{*}$ |
| **Valor** | -0,1730$^{***}$ | -0,1066$^{*}$ | -0,2847$^{***}$ | **1** | -0,2739$^{***}$ | 0,1829$^{***}$ | 0,0719 | -0,0568 | 0,1789$^{***}$ |
| **Tipo Interés** | 0,4710$^{***}$ | 0,3710$^{***}$ | 0,3220$^{***}$ | -0,3557$^{***}$ | **1** | 0,5141$^{***}$ | 0,1165$^{**}$ | 0,0707 | -0,1989$^{***}$ |
| **Volatilidad** | 0,3907$^{***}$ | -0,1492$^{**}$ | 0,0738 | 0,0976$^{*}$ | 0,4961$^{***}$ | **1** | -0,0884$^{*}$ | -0,0578 | -0,1860$^{***}$ |
| **ΔIA Futuro** | -0,0933 | 0,1810$^{***}$ | 0,0030 | 0,1028$^{*}$ | 0,1351$^{**}$ | -0,0804 | **1** | -0,0401 | 0,0846 |
| **ΔIA Call** | 0,1151$^{*}$ | 0,1474$^{***}$ | 0,0572 | -0,0493 | 0,0463 | -0,0832 | -0,0802 | **1** | 0,2007$^{***}$ |
| **ΔIA Put** | -0,1342$^{**}$ | 0,3254$^{***}$ | -0,0798 | 0,2025$^{***}$ | -0,2534 | -0,3006$^{***}$ | 0,0544 | 0,2070$^{***}$ | **1** |

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 10: EVALUACION DE NORMALIDAD Y AUTOCORRELACIÓN**

En la tabla 10, se exhibe el estudio de la normalidad y autocorrelación, dividida en dos panales. El panel A, muestra la serie de la cuantía de beneficio original, y el panel B, el logaritmo de la serie.

Para calificar el grado de autocorrelación se han utilizado, el umbral inferior ($dL = 1{,}85$) y el umbral superior ($dU = 2{,}15$).

| | **Panel A: Contraste sobre la serie original** | |
|---|---|---|
| | **Arbitraje sin coste** | **Arbitraje con coste** |
| Observaciones | **397** | **335** |
| Asimetría | 0,6585 | 0,6034 |
| Curtosis | 17,5712 | 15,6082 |
| Jarque Bera | 3.540,79 | 2.239,23 |
| Probabilidad | 0,00% | 0,00% |
| Durbin-Watson | 1,6716 | 1,4421 |
| Resultado | Autocorrel. Positiva débil | Autocorrel. positiva |

| | **Panel B: Contraste sobre el logaritmo de la serie** | |
|---|---|---|
| | **Arbitraje sin coste** | **Arbitraje con coste** |
| Observaciones | **397** | **335** |
| Asimetría | -0,0220 | -0,2394 |
| Curtosis | 2,5693 | 2,6247 |
| Jarque Bera | 3,1005 | 5,1666 |
| Probabilidad | 21,22% | 7,55% |
| Durbin-Watson | 1,2558 | 0,9758 |
| Resultado | Autocorrel. positiva | Autocorrel. positiva |

Fuente: Elaboración propia.

## Tabla 11: ANALISIS DE REGRESIÓN

En la tabla 11, se examinan los coeficientes y el *p-valor* de las diferentes regresiones realizadas con las técnicas de *Stepwise-forward* y *Swapwise* Max. La primera técnica busca seleccionar las variables más significativas dentro de la regresión (exigiendo un *p-valor* mínimo del 25%) y la segunda busca a través de las mismas variables maximizar el $R^2$.

Las regresiones se han realizado para los intervalos de 10, 5 y 0 segundos para el escenario con costes y sin costes de transacción, y para las distintas variables estudiadas a lo largo de toda la sección.

Los valores señalados con un *, ** o ***, muestran significatividad al 10%, 5% y 1%, respectivamente. Los coeficientes vacíos (-) son aquellas variables que para la técnica *Stepwise-forward* no han pasado el nivel de significatividad mínimo exigido.

**TABLA DE REGRESIONES**

**FORMULA**

$$\log(Arbit_t) = c + \beta_1 Vol + \beta_2 Nºtran + \beta_3 Valor + \beta_4 Vto + \beta_5 Volat + \beta_6 r + \beta_7 OI_F + \beta_8 OI_C + \beta_{10} OI_P + \varepsilon_t$$

| VARIABLE | Sin Costes de transacción | | | Con Costes de transacción | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 Seg | 5 Seg | 10 Seg | 0 Seg | 5 Seg | 10 Seg |
| Constante | - | -1,4396*** | -1,7681*** | 0,6842 | -0,8635** | -1,9805*** |
| Volumen | 0,0037*** | 0,0063*** | 0,0055*** | 0,0035*** | 0,0067*** | 0,0054*** |
| Nº. Neg. Diaria | -0,0001** | 0 | - | -0,0003*** | -0,0002*** | - |
| Valor | - | -0,0352 | - | - | - | - |
| Vencimiento | -0,0015* | -0,0010 | - | -0,0021* | -0,0015* | - |
| Volatilidad | 4,4362*** | 14,7898*** | 7,5869*** | 5,8620* | 18,9144*** | 7,7886*** |
| Tipo Interés | 2,1153*** | 0,9611*** | 1,5978*** | 1,8401*** | - | 1,6812*** |
| Variación IA Futuro | - | - | - | - | - | 0 |
| Variación IA Call | 0,0009*** | 0,0012*** | 0,0005*** | 0,0009** | 0,0011*** | 0,0005*** |
| Variación IA Put | - | -0,0007*** | - | - | -0,0016*** | - |
| **$R^2$** | **0,6667** | **0,5890** | **0,4256** | **0,6621** | **0,5843** | **0,3941** |
| **$R^2$ Swapwise-Max** | **0,6711** | **0,5896** | **0,4276** | **0,6699** | **0,5894** | **0,3978** |

Fuente: Elaboración propia.

## Tabla 12: VOLUMEN NECESARIO DE UN INVERSOR PARTICULAR

La tabla 12, plasma los resultados de las tres muestras, distribuidas por año. Para cada una de las muestras, la primera columna (# Desajuste), muestra el número de arbitrajes hallados. La segunda columna, representa el volumen medio observado de las ineficiencias por año. En la columna 3, se observa el volumen medio que debería de invertir el inversor particular, para que el arbitraje fuese efectivo. Por último, en la cuarta columna, se muestra el volumen total observado que se ha negociado (en la mayoría de las ocasiones inferior al volumen mínimo exigido por parte del inversor particular).

| | ESCENARIO CON COSTES DE TRANSACCION | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (0 seg) | | | | (5 seg) | | | | (10 seg) | | | |
| Año | # Desajuste | Vol. Medio | Vol. Medio Inversor Particular | Volumen Total | # Desajuste | Vol. Medio | Vol. Medio Inversor Particular | Total del volumen negociado | # Desajuste | Vol. Medio | Vol. Medio Inversor Particular | Total del volumen negociado |
| **2009** | - | - | - | - | - | - | - | - | 1 | 82 | 16.393 | 82 |
| **2010** | 1 | 4 | 58.824 | 4 | 2 | 10 | 19.252 | 19 | 3 | 8 | 15.092 | 23 |
| **2011** | 14 | 527 | 540 | 8738 | 16 | 468 | 4.877 | 8839 | 18 | 416 | 4.200 | 8845 |
| **2012** | 19 | 116 | 2.973 | 2204 | 22 | 101 | 2.353 | 2220 | 36 | 63 | 1.147 | 2269 |
| **2013** | 11 | 114 | 2.107 | 1256 | 17 | 78 | 1.268 | 1325 | 23 | 61 | 865 | 1410 |
| **2014** | 7 | 504 | 7.467 | 3527 | 11 | 321 | 3.364 | 3531 | 13 | 272 | 2.531 | 3533 |
| **2015** | 3 | 21 | 9.009 | 64 | 5 | 24 | 5.405 | 122 | 11 | 20 | 2.457 | 216 |
| **2016** | 20 | 138 | 11.993 | 2848 | 38 | 78 | 5.947 | 3046 | 49 | 61 | 5.904 | 3102 |
| **2017** | 1 | 1 | 200.000 | 1 | 3 | 1 | 155.556 | 3 | 25 | 6 | 8.193 | 156 |
| **2018** | 22 | 115 | 24.567 | 2539 | 91 | 32 | 2.105 | 2910 | 161 | 21 | 1.086 | 3339 |
| **2019** | 5 | 13 | 24.113 | 63 | 14 | 6 | 3.649 | 83 | 23 | 6 | 2.644 | 128 |
| **TOTAL** | **103** | **1.553** | **341.593** | **21.244** | **219** | **1.119** | **203.776** | **22.098** | **363** | **1.016** | **60.512** | **23.103** |

Fuente: Elaboración propia.

# 9. Anexo

## Tabla 1: ANALISIS DEL INICIO DE ORDEN DISTRIBUIDO POR VENCIMIENTO

En la tabla se puede observar la distribución del inicio de la transacción agrupadas por vencimiento para cada uno de los intervalos y activos estudiados. Cada uno de los activos se dividen en dos columnas, la primera (#) es la frecuencia que se ha detectado y la segunda el porcentaje sobre el total de la muestra.

| | | Inicio de la transaccion | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Intervalo 0 segundos | | | | | | Intervalo 5 segundos | | | | | | Intervalo 10 segundos | | | | | |
| | | Futuro | | Call | | Put | | Futuro | | Call | | Put | | Futuro | | Call | | Put | |
| Vencimeinto | Transacc. | # | (%) | # | (%) | # | (%) | # | (%) | # | (%) | # | (%) | # | (%) | # | (%) | # | (%) |
| dec10 | B | 1 | 1% | 1 | 1% | 1 | 1% | 2 | 1% | 2 | 1% | 2 | 1% | 3 | 1% | 4 | 1% | 4 | 1% |
| | O | - | | - | | - | | - | - | - | - | - | - | 1 | 0% | - | - | - | - |
| dec11 | B | 3 | 4% | 4 | 6% | 4 | 6% | 5 | 3% | 6 | 3% | 6 | 3% | 5 | 2% | 7 | 2% | 7 | 2% |
| | O | 1 | 1% | - | | - | | 1 | 1% | - | - | - | - | 2 | 1% | - | - | - | - |
| dec12 | B | 10 | 14% | 10 | 14% | 10 | 14% | 12 | 6% | 14 | 7% | 14 | 7% | 15 | 5% | 28 | 9% | 28 | 9% |
| | O | - | | - | | - | | 2 | 1% | - | - | - | - | 13 | 4% | - | - | - | - |
| dec13 | B | 1 | 1% | 1 | 1% | 1 | 1% | 10 | 5% | 10 | 5% | 10 | 5% | 1 | 0% | 1 | 0% | 1 | 0% |
| | O | - | | - | | - | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| dec14 | B | 5 | 7% | 5 | 7% | 5 | 7% | 9 | 5% | 17 | 9% | 17 | 9% | 7 | 2% | 21 | 6% | 21 | 6% |
| | O | - | | - | | - | | 8 | 4% | - | - | - | - | 14 | 4% | - | - | - | - |
| dec15 | B | 3 | 4% | 3 | 4% | 3 | 4% | 5 | 3% | 5 | 3% | 5 | 3% | 10 | 3% | 11 | 3% | 11 | 3% |
| | O | - | | - | | - | | - | - | - | - | - | - | 1 | 0% | - | - | - | - |
| dec16 | B | 15 | 21% | 18 | 26% | 18 | 26% | 28 | 14% | 33 | 17% | 33 | 17% | 36 | 11% | 43 | 13% | 43 | 13% |
| | O | 3 | 4% | - | | - | | 8 | 4% | 3 | 2% | 3 | 2% | 11 | 3% | 4 | 1% | 4 | 1% |
| dec17 | B | 1 | 1% | 1 | 1% | 1 | 1% | 2 | 1% | 3 | 2% | 3 | 2% | 11 | 3% | 25 | 8% | 13 | 4% |
| | O | - | | - | | - | | 1 | 1% | - | - | - | - | 14 | 4% | - | - | 12 | 4% |
| dec18 | B | 8 | 11% | 14 | 20% | 7 | 10% | 43 | 22% | 70 | 35% | 31 | 16% | 68 | 21% | 124 | 38% | 52 | 16% |
| | O | 6 | 9% | - | | 7 | 10% | 40 | 20% | 13 | 7% | 52 | 26% | 84 | 26% | 28 | 9% | 100 | 30% |
| dec19 | B | 1 | 1% | 12 | 17% | 10 | 14% | 6 | 3% | 21 | 11% | 13 | 7% | 10 | 3% | 27 | 8% | 20 | 6% |
| | O | 12 | 17% | 1 | 1% | 3 | 4% | 16 | 8% | 1 | 1% | 9 | 5% | 22 | 7% | 5 | 2% | 12 | 4% |
| TOTAL | | 70 | 100% | 70 | 100% | 70 | 100% | 198 | 1 | 198 | 100% | 198 | 100% | 328 | 100% | 328 | 100% | 328 | 100% |

## Tabla 2: ANALISIS DEL TIPO DE ORDEN DISTRIBUIDO POR VENCIMIENTO

En la tabla se puede observar la distribución del tipo de orden agrupada por vencimientos, para cada uno de los intervalos y activos estudiados. Cada uno de los activos se dividen en dos columnas, la primera (#) es la frecuencia que se ha detectado y la segunda el porcentaje sobre el total de la muestra.

| | | Panel B: Tipo de Orden | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Intervalo 0 segundos | | | | | | Intervalo 5 segundos | | | | | | Intervalo 10 segundos | | | | | |
| | | Futuro | | Call | | Put | | Futuro | | Call | | Put | | Futuro | | Call | | Put | |
| Vencimeinto | Transacc. | # | (%) | # | (%) | # | (%) | # | (%) | # | (%) | # | (%) | # | (%) | # | (%) | # | (%) |
| dec10 | K | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% |
| | T | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | 1 | 0% | | 0% | | 0% |
| | O | 1 | 1% | 1 | 1% | 1 | 1% | 2 | 1% | 2 | 1% | 2 | 1% | 3 | 1% | 4 | 1% | 4 | 1% |
| | X | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% |
| | Z | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% |
| dec11 | K | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% |
| | T | 1 | 1% | | 0% | | 0% | 2 | 1% | | 0% | | 0% | 3 | 1% | | 0% | | 0% |
| | O | 10 | 10% | 11 | 11% | 11 | 11% | 11 | 5% | 13 | 6% | 13 | 6% | 11 | 3% | 14 | 4% | 14 | 4% |
| | X | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% |
| | Z | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% |
| dec12 | K | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% |
| | T | | 0% | | 0% | | 0% | 3 | 1% | | 0% | | 0% | 18 | 5% | | 0% | | 0% |
| | O | 17 | 17% | 17 | 17% | 17 | 17% | 17 | 8% | 20 | 9% | 20 | 9% | 17 | 5% | 35 | 10% | 35 | 10% |
| | X | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% |
| | Z | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% |
| dec13 | K | 1 | 1% | 1 | 1% | 1 | 1% | 1 | 0% | 1 | 0% | 1 | 0% | 1 | 0% | 3 | 1% | 3 | 1% |
| | T | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | 2 | 1% | | 0% | | 0% |
| | O | 10 | 10% | 10 | 10% | 10 | 10% | 10 | 5% | 10 | 5% | 10 | 5% | 10 | 3% | 10 | 3% | 10 | 3% |
| | X | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% |
| | Z | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% |
| dec14 | K | 6 | 6% | 6 | 6% | 6 | 6% | 14 | 6% | 14 | 6% | 14 | 6% | 6 | 2% | 18 | 5% | 18 | 5% |
| | T | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | 16 | 4% | | 0% | | 0% |
| | O | 5 | 5% | 5 | 5% | 5 | 5% | 7 | 3% | 7 | 3% | 7 | 3% | 5 | 1% | 9 | 2% | 9 | 2% |
| | X | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% |
| | Z | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% |
| dec15 | K | 1 | 1% | 3 | 3% | 3 | 3% | 1 | 0% | 5 | 2% | 5 | 2% | 1 | 0% | 11 | 3% | 11 | 3% |
| | T | 2 | 2% | | 0% | | 0% | 4 | 2% | | 0% | | 0% | 9 | 2% | | 0% | | 0% |
| | O | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% |
| | X | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | 1 | 0% | | 0% | | 0% |
| | Z | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% |
| dec16 | K | 17 | 17% | 20 | 20% | 20 | 20% | 17 | 8% | 35 | 16% | 35 | 16% | 17 | 5% | 45 | 12% | 45 | 12% |
| | T | 3 | 3% | | 0% | | 0% | 21 | 10% | 3 | 1% | 3 | 1% | 32 | 9% | 4 | 1% | 4 | 1% |
| | O | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% |
| | X | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% |
| | Z | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% |
| dec17 | K | | 0% | 1 | 1% | 1 | 1% | | 0% | 3 | 1% | 3 | 1% | | 0% | 25 | 7% | 25 | 7% |
| | T | 1 | 1% | | 0% | | 0% | 3 | 1% | | 0% | | 0% | 24 | 7% | | 0% | | 0% |
| | O | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% |
| | X | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% |
| | Z | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | 1 | 0% | | 0% | | 0% |
| dec18 | K | 7 | 7% | 14 | 14% | 14 | 14% | 8 | 4% | 83 | 38% | 83 | 38% | 8 | 2% | 152 | 42% | 152 | 42% |
| | T | 6 | 6% | | 0% | | 0% | 74 | 34% | | 0% | | 0% | 143 | 40% | | 0% | | 0% |
| | O | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% |
| | X | 1 | 1% | | 0% | | 0% | 1 | 0% | | 0% | | 0% | 1 | 0% | | 0% | | 0% |
| | Z | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% |
| dec19 | K | 9 | 9% | 13 | 13% | 13 | 13% | 9 | 4% | 22 | 10% | 22 | 10% | 9 | 2% | 32 | 9% | 32 | 9% |
| | T | 4 | 4% | | 0% | | 0% | 13 | 6% | | 0% | | 0% | 22 | 6% | | 0% | | 0% |
| | O | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% |
| | X | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | 1 | 0% | | 0% | | 0% |
| | Z | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% | | 0% |
| TOTAL | | 102 | 100% | 102 | 100% | 102 | 100% | 218 | 100% | 218 | 100% | 218 | 100% | 362 | 100% | 362 | 100% | 362 | 100% |