UNIVERSIDAD TORCUATO DI TELLA

UNIVERSIDAD TORCUATO DI TELLA, ESCUELA DE NEGOCIOS
MASTER IN MANAGEMENT + ANALYTICS

Estimación de densidades de probabilidades neutrales al riesgo a partir de cadenas de opciones sobre AstraZeneca

---

Resumen

La función de Densidad Neutral al Riesgo (DNR) es un concepto fundamental en las finanzas en la valuación de derivados financieros. La estimación de la DNR sigue siendo un desafío matemático y computacional debido a las limitaciones de los datos financieros disponibles y las restricciones requeridas por los métodos disponibles. En la literatura y en la industria se utilizan tanto métodos paramétricos como no paramétricos para estimar la DNR a partir de los precios de las opciones. En este trabajo proponemos y estudiamos ambos tipos de métodos para investigar el contenido informativo de las DNR sobre opciones financieras europeas de la empresa AstraZeneca, una de las empresas farmacéuticas que desarrolló una vacuna contra la COVID-19. El uso de las DNR estimadas en torno a episodios de noticias financieras por la fabricación de las vacunas, interrupciones en la fabricación o el suministro de las mismas y datos efectos positivos o adversos para la salud humana de la vacuna, nos permitió explorar y conocer en qué medida los agentes que negocian estas opciones financieras en el mercado anticipan los eventos en relación a sus creencias temporales o permanentes al negociar este derivado financiero.

Palabras claves: Densidad Neutral al Riesgo, opciones, vacunas, COVID-19

Alumno: Vargas Duarte, Oscar
Director: Roccatagliata, Pablo - Escuela de Negocios, UTDT

Fecha de entrega: 23 de julio del 2021

UNIVERSIDAD
TORCUATO DI TELLA

TORCUATO DI TELLA UNIVERSITY, BUSINESS SCHOOL
MASTER IN MANAGEMENT + ANALYTICS

Estimating Risk Neutral Probability Densities from options chains over AstraZeneca

---

Abstract

The Risk Neutral Density (DNR) function is a fundamental concept in finance in the valuation of financial derivatives. Estimating the DNR remains a mathematical and computational challenge due to the limitations of the available financial data and the constraints required by the available methods. Both parametric and nonparametric methods are used in the literature and industry to estimate DNR from option prices. In this paper we propose and study both types of methods to investigate the informational content of the DNRs on European financial options of the company AstraZeneca, one of the pharmaceutical companies that developed a vaccine against COVID-19. The use of estimated DNRs around financial news episodes due to the manufacture of vaccines, interruptions in the manufacture or supply of the same and data, positive or adverse effects on human health of the vaccine, allowed us to explore and know in to what extent the agents who trade these financial options in the market anticipate events in relation to their temporary or permanent beliefs when trading this financial derivative.

Keywords: Risk Neutral Density, options, vaccines, COVID-19

Student: Vargas Duarte, Oscar
Advisor: Roccatagliata, Pablo - School of Business, UTDT

Delivery date: July 23, 2021

Índice

1 - Introducción **4**

1.1 - Línea de tiempo de la fabricación de la vacuna AstraZeneca 6

1.2 - Noticias y eventos relacionados a la vacuna AstraZeneca 7

2 - Revisión de la literatura **10**

2.1 - Revisión de la literatura sobre valuación de opciones 10

2.1.1 - Precio de la opción en forma genérica 10

2.1.2 - Proceso del stock price o activo subyacente 10

2.1.3 - Precio de la opción sobre acciones 11

2.2 - Parámetros de las Distribuciones de Probabilidad 14

2.2.1 - Momentos de las Distribuciones 14

2.2.2 - Distribución lognormal 15

2.2.3 - Momentos de las Distribuciones Neutrales al Riesgo (DNR) 16

2.3 - Métodos para la extracción de Distribuciones Neutrales al Riesgo (DNR) 17

2.3.1 - Antecedentes de las técnicas de estimación de las DNR 17

2.3.2 - Métodos paramétricos para estimar las DNR 18

2.3.3 - Métodos no paramétricos para estimar las DNR 19

2.3.4 - Aplicaciones de las Distribuciones Neutrales al Riesgo 20

2.4 - Revisión de las metodologías para la estimación de las DNR 21

2.4.1 - Métodos de referencia para estimar las DNR 21

2.4.2 - Beta generalizada 22

2.4.3 - Mezcla de lognormales 24

2.4.4 - Volatilidad implícita 27

3 - Materiales y métodos **29**

3.1 - Datos 29

3.1.1 - Estructura de los datos originales y su uso 29

3.1.2 - Criterio para la elección de este tipo de opciones 31

3.2 - Software, código fuente del proyecto y paquete estadístico 31

3.2.1 - Software y código fuente del proyecto 31

3.2.2 - Paquetes del software 31

4 - Resultados **32**

4.1 - Momentos de la distribución neutral al riesgo del activo subyacente 32

4.1.1 - Cadena de opciones con vencimiento 15/01/2021 33

4.1.2 - Cadena de opciones con vencimiento 19/02/2021 36

4.1.3 - Cadena de opciones con vencimiento 19/03/2021 38

4.1.4 - Cadena de opciones con vencimiento 16/04/2021 40

4.2 - Probabilidades implícitas de la vacuna según opciones binarias 43

4.3 - Discusión sobre las probabilidades neutrales y físicas 45

5 - Conclusiones **46**

5.1 - Limitaciones y futuras mejoras 46

5.2 - Conclusión 46

7 - Bibliografía **47**

Apéndice A - Eventos relacionados a la vacuna de Oxford-AstraZeneca **49**

Apéndice B - Glosario sobre opciones financieras **55**

Apéndice C - Línea de tiempo de la fabricación de las vacunas contra la COVID-19 **61**

Apéndice D -Métodos para la estimación de la densidad neutral al riesgo **65**

1 - Introducción

Los *traders*, economistas y banqueros centrales tienen un gran interés en evaluar las creencias del mercado. El problema es que los mercados nos hablan en el lenguaje de los precios, y extraer sus opiniones a menudo puede ser un problema de inferencia difícil. Errores de predicción pueden resultar en costos sustanciales e irreversibles para una empresa financiera, un banco central o una empresa que se nutre de *commodities*. Mejorando la previsión y anticipando la demanda o riesgo futuro con los datos disponibles de hoy, la posición se vuelve mucho más ventajosa para quienes conocen las herramientas para leer el lenguaje del mercado.

Con la pandemia de la enfermedad COVID-19 el mundo en su totalidad tuvo una desaceleración repentina y creció la incertidumbre en todas las industrias y mercados. Los mercados financieros respondieron al confinamiento con estancamientos económicos en varias Bolsas del mundo. La incertidumbre ocasionó un alto riesgo financiero, y las personas, empresas y gobiernos tomaron previsiones económicas variadas, no solo durante los primeros períodos de contención sino durante toda la pandemia, con aciertos y fracasos.

Las vacunas contra el coronavirus fueron todo un reto para varios laboratorios del mundo. Fue necesaria mucha inversión en investigación y desarrollo que fue financiada a través de los mercados financieros y con fondos públicos para lograr obtener un producto terminado apto para uso humano en tan poco tiempo. Estados Unidos y Alemania fueron las principales inversores en I+D para el desarrollo de las vacunas, con unos 2.000 millones de dólares y 1.500 millones de dólares, respectivamente. El Reino Unido ocupó el tercer lugar en la lista de financiación con poco más de 500 millones de dólares, mientras que la Unión Europea ha invertido alrededor de 327 millones de dólares. Aunque la mayor parte de la inversión en los EE. UU. utilizó fondos públicos, también se han donado unos 2,17 mil millones de dólares y al menos 62 millones de dólares fueron donados de la filantropía[1].

Teniendo en cuenta esto, ¿Es probable que las opciones financieras de los principales laboratorios que fabrican la vacuna nos ofrezcan información relevante sobre eventos futuros? ¿Se puede conocer anticipadamente el *stock price* de un laboratorio analizando el mercado de opciones de manera anticipada?

Los mercados de opciones proporcionan información pública útil sobre las distribuciones de probabilidad de los precios de los activos subyacentes. Debido a que los pagos de las opciones son funciones determinadas de manera única de los posibles precios del activo subyacente, las interacciones entre los participantes del mercado de opciones dan como resultado expresiones colectivas de expectativas sobre las distribuciones de precios futuros en los precios de las opciones actuales. Por lo tanto, los modelos de fijación de precios de opciones pueden utilizarse para recuperar información probabilística sobre los precios de los activos subyacentes sin obtener opiniones directamente de los participantes del mercado (Bahra, 1997).

Por otra parte, existen también mercados de predicción donde se negocian contratos respecto a la probabilidad de la vacuna. En este tipo de mercado ocurre un juego de apuestas competitivo diseñado para aprovechar la inteligencia colectiva de un gran grupo de participantes para predecir eventos futuros. Un mercado de predicción es particularmente útil

[1] https://www.statista.com/chart/24808/top-sources-of-covid-19-vaccine-funding/

en generar predicciones dinámicas que evolucionan en tiempo real hasta que se resuelve el problema en cuestión. En su forma más común, un mercado de predicción se asemeja a un mercado financiero para opciones binarias o futuros. Existen estudios que establecen supuestos donde los precios de mercado pueden tomarse como probabilidades de eventos (Wolfers and Zitzewitz, 2006).

Teniendo en cuenta las similitudes que existen entre estos mercados cuando son escritos de forma binaria, se pueden realizar estudios de manera conjunta y conocer con anterioridad la información de eventos inciertos obteniendo las probabilidades implícitas de las transacciones (Langer and Lemoine, 2020).

Aunque los mercados de predicción pueden ser una fuente valiosa de información pronosticando eventos futuros, los mismos carecen de valor cuando no existen contratos determinados sobre un activo subyacente a evaluar o existe poca participación en el mercado elaborado (Manski, 2006).

Los mercados de derivados proporcionan información dinámica sobre la situación del mercado. Los mercados de derivados suelen ser sensibles a cualquier cambio estático y dinámico en el mercado. Los mercados de derivados proporcionan una fuente útil de información para evaluar el estado actual y las tendencias de los mercados. El derivado es un producto financiero, donde el precio depende o se deriva de uno o más activos subyacentes. La valuación de los derivados suele ser un proceso complicado desde el punto de vista teórico. Contratos de futuros, contratos a plazo, opciones y *swaps* son los tipos más comunes de derivados. Los derivados son instrumentos financieros interesantes, que normalmente se utilizan como instrumento de cobertura financiera de riesgos, aunque también se pueden utilizar con fines especulativos.

En este trabajo, el activo subyacente de los derivados (en este caso opciones financieras) es el *stock price* del laboratorio de AstraZeneca que fabrica una de las vacunas contra la COVID-19. Como no se obtuvieron mercados de predicción elaborados sobre dicho activo subyacente, el análisis de este trabajo se basa en entender el lenguaje de los mercados a través de opciones financieras negociadas sobre estos activos subyacentes.

Este trabajo consiste en revisar la literatura y los métodos existentes para extraer información de las cadenas de opciones a través de los momentos (curtosis, asimetría, desviación estándar y media), y de las Densidades Neutrales al Riesgo (*Risk Neutral Probabilities*) para conocer el movimiento neutral implícito que pueda tener el *stock price* con relación a noticias o eventos relacionados a la vacuna contra la COVID-19 de AstraZeneca.

La utilización de información de derivados financieros no es algo nuevo para comprender o anticipar eventos relacionados a fluctuaciones de precios subyacentes. (Datta et al. 2014) calculan distintos momentos sobre las DNR de opciones durante las crisis del crudo entre los años 2011 y 2012. Más aplicaciones de las distintas técnicas de estimación se encuentran en una sección específica del trabajo.

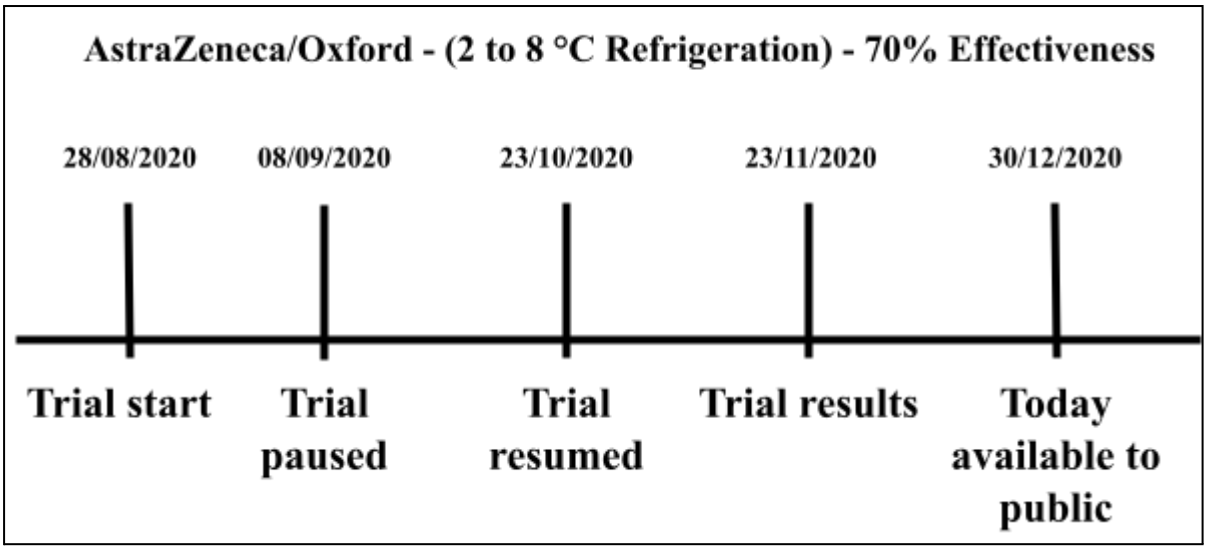
El documento se encuentra estructurado de la siguiente manera: en la Sección 2 se presentará una revisión de la literatura sobre las Distribuciones Neutrales al Riesgo y formas de estimación, en la Sección 3 se presentarán los materiales y métodos para la obtención de las Densidades Neutrales al Riesgo de las opciones de AstraZeneca, en la Sección 4 se presentarán los resultados obtenidos sobre las DNR estimadas y su relación con el activo

subyacente entre las creencias del mercado de opciones obtenidas a través de los momentos de las distribuciones y la evolución del activo subyacente, en la Sección 5 se presentarán las conclusiones del trabajo, aplicaciones y las posibles futuras mejoras.

1.1 - Línea de tiempo de la fabricación de la vacuna AstraZeneca

Según la noticia publicada por la compañía de asesoría financiera Bloomberg[2] para constatar el transcurso cronológico del desarrollo de las vacunas contra la COVID-19, la línea de tiempo de la vacuna AstraZeneca y sus características fueron como siguen en la Figura 1 (**ver Apéndice C, para observar la evolución de las demás vacunas contra la COVID-19**), y la línea de tiempo de cada fase de la vacuna AstraZeneca se observan en la Figura 2:

Figura 1. Línea de tiempo de la vacuna AstraZeneca

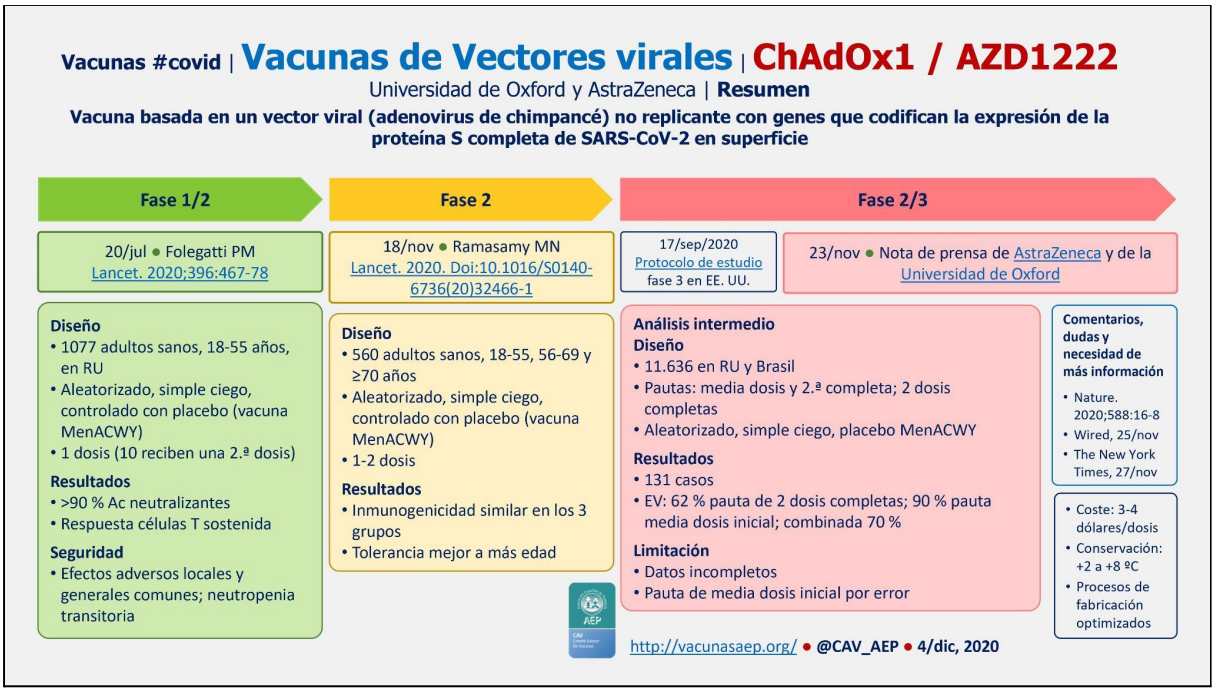


ASTRAZENECA - OXFORD (AZD1222)
Vacuna de adenovirus o vector adenoviral

País: Reino Unido
Vía de administración: Intramuscular
Dosis: 2
Intervalo de dosis: 28 días
Eficacia en fase 3: 70.4%
Eficacia contra enfermedad grave y muerte: 100%
Efectos adversos: Dolor, hinchazón y enrojecimiento en la zona inyectada; escalofríos, cansancio y dolor de cabeza en el resto del cuerpo.
Conservación: 2-8 grados con vida útil de hasta por 6 meses
Precio: Entre $2 y $4.5 dólares por dosis.

[2] https://www.bloomberg.com/graphics/covid-vaccine-tracker-global-distribution/

Figura 2. Línea de tiempo de las fases de la vacuna AstraZeneca



Fuente:Comité Asesor de Vacunas de la Asociación Española de Pediatría [3]

1.2 - Noticias y eventos relacionados a la vacuna AstraZeneca

AstraZeneca, el gigante farmacéutico británico-sueco con sede en Cambridge, Inglaterra, tiene poco historial en vacunas, pero logró marcar un golpe al asociarse con científicos del Instituto Jenner de la Universidad de Oxford para ayudar a llevar su vacuna contra la COVID-19 al mercado. La compañía firmó acuerdos para entregar miles de millones de vacunas en todo el mundo.

Sin embargo, de las principales vacunas en el mercado global, AstraZeneca ha tenido el viaje más difícil. Entre ensayos detenidos, datos confusos y contratiempos de comunicación, la compañía ahora enfrenta vacunas suspendidas y una disminución de la confianza en su vacuna.

La revista de negocios Fortune[4] enumera cronológicamente las noticias y eventos relacionados a la vacuna europea desde su inicio de fabricación.

En la Tabla 1, se observa un resumen de los eventos más relevantes con respecto a la vacuna a lo largo de su desarrollo, testeo, eficacia y posterior distribución logística (**ver Apéndice A, para observar con más detalles la cronología de noticias**).

Como complemento a las noticias relacionadas a la vacuna, en la Figura 3 se observa una lista del total de países con mayor cantidad de dosis reales entregadas, el porcentaje de la población con una dosis y con dos dosis, y la cantidad de vacunas inoculadas diariamente.

[3] https://vacunasaep.org/profesionales/noticias/covid-vacunas-vector-viral-ChAdOx1-Oxford-AstraZeneca
[4] https://fortune.com/2021/04/01/astrazeneca-covid-vaccine-timeline-news-latest-update/

Tabla 1. Noticias y eventos más resaltantes de la vacuna AstraZeneca

Fecha	Evento
18 de mayo de 2020:	AstraZeneca firma un acuerdo con el gobierno del Reino Unido para suministrar hasta 30 millones de dosis de la vacuna en septiembre y 100 millones de dosis para fin de año
10 de agosto de 2020:	Con su vacuna en la primera posición para ser la primera aprobada a nivel mundial, Pascal Soriot, director ejecutivo de AstraZeneca, es el centro de atención. La campaña de vacunas representa un punto culminante en su campaña de siete años para revertir a la compañía farmacéutica que alguna vez tuvo dificultades. Los inversores acuden en masa a las acciones de AstraZeneca desde que se anunció la alianza con Oxford, lo que las envía a máximos históricos y convierte a la empresa en la más valiosa en el índice de acciones FTSE 100.
9 de noviembre de 2020:	Pfizer supera a AstraZeneca para convertirse en la primera gran empresa farmacéutica en anunciar los resultados de sus ensayos clínicos de fase III. La compañía dice que su jab tiene una efectividad superior al 90%, lo que aumenta la presión sobre AstraZeneca para demostrar que su vacuna también es altamente efectiva.
30 de diciembre de 2020:	el Reino Unido se convierte en el primer país en aprobar la vacuna de AstraZeneca
25 de enero de 2021:	AstraZeneca enfurece a los políticos de la Unión Europea cuando les informa que podrá suministrar al bloque de 27 naciones sólo alrededor del 40% de las dosis de vacuna que prometió durante el primer trimestre debido a problemas de fabricación en sus instalaciones europeas.
8 de febrero de 2021:	Científicos de Sudáfrica dicen que la vacuna AstraZeneca parece ser ineficaz para prevenir el COVID-19 de leve a moderado entre las personas infectadas con la variante B.1.351 que surgió por primera vez en ese país.
11 de marzo de 2021:	Dinamarca detiene el lanzamiento de la vacuna AstraZeneca debido a preocupaciones sobre la peligrosa coagulación de la sangre entre algunos de los que recibieron la vacuna.
16 de marzo de 2021:	Varios países europeos, incluidos Alemania, Francia e Italia, también suspenden la distribución de la vacuna AstraZeneca en medio de preocupaciones sobre la coagulación, incluso cuando la Agencia Europea de Medicamentos y la Organización Mundial de la Salud dicen que la vacuna es segura.
30 de marzo de 2021:	Algunas ciudades y regiones alemanas, incluidas Múnich y Berlín, suspenden la distribución de la vacuna de

	AstraZeneca a personas menores de 60 años debido a las continuas preocupaciones sobre incidentes inusuales de coagulación sanguínea potencialmente relacionados con la inyección. Canadá también deja de administrar la vacuna a menores de 55 años debido a temores similares.
7 de abril de 2021:	El regulador médico de la Unión Europea, la Agencia Europea de Medicamentos (EMA), dice que las muy raras condiciones de coagulación de la sangre que han afectado a un puñado de personas después de recibir la vacuna AstraZeneca probablemente sean causadas por el pinchazo, y ordena a la empresa que realice más pruebas para investigar el motivo exacto. Pero dice que, dados los mayores riesgos del COVID-19 en sí y la falta de alternativas hasta ahora en Europa, la vacuna se debe seguir administrando. Mientras tanto, el regulador británico, la Agencia Reguladora de Medicamentos y Productos Sanitarios (MHRA), dice que, si bien aún no se puede estar seguro del vínculo, recomienda que los adultos sanos menores de 30 años reciban una vacuna diferente en lugares donde está fácilmente disponible. Es probable que la noticia haga que las personas se muestren más reacias a tomar la vacuna, ya que se ha tenido dudas sobre su eficacia, seguridad y suministro.

Figura 3. Datos reales del total de dosis entregadas

Countries and regions	Doses administered ▾	Enough for % of people	% of population given 1+ dose	% of population fully vaccinated	Daily rate of doses administered
Global Total	*3,512,344,314*	–	–	–	*30,482,663*
Mainland China	1,402,019,000	50.1	–	–	10,050,000
EU	419,757,050	47.2	55.0	41.5	4,135,966
India	391,053,156	14.3	22.8	5.6	3,780,721
U.S.	335,487,779	52.4	55.7	48.2	548,045
Brazil	117,292,826	28.7	42.4	15.0	1,355,325
Germany	84,115,549	50.6	59.0	43.7	777,522
U.K. +	81,192,857	60.8	68.9	52.6	235,866
Japan	63,651,899	25.2	31.2	19.2	1,572,577
France	62,321,777	48.1	56.2	44.2	555,342
Turkey	60,540,767	36.4	46.2	22.4	737,986
Italy	59,211,538	49.0	59.7	41.4	513,304
Indonesia	54,963,687	10.3	14.7	5.9	885,329
Mexico	51,331,578	20.1	28.0	16.4	513,114
Spain	49,110,538	52.8	61.3	48.4	603,073
Russia	45,000,000	15.3	20.4	10.2	700,000
Canada +	43,728,087	58.3	68.8	36.4	437,546
Poland	32,981,570	43.4	46.2	40.7	359,362
Argentina	25,718,531	28.6	45.9	11.4	343,017
Chile	24,096,859	63.1	69.3	59.3	101,868

Fuente: Vaccine Tracker de Bloomberg [5]

[5] https://www.bloomberg.com/graphics/covid-vaccine-tracker-global-distribution/

2 - Revisión de la literatura

2.1 - Revisión de la literatura sobre valuación de opciones

Una opción de compra u opción *call* otorga al titular de la opción el derecho a comprar un activo en una fecha determinada por un precio determinado. Una opción de venta u opción *put* otorga al titular de la opción el derecho a vender un activo en una fecha determinada por un precio determinado. La fecha especificada en el contrato se conoce como fecha de vencimiento o *expiration date*. El precio especificado en el contrato se conoce como precio de ejercicio o *strike price*. Las opciones europeas sólo pueden ejercerse en la fecha de caducidad. Las opciones americanas se pueden ejercer en cualquier momento hasta antes de la fecha de vencimiento (Hull, 2012).

2.1.1 - Precio de la opción en forma genérica

Los precios de las opciones *call* y *put* europeas en el momento t se pueden definir de forma genérica como las sumas descontadas de todos los pagos futuros esperados (Cox y Ross 1976):

$$c(X,t) = e^{-rt} \int_X^\infty q(S_T)\,(S_T - X)\,dS_T \tag{1}$$

$$p(X,t) = e^{-rt} \int_0^X q(S_T)\,(X - S_T)dS_T \tag{2}$$

donde c es el precio de la opción de compra, p es el precio de la opción de venta, X es el precio de ejercicio, S_T es el precio del activo en el tiempo T, r es la tasa de interés libre de riesgo y t es el tiempo. Los precios de las opciones pueden ser calculados integrando ecuaciones directamente si y sólo si la forma de la densidad la función $q(S_T)$ está disponible. En la práctica, la función de densidad real es relativamente difícil de definir directamente.

2.1.2 - Proceso del stock price o activo subyacente

Un proceso estocástico se puede clasificar como proceso de tiempo discreto o tiempo continuo. Un proceso estocástico también se puede clasificar como variable continua o variable discreta. El tiempo continuo y la variable continua son fundamentales para comprender la valuación de precios de opciones y otros derivados más complicados. El precio de la opción sobre acciones es una función del precio y el tiempo de las acciones subyacentes. El precio de cualquier derivado es una función de las variables estocásticas subyacentes a la derivada y el tiempo (Hull, 2012).

El modelado del proceso del comportamiento del precio de las acciones según Hull (2012) se basa en el movimiento browniano geométrico, determinado como versión de tiempo continuo:

$$dS = \mu\, S\, dt + \sigma\, S\, dz \tag{3}$$

El mismo modelo se puede determinar como versión de tiempo discreto:

$$\Delta S = \mu\, S\, \Delta t + \sigma\, S\, \epsilon \sqrt{\Delta t} \tag{4}$$

donde la variable μ es la tasa de rendimiento esperada de las acciones, la variable σ es la volatilidad del precio de las acciones y la variable δS es el cambio en el precio de las acciones S a lo largo del intervalo de tiempo Δt. La función ϵ es una distribución normal estándar con media de cero y desviación estándar de uno.

Basado en el lema de Itô, el precio de la derivada f, que depende del precio de las acciones y del tiempo, cumple con el proceso de Itô y se puede definir como versión de tiempo continuo:

$$\mathrm{d}f = \left(\frac{\partial f}{\partial S}\mu S + \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 y}{\partial S^2}\sigma^2 S^2\right) dt + \frac{\partial f}{\partial S}\sigma S \mathrm{d}z \tag{5}$$

y la versión de tiempo discreto:

$$\Delta f = \left(\frac{\partial f}{\partial S}\mu S + \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 y}{\partial S^2}\sigma^2 S^2\right) \Delta t + \frac{\partial f}{\partial S}\sigma S \Delta z \tag{6}$$

Basado en el lema de Itô, el modelo lognormal para el comportamiento del precio de los activos se puede definir por la siguiente ecuación:

$$\ln S_T \approx \emptyset\left[\ln S_0 + \left(\mu - \frac{\sigma^2}{2}\right)T, \sigma^2 T\right] \tag{7}$$

donde S_T es el precio del activo en el tiempo futuro T y S_0 es el precio del activo en el momento 0. El precio del activo tiene una distribución logarítmica normal si el logaritmo natural del precio del activo tiene una distribución lognormal. El proceso estocástico, que es una suposición típica, se basa en el movimiento browniano geométrico (GBM). El modelo de Black-Scholes-Merton se basa en el supuesto de movimiento browniano geométrico (Hull, 2012).

2.1.3 - Precio de la opción sobre acciones

El tipo de proceso estocástico es importante en la valuación de opciones. La fijación de precios de la opción se basa típicamente en el supuesto de un proceso de difusión lognormal. Cox y Ross (1976) estudiaron la importancia del tipo de proceso estocástico presentando la difusión de procesos en más detalles y también diferentes procesos de tipo de salto para la valuación de opciones. El modelo de Black y Scholes comúnmente utilizado

(1973) para la fijación de precios de opciones supone que el precio del activo subyacente sigue una difusión de proceso lognormal.

El pago de la opción europea al vencimiento se puede definir si no existen costos de transacción como:

$$c(S_T, T, X) = \max(S_T - X\ ;\ 0) \tag{8}$$

$$p(S_T, T, X) = \max(X - S_T\ ;\ 0) \tag{9}$$

El modelo de Black y Scholes (1973) para la fijación de precios de opciones asume que el precio del activo tiene una distribución lognormal. El movimiento browniano geométrico (GBM) es un proceso estocástico con un rendimiento esperado constante y una volatilidad constante de modo que se supone que los parámetros μ y σ son constantes. El modelo de Black y Scholes asume la volatilidad constante durante el plazo de la opción y la misma volatilidad en el rango total de los precios de ejercicio.

Al considerar una cartera que comprende una unidad de un activo derivado y una posición corta de Δ unidades del activo subyacente, es posible aplicar el diferencial parcial de ecuación de este portafolio para obtener la ecuación parcial de Black y Scholes:

$$\frac{1}{2}\frac{\partial^2 f}{\partial s_t^2} S_t^2 \sigma^2 + \frac{\partial f}{\partial s_t} S_t r + \frac{\partial f}{\partial t} - \mathrm{r\,f} = 0 \tag{10}$$

El valor de la opción depende de la tasa libre de riesgo r y la desviación estándar σ y la condición de frontera de los contratos de opción en ecuaciones para opciones de compra y venta. Resolviendo la ecuación diferencial parcial en la ecuación (10) con los resultados de las condiciones de frontera, las fórmulas de precios de Black y Scholes para opciones de compra y venta:

$$c(S;t) = SN(d_1) - Xe^{-rT}N(d_2) \tag{11}$$

$$p(S;t) = Xe^{-rT}N(-d_2) - SN(-d_1) \tag{12}$$

con d_1 y d_2 se pueden calcular usando ecuaciones:

$$d_1 = \frac{\ln\left(\frac{S}{X}\right) + (r + \frac{1}{2}\sigma^2)(T)}{\sigma\sqrt{T}} \tag{13}$$

y

$$d_2 = \frac{\ln\left(\frac{S}{X}\right) + (r - \frac{1}{2}\sigma^2)(T)}{\sigma\sqrt{T}} \tag{14}$$

El parámetro μ no está en la ecuación, lo que significa que el rendimiento esperado no aparece en la ecuación de Black y Scholes. En consecuencia, el valor de la opción no depende de las preferencias de riesgo de los inversores.

El modelo de Black and Scholes asume que el precio del activo subyacente sigue un modelo estocástico con rentabilidad esperada constante y volatilidad constante. El parámetro con respecto a la volatilidad instantánea σ en el rendimiento subyacente del activo no está disponible directamente. Sin embargo, la volatilidad instantánea se puede estimar invirtiendo la ecuación de Black y Scholes en términos de volatilidad implícita σ. En la práctica la volatilidad implícita calculada para cada precio de ejercicio es diferente, de modo que las volatilidades implícitas son diferentes entre vencimientos, lo que no es consistente con los supuestos Black y Scholes lognormales que definen la volatilidad como constante en todo el rango de precios de ejercicio y vencimientos. Las volatilidades implícitas observadas en el mercado son una función de los precios de ejercicio, lo que crea el fenómeno llamado volatilidad de la sonrisa.

El trabajo de Black-Scholes y Merton (1973) fue fundamental para comprender teóricamente que la tasa libre de riesgo debería utilizarse para el descuento en lugar del rendimiento esperado del activo. Basado en la teoría en mercados completos que los inversores pueden cubrir la posición de inversión de una opción mediante una posición de compensación en la acción y el bono. El rendimiento esperado debe ser solo la tasa libre de riesgo si cualquier inversor puede rentabilizarlo eliminar el riesgo de la posición de la opción. El riesgo de la inversión se puede eliminar en este enfoque porque cualquier riesgo podría cubrirse. Black-Scholes detectaron que el rendimiento esperado del activo ya no aparecía en la ecuación de fijación de precios de opciones. La tasa libre de riesgo resultó ser un término conveniente para tener en cuenta el descuento en una situación de riesgo neutral.

La ecuación de Black-Scholes para la opción de compra estándar se puede presentar como una versión combinada para obtener una mejor vista general de todos los componentes:

$$c = S\,N\left[\frac{ln\left(\frac{S}{X}\right)+\left(r+\frac{\sigma^2}{2}\right)T}{\sigma\sqrt{T}}\right] - \; e^{-rT}\,X\,N\left[\frac{ln\left(\frac{S}{X}\right)+\left(r-\frac{\sigma^2}{2}\right)T}{\sigma\sqrt{T}}\right] \tag{15}$$

Ecuación de Black-Scholes para la opción de venta estándar:

$$p = \; e^{-rT}\,X\,N\left[-\frac{ln\left(\frac{S}{X}\right)+\left(r-\frac{\sigma^2}{2}\right)T}{\sigma\sqrt{T}}\right] - S\,N\left[-\frac{ln\left(\frac{S}{X}\right)+\left(r+\frac{\sigma^2}{2}\right)T}{\sigma\sqrt{T}}\right] \tag{16}$$

La ecuación de precios de opciones de Black-Scholes fue un gran avance teórico y práctico para comprender la fijación de precios neutrales al riesgo porque todos los insumos necesarios para la ecuación de Black-Scholes eran observables, excepto el parámetro de volatilidad implícita, que podría estimarse a partir de los rendimientos históricos de los activos.

2.2 - Parámetros de las Distribuciones de Probabilidad

2.2.1 - Momentos de las Distribuciones

Los momentos no centrados de la variable aleatoria X se pueden definir como:

$$m_k = E[X^k] = \int_{-\infty}^{\infty} x^k \, f(x) \, dx \tag{17}$$

Los momentos centrados de la variable aleatoria X se pueden definir como:

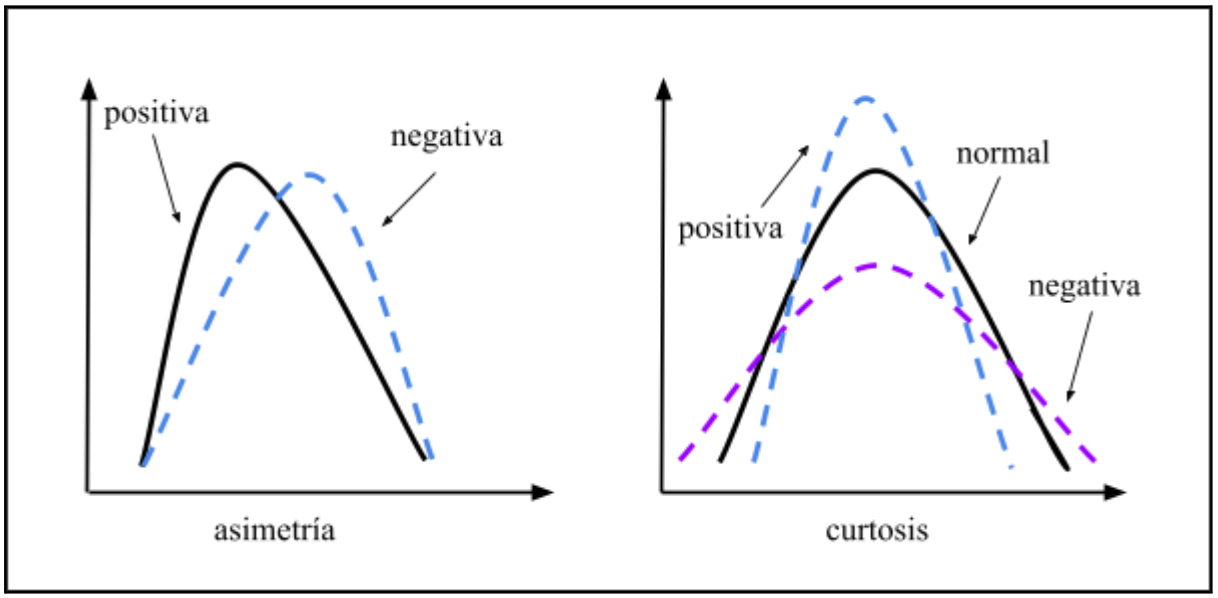
$$\mu_k = E[(X - m)^k] = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m)^k \, f(x) \, dx \tag{18}$$

Las propiedades de las distribuciones de probabilidad se pueden describir mediante los momentos de las distribuciones. El primer momento (M1) es el valor esperado de la distribución. El segundo momento (M2) es la varianza de la distribución. El tercer momento (M3) es la asimetría de la distribución y el cuarto momento (M4) es la curtosis de la distribución.

La asimetría es el 3er momento de una distribución. La asimetría describe la asimetría de la distribución estadística, en la que la curva de distribución sale distorsionada o sesgada ya sea hacia la izquierda o hacia la derecha. La asimetría se puede cuantificar en función de la diferencia con la distribución normal. La asimetría negativa significa que la distribución está sesgada a la izquierda. Si una distribución está sesgada hacia la izquierda, la cola del lado izquierdo de la curva es más larga que la cola del lado derecho, y la media es menor que la moda. La asimetría positiva significa que la distribución está sesgada hacia la derecha. Si una distribución es sesgada hacia la derecha, la cola en el lado derecho de la curva es más larga que la cola en el lado izquierdo, y la media es mayor que la moda. Un resumen de la asimetría positiva y negativa se presenta en la Figura 2.

Curtosis es el 4to momento de una distribución. La curtosis se mide típicamente con respecto a la distribución normal. La curtosis captura el grosor de la cola de las distribuciones. Una distribución que se comporta de la misma manera que cualquier distribución normal es distribución mesocúrtica. El valor de la curtosis de la distribución leptocúrtica es mayor que la curtosis valor de la distribución mesocúrtica (curtosis positiva). Las estadísticas de una distribución en el caso de las leptocúrticas está más concentrada en la media de la distribución normal. Las colas de las distribuciones leptocúrticas, tanto a la derecha como a la izquierda, son típicamente delgadas y ligeras. El valor de curtosis de la distribución platicúrtica es menor que el valor de curtosis de la distribución mesocúrtica (curtosis negativa). Las estadísticas de una distribución en el caso platicúrtico está menos concentrada en la media de la distribución normal. Las colas de las distribuciones platicúrticas, tanto a la derecha como a la izquierda, son típicamente gruesas y pesadas. La descripción general de la curtosis negativa y positiva se presentan en la Figura 4.

Figura 4. Resumen gráfico de los escenarios de asimetría y curtosis.



Fuente:Elaboración propia en base a Shape of data: Skewness and Kurtosis[6]

2.2.2 - Distribución lognormal

El parámetro μ en la distribución logarítmica normal es la media de la distribución. El parámetro σ es la desviación estándar de la distribución. En la escala logarítmica μ es un parámetro de ubicación y σ es un parámetro de escala. La desviación estándar y media de los valores no logarítmicos se denotan m y s.

Un parámetro de ubicación de distribución logarítmica normal μ se puede calcular a partir de la media m y la desviación estándar s de la distribución no logarítmica:

$$\mu = ln\left(\frac{m^2}{\sqrt{s^2+m^2}}\right) \quad (19)$$

Un parámetro de escala de distribución logarítmica normal σ se puede calcular a partir de la media m y desviación estándar s de la distribución no logarítmica:

$$\sigma = \sqrt{ln\left(1+\frac{s^2}{m^2}\right)} \quad (20)$$

Los momentos de las distribuciones se pueden calcular a partir del parámetro de ubicación μ y el parámetro de escala σ asumiendo una distribución lognormal. Los momentos básicos pueden ser calculados usando las ecuaciones (21) a (24):

El valor esperado de los parámetros de distribución lognormal μ y σ:

$$\mu_d = e^{\mu+\sigma^2/2} \quad (21)$$

[6] https://www.analyticsvidhya.com/blog/2021/05/shape-of-data-skewness-and-kurtosis/

La desviación estándar basada en los parámetros de distribución lognormal μ y σ:

$$\sigma_d = \sqrt{e^{2\mu+\sigma^2}\left(e^{\sigma^2}-1\right)} \quad (22)$$

Asimetría basada en el parámetro de distribución lognormal σ:

$$\gamma_1 = \sqrt{e^{\sigma^2}-1}\left(2+e^{\sigma^2}\right) \quad (23)$$

Curtosis (exceso) basado en el parámetro de distribución lognormal σ:

$$\gamma_2 = e^{4\sigma^2} + 2\,e^{\sigma s^2} + 3\,e^{2\sigma^2} - 6 \quad (24)$$

2.2.3 - Momentos de las Distribuciones Neutrales al Riesgo (DNR)

Los momentos clave deben calcularse a partir de los DNR de referencia o de la DNR que mejor performance tenga en términos de colas al momento de observar su comportamiento en una cadena de opciones en una fecha de expiración determinada. El valor valor de expectativa se calcula directamente usando las ecuaciones (25) para el caso discreto y (26) para el caso continuo. La varianza se calcula usando las ecuaciones (27) para el caso discreto y (28) para el caso continuo. La desviación estándar se utiliza como medida de dispersión en el análisis de los resultados. La desviación estándar, que es la raíz cuadrada de la varianza de la distribución, se calcula directamente tomando la raíz cuadrada de la varianza. L asimetría S se calcula directamente usando las ecuaciones (29) para los casos discretos y (30) para los casos continuos. La curtosis K se calcula directamente usando las ecuaciones (31) para casos discretos y (32) para casos continuos.

Valor de expectativa $E(X)$ para la variable aleatoria discreta X con distribución de probabilidad $f(x)$:

$$E(X) = \sum_{i=1}^{n} x_i\, f(x) \quad (25)$$

Valor de expectativa $E(X)$ para la variable aleatoria continua X con distribución de probabilidad $f(x)$:

$$E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} x\, f(x)\, dx \quad (26)$$

Varianza $D^2(X)$ para variable aleatoria discreta X con distribución de probabilidad $f(x)$:

$$D^2(X) = \sigma^2 = E(X-\mu)^2 = \sum_{i=1}^{n}(x_i-\mu)^2\, f(x) \quad (27)$$

Varianza $D^2(X)$ para variable aleatoria continua X con distribución de probabilidad $f(x)$:

$$D^2(X) = \sigma^2 = E(X-\mu)^2 = \int_{-\infty}^{\infty}(x-\mu)^2 f(x)\,dx \quad (28)$$

Asimetría S para la variable aleatoria discreta X con distribución de probabilidad $f(x)$:

$$S_d(X) = E\left[\left(\frac{X-\mu}{\sigma}\right)^3\right] = \frac{\mu_3}{\sigma^3} = \sum_{i=1}^{n}(x_i-\mu)^3 f(x) \quad (29)$$

Asimetría S para la variable aleatoria continua X con distribución de probabilidad $f(x)$:

$$S_c(X) = E\left[\left(\frac{X-\mu}{\sigma}\right)^3\right] = \frac{\mu_3}{\sigma^3} = \int_{-\infty}^{\infty}(x-\mu)^3 f(x)\,dx \quad (30)$$

Curtosis K para la variable aleatoria discreta X con distribución de probabilidad $f(x)$:

$$K_d(X) = E\left[\left(\frac{X-\mu}{\sigma}\right)^4\right] = \frac{\mu_4}{\sigma^4} = \sum_{i=1}^{n}(x_i-\mu)^4 f(x) \quad (31)$$

Curtosis K para la variable aleatoria discreta X con distribución de probabilidad $f(x)$:

$$S_c(X) = E\left[\left(\frac{X-\mu}{\sigma}\right)^4\right] = \frac{\mu_4}{\sigma^4} = \int_{-\infty}^{\infty}(x-\mu)^4 f(x)\,dx \quad (32)$$

En la práctica, los cálculos se basan en el uso de versiones discretas de ecuaciones para determinar los momentos de los DNR de referencia. Pero desde el punto de vista teórico las versiones continuas son más adecuadas para el análisis de los momentos.

2.3 - Métodos para la extracción de Distribuciones Neutrales al Riesgo (DNR)

2.3.1 - Antecedentes de las técnicas de estimación de las DNR

Las técnicas de estimación de DNR se pueden clasificar de diferentes formas. Los modelos paramétricos tienen como objetivo encontrar un modelo directo para la distribución DNR sin referirse a alguna forma dinámica específica de la DNR. Los modelos no paramétricos intentan definir un modelo preciso de la distribución DNR directamente sin asumir una forma específica para la DNR. Cont (1997), Bahra (1997), Jackwerth (1999), Perignon y Villa (2002) y Santos y Guerra (2011) son buenas referencias para obtener una descripción más general de los detalles de las diferentes metodologías. Muchos estudios han intentado comparar el rendimiento de los diferentes métodos entre sí. Más información con respecto a las comparaciones está disponible en Campa et al. (1998), Coutant et al. (2000), MacManus(1999) y Sherrick y et al. (1996). Cooper (1999) y Jondeau y Rockinger (2000) han comparado muchos métodos pero no hay conclusiones reales. La literatura sobre la

extracción de las DNR no está resuelta, por lo que no existe un consenso real sobre de las técnicas de mejor estimación de las DNR. Jackwerth (2004) es una buena introducción para obtener una descripción general genérica de estudios anteriores relacionados con la definición de DNR. El resumen de Jackwerth es una buena referencia para comprender los conceptos básicos y las metodologías para la búsqueda de DNR. Jondeau et al. (2007) es una buena referencia para comprender más sobre los diferentes algoritmos relacionados con la definición de las DNR.

2.3.2 - Métodos paramétricos para estimar las DNR

En el caso paramétrico, los parámetros de las distribuciones de la DNR son seleccionados por diferentes metodologías para minimizar el error de precios entre los precios observados y los precios de opción estimados. Los métodos paramétricos tienen potenciales inconvenientes si la distribución paramétrica no es adaptable para hacer coincidir las observaciones. Los métodos paramétricos tienen beneficios potenciales al producir distribuciones estables si la distribución paramétrica coincide con las observaciones. Dentro de los métodos paramétricos, es posible identificar tres categorías diferentes de métodos: métodos de expansión, métodos de distribución generalizados y métodos mixtos o de mezcla (Jackwerth, 2004).

Este enfoque para estimar la función de densidad neutral al riesgo directamente comienza con el supuesto de que la DNR de S_T[7] pertenece a una familia paramétrica. Uno de los enfoques más clásicos en esta área es el de la aproximación lognormal simple, que se basa en el modelo de Black-Scholes. Sin embargo, este método ha sido criticado por Gemmill y Saflekos (2000), donde los enfoques paramétricos a través del método lognormal doble y lognormal simple son propuestos para examinar la *performance* de una doble lognormal para obtener el precio de las opciones y su relación en torno a los eventos polémicos durante las elecciones generales británicas. Su estudio encuentra que el método doble lognormal es mucho mejor que el método lognormal simple por el ajuste de sus precios estimados ante los precios de opciones observados. Carsten (2004) conceptualiza a los métodos paramétricos de expansión, de distribución generalizados, y los métodos mixtos de la siguiente manera:

- **Métodos de expansión:** Los métodos de expansión comienzan con una simple distribución conocida de probabilidad (a menudo normal o log normal) y luego agregan una corrección a los términos de ella. Los métodos de expansión están relacionados conceptualmente con la serie de expansiones de Taylor para funciones simples. Estos términos de corrección a menudo no son garantizados para preservar la integridad de la distribución de probabilidad, por lo que el analista debe comprobar siempre que la distribución resultante sea estrictamente positiva y se integre a 1.
- **Métodos de distribución generalizados:** En los métodos de distribución generalizados se utilizan funciones de distribución con más de los dos parámetros típicos para la media y volatilidad, a menudo se añaden parámetros de *skewness* y *kurtosis*. La asimetría permite que la cola (izquierda) de la distribución sea más

[7] El nivel de precios de la opción en la fecha de vencimiento - Precio del stock price (subyacente)

gruesa que la cola derecha para modelar la mayor probabilidad de *melt-downs* que de *melt-ups*. La curtosis permite que la distribución sea más puntiaguda en el centro y tener colas más gruesas a expensas de probabilidades reducidas en las colas cercanas. Las distribuciones generalizadas describen familias enteras de distribuciones flexibles, que simplifican las distribuciones estándar por constelaciones de parámetros especiales.

- **Métodos mixtos:** En los métodos mixtos, se construyen distribuciones de probabilidad como promedios ponderados agregando varias distribuciones de probabilidades simples con diferentes probabilidades mixtas. La flexibilidad adicional viene a costa de aumentar rápidamente el número de parámetros. Una mezcla de tres distribuciones lognormales ya produce ocho parámetros, dos cada uno para las tres distribuciones log normales y las dos probabilidades de mezcla. De la tercera mezcla de probabilidad resulta la restricción de que las tres probabilidades mixtas deben sumar 1.

2.3.3 - Métodos no paramétricos para estimar las DNR

En el caso no paramétrico, en lugar de seleccionar parámetros paramétricos de las DNR, el objetivo es definir la función de densidad de probabilidad óptima neutral al riesgo ya sea por acumulación a partir de segmentos lineales o incluso de segmentos no lineales. El número de parámetros son mucho más altos que en el caso paramétrico. El procesamiento directo de ajuste de la distribución neutral al riesgo no se realiza a menudo debido a problemas potenciales para restringir la distribución de probabilidad para cumplir con los requisitos de una función de densidad de probabilidad. La distribución resultante debe cumplir con los requisitos de la densidad de probabilidad genérica para que la misma sea integrable. La función de densidad de probabilidad debe integrarse correctamente. Dentro de los métodos no paramétricos, es posible identificar tres diferentes categorías de métodos: métodos de máxima entropía, métodos de kernel y métodos de ajuste de curvas (Jackwerth, 2004).

La mejora de las técnicas de adaptación inmediata de la distribución neutral al riesgo se basa en ajustar la función de los precios de las opciones a los precios de ejercicio y proceder tomando dos derivadas de la función de precio de opción con respecto a los precios de ejercicio para obtener la DNR.

El problema crítico con este enfoque es la estabilidad porque el proceso de derivación directa puede tener problemas numéricos. Además, debe asegurarse que la función ajustada no viole los límites de arbitraje, que es un requisito que a menudo conduce a dificultades numéricas.

Quizás una mejor metodología, está basada en ajustar la función de volatilidades implícitas a través de los precios de ejercicio. Esta metodología reside en un proceso de ajuste en el cálculo de los precios de las opciones a partir de la modificación de las volatilidades implícitas tomando dos derivadas para obtener una DNR.

Los métodos anteriores producen DNR libres de arbitraje siempre que las sonrisas de volatilidad ajustadas no tengan interrupciones. La mayoría de los métodos no paramétricos utilizan el procedimiento llamado ajuste de curvas.

De nuevo, Carnsten (2004) conceptualiza a los métodos no paramétricos de máxima entropía, de kernel y métodos de ajuste de curvas de la siguiente manera:

- **Métodos de máxima entropía:** Los métodos de máxima entropía son DNR que se ajustan a los datos de opciones y que presumen que la mínima información disponible es relativa a una distribución de probabilidad previa. La estimación de la DNR a partir de un número limitado de observaciones posibilita numerosas expresiones de la misma, compatibles con los precios de las opciones negociadas. El objetivo del método en cuestión es identificar la densidad que satisface la condición de máxima entropía, siendo la entropía una medida del contenido informativo de aquella.
- **Métodos de kernel:** Los métodos de kernel son utilizados para ajustar la función de precio de *call* y en ocasiones la función de volatilidad implícita, están relacionadas con regresiones no lineales. No especifican la forma lineal de una regresión estándar. En cambio, son localizados, parten del concepto de que cada punto de datos sugiere el centro de una región por la que debe pasar la función. La función asume la función pasará por el centro de los datos y un *kernel* mide la probabilidad de que la función pase por los puntos a una distancia dada.
- **Métodos de ajuste de curvas:** Se utiliza principalmente para adaptar a la función de volatilidad implícita, los métodos de ajuste de curvas intentan ajustar la sonrisa de volatilidad implícita con algunos parámetros flexibles. Los criterios más típicos para el ajuste son las sumas de las diferencias al cuadrado entre las volatilidades modeladas y observadas, las diferencias al cuadrado entre precios de opciones modelados y observados, o los cuadrados de 1 menos el ratio de precios de las opciones.

2.3.4 - Aplicaciones de las Distribuciones Neutrales al Riesgo

En cuanto a las aplicaciones al obtener las DNR, las expectativas sobre el potencial de estas técnicas para mejorar las decisiones de administración de riesgos constituyen una fuente de motivación constante para el desarrollo de esta área de investigación debido a que se permite estimar las preferencias de riesgo de los agentes y evaluar la racionalidad de los precios de mercado

Dentro de las investigaciones de los métodos paramétricos, Melick y Thomas (1997) obtuvieron la densidad de riesgo neutral de los precios de las opciones estadounidenses del petróleo crudo durante la crisis del Golfo Pérsico para estudiar las percepciones del mercado. Ellos encontraron que las creencias del mercado de opciones reflejan que la alteración en los precios del petróleo sería muy significativa, también encontraron que obtener las distribuciones implícitas con una mezcla de tres lognormales es mejor que usando el método lognormal simple de Black-Scholes.

Bahra (1997) y Cheng (2010) también comparan las metodologías paramétricas usando una lognormal simple o una mezcla de lognormales en diferentes aplicaciones. Los métodos dentro de la categoría paramétrica son diversos, Bates (1991) estudia el enfoque de difusión de salto y encuentra que una fuerte percepción de riesgo a la baja en el mercado y el colapso fue predicho por las opciones de futuros del S & P 500 durante 1985-1987.

En cuanto a los no paramétricos, tenemos a Coutant, Jondeau y Rockinger (1999) que investigan con métodos de la expansión de Hermite y máxima entropía. Ellos muestran que ambos métodos se ajustan mejor a los precios de las opciones que mediante la distribución lognormal.

Rubinstein (1994) estudia la densidad neutral al riesgo con un modelo de árboles binomiales implícitos; Ait-Sahalia y Lo (1998) examinan distribuciones neutrales con métodos de estimación de kernel; Avellaneda (1998) lo estudia con enfoques de máxima entropía.

Shimko (1993) propone un enfoque no paramétrico, con un método que se basa en el suavizado de la sonrisa de volatilidad implícita con supuestos paramétricos de las distribuciones lognormales en las colas de la densidad. Este modelo hace posible analizar los movimientos de probabilidad y compararlos entre mercados. Desde entonces, se han utilizado varios métodos de suavizado en este enfoque. Campa,Chang y Reider (1998) estudian los métodos de suavizado de splines cúbicos en la aplicación a opciones de tipos de cambio cruzados del marco-dólar y del yen-dólar. Ellos encuentran que, con base en los momentos de la densidad neutral al riesgo, cuanto más fuerte sea la moneda, más expectativas están sesgadas hacia una mayor apreciación de la moneda. Cooper (1999) también estudia los métodos de suavizado de splines cúbicos. Concluye que el desempeño de precios del método basado en suavizar la volatilidad implícita interpreta mejor el mercado que el de la mezcla de lognormales.

En el Apéndice D se pueden observar las distintas aplicaciones que se dieron a lo largo de los años en la academia y en la industria con las DNR.

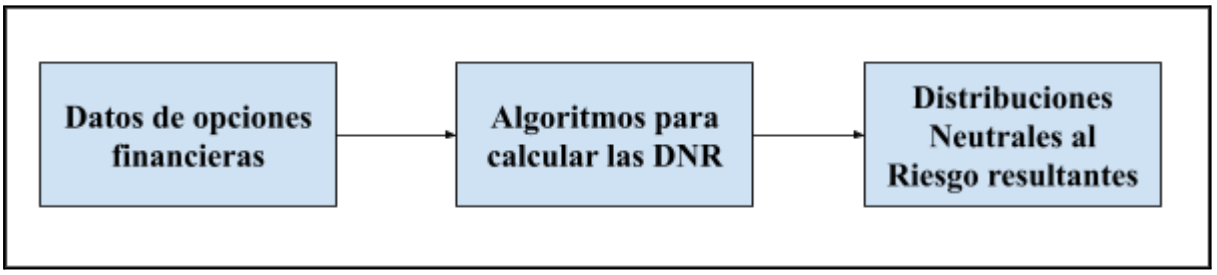
2.4 - Revisión de las metodologías para la estimación de las DNR

2.4.1 - Métodos de referencia para estimar las DNR

Los métodos de referencia fueron seleccionados para cumplir con los requisitos de que no existan problemas críticos de estabilidad y para que la precisión del modelado tenga resultados aceptables. La estabilidad y precisión es un criterio de selección crítico para muchos métodos de estimación de las DNR.

El proceso genérico para calcular las DNR se basa en datos de opciones que deben ser procesados utilizando diferentes algoritmos para sacar las DNR. El proceso para la definición de las DNR se presenta en la Figura 5.

Figura 5. Proceso para la obtención de las DNR a partir de los datos de opciones.



Fuente: Elaboración propia

El objetivo genérico para definir la DNR óptima se basa en el uso de diferentes tipos de algoritmos para encontrar los parámetros para diferentes metodologías buscando obtener el mínimo error entre los precios de opción observados y los precios de opción estimados de una DNR.

La beta generalizada (GB) y la mezcla de lognormales (LN) se seleccionaron entre los métodos paramétricos. Los métodos paramétricos no deberían tener muchos problemas numéricos. El método de Shimko se seleccionó entre los métodos no paramétricos dentro de la categoría de métodos de ajuste de curvas. El método de Shimko puede tener problemas de estabilidad en su estimación, pero dicho método de Shimko posee características aceptables en el equilibrio entre estabilidad y precisión de estimación. Solo se presentan ecuaciones claves para comprender a los algoritmos de los métodos de referencia. Jondeau et al. (2007) es una buena referencia para comprender más detalles numéricos sobre diferentes algoritmos relacionados con la estimación de las DNR. Clews et al. (2002) presentan una descripción general genérica de las metodologías más comunes para la definición de las DNR.

2.4.2 - Beta generalizada

Bookstaber y McDonald (1987) propusieron la distribución beta generalizada para modelar la rentabilidad de los activos. Liu et al. (2007) utilizan la beta generalizada de segundo tipo (GB2) para definir las DNR a partir de los precios de las opciones. Las DNR pueden definirse mediante una modificación relativamente simple de los parámetros de la distribución. El GB2 es un método interesante con solo unos pocos parámetros positivos, pero la distribución GB2 es de todos modos capaz de modelar los diferentes tipos de distribuciones.

La función de distribución para GB2:

$$g_{BG2}(x;a,b,p,q) = \frac{ax^{ap-1}}{b^{ap}B(p,q)\left(1+(\frac{x}{b})^{a}\right)^{p+q}} \quad (33)$$

La función de distribución GB2 es neutral al riesgo si y sólo si la ecuación:

$$F = \frac{bB(p+\frac{1}{a},q-\frac{1}{a})}{B(p,q)} \quad (34)$$

Los momentos de GB2 se pueden definir mediante la ecuación:

$$E_{GB2}(S_T^n) = \frac{b^h B(p+\frac{n}{a}, q-\frac{n}{a})}{B(p,q)} \quad (35)$$

La distribución beta generalizada es un tipo de distribución multimodal, que utiliza este tipo de distribución conveniente para el modelado de las DNR. La distribución beta generalizada tiene una función de densidad que hace que la distribución GB2 sea adecuada para muchas aplicaciones porque la función de densidad podría definirse explícitamente. La GB2 es una función de cuatro parámetros: a, b, p y q. Estos parámetros funcionan de forma interactiva definiendo la forma de la distribución. El parámetro de potencia (a) determina el comportamiento de las colas de la función de densidad. El parámetro de escala (b) determina el valor de la curtosis. Los parámetros (p) y (q) definen juntos la asimetría de la distribución. La distribución GB2, a diferencia de la distribución lognormal, tiene la flexibilidad necesaria para modelar la asimetría positiva o negativa. (Bookstaber y McDonald 1987).

El GB2 incluye la gamma generalizada (GG) como caso límite:

$$GG(x; a, \beta, b) = \lim_{q\to\infty} GB2(x; a, \beta q^{\frac{1}{a}}, p, q) \quad (36)$$

Los límites adicionales aplicados al GG llevan a la densidad logarítmica normal como un caso límite:

$$LN(x; \mu, \sigma)$$
$$= \lim_{q\to 0} GG(x; a, \beta = (\sigma^2 a^2)^{\frac{1}{a}}, p = (a\mu + 1)/\beta^a) \quad (37)$$

GB2 contiene muchas distribuciones diferentes para que una amplia gama de diferentes tipos de las distribuciones se pueden expresar como casos especiales y limitantes del GB2.

Liu et al. (2007) definieron la ecuación de forma cerrada para el precio de la opción de compra para estimar la DNR. La fórmula de precios teórica para la opción de compra europea:

$$C(X|\, r, T) = e^{-rt} \int_X^\infty (x - \mathrm{X}) g_{GB2}(\mathrm{x}|a, b, \mathrm{p}, \mathrm{q})\, \mathrm{dx}$$
$$= F e^{-rt} \left[1 - G_\beta \left(z(X, a, b)|p + \frac{1}{a}, q - \frac{1}{a}\right)\right]$$
$$-X e^{-rt}\left[1 - G_\beta(z(X, a, b)|\, p, q)\right] \quad (38)$$

Liu y col. estaban usando la paridad put-call para tener en cuenta las opciones de venta para definir la distribución de la DNR. La ecuación de paridad put-call podría usarse para el cálculo:

$$C + Ke^{-rt} = P + S_0 \tag{39}$$

Por supuesto, se podría definir el mismo tipo de ecuación para el precio de la opción de venta, pero la paridad *put-call*[8] se utilizó en la definición de distribución DNR. La distribución DNR basada en la metodología GB2 se puede calcular utilizando las ecuaciones (48) - (50) y (53) - (54).

2.4.3 - Mezcla de lognormales

En lugar de especificar la dinámica del precio de los activos subyacentes para llegar a la conclusión de la función DNR, es posible hacer suposiciones sobre la forma funcional de la función DNR para encontrar los parámetros de la estimación de la DNR. La descripción de la distribución de densidad de probabilidad como la combinación de la otra densidades de distribución ha sido una forma común de mejorar el ajuste en muchos problemas estadísticos. Bahra (1996), Melick y Thomas (1997) y Söderling y Svensson (1997) han usado lognormals para describir la distribución de la DNR. Chen (2010) ha estudiado el uso de técnica multilognormal para obtener una mejor precisión para el modelado de la DNR. Sólo dos distribuciones de densidad lognormales se seleccionaron en el estudio para su análisis, incluso si desde un punto de vista teórico utilizando más de dos lognormales daría una mejor precisión para modelar DNR.

El enfoque de mezcla de lognormales se basa en el supuesto de que la distribución del activo subyacente es una suma ponderada de muchas distribuciones lognormales independientes.La distribución doble lognormal se describe mediante cinco parámetros: dos parámetros para cada distribución logarítmica normal (α i , i) y un parámetro de ponderación (i) para el peso relativo para cada distribución. Los parámetros se seleccionan para satisfacer lo mejor posible las restricciones de las opciones de compra y venta observadas y la tasa a plazo observada. Normalmente, la función de pérdida, que es la suma de las desviaciones al cuadrado de las restricciones, debe definirse para encontrar la solución correcta para los parámetros. Un beneficio adicional de la mezcla de lognormals es el comportamiento suave de la cola de modo que las colas declinan de manera monótona y siempre decaen relativamente rápido para prevenir una curtosis irrazonable. Por otro lado, este tipo de enfoque puede determinar una estructura demasiado inflexible en la estimación de las DNR.

Los precios de las opciones call y put europeas en el momento t se pueden escribir como sumas de todos los pagos futuros esperados:

$$c(X,t) = e^{-rt} \int_X^{\infty} q(S_T)\,(S_T - X)\,dS_T \tag{40}$$

[8] https://www.investopedia.com/terms/p/putcallparity.asp

$$p(X,t) = e^{-rt} \int_0^X q(S_T)\,(X - S_T)dS_T \tag{41}$$

En teoría, cualquier forma funcional para la función de densidad q(ST) puede usarse en ecuaciones(40) y (41) para encontrar los parámetros recuperados por optimización numérica. El problema con otros modelos distintos al modelo gaussiano es que la distribución del precio subyacente podría estar cambiando a medida que cambia el tiempo de espera. En el caso Gaussiano cualquier distribución de precios de tiempo de tenencia de longitud arbitraria debe ser lognormal si los precios diarios se distribuyen lognormalmente. Ninguna otra distribución de varianza finita es estable de la misma manera bajo adición de lognormales (Bahra 1997).

El marco sugerido por Ritchey (1990) asume que q (S T) es la suma ponderada de funciones de densidad logarítmica normal de componente k:

$$q(S_T) = \sum_{i=1}^{k} [\theta_i L(\alpha_i, \beta_i; S_T)] \tag{42}$$

donde L α i , i ; S es la i- ésima función de densidad logarítmica normal en la mezcla de k componentes con parámetros:

$$\alpha_i = \ln S + \left(\mu_i - \frac{\sigma_i^2}{2}\right)\tau \tag{43}$$

$$\beta_i = \sigma_i \sqrt{\tau} \tag{44}$$

para cada i Los valores de las opciones de compra y venta, dados por las ecuaciones (39) y (40), pueden ser calculados por las ecuaciones:

$$c(X,\tau) = e^{-r\tau} \int_x^{\infty} [\theta_i L(\alpha_1, \beta_1; S_T) + (1-\theta) L(\alpha_2, \beta_2; S_T)](S_T - X)\, dS_T \tag{45}$$

$$p(X,\tau) = e^{-r\tau} \int_0^{x} [\theta_i L(\alpha_1, \beta_1; S_T) + (1-\theta) L(\alpha_2, \beta_2; S_T)](X - S_T)\, dS_T \tag{46}$$

En ausencia de oportunidades de arbitraje, la media de la DNR debe ser igual al precio futuro del activo subyacente. El objetivo de la optimización es encontrar numéricamente mínimo de la ecuación:

$$\sum_{i=1}^{n} [c(X_i,\tau) - c_i]^2 + \sum_{i=1}^{n} [p(X_i,\tau) - p_i]^2 + \left[\theta e^{\alpha_1 + 1/2\beta_1^2} + (1-\theta)\, e^{\alpha_2 + 1/2\beta_2^2} - e^{r\tau} S\right]^2 \tag{47}$$

sujeto a β 1 y β 2 > 0 y 0 <θ <1 sobre el rango de impacto observado X1 , X2 ,… Xn.

La evaluación numérica de la ecuación (40) y (41) puede tener problemas numéricos debido al límite superior del infinito. Los valores de las opciones de compra y venta, dados por las ecuaciones (40) y(41), se puede calcular utilizando las soluciones en forma cerrada de las ecuaciones (45) y (46):

$$c(X,\tau) = e^{-r\tau}\theta\left[e^{\propto_1+\frac{1}{2\beta_1^2}}N(d_1) - XN(d_2)\right]$$

$$+(1-\theta)\left[e^{\propto_2+\frac{1}{2\beta_2^2}}N(d_3) - XN(d_4)\right] \quad (48)$$

$$p(X,\tau) = e^{-r\tau}\theta\left[-e^{\propto_1+\frac{1}{2\beta_1^2}}N(-d_1) + XN(-d_2)\right]$$

$$+(1-\theta)\left[-e^{\propto_2+\frac{1}{2\beta_2^2}}N(-d_3) + XN(-d_4)\right] \quad (49)$$

donde:

$$d_1 = \frac{-lnX+\propto_1+\beta_1^2}{\beta_1} \quad (50)$$

$$d_2 = d_1 - \beta_1 \quad (51)$$

$$d_3 = \frac{-lnX+\propto_2+\beta_2^2}{\beta_2} \quad (52)$$

$$d_4 = d_3 - \beta_2 \quad (53)$$

Este modelo de dos logaritmos normal es la suma ponderada de dos soluciones de Black-Scholes, dondeθ es el parámetro de peso y α 1 , β 1, α 2 y β 2 son los parámetros de cada uno de los componentes lognormales de las funciones DNR. La estimación DNR basada en la metodología lognormal doble se puede estimar en forma cerrada mediante el uso de ecuaciones.(48) - (53). Los resultados de la metodología lognormal doble se calcularon utilizando opciones de compra y venta.

2.4.4 - Volatilidad implícita

En los métodos de volatilidad implícita, las DNR se estiman diferenciando el doble de precios de opciones modificadas antes de descontar por tasa de interés sin riesgo. La técnica de Shimko es un caso especial entre todas las metodologías de volatilidad implícita.

Shimko (1993) introdujo la técnica de ajustar la volatilidad implícita con una función cuadrática para obtener precios continuos de las opciones de compra en función precio de ejercicio. Malz (1997) modificó la técnica de Shimko interpolando las volatilidades en el espacio delta de opciones en lugar de en los precios de ejercicio. La modificación de Malz mediante el uso de volatilidad implícita sobre delta tiene una ventaja numérica, pero el proceso de traducción desde el espacio delta hasta los precios de ejercicio es numéricamente exigente. Campa et al. (1998) utilizaron una modificación del enfoque de Shimko que proporciona una mejor formabilidad en forma de la sonrisa de volatilidad y, por tanto, la función de densidad de probabilidad. El método se basa en reemplazar la cuadrática con splines cúbicos: funciones polinomiales de orden tres o inferior. Los polinomios entre dos puntos cualesquiera se seleccionan para que los polinomios se encuentren en un solo punto de datos- las primeras derivadas si las dos funciones son iguales y diferenciables. El enfoque spline cúbico es atractivo por su generalidad como polinomio de tercer orden utilizado para adaptarse a la sonrisa de volatilidad ya que permite cambiar de forma en cada intervalo. Bliss y Panigirtzoglou usaron la teoría de Malz (1997) interpolando en la volatilidad implícita sobre el espacio delta y Campa et al. (1998) mediante el uso de splines de suavizado para ajustar la función.

La metodología es un punto de vista teórico adaptativo para proporcionar resultados fiables, pero la implementación es relativamente exigente. Se estudiaron muchas otras versiones de ajuste de curvas para comprender diferentes tipos de procesamiento de volatilidad implícita, pero se seleccionó el método de Shimko como método de referencia de ajuste de curvas. El método de Shimko como método de ajuste de curvas puede tener algunos problemas de estabilidad, pero el método de Shimko tiene un equilibrio aceptable entre estabilidad y precisión.

El enfoque de Shimko (1993) se basa en obtener información contenida en la sonrisa de la volatilidad a través de un polinomio σ (K). El polinomio σ (K) es función del precio de ejercicio K. La DNR se basa en la evaluación de σ (K).

Precio de la opción de compra:

$$C(S_t, K, \tau, r, \sigma) = C(S_t, K, \tau, r, \sigma(K)) \tag{54}$$

donde:

$$\sigma_i = \alpha_0 + \alpha_1 K_i + \alpha_2 K_i^2 \tag{55}$$

para N = 1… N. N representa el número de precios observados. Los parámetros de este polinomio se pueden estimar mediante una regresión de mínimos cuadrados no lineal.

El precio de la opción de compra i dependiendo del precio de ejercicio K i , i = 1… N:

$$C^{SH}(t,S,K,T) = S\emptyset\left(d_1\left(\sigma(K)\right)\right) - e^{-rt}K\emptyset\left(d_2\left(\sigma(K)\right)\right) \tag{56}$$

DNR se puede calcular usando la ecuación:

$$q^{SH}(K) = e^{-rt}\frac{\partial^2 C(t,S,\sigma(K),T)}{\partial^2 K^2} =$$
$$e^{rt}S(d_1''(\emptyset(d_1(K)) - (d_1')^2 d_1\emptyset(d_1(K))) - d_2'\emptyset(d_2(K)) -$$
$$K(d_2''(\emptyset\left(d_2(K)\right) - (d_2')^2 d_2\emptyset\left(d_2(K)\right)) \tag{57}$$

Para el caso cuadrático, las ecuaciones necesarias son:

$$d_1(K) = \frac{1}{\sigma(K)\sqrt{\tau}}\log\left(\frac{S}{Ke^{rt}}\right) + \frac{1}{2}\sigma(K)\sqrt{\tau} \tag{58}$$

$$d_2(K) = d_1(K) - \sigma(K)\sqrt{\tau} \tag{59}$$

La primera y segunda derivadas de d1 y d2 están dadas por:

$$d_1'(K) =$$
$$-\frac{\sigma'(K)\sqrt{\tau}}{\sigma^2(K)\sqrt{\tau}}\,log\left(\frac{S}{Ke^{rt}}\right) - \frac{1}{K\sigma(K)\sqrt{\tau}} + \frac{1}{2}\sigma'(K)\sqrt{\tau} \tag{60}$$

$$d_2'(K) = d_1'(K) - \sigma'(K)\sqrt{\tau} \tag{61}$$

$$d_1''(K) =$$
$$-\frac{\sigma''(K)\sigma'(K)\sqrt{\tau} - 2\sigma'(K)^2\tau}{\left(\sigma(K)\sqrt{\tau}\right)^3}\log\left(\frac{S}{Ke^{rt}}\right) + \frac{1}{K}\frac{\sigma'(K)\sqrt{\tau}}{\sigma^2(K)\tau}$$
$$+\frac{\sigma(K)\sqrt{\tau} + K\sigma'(K)\sqrt{\tau}}{K^2\sigma^2(K)\tau} + \frac{1}{2}\sigma''(K)\sqrt{\tau} \tag{62}$$

$$d_2''(K) = d_1''(K) - \sigma''(K)\sqrt{\tau} \tag{63}$$

$$\sigma(K) = (a_0 + a_1K + a_2K^2) \tag{64}$$

$$\sigma'(K) = (a_1 + 2a_2K) \tag{65}$$

$$\sigma''(K) = 2a_2 \quad (66)$$

La estimación de DNR basada en la metodología de Shimko se puede calcular utilizando las ecuaciones (57) - (66). Los resultados de Shimko se calcularon utilizando sólo call options. El caso de la opción de venta se puede definir mediante la misma metodología. El método de Shimko consiste en técnicas de ajuste de curvas relativamente sencillas. El método de Shimko se ha utilizado a menudo como técnica de referencia.

El problema genérico de las técnicas curvas es la adaptación es que hay muchas versiones disponibles, pero ninguna técnica es aceptada generalmente para el procesamiento de volatilidad implícita. Incluso hay muchas versiones de diferentes métodos de ajuste de curvas, que utilizan diferentes tipos de procesamiento de la sonrisa de volatilidad. Para este trabajo se seleccionó el método de Shimko como metodología de ajuste de curva clásico.

3 - Materiales y métodos

3.1 - Datos

3.1.1 - Estructura de los datos originales y su uso

Este trabajo fue realizado con datos privados adquiridos de la empresa IVolatility.com[9]. Esta empresa es proveedora de datos de opciones y herramientas analíticas para *traders*, analistas y medios financieros a nivel internacional.

Esta base de datos posee información histórica detallada de la cadena de opciones (**ver Apéndice B, Cadena de Opciones / Options Chain**) negociadas de la empresa AstraZeneca en el *London Stock Exchange*[10].

Puntualmente, cada fila de la base de datos representa un *contrato de opción put o call* (**ver Apéndice B, Contrato de Opción**) de una fecha determinada y con los detalles registrados por la empresa proveedora de datos.

Nuestro conjunto de datos de entrada incluye datos diarios de opciones de compra (*call*) y venta (*put*) de AZN (AstraZeneca) al final del día o EOD (End Of The Day), entre el 02 de enero de 2020 y el 13 de mayo de 2021, con distintas fechas de expiración.

El archivo (NBBO.csv) que contiene los datos utilizados en este trabajo se encuentra en la carpeta del código fuente detallada en la sección (**3.2.2.1 - Software y código fuente del proyecto**).

Para el análisis de este trabajo, los datos originales fueron filtrados, al realizar un análisis diario de las opciones desde el 31 de diciembre del 2020 en adelante para obtener información de las transacciones realizadas durante los eventos de la vacuna. Los paquetes utilizados para el filtrado y estimación de las DNR se encuentran en la sección (**3.2.2.2 - Paquetes del software**).

En la Tabla 2 se detallan las variables que incluye la base de datos originales obtenidas por Volatility.

[9] https://www.ivolatility.com/data/european-historical-option-data2.html
[10] https://www.londonstockexchange.com/

Tabla 2: Variables / Datos de IVolatility.com

Variable	Características	Tipo
date	fecha de negociación los datos	Cadena de caracteres
symbol	símbolo del subyacente	Cadena de caracteres
exchange	código de intercambio del subyacente	Cadena de caracteres
company_name	nombre de empresa	Cadena de caracteres
stock_price_close	último precio subyacente	Numérico
option_symbol	símbolo de la opción	Cadena de caracteres
option_expiration	fecha de vencimiento de la opción	Cadena de caracteres
strike	precio de ejercicio de la opción	Numérico
call_put	'C' para opciones *call*, 'P' para opciones *put*	Cadena de caracteres
style	estilo de opción (A = Americana, E = Europea). En este caso el tipo de opción es europea.	Cadena de caracteres
open	precio de apertura de la opción (0 si no hubo operaciones)	Numérico
high	precio alto de la opción (0 si no hubo operaciones)	Numérico
low	precio bajo de la opción (0 si no hubo intercambios)	Numérico
close	precio de cierre de la opción (0 si no hubo operaciones)	Numérico
bid	precio *bid* de la opción (**ver Apéndice B, bid**)	Numérico
ask	precio *ask* de la opción (**ver Apéndice B, ask**)	Numérico
mean_price	((*bid* + *ask*) / 2 si *bid*> 0, de lo contrario 0) o *settlement*	Numérico
settlement	precio de liquidación de la opción	Numérico
volume	volumen de contrato de la opción	Numérico
open_interest	interés abierto del contrato de opción	Numérico

3.1.2 - Criterio para la elección de este tipo de opciones

Cabe destacar que el tipo de opciones a utilizar para este trabajo, es del tipo de opción europea (**ver Apéndice B, Opción Europea**). Cuyo tratamiento al momento de aplicar los métodos paramétricos o no paramétricos para obtener la Distribución Neutral al Riesgo es muy distinto en comparación al de las opciones del estilo americano, debido a que éstas pueden ejercerse en cualquier momento antes de la fecha de vencimiento (**ver Apéndice B, Opción Americana**) y las de estilo europeo no.

Las vacunas desarrolladas para la COVID-19 fueron varias[11], fabricadas principalmente en Estados Unidos, Europa, Asia, Rusia, India y China. (**ver Apéndice C, Línea de tiempo de las principales vacunas).**

Cada país o región económica decidió utilizar sus recursos disponibles u obtener financiamiento por parte del mercado financiero para invertir en la investigación y desarrollo de las vacunas.

Cada empresa que cotiza en bolsa busca financiamiento, cuando se emiten sus acciones, recibe un precio o una asignación que refleja idealmente el valor de la propia empresa. El precio de una acción subirá y bajará en relación con una serie de factores internos y externos a la empresa, incluidos los cambios dentro de la economía en su conjunto, los cambios dentro de las industrias, los eventos políticos, las guerras, los cambios ambientales o eventos de cisne negro o *black swan*[12] (Fama et al, 1969).

Teniendo en cuenta esto, la vacuna es uno de los proyectos más importantes entre todos los productos que fabrica la empresa AstraZeneca, el *stock price* como activo subyacente de la opción nos proporciona información sobre la situación de la empresa en tiempo real, y esto lo utilizamos para observar el impacto de las noticias o eventos relacionados a la vacuna a lo largo de periodos de tiempo acotados.

3.2 - Software, código fuente del proyecto y paquete estadístico

3.2.1 - Software y código fuente del proyecto

Este trabajo fue realizado bajo el lenguaje de programación R y en Python para satisfacer las necesidades de la investigación, los datos y el código pueden encontrarse en el siguiente repositorio: Estimacion DNR_EventosAstraZeneca_MiM+A2021

3.2.2 - Paquetes del software

Fueron necesarios los siguientes paquetes de R para realizar el análisis de los datos de las opciones financieras de AstraZeneca:

- (RND):https://cran.r-project.org/web/packages/RND/RND.pdf
- (dplyr):https://cran.r-project.org/web/packages/dplyr/dplyr.pdf
- (readr):https://cran.r-project.org/web/packages/readr/readr.pdf
- (lubridate):https://cran.r-project.org/web/packages/lubridate/lubridate.pdf
- (moments):https://cran.r-project.org/web/packages/moments/moments.pdf

[11] https://www.raps.org/news-and-articles/news-articles/2020/3/covid-19-vaccine-tracker
[12] https://es.wikipedia.org/wiki/Teor%C3%ADa_del_cisne_negro

- (gridExtra):https://cran.r-project.org/web/packages/gridExtra/gridExtra.pdf
- Los paquetes de Python utilizados fueron pandas, numpy, seaborn, datetime y matplotlib para la visualización de los resultados.

El paquete RND, contiene funciones que calculan distintas DNR. Dentro del mismo, la función MOE extrae la densidad neutral al riesgo basada en todos los modelos y resume los resultados. Dicha función es utilizada para este trabajo al momento de recorrer los días de cada cadena de opciones y extraer las DNR para cada fecha de expiración.

El paquete dyplr, lubridate, gridExtra y readr fueron necesarios para el levantamiento, procesado y filtrado de los datos.

El paquete moments fue necesario para calcular la skewness y kurtosis de cada Densidad Neutral al Riesgo obtenida por la función MOE.

4 - Resultados

4.1 - Momentos de la distribución neutral al riesgo del activo subyacente

En esta sección, se analizan los resultados obtenidos a lo largo de fechas con eventos relevantes para el desarrollo de la vacuna de AstraZeneca (**Ver Apéndice A**). En cada figura están representadas 5 estimaciones distintas de la densidad neutral al riesgo en base a las metodologías presentadas en la sección anterior. De estas estimaciones, se calculan la curtosis, asimetría y desviación estándar que tienen las DNR de manera conjunta (todas las fechas de expiración) y de manera separada, cada fecha de expiración aislada con las opciones diarias negociadas para esa fecha de expiración.

Al momento de observar una distribución neutral al riesgo podemos analizar dos momentos vinculados con las probabilidades en las colas de la distribución como la asimetría[13] y la curtosis[14]. A medida que van ocurriendo eventos a lo largo de los días hasta la fecha de expiración, las distribuciones van tomando una forma más puntiaguda (mayor concentración de datos hacia la media).

Las cadenas de opciones de mayor interés para observar los momentos neutrales de los participantes en el mercado de opciones durante los eventos de la vacuna (**Ver Apéndice A**) son las siguientes: vencimiento 15/01/2021, vencimiento 19/02/2021, vencimiento 19/03/2021 y vencimiento 16/04/2021.

---

[13] Si la misma está sesgada hacia la izquierda, los datos tienen una mayor concentración hacia ese lado de la distribución.

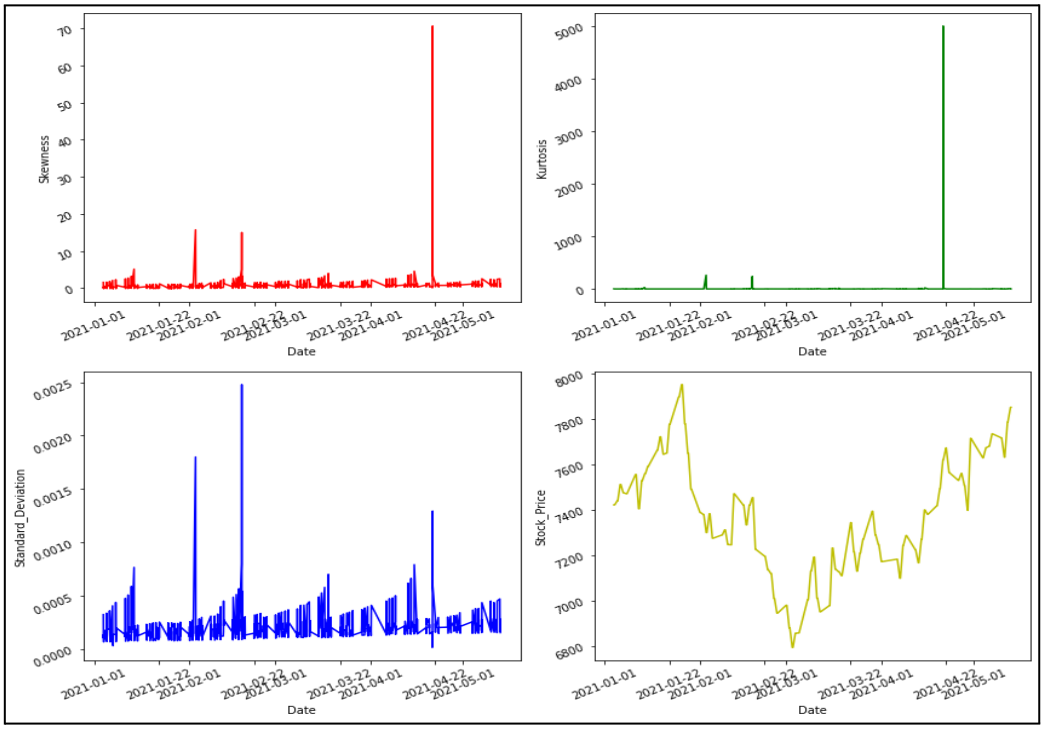
1. Si la misma está sesgada hacia la derecha, los datos tienen una mayor concentración hacia ese lado de la distribución.
2. Si la misma tiene un comportamiento muy inestable, cómo es el caso de Shimko, la misma no presenta ninguna uniformidad en la distribución de los datos

[14] Curtosis:

1. Si los datos están muy concentrados hacia la media, es una distribución leptocúrtica (curtosis mayor a 0).
2. Si los datos están muy dispersos es una distribución platicúrtica (curtosis menor a 0).
3. Si tiene el comportamiento de una distribución normal, es una distribución mesocúrtica (curtosis igual a 0).

Una visión general del comportamiento de los momentos neutrales con las todas DNR diarias se puede observar en la figura 6:

Figura 6. Variación diaria completa de los momentos neutrales al riesgo y el subyacente



A continuación, se detallan los eventos relevantes antes de cada cadena de opciones y los momentos neutrales al riesgo para cada fecha de expiración.

4.1.1 - Cadena de opciones con vencimiento 15/01/2021

Noticias o eventos relevantes:
• **30 de diciembre de 2020:** el Reino Unido se convierte en el primer país en aprobar la vacuna de AstraZeneca.

Figura 7. DNR de los días 04/01/2021 y 07/01/2021 para la fecha de vencimiento 15/01/2021

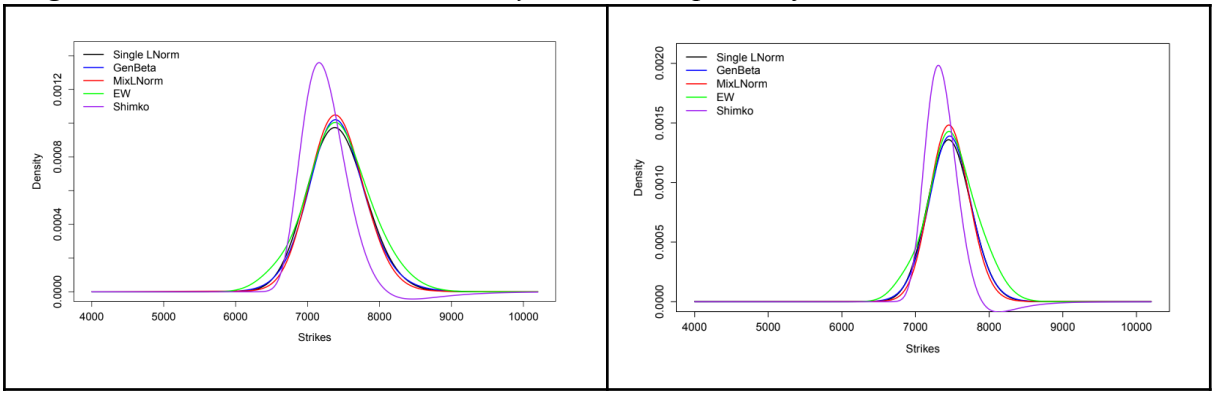


Figura 8. DNR de los días 11/01/2021 y 07/01/2021 para la fecha de vencimiento 15/01/2021

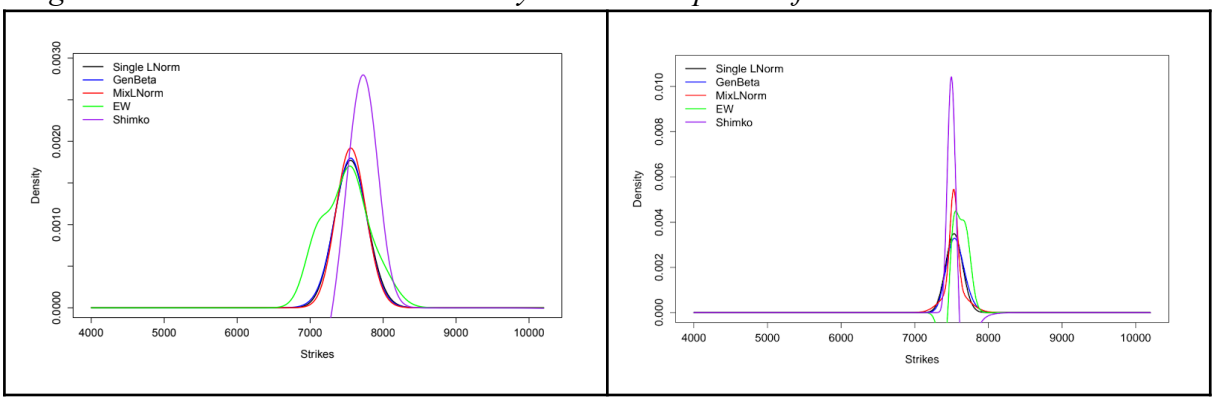
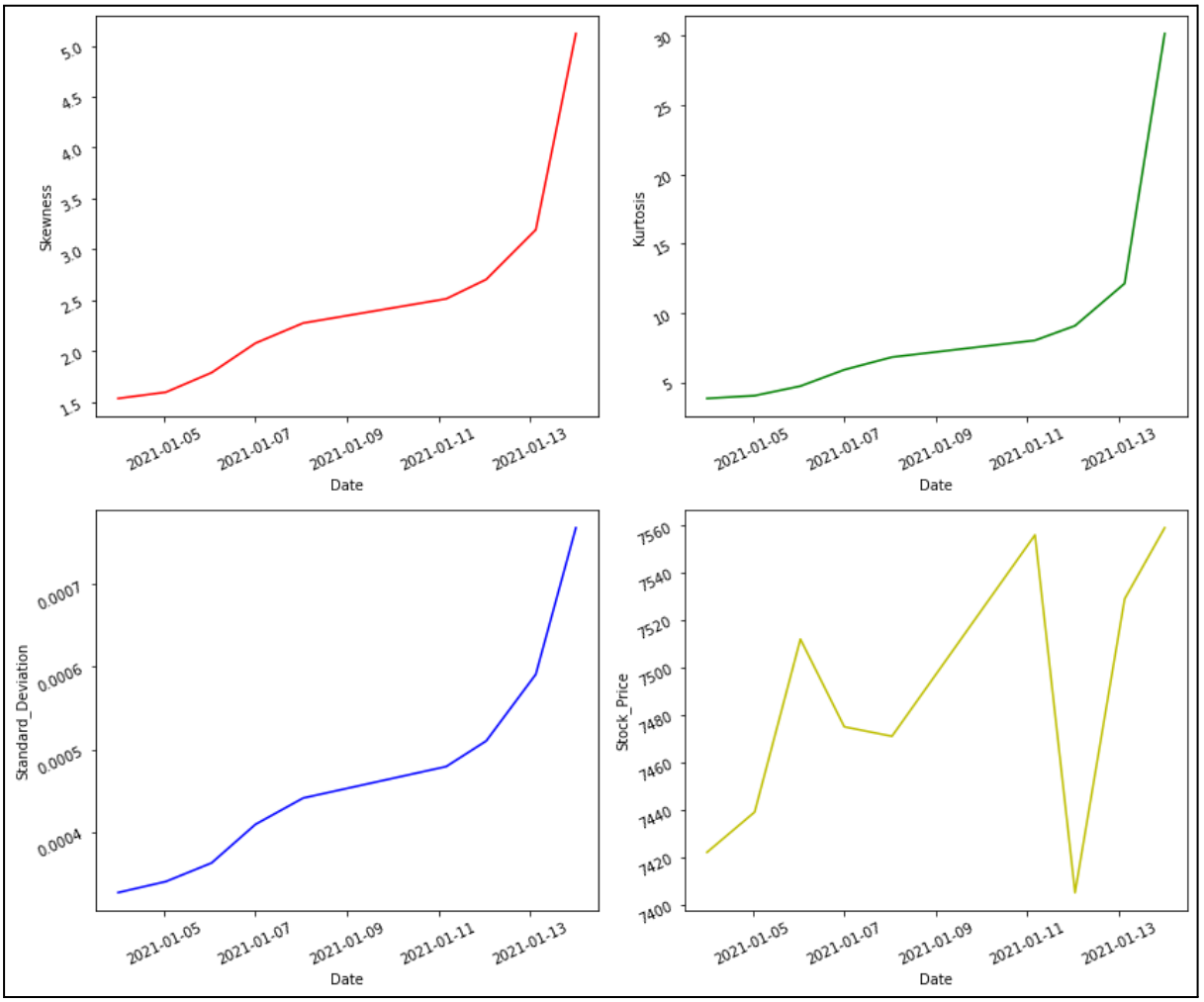


Figura 9. Momentos de la distribución risk neutral en base a la cadena de opciones con vencimiento 15/01/2021



En la Figura 9, se observa en el eje de abscisas de los gráficos el período de días de la cadena de opciones hasta su fecha de vencimiento, el en el eje de ordenadas de cada gráfico se observan las variaciones de los momentos (asimetría, curtosis y desviación estándar) de las Distribuciones Neutrales al Riesgo y también la variación del activo subyacente (*stock price*) hasta dicha fecha de vencimiento.

Para esta fecha de vencimiento no se observa mucha variación en los movimientos de los momentos de las DNR, pero sí se observa que la curtosis tiene un comportamiento leptocúrtico positivo cuando la cadena va llegando a su fecha de vencimiento (Una distribución con un valor positivo de curtosis indica que la distribución tiene colas más pesadas que la distribución normal). La asimetría tiene un comportamiento positivo constante cuando se acerca la fecha de vencimiento, datos con asimetría positiva o asimétricos hacia la derecha se llaman así porque la "cola" de la distribución apunta hacia la derecha y porque el valor de asimetría es mayor que 0 (es decir, positivo). Es decir, muchas DNR diarias daban un precio final de *strike price* relativamente bajo, mientras que las DNR diarias que dieron un precio de cierre de ejercicio elevado fueron menores.

4.1.2 - Cadena de opciones con vencimiento 19/02/2021

Noticias o eventos relevantes:
• **25 de enero de 2021:** AstraZeneca enfurece a los políticos de la Unión Europea cuando les informa que podrá suministrar al bloque de 27 naciones sólo alrededor del 40% de las dosis de vacuna que prometió durante el primer trimestre debido a problemas de fabricación en sus instalaciones europeas. • **29 de enero de 2021:** la Autoridad Europea de Medicamentos aprueba la vacuna AstraZeneca para su uso en todos los adultos, pero agrega que los ensayos clínicos iniciales no incluyeron suficientes personas mayores de 55 años para estar seguros de la efectividad en ese grupo de edad. • **5 de febrero de 2021:** los científicos de Oxford dicen que la vacuna es eficaz contra la variante B.117 "UK" del coronavirus. • **8 de febrero de 2021:** científicos de Sudáfrica dicen que la vacuna AstraZeneca parece ser ineficaz para prevenir el COVID-19 de leve a moderado entre las personas infectadas con la variante B.1.351 que surgió por primera vez en ese país. • **15 de febrero de 2021:** la Universidad de Oxford comienza un ensayo clínico para probar cómo funciona la vacuna AstraZeneca en los niños.

Figura 10. DNR de los días 07/01/2021 y 14/01/2021 para la fecha de vencimiento 19/02/2021

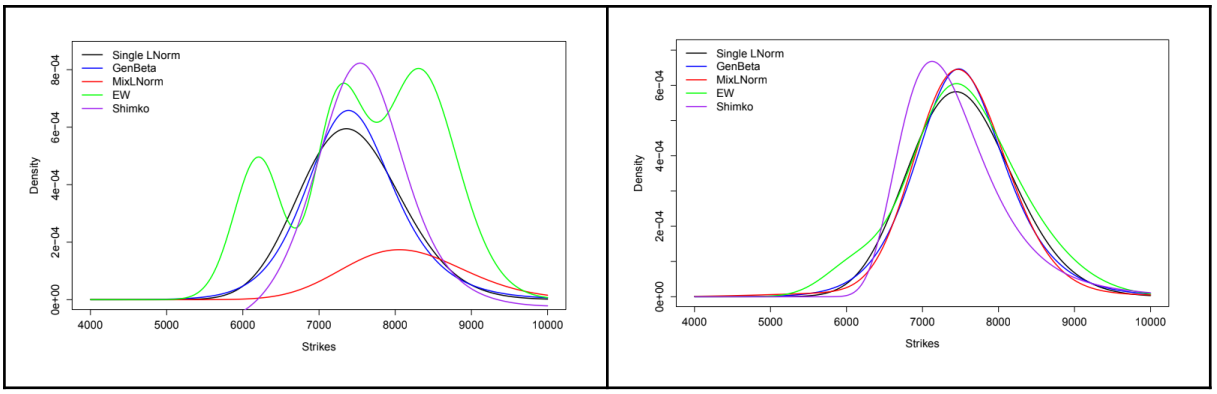


Figura 11. DNR de los días 15/02/2021 y 18/02/2021 para la fecha de vencimiento 19/02/2021

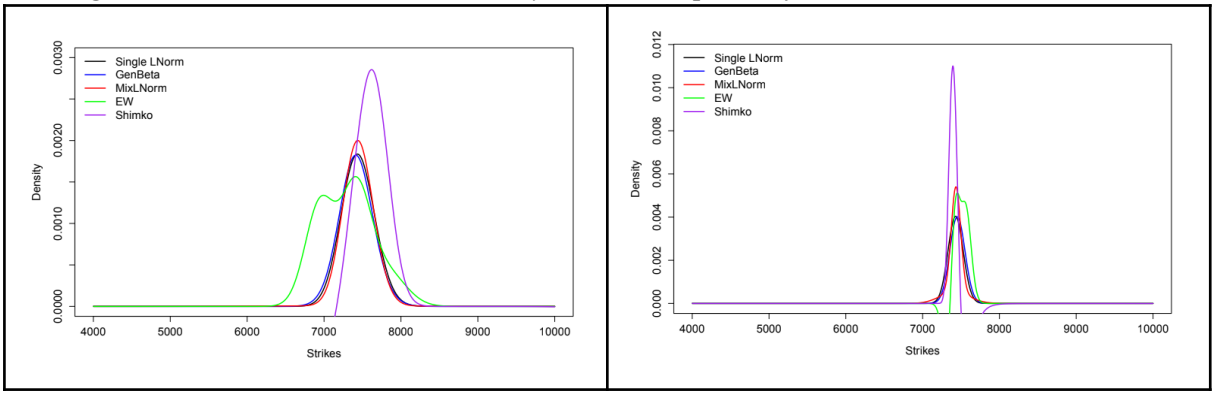
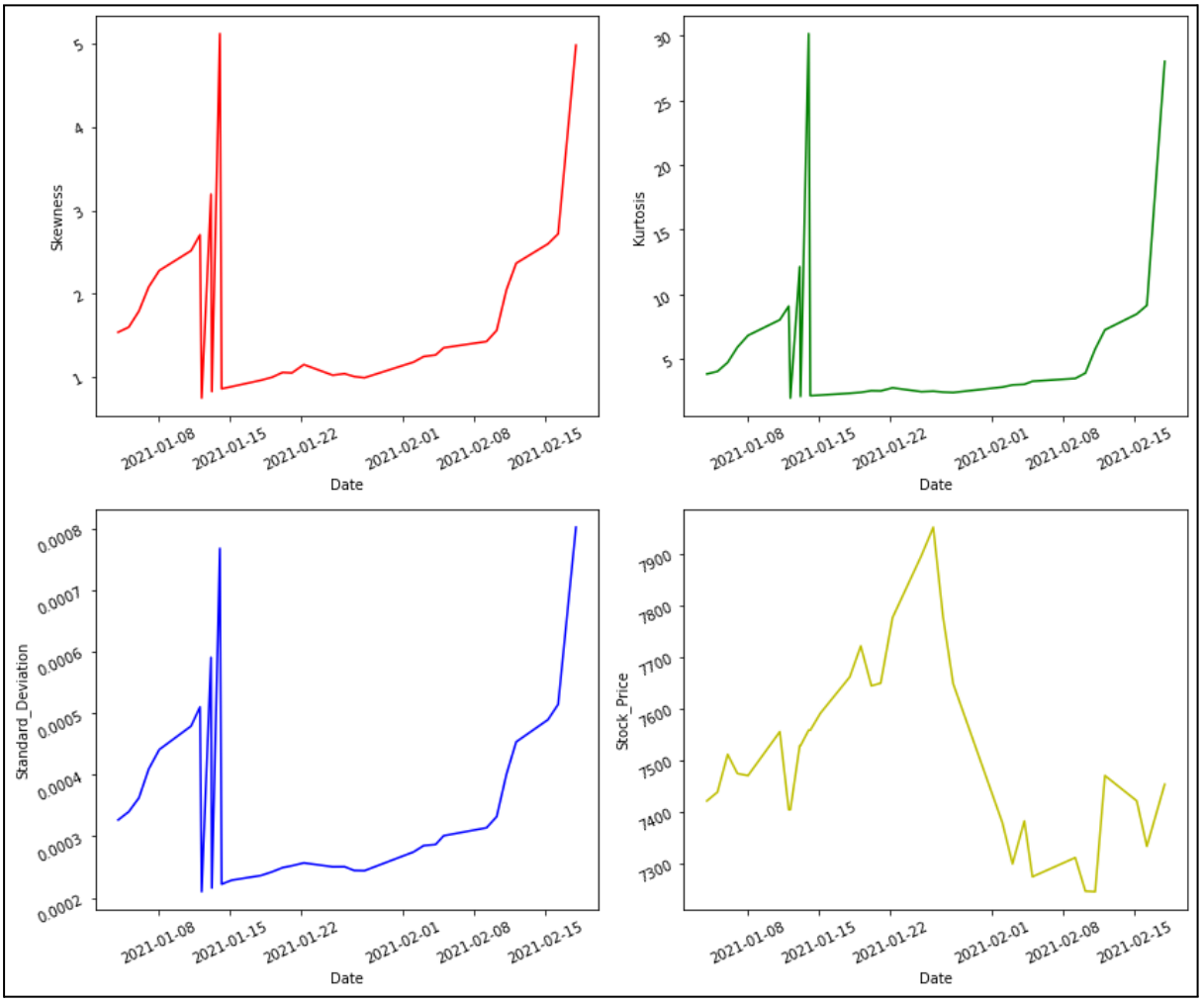


Figura 12. Momentos de la distribución risk neutral en base a la la cadena de opciones con vencimiento 19/02/2021



En la Figura 12, se observa en el eje de abscisas de los gráficos el período de días de la cadena de opciones hasta su fecha de vencimiento, el en el eje de ordenadas de cada gráfico se observan las variaciones de los momentos (asimetría, curtosis y desviación estándar) de las Distribuciones Neutrales al Riesgo y también la variación del activo subyacente (*stock price*) hasta dicha fecha de vencimiento.

Para esta fecha de vencimiento se observa una variación en los movimientos de los momentos de las DNR en los días cercanos a la fecha de vencimiento de la cadena anterior (*15/01/2021)*, también se observa que la curtosis tiene un comportamiento leptocúrtico positivo cuando la cadena va llegando a su fecha de vencimiento y una a asimetría tiene un comportamiento positivo constante cuando se acerca la fecha de vencimiento.

4.1.3 - Cadena de opciones con vencimiento 19/03/2021

Noticias o eventos relevantes:
• **5 de marzo de 2021:** En un cambio radical, el gobierno alemán acuerda autorizar la vacuna AstraZeneca para su uso en personas mayores de 65 años. • **11 de marzo de 2021:** Dinamarca detiene el lanzamiento de la vacuna AstraZeneca debido a preocupaciones sobre la peligrosa coagulación de la sangre entre algunos de los que recibieron la vacuna. Las acciones de la compañía caen con las noticias. AstraZeneca insiste en que el número de incidentes de coagulación reportados hasta ahora es en realidad menor de lo que ocurriría normalmente para los millones de personas que han recibido la vacuna en todo el mundo hasta ahora. • **16 de marzo de 2021:** Varios otros países europeos, incluidos Alemania, Francia e Italia, también suspenden la distribución de la vacuna AstraZeneca en medio de preocupaciones sobre la coagulación, incluso cuando la Agencia Europea de Medicamentos y la Organización Mundial de la Salud dicen que la vacuna es segura. Las suspensiones son otro golpe a los ya vacilantes esfuerzos de vacunación en Europa. Mientras tanto, Tailandia se suma a la lista de países que han autorizado la vacuna. • **18 de marzo de 2021:** después de una revisión, la Agencia Europea de Medicamentos concluye que la vacuna AstraZeneca es "segura y eficaz", lo que abre el camino para que se reanude el lanzamiento de la vacuna en Europa.

Figura 13. DNR de los días 04/01/2021 y 08/02/2021 para la fecha de vencimiento 19/03/2021

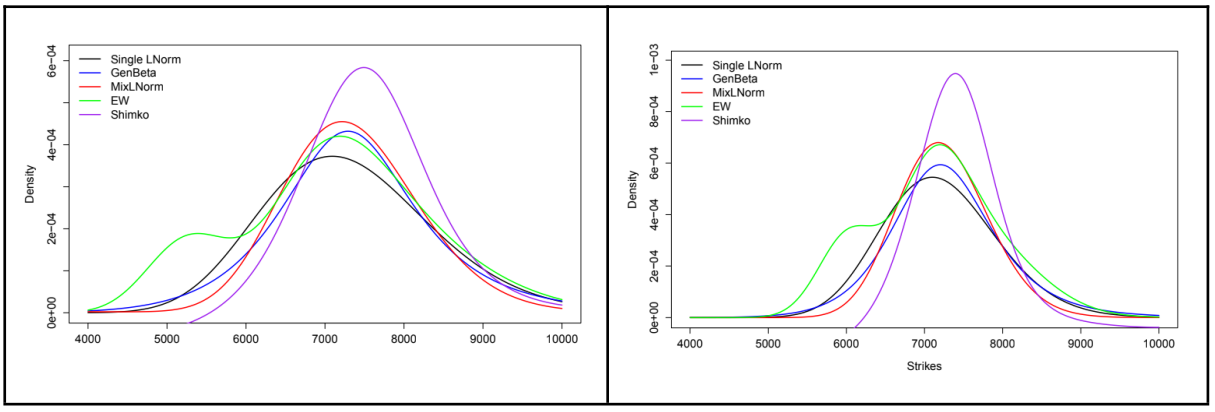


Figura 14. DNR de los días 25/02/2021 y 18/03/2021 para la fecha de vencimiento 19/03/2021

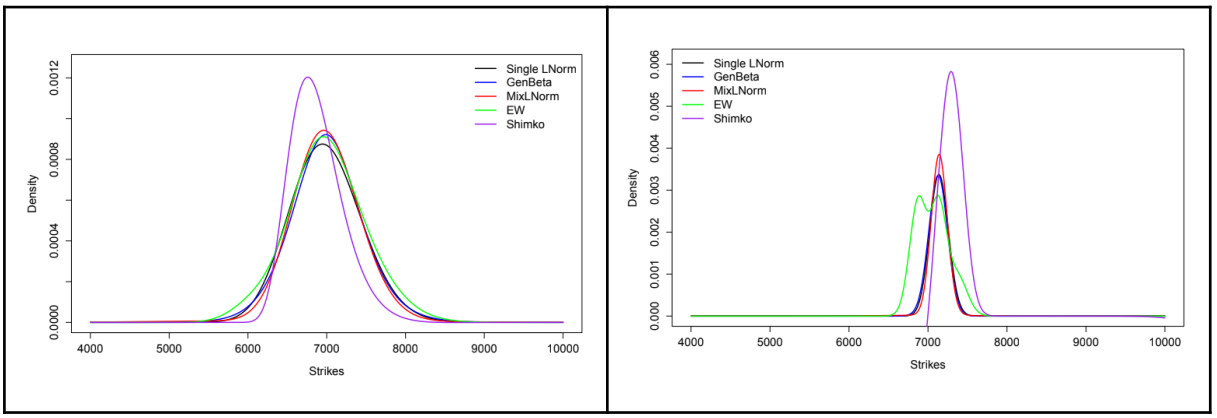
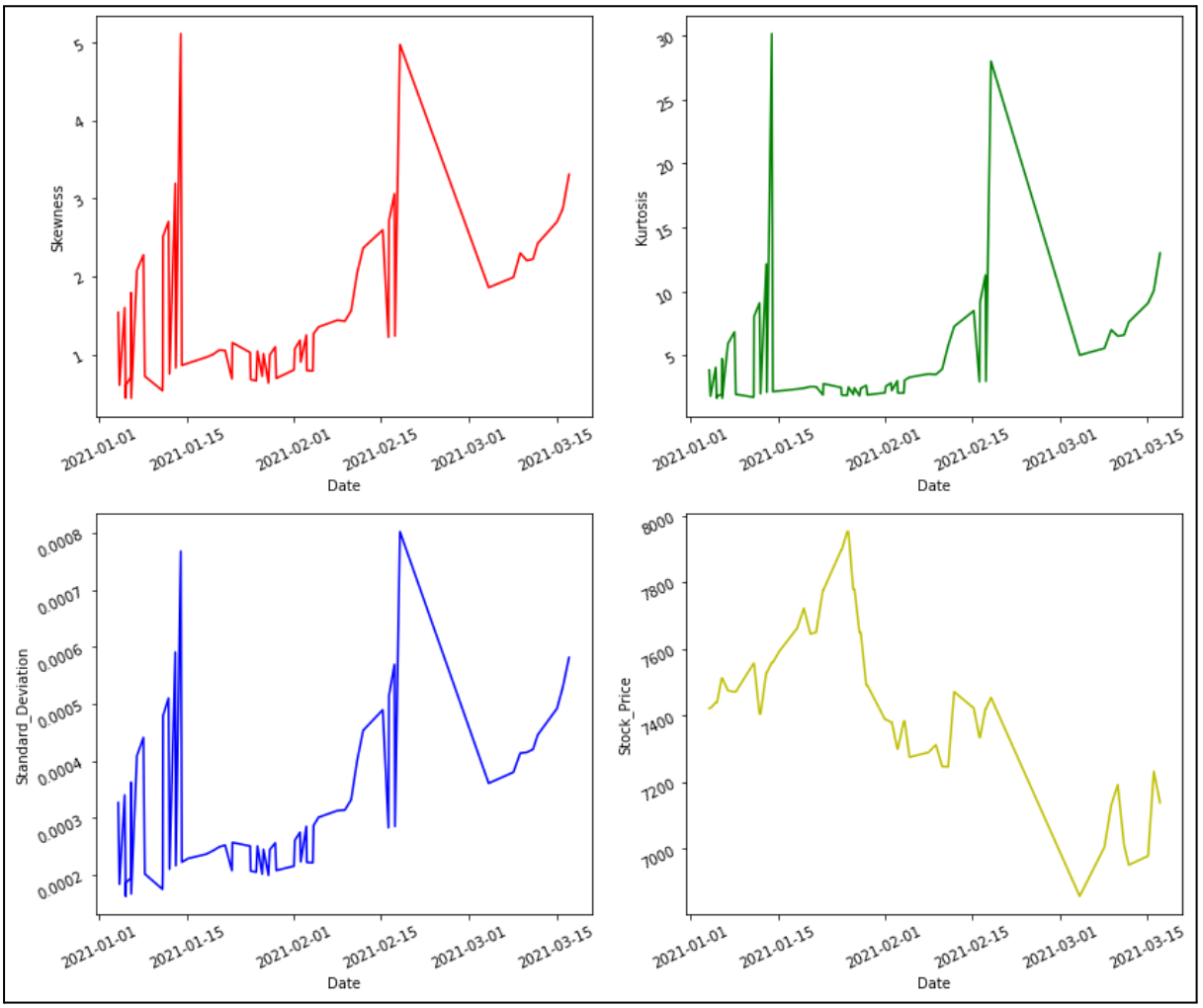


Figura 15. Momentos de la distribución risk neutral en base a la la cadena de opciones con vencimiento 19/03/2021



En la Figura 15, se observa en el eje de abscisas de los gráficos el período de días de la cadena de opciones hasta su fecha de vencimiento, el en el eje de ordenadas de cada gráfico se observan las variaciones de los momentos (asimetría, curtosis y desviación

estándar) de las Distribuciones Neutrales al Riesgo y también la variación del activo subyacente (*stock price*) hasta dicha fecha de vencimiento.

Para esta fecha de vencimiento se observa una variación en los movimientos de los momentos de las DNR en los días cercanos a las fecha de vencimiento de las cadenas anteriores (*15/01/2021)* y *(19/02/2021)*, también se observa que la curtosis tiene un comportamiento leptocúrtico positivo cuando la cadena va llegando a su fecha de vencimiento y una a asimetría tiene un comportamiento positivo constante cuando se acerca la fecha de vencimiento.

4.1.4 - Cadena de opciones con vencimiento 16/04/2021

Noticias o eventos relevantes:
● **22 de marzo de 2021:** AstraZeneca anuncia los resultados provisionales de su ensayo clínico en EE. UU., diciendo que la vacuna fue 79% efectiva contra COVID-19 sintomático y 100% efectiva contra hospitalización y muerte. ● **23 de marzo de 2021:** en un acontecimiento sorprendente, el Instituto Nacional de Alergias y Enfermedades Infecciosas de EE. UU. (NIAID) emite una declaración de advertencia a media noche que AstraZeneca pudo haber utilizado datos "obsoletos" que proporcionaron una imagen "incompleta" de su eficacia. ● **30 de marzo de 2021:** algunas ciudades y regiones alemanas, incluidas Múnich y Berlín, suspenden la distribución de la vacuna de AstraZeneca a personas menores de 60 años debido a las continuas preocupaciones sobre incidentes inusuales de coagulación sanguínea potencialmente relacionados con la inyección. Canadá también deja de administrar la vacuna a menores de 55 años debido a temores similares. ● **7 de abril de 2021:** el regulador médico de la Unión Europea, la Agencia Europea de Medicamentos (EMA), dice que las muy raras condiciones de coagulación de la sangre que han afectado a un puñado de personas después de recibir la vacuna AstraZeneca probablemente sean causadas por el pinchazo, y ordena a la empresa que realice más pruebas para investigar el motivo exacto. Pero dice que, dados los mayores riesgos del COVID-19 en sí y la falta de alternativas hasta ahora en Europa, la vacuna se debe seguir administrando.

Figura 16. DNR de los días 04/01/2021 y 09/02/2021 para la fecha de vencimiento 16/04/2021

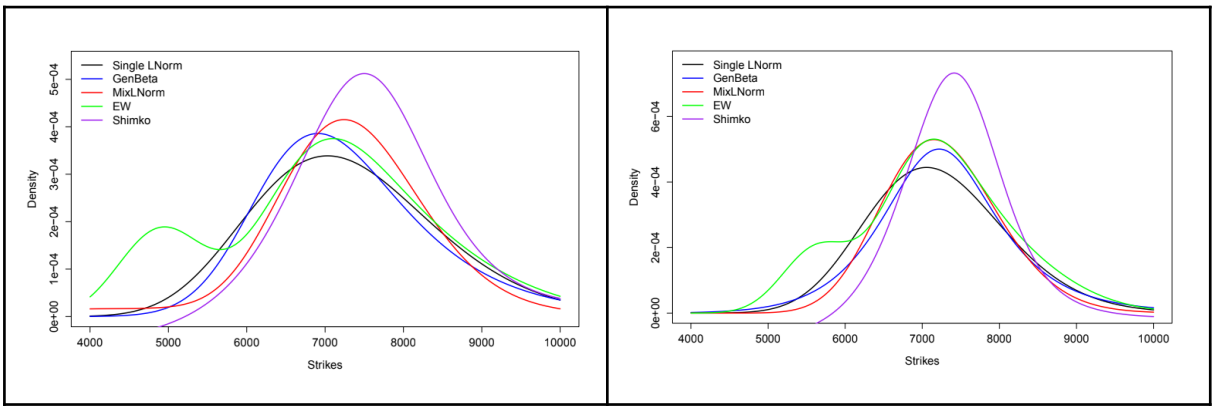


Figura 17. DNR de los días 06/04/2021 y 15/04/2021 para la fecha de vencimiento 16/04/2021

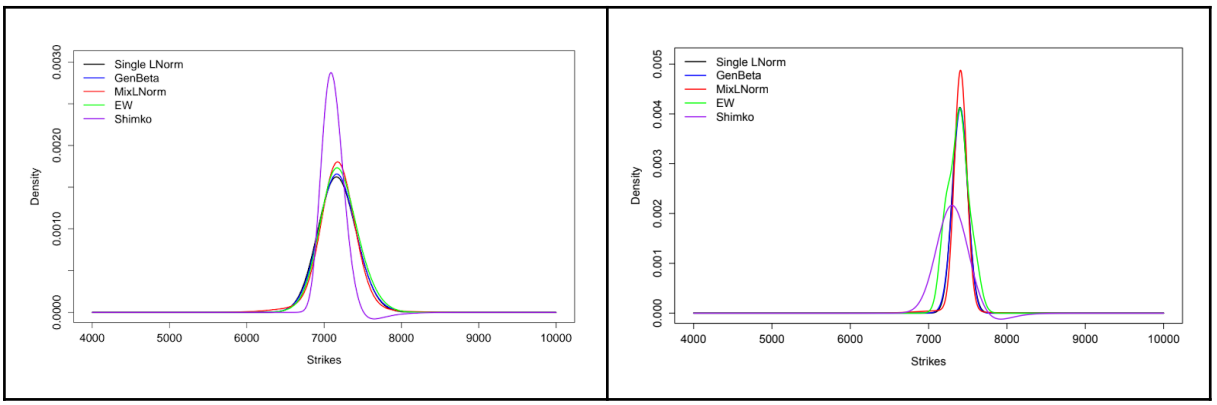
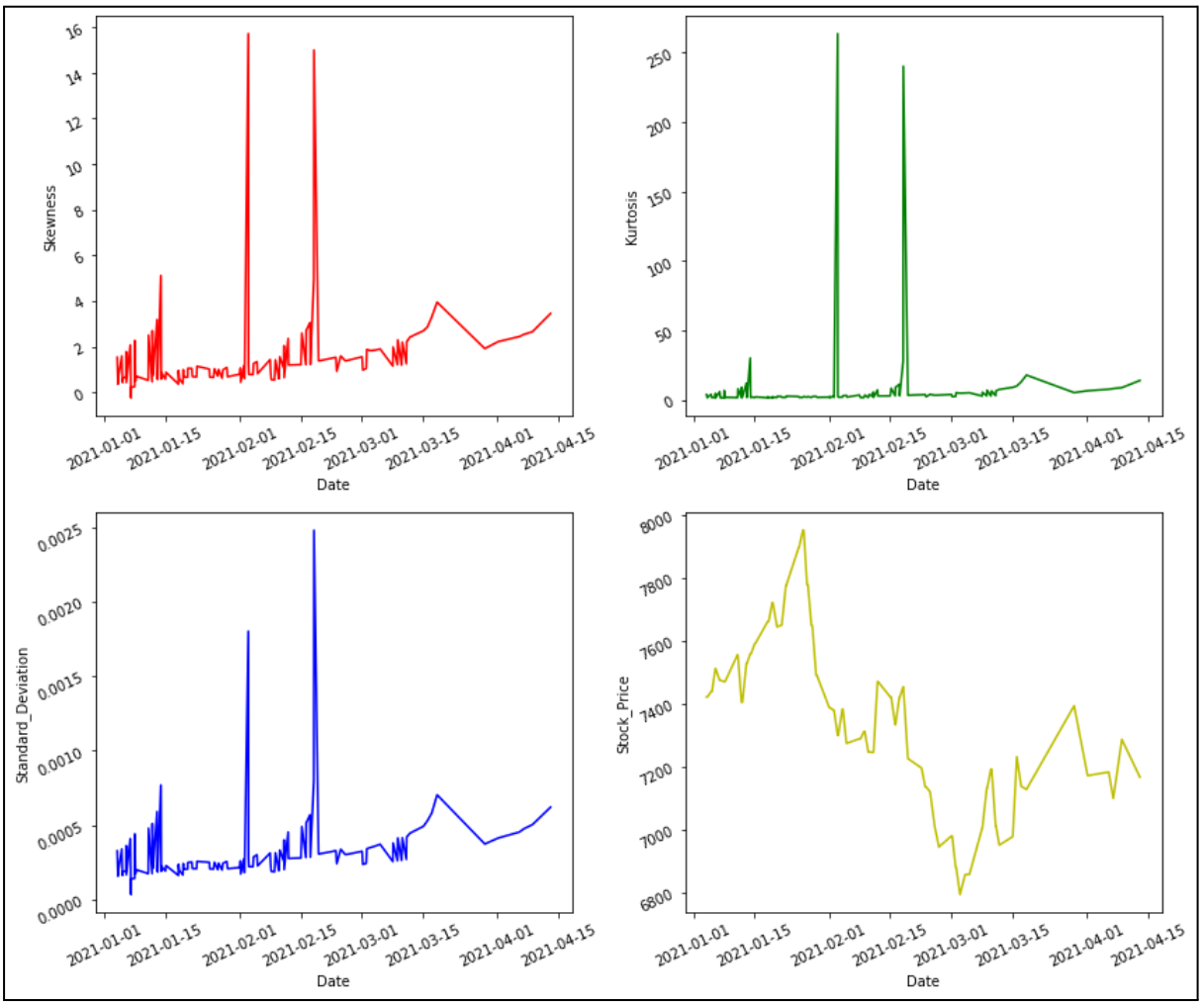


Figura 18. Momentos de la distribución risk neutral en base a la la cadena de opciones con vencimiento 16/04/2021



En la Figura 18, se observa en el eje de abscisas de los gráficos el período de días de la cadena de opciones hasta su fecha de vencimiento, el en el eje de ordenadas de cada gráfico se observan las variaciones de los momentos (asimetría, curtosis y desviación estándar) de las Distribuciones Neutrales al Riesgo y también la variación del activo subyacente (*stock price*) hasta dicha fecha de vencimiento.

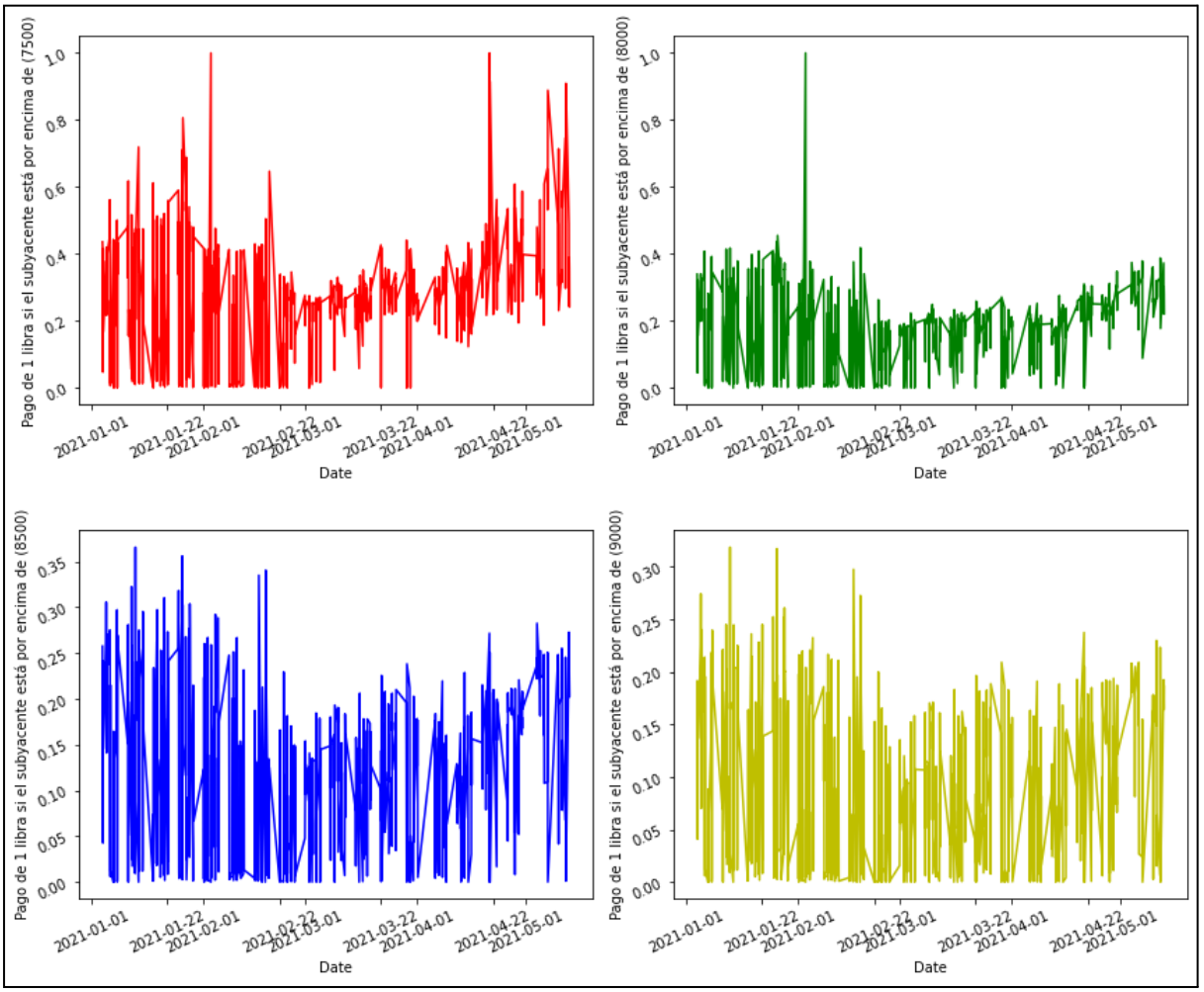
Para esta fecha de vencimiento se observa una variación en los movimientos de los momentos de las DNR en los días cercanos a las fecha de vencimiento de las cadenas anteriores *(19/02/2021)* y *(19/03/2021)*, también se observa que la curtosis tiene un comportamiento casi mesocúrtico cuando la cadena va llegando a su fecha de vencimiento y la asimetría tiene un comportamiento positivo constante cuando se acerca la fecha de vencimiento.

4.2 - Probabilidades implícitas de la vacuna según opciones binarias

En base a la densidad neutral obtenida es posible valuar otros derivados sobre el mismo subyacente. En particular podemos pensar en el precio de mercado, bajo condiciones de no arbitraje, de opciones binarias que pagan 1 libra si el subyacente supera cierto nivel y 0 en caso contrario. En particular, podemos analizar los siguientes niveles para el subyacente

- 7500 libras como referencia de precio previo al inicio de la pandemia.
- 8500 libras como el precio máximo observado durante 2020, en un momento en el que el mercado estaba optimista respecto a las posibilidades de que AstraZeneca logre desarrollar la vacuna[15].

Figura 19. Valor estimado para las de opciones binarias

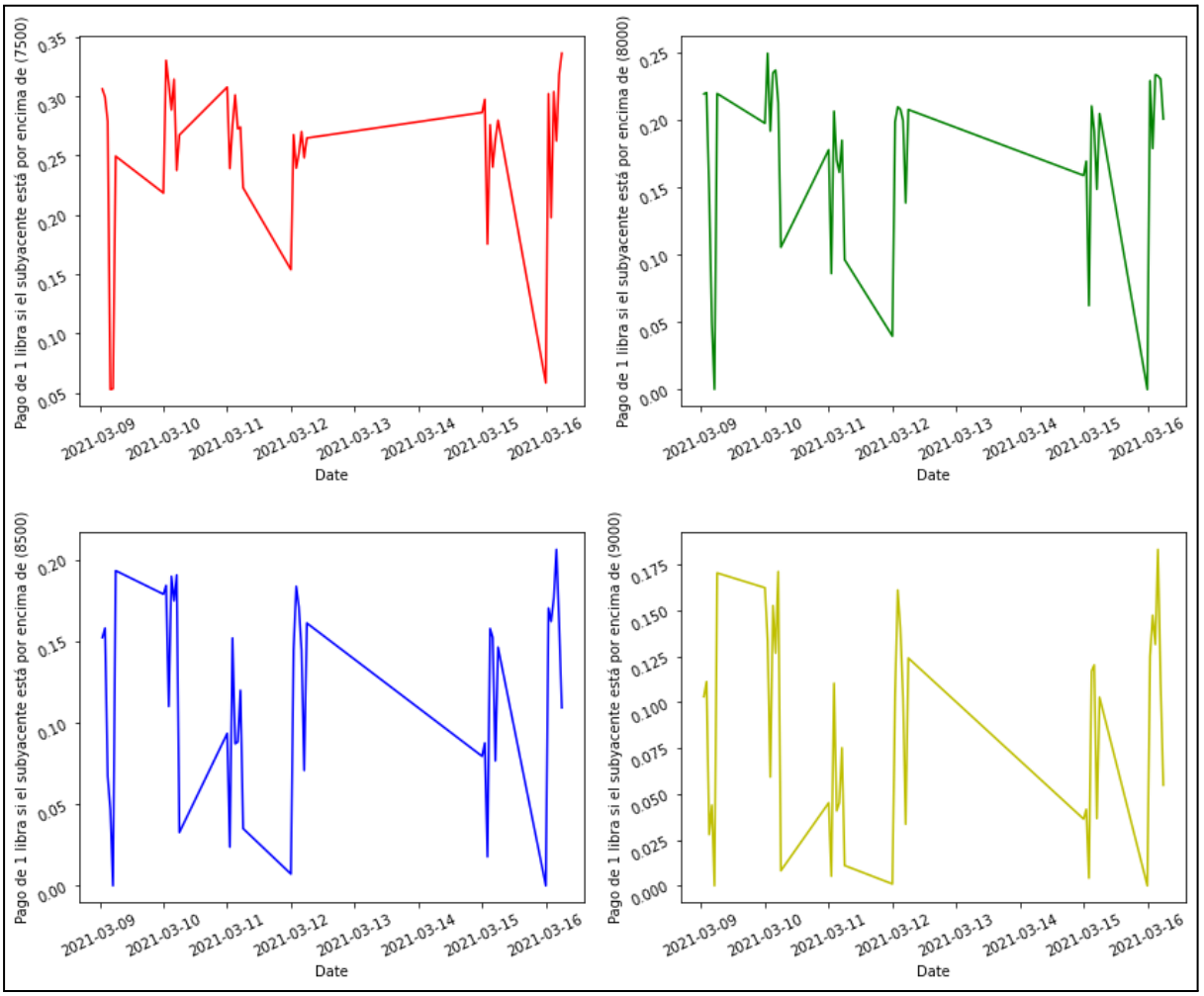


En este punto es importante remarcar que la probabilidad neutral no coincide con la probabilidad física. Sin embargo, el valor de la opción binaria obtenida usando valuación neutral al riesgo y descuento a la tasa libre de riesgo si coincide con el valor obtenido

[15] A los fines de este ejercicio no profundizamos en la valuación de la empresa, en la que la vacuna es uno de los proyectos en desarrollo y que además cuenta con múltiples productos ya maduros que generan cash flows. Por ese motivo, tomamos como referencia los precios de mercado para entender qué niveles del subyacente podríamos asociar a resultados favorables sobre la evolución del proyecto de la vacuna.

mediante el valor esperado usando probabilidades del mundo físico y descontando a la tasa de descuento ajustada por riesgo.

Figura 20. Valor estimado para las de opciones binarias durante los eventos del 09/03 al 16/03



A modo de ilustración de que nuestro método para conocer una probabilidad "real" relacionada a los eventos del proyecto de la vacuna de AstraZeneca simula muy bien la realidad, podemos observar los pagos esperados entre los días 09/03/2021 y 18/03/2021.

Durante estos días, como ya se comentó en los resultados anteriores ocurren los siguientes eventos (**Ver Apéndice A**):

Dinamarca suspende la vacunación el 11 de marzo por una coagulación de sangre, para ese momento, podemos observar que el pago esperado de la opción binaria es mayor para cuando este se encuentra en 7500 y 8000 libras (muy cerca de su punto mínimo del 2020).

El 16 de marzo, varios países europeos, entre ellos Alemania. Francia e Italia suspenden la utilización de las vacunas de AstraZeneca por el mismo inconveniente que se registró en Dinamarca. Aquí, podemos ver que el pago esperado estuvo por debajo de las 7500 libras, es decir que el proyecto de la vacuna afectó rotundamente al mercado de derivados y a su correspondiente subyacente por la incertidumbre generada.

Finalmente, el 18 de marzo, la Agencia Europea de Medicamentos dice que la vacuna es segura y eficaz, y para este momento el pago esperado en nuestra opción binaria del subyacente alcanza su punto máximo cercano a las 9000 libras esterlinas.

4.3 - Discusión sobre las probabilidades neutrales y físicas

Es importante enfatizar nuevamente que las distribuciones neutrales al riesgo son diferentes de las distribuciones del mundo real que gobiernan la probabilidad de eventos en los mercados financieros. Una DNR es una distribución de probabilidad artificial que permite el cálculo de los precios de las opciones sin especificar la aversión al riesgo de los inversores (esta idea es la razón del Premio Nobel de Scholes y Merton en 1997). Por lo tanto, son una herramienta matemática muy conveniente, pero no una descripción del mundo real.

Los cambios en la DNR se pueden atribuir a cambios en las preferencias de los inversores, las probabilidades del mundo real o ambos. A priori, es imposible saber cuál de los tres casos es verdadero. Separar las probabilidades del mundo real de la aversión al riesgo normalmente requiere un modelo de equilibrio general de la economía y sigue siendo una cuestión abierta para la investigación actual, ver Ross (2015) para un intento reciente sobre esta metodología de recuperación. A partir de la relación fundamental de que los precios en cada estado son el producto de probabilidades físicas y el factor de descuento estocástico, Ross (2015) muestra que, dados supuestos sólidos, conocer los precios en cada estado es suficiente para despejar las probabilidades físicas y el factor de descuento estocástico al mismo tiempo.

Carr y Yu[16] (2013) proponen una alternativa para recuperar las probabilidades que no dependen de supuestos sobre la aversión al riesgo. Bajo nuevos supuestos logran separar tanto las creencias del mercado como la prima de riesgo. En la actualidad, no disponemos de una teoría general que dé condiciones suficientes para cuando la recuperación de Ross tiene éxito para una difusión sobre un espacio de estados ilimitado. En este aspecto, Jackwerth y Menner (2018) argumentan que tales distribuciones físicas recuperadas basadas en el índice S&P 500 son incompatibles con los rendimientos realizados en el futuro y no predicen los rendimientos y variaciones realizados. Estos resultados negativos se mantienen incluso cuando se agregan restricciones económicamente razonables.

16 https://ocw.mit.edu/courses/mathematics/18-s096-topics-in-mathematics-with-applications-in-finance-fall-2013/lecture-notes/MIT18_S096F13_lecnote25.pdf

5 - Conclusiones

5.1 - Limitaciones y futuras mejoras

Un gran desafío para la resolución de este trabajo, fue principalmente tener acceso a los datos de cadenas de opciones, ya que los mismos son una información muy sofisticada y necesaria en el mundo de las finanzas bursátiles. Además, este mismo ejercicio fue pensado inicialmente para analizar todas las vacunas americanas contra la COVID-19 expresadas en el **Apéndice C,** pero en el caso de las opciones americanas se presenta un grave problema al momento de buscar obtener información implícita sobre cadenas de opciones. Los métodos para obtener Distribuciones Neutrales al Riesgo (DNR) se aplican estrictamente sólo a los precios de las opciones europeas. Para utilizar los precios de las opciones estadounidenses, uno tiene que verificar que no habrá ejercicio temprano[17].

En versiones futuras de este trabajo, o en caso de buscar perfeccionarlo con un mayor financiamiento para la adquisición de los datos, se podría complementar el análisis de las vacunas con un ejercicio similar, pero obteniendo las DNR de datos opciones financieras relacionadas al turismo, a líneas aéreas y a agentes de viajes (Hsien-Tang et al., 2004) para observar el impacto de manera conjunta que trajo consigo la pandemia de la COVID-19 a estas empresas y cómo reaccionaron a este *shock* económico los mercados financieros más importantes del mundo.

5.2 - Conclusión

En este trabajo realizamos una reseña de los fundamentos teóricos y principales metodologías desarrolladas para la estimación de la función de densidad neutral al riesgo y su aplicación sobre cadenas de opciones sobre la acción de la empresa británica AstraZeneca que desarrolló una de las vacunas contra la COVID-19. En base a la densidad neutral estimada hemos valuado otros derivados sobre el mismo subyacente. Por ejemplo, una opción binaria, que no es tradeada en el mundo real, de la que podemos obtener su precio teórico en el mundo físico bajo condiciones de no arbitraje. Esta valuación nos otorga una medida útil respecto a la valoración del mercado en relación a las probabilidades de éxito de la vacuna. Esta solución sigue las recomendaciones de la literatura respecto a las dificultades, y supuestos adicionales necesarios, para separar las probabilidades del mundo neutral y el mundo físico (Carr y Yu (2013), Ross (2015), Jackwerth y Menner (2018)) (**Ver Sección 4.3 - Resultados**).

En conclusión, este trabajo es un ejemplo de cómo se pueden estimar las probabilidades, bajo la medida neutral al riesgo, sobre eventos que puedan afectar positiva o negativamente a algún proyecto o decisión de inversión. Con la información implícita extraída se podrían tomar mejores decisiones de inversión y hedging ante posibles *shocks*. Esta metodología puede aplicarse utilizando precios de opciones sobre activos diversos como equities, *commodities* e índices bursátiles entre otros.

[17] Merton da las condiciones exactas en las que no se ejercerán estas opciones; generalmente, las opciones *calls* estadounidenses que no pagan dividendos nunca deben ejercerse anticipadamente.

7 - Bibliografía

- Ait-Sahalia, Y. and Lo, A.W., 1998. "Nonparametric Estimation of State-Price Densities Implicit in Financial Asset Prices." Journal of Finance 53, 499-547.
- Anagnou, I., M. Bedendo, S. Hodges, and R. Tompkins. 2002. "The Relation between Implied and Realized Probability Density Functions." Working paper, University of Warwick.
- Arrow, K. J. (1964). The role of securities in the optimal allocation of risk-bearing. The Review of Economic Studies 31(2), 91-96.
- Avellaneda, M., 1998. Minimum-Relative-Entropy Calibration of Asset-Pricing Models.
- Bahra, B., 1997. Implied risk-neutral probability density functions from option prices: Theory and application. Working Paper No. 66. Bank of England,London.
- Banz, R. & Miller, M. (1978). Prices for state-contingent claims: Some estimates and applications. Journal of Business 51, 653-672.
- Bates, D. S., 1991. The crash of '87: Was it expected? The evidence from options markets. The Journal of Finance 46(3), 1009-1044.
- Black, F. and Scholes, M.. 1973. The pricing of options and corporate liabilities. Journal of Political Economy (81), 637-659.
- Bliss, R., and N. Panigirtzoglou. 2001. "Testing the Stability of Implied Probability Density Functions." Journal of Banking and Finance, vol. 26, no. 2–3 (March):381–422.
- Bliss, R. & Panigirtzoglou, N. (2002). Testing the stability of implied probability density functions. Journal of Banking and Finance 26, 381-422.
- Bookstaber and McDonald (1987). A general distribution for describing security price returns. Journal of Business 60(3), 401-424.
- Breeden, D. and Litzenberger, R., 1978. Prices of State-Contingent Claims Implicit in Option Prices. Journal of Business 51, 621-652.
- Buchen, M.W. & Kelly, M. (1996). The maximum entropy distribution of an asset inferred from option prices. Journal of Financial and Quantitative Analysis 31(1), 143-159.
- Campa, J.M., Chang, P.H.K. and Reider, R.L., 1998. "Implied Exchange Rate Distributions: Evidence from OTC Option Markets." Journal of International Money and Finance 17, 117-160.
- Carsten, J., 2004. Option-Implied Risk-Neutral Distributions and Risk Aversion. The Research Foundation of AIMR
- Chen, K. (2010). A new framework to estimate the risk-neutral probability density functions embedded in option prices. International Monetary Fund working paper WP/10/181.
- Cheng, K., 2010. A New Framework to Estimate the Risk-Neutral Probability Density Functions Embedded in Options Prices. IMF Working Papers, pp. 1-31.
- Cooper, N., 1999. Testing techniques for estimating implied RNDs from the prices of European-style options. Working Paper, Bank of England.

- Coutant, S., Jondeau, E. and Rockinger, M., 1999. Reading interest rate and bond futures options smiles: how Pibor and notational operators appreciated the 1997 French snap election? Working Paper NER, No. 54, Banque de France.
- Cox, J. C. and Ross, S. A., 1976. The valuation of options for alternative stochastic processes. Journal of Financial Economics, 3(1):145-166.
- Datta D., Londono L., Ross L., 2014. Generating Options-Implied Probability Densities to Understand Oil Market Events.
- Duffie, D., 2010. Dynamic asset pricing theory. Princeton University Press.
- Fama, E., Fisher, L., Jensen, M., & Roll, R. (1969). The Adjustment of Stock Prices to New Information. International Economic Review, 10(1), 1-21.
- Figlewski, S. (2008). Estimating the implied risk neutral density for the U.S. market portfolio. Volatility and Time Series Econometrics. Oxford University Press.
- Gemmill, G. and Saflekos, A., 2000. How useful are implied distributions? Evidence from stock index options. The Journal of Derivatives, 7(3), pp.83-91.
- Gisiger, N., 2010. Risk-Neutral Probabilities Explained.
- Hull, J., 2012. Options, Futures and Other Derivatives, Prentice Hall, 8th Edition.
- Hsien-Tang, T., Chung-Gee, L. & Leo Huang,. 2004. A study of the option pricing method in the agency problem between airlines and travel agents.
- Jackwerth, J. (2004). Option-Implied Risk-Neutral Distributions and Risk Aversion. The Research Foundation of AIMR.
- Jackwerth, J. C., 1999. Option-implied risk-neutral distributions and implied binomial trees: A literature review. Journal of Derivatives 7(2), 66-82.
- Jondeau, E., Poon, S-H. & Rockinger, M. (2007). Financial Modeling Under Non-Gaussian Distributions. London: Springer Finance.
- Langer A. and D., 2020. Lemoine. What Were the Odds? Estimating the Market's Probability of Uncertain Events.
- Liu, X., Shackleton, M.B., Taylor, S.J. & Xu, X. (2007). Closed-form transformations from risk-neutral to real-world distributions. Journal of Business 60, 401-424.
- Manski, C. F., 2006. Interpreting the predictions of prediction markets. Economics Letters, 91(3):425–429.
- Melick, W. R. and Thomas, C. P., 1997. Recovering an Asset's Implied PDF from Option Prices: An Application to Crude Oil During the Gulf Crisis. Journal of Financial and Quantitative Analysis 32, 91-115.
- Monteiro, A. and Vicente, L. N., 2008. Recovering risk-neutral probability density functions from options prices using cubic splines and ensuring nonnegativity. European Journal of Operational Research, 187(2):525-542.
- Pritzker, M. (1998). Nonparametric density estimation and test of continuous time interest rate models. Review of Financial Studies 11(3), 449-487.
- Rockinger, M. & Jondeau, E. (2002). Entropy densities with an application to autoregressive conditional skewness and kurtosis. Journal of Econometrics 106(1), 119-142.
- Ross, S., 2015. The recovery theorem. The Journal of Finance, 70(2), pp.615-648.
- Ross, S. (1976). The arbitrage theory of capital asset pricing. Journal of Economic Theory 13(3), 341-360.

- Rubinstein, M., 1994. Implied binomial trees. Journal of Finance 49, 771-818.
- Sherrick, B.J., Garcia, P. & Tirapattur, V. (1996). Recovering probabilistic information from option markets: Test of distributional assumptions. Journal of Financial Markets 16(5), 545-560.
- Shimko, D., 1993. The Bounds of Probability. RISK 6, 33-37.
- Söderlind, P. & Svensson, L. (1997). New techniques to extract market expectations from financial instruments. Journal of Monetary Economics 40, 383-429.
- Wolfers J. and Zitzewitz E., 2006. Interpreting Prediction Market Prices as Probabilities.

Apéndice A - Eventos relacionados a la vacuna de Oxford-AstraZeneca

AstraZeneca, el gigante farmacéutico británico-sueco con sede en Cambridge, Inglaterra, tiene poco historial en vacunas, pero logró marcar un golpe al asociarse con científicos del Instituto Jenner de la Universidad de Oxford para ayudar a llevar su vacuna COVID-19 al mercado. La compañía firmó acuerdos para entregar miles de millones de vacunas en todo el mundo.

Sin embargo, de las principales vacunas en el mercado global, AstraZeneca ha tenido el viaje más difícil. Entre ensayos detenidos, datos confusos y contratiempos de comunicación, la compañía ahora enfrenta vacunas suspendidas y una disminución de la confianza en su vacuna.

La revista de negocios *Fortune*[18], enumera cronológicamente las noticias y eventos relacionados a la vacuna europea desde su inicio de fabricación:

- **30 de abril de 2020:** la vacuna de AstraZeneca utiliza un virus de chimpancé modificado para dar instrucciones al cuerpo para producir la proteína de pico de coronavirus. Esto, a su vez, desencadena una respuesta inmunitaria. Los científicos, que ya han comenzado los ensayos clínicos en humanos de su vacuna en el Reino Unido, han estado en negociaciones con el gigante farmacéutico estadounidense Merck, pero se encuentran bajo una presión cada vez mayor del gobierno del Reino Unido para encontrar un socio con sede en el Reino Unido. Como parte del acuerdo, la compañía se compromete a desempeñar un papel de liderazgo en ayudar a vacunar al mundo mediante la producción de miles de millones de dosis. También se compromete a no obtener ganancias con el esfuerzo de la vacuna hasta que termine la pandemia.

- **18 de mayo de 2020:** AstraZeneca firma un acuerdo con el gobierno del Reino Unido para suministrar hasta 30 millones de dosis de la vacuna en septiembre y 100 millones de dosis para fin de año.

- **21 de mayo de 2020:** el gobierno de EE. UU. Firma un acuerdo con AstraZeneca por 300 millones de dosis de su vacuna. Acuerda pagarle a la compañía $1.2 mil millones

[18] https://fortune.com/2021/04/01/astrazeneca-covid-vaccine-timeline-news-latest-update/

para ayudar a cubrir el costo de los ensayos clínicos y para establecer instalaciones de fabricación capaces de producir miles de millones de dosis.

- **4 de junio de 2020:** la compañía firma dos acuerdos históricos con dos organizaciones internacionales de vacunas, CEPI y Gavi, para proporcionar 1.300 millones de dosis a países de ingresos bajos y medianos . Las organizaciones acuerdan pagar a AstraZeneca $750 millones para cubrir el costo de producir las primeras 300 millones de dosis para que estén listas para fin de año. Por separado, la compañía anunció una asociación con el Serum Institute of India para proporcionar mil millones de dosis para la India y otros países de ingresos bajos y medianos, y los primeros 400 millones de dosis estarán disponibles para fin de año. La vacuna se considera importante para inmunizar a gran parte del mundo porque las dosis son relativamente económicas (cuestan menos de $ 5 por inyección en la mayoría de los casos) y se pueden almacenar a temperaturas normales de refrigerador, una consideración importante dados los problemas logísticos que rodean a la vacuna de Pfizer, que necesita almacenar a temperaturas extremadamente bajas.

- **20 de julio de 2020:** la vacuna AstraZeneca supera un obstáculo de seguridad clave cuando la Universidad de Oxford publicó los resultados de los ensayos clínicos en humanos de fase I iniciales en la revista médica The Lancet. Los resultados muestran que la vacuna es segura y parece producir fuertes respuestas inmunes basadas en análisis de laboratorio de muestras de sangre de los inoculados.

- **10 de agosto de 2020:** con su vacuna en la primera posición para ser la primera aprobada a nivel mundial, Pascal Soriot, director ejecutivo de AstraZeneca, es el centro de atención. La campaña de vacunas representa un punto culminante en su campaña de siete años para revertir a la compañía farmacéutica que alguna vez tuvo dificultades . Los inversores acuden en masa a las acciones de AstraZeneca desde que se anunció la alianza con Oxford, lo que las envía a máximos históricos y convierte a la empresa en la más valiosa en el índice de acciones FTSE 100.

- **1 de septiembre de 2020:** la compañía comienza su ensayo clínico en humanos de fase III a gran escala de la vacuna en los EE. UU.

- **8 de septiembre de 2020:** STAT News publica la historia de que los ensayos clínicos de la vacuna se detuvieron a nivel mundial después de que un voluntario en el ensayo clínico del Reino Unido desarrollara síntomas neurológicos graves. Más tarde, una junta de revisión independiente concluye que es poco probable que los síntomas sean causados por la vacuna. AstraZeneca maneja mal las comunicaciones en torno al incidente: La noticia del ensayo hace una pausa a los funcionarios del gobierno de EE.UU. El director ejecutivo Pascal Soriot agrava los problemas al revelar en una conferencia telefónica con analistas financieros que el ensayo clínico del Reino Unido se había detenido brevemente en julio cuando otro voluntario también desarrolló síntomas neurológicos. Aunque tampoco se encontró un vínculo con la vacuna en ese

caso, la forma en que Soriot reveló la información enfureció a muchos expertos en salud, lo que generó preocupaciones sobre la transparencia. Aunque los ensayos clínicos en la mayor parte del mundo se reanudaron el 13 de septiembre después de una pausa de una semana, en los EE. UU. El ensayo clínico se mantiene en espera. durante siete semanas, hasta el 23 de octubre, mientras AstraZeneca lucha por proporcionar datos adicionales solicitados por la FDA.

- **9 de noviembre de 2020:** Pfizer supera a AstraZeneca para convertirse en la primera gran empresa farmacéutica en anunciar los resultados de sus ensayos clínicos de fase III. La compañía dice que su vacuna tiene una efectividad superior al 90%, lo que aumenta la presión sobre AstraZeneca para demostrar que su vacuna también es altamente efectiva.

- **19 de noviembre de 2020:** los investigadores de Oxford publican más datos en The Lancet que muestran que la vacuna que están desarrollando con AstraZeneca provoca una fuerte respuesta inmunitaria en los adultos mayores. El hallazgo es importante porque los ancianos tienen mayor riesgo de contraer COVID-19.

- **23 de noviembre de 2020:** AstraZeneca y la Universidad de Oxford anunciaron los resultados iniciales de los ensayos clínicos de fase III en el Reino Unido, Brasil y Sudáfrica. El estudio encuentra que la vacuna es segura y efectiva, pero los resultados se presentan de manera confusa, combinando datos de ensayos realizados con diferentes protocolos y dando tres cifras de eficacia diferentes. La compañía dice que un "promedio combinado" mostró que la vacuna tenía una efectividad de alrededor del 70%. Pero en un pequeño subgrupo del ensayo clínico, en el que los participantes recibieron media dosis de la vacuna y luego un refuerzo de dosis completa semanas después, la vacuna pareció tener un 90% de efectividad. En el grupo más grande que recibió dos dosis completas, solo tuvo una efectividad del 62%. La presentación desconcierta a los virólogos. La confusión se profundiza cuando los funcionarios de AstraZeneca les dicen a los periodistas que el régimen de media dosis es el resultado de un error. Los científicos de Oxford inicialmente disputaron esta caracterización, señalando que sabían que le estaban dando a la gente medias dosis. También surge que el subgrupo que recibió este régimen de media dosis no incluyó a nadie mayor de 55 años, lo que genera más dudas sobre cómo interpretar las altas cifras de eficacia del estudio. Algunos expertos también cuestionan si se incluyeron suficientes adultos mayores en cualquiera de los regímenes para medir la efectividad en los mayores de 65 años.

- **30 de diciembre de 2020:** el Reino Unido se convierte en el primer país en aprobar la vacuna de AstraZeneca .

- **25 de enero de 2021:** AstraZeneca enfurece a los políticos de la Unión Europea cuando les informa que podrá suministrar al bloque de 27 naciones sólo alrededor del 40% de las dosis de vacuna que prometió durante el primer trimestre debido a problemas de fabricación en sus instalaciones europeas. Los políticos insisten en que AstraZeneca debe ceñirse a su contrato. Soriot aviva las tensiones al insistir en que el contrato obliga a AstraZeneca solo a hacer el "mejor esfuerzo" para cumplir con los objetivos mencionados en el contrato. La UE considera imponer controles de exportación para evitar que se envíen dosis de AstraZeneca al Reino Unido u otros países hasta que Europa reciba las dosis prometidas.

- **28 de enero de 2021:** Los reguladores de salud alemanes cuestionan si hay suficientes datos sobre qué tan bien funciona la vacuna de AstraZeneca en personas mayores de 65 años para aprobar su uso en ese grupo de edad. Un panel asesor del gobierno recomienda no aprobar la vacuna para adultos mayores. Mientras tanto, el presidente francés, Emmanuel Macron, dice a los periodistas que la vacuna AstraZeneca es "casi ineficaz" en los mayores de 65 años. La compañía insiste en que la vacuna es eficaz para los adultos mayores y que los datos del uso inicial en el Reino Unido respaldan esta afirmación.

- **29 de enero de 2021:** la Autoridad Europea de Medicamentos aprueba la vacuna AstraZeneca para su uso en todos los adultos, pero agrega que los ensayos clínicos iniciales no incluyeron suficientes personas mayores de 55 años para estar seguros de la efectividad en ese grupo de edad.

- **3 de febrero de 2021:** Oxford y AstraZeneca publican más datos de ensayos clínicos que muestran que una sola dosis de la vacuna reduce la transmisión del coronavirus en aproximadamente dos tercios y que tiene una efectividad del 76% para prevenir el COVID-19 sintomático. Los ensayos también encontraron que es más eficaz retrasar la segunda dosis de la vacuna durante 12 semanas en lugar de administrar antes.

- **5 de febrero de 2021:** los científicos de Oxford dicen que la vacuna es eficaz contra la variante B.117 "UK" del coronavirus.

- **8 de febrero de 2021:** científicos de Sudáfrica dicen que la vacuna AstraZeneca parece ser ineficaz para prevenir el COVID-19 de leve a moderado entre las personas infectadas con la variante B.1.351 que surgió por primera vez en ese país. Como resultado, el país detiene el lanzamiento de la vacuna. AstraZeneca dice que cree que la vacuna probablemente todavía previene casos graves de la enfermedad.

- **15 de febrero de 2021:** la Universidad de Oxford comienza un ensayo clínico para probar cómo funciona la vacuna AstraZeneca en los niños.

- **22 de febrero de 2021:** El Serum Institute of India, socio de fabricación de AstraZeneca en ese país y para muchos otros países de ingresos bajos y medios, dice

que el gobierno indio le ha pedido que priorice la producción para India, posiblemente retrasando las dosis para otros países.

- **4 de marzo de 2021:** Italia bloquea un envío de la vacuna AstraZeneca con destino a Australia mientras se intensifica la lucha de la compañía con Europa por la falta de suministros allí.

- **5 de marzo de 2021:** En un cambio radical, el gobierno alemán acuerda autorizar la vacuna AstraZeneca para su uso en personas mayores de 65 años.

- **11 de marzo de 2021:** Dinamarca detiene el lanzamiento de la vacuna AstraZeneca debido a preocupaciones sobre la peligrosa coagulación de la sangre entre algunos de los que recibieron la vacuna. Las acciones de la compañía caen con las noticias. AstraZeneca insiste en que el número de incidentes de coagulación reportados hasta ahora es en realidad menor de lo que ocurriría normalmente para los millones de personas que han recibido la vacuna en todo el mundo hasta ahora.

- **16 de marzo de 2021:** Varios otros países europeos, incluidos Alemania, Francia e Italia, también suspenden la distribución de la vacuna AstraZeneca en medio de preocupaciones sobre la coagulación, incluso cuando la Agencia Europea de Medicamentos y la Organización Mundial de la Salud dicen que la vacuna es segura. Las suspensiones son otro golpe a los ya vacilantes esfuerzos de vacunación en Europa. Mientras tanto, Tailandia se suma a la lista de países que han autorizado la vacuna.

- **18 de marzo de 2021:** después de una revisión, la Agencia Europea de Medicamentos concluye que la vacuna AstraZeneca es "segura y eficaz", lo que abre el camino para que se reanude el lanzamiento de la vacuna en Europa.

- **22 de marzo de 2021:** AstraZeneca anuncia los resultados provisionales de su ensayo clínico en EE. UU., diciendo que la vacuna fue 79% efectiva contra COVID-19 sintomático y 100% efectiva contra hospitalización y muerte. La compañía espera que los resultados del estudio de 30.000 personas en los Estados Unidos y Sudamérica finalmente despejen el camino para que la vacuna sea aprobada por la FDA de los Estados Unidos.

- **23 de marzo de 2021:** en un acontecimiento sorprendente, el Instituto Nacional de Alergias y Enfermedades Infecciosas de EE. UU. (NIAID) emite una declaración de advertencia a media noche que AstraZeneca pudo haber utilizado datos "obsoletos" que proporcionaron una imagen "incompleta" de su eficacia. La agencia hace el anuncio después de que la Junta de Monitoreo de Datos y Seguridad, un grupo de expertos independientes que ayudan al NIAID a supervisar los ensayos de la vacuna COVID-19 que han recibido apoyo del gobierno de EE. UU., Escribieron una carta mordaz tanto al NIAID como a AstraZeneca diciendo que la compañía pudo haberlo

hecho deliberadamente. Intentó que sus resultados parecieran mejores de lo que eran. AstraZeneca dice que los resultados provisionales se basaron en una fecha de corte "pre especificada" para los datos del 17 de febrero y que una revisión de datos más recientes mostró resultados que eran "consistentes" con las cifras que utilizó en su comunicado de prensa. La controversia daña gravemente la credibilidad ya maltrecha de AstraZeneca, sobre todo con el gobierno de Estados Unidos.

- **25 de marzo de 2021:** AstraZeneca publica los resultados actualizados de su ensayo clínico en EE. UU. , que incluyen datos más actualizados, que muestran que su vacuna tiene una efectividad del 76%. Aún así, puede que no sea suficiente para reparar la reputación de la vacuna en los EE. UU., y muchos se preguntan si el país, que ya aprobó tres vacunas contra el coronavirus, incluso necesitará la inyección de AstraZeneca.

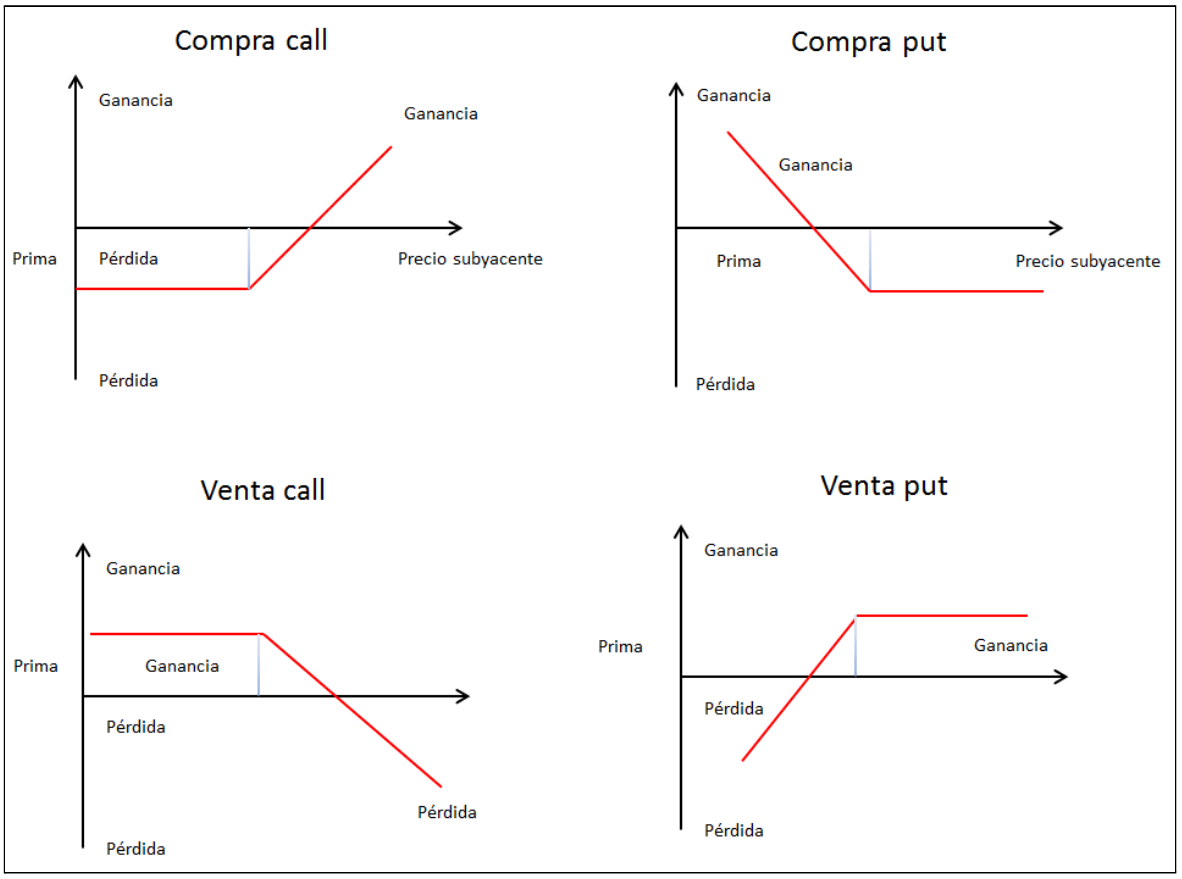
- **26 de marzo de 2021:** la UE autoriza a una planta de fabricación propiedad de la empresa Halix cerca de la ciudad holandesa de Leiden para comenzar a producir dosis de la vacuna AstraZeneca para su distribución en el bloque. Pero la planta es controvertida porque la empresa ha querido enviar las dosis producidas allí al Reino Unido.

- **30 de marzo de 2021:** algunas ciudades y regiones alemanas, incluidas Múnich y Berlín, suspenden la distribución de la vacuna de AstraZeneca a personas menores de 60 años debido a las continuas preocupaciones sobre incidentes inusuales de coagulación sanguínea potencialmente relacionados con la inyección. Canadá también deja de administrar la vacuna a menores de 55 años debido a temores similares.

- **7 de abril de 2021:** el regulador médico de la Unión Europea, la Agencia Europea de Medicamentos (EMA), dice que las muy raras condiciones de coagulación de la sangre que han afectado a un puñado de personas después de recibir la vacuna AstraZeneca probablemente sean causadas por el pinchazo, y ordena a la empresa que realice más pruebas para investigar el motivo exacto. Pero dice que, dados los mayores riesgos del COVID-19 en sí y la falta de alternativas hasta ahora en Europa, la vacuna debe seguir administrando. Mientras tanto, el regulador británico, la Agencia Reguladora de Medicamentos y Productos Sanitarios (MHRA), dice que, si bien aún no se puede estar seguro del vínculo, recomienda que los adultos sanos menores de 30 años reciban una vacuna diferente en lugares donde está fácilmente disponible. Es probable que la noticia haga que las personas se muestren más reacias a tomar la vacuna, que ya ha tenido dudas sobre su eficacia, seguridad y suministro.

Apéndice B - Glosario sobre opciones financieras

Una de las dificultades más grandes cuando comenzamos a estudiar las opciones es que casi toda la bibliografía de calidad se encuentra en inglés y las opciones tienen un vocabulario específico para este tipo de activos, por lo que resulta importante conocer el significado de cada uno de los términos utilizados.



Según el libro de Hull (2012), los siguientes conceptos resultan ser los más importantes a la hora de comprender el mundo de estos derivados financieros:

- **Activo Subyacente:** Activo financiero o índice de activos financieros, que servirá de referencia como objeto del contrato de opciones. Término usado en todos los mercados de derivados.
- **Apalancamiento:** Uso de una pequeña cantidad de dinero de la cuenta del inversor, aceptando las pérdidas o ganancias en función del valor real de la inversión, que es mucho mayor.
- **Asignación / Assignment:** Aviso por el que se obliga a vender en el caso de una opción call o comprar en el caso de una put el activo subyacente a un precio de strike específico.
- **Ask:** Precio más bajo al cual el vendedor ofrece vender la opción. Precio de oferta. Precio aplicado en las órdenes de compra.
- **At the money / En el dinero:** Cuando el precio de ejercicio de la opción es igual al precio de mercado del activo subyacente.
- **Beta:** es una medida de la relación entre el movimiento de un activo individual y el movimiento del mercado en su totalidad.

- **Bid:** es el precio más alto al cual un comprador está dispuesto a comprar una opción. Precio de demanda. Precio aplicado en las órdenes de venta.
- **Break-Even:** Nivel de precio del subyacente, a partir del cual una opción entre en beneficios, teniendo en cuenta los costes o ingresos por primas.
- **Cadena de Opciones / Options Chain:** La cadena de opciones es un listado que nos muestra todos los contratos disponibles con los que podemos operar, en función del precio strike y de la fecha de expiración. Cada acción o índice (el subyacente) tiene su cadena particular.
- **Call:** es un contrato de opción que otorga a su propietario el derecho pero no la obligación de comprar el activo subyacente a un precio de ejercicio determinado, en una fecha determinada. Para el vendedor de una call el contrato representa la obligación de de vender el activo subyacente si la opción es ejercida.
- **Cerrar un contrato:** Realizar una operación opuesta a la que dio origen al contrato (compra de contrato idéntico al que tenemos vendido o venta de uno idéntico al que tenemos comprado). Son idénticos si coinciden en clase, tipo y serie.
- **Charm o Delta Decay:** Variable que nos indica cuánto cambiará el Delta a medida que pase un día de negociación en el contrato. Una de las griegas.
- **Clase de contrato:** Contrato de opción referidos al mismo activo subyacente.
- **Closing price:** es el precio al cual la transacción es realizada.
- **Contract Size:** es la cantidad del activo subyacente cubierto por el contrato de opción. Normalmente una opción representa 100 acciones.
- **Contrato de Opción:** Es un contrato normalizado, por el que el comprador, por el pago de una prima, adquiere el derecho, no la obligación, de comprar, en el caso de una Call, o vender, en el caso de una Put, el activo subyacente a un precio pactado (precio de ejercicio), en una fecha determinada (fecha de liquidación). Mientras que el vendedor de un contrato de opción, a cambio del cobro de una prima, adquiere la obligación de vender, en el caso de una Call, o comprar, en el caso de una Put, el activo subyacente a un precio pactado en una fecha determinada, siempre que el comprador exija el ejercicio de la opción.
- **Covered call:** es una estrategia por la cual se venden opciones call sobre unas acciones que se encuentran en nuestra cartera por valor equivalente.
- **Delta:** Variable que representa la variación del precio de una opción cuando el precio del activo subyacente varía su precio. Una de las griegas.
- **Dinero / Moneyness:** Distancia entre el precio del subyacente y el precio de ejercicio (Strike). Según la distancia entre estos precios, podemos clasificar las opciones en In-the-Money (ITM), At-the-Money ATM) y Out-of-the-Money (OTM).

Moneyness in an Option		
Price Differential	**Call Option**	**Put Option**
Stock Price > Strike Price	In-the-money	Out-of-money
Stock Price = Strike Price	At-the-money	At-the-money
Stock Price < Strike Price	Out-of-money	In-the-money

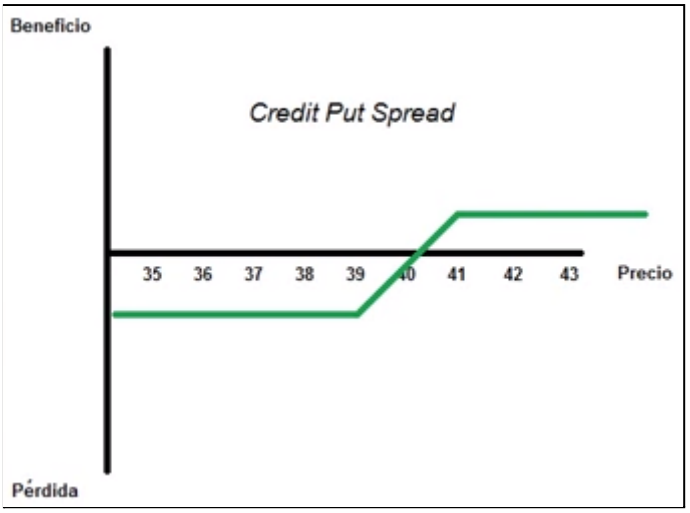
- **Ejecución de una orden:** Acto por el que se da cumplimiento a la orden de compra o de venta.
- **Ejercicio:** Acto por el que el comprador de una opción hace uso de su derecho a comprar o vender el activo subyacente del contrato. En caso de que el viernes sea festivo se pasa el vencimiento al jueves.
- **Estrategias con opciones:** Toma de una posición sobre un activo subyacente, mediante el uso o la combinación de varios tipos de opciones e incluso el propio activo.
- **Expiration Date:** es la fecha en que la opción y su derecho de ejercicio desaparece.
- **Fecha de ejercicio:** Día en el que la opción puede ser ejercida y a partir del cual, desaparece la opción. Suele ser los terceros viernes de cada mes, aunque existen opciones con vencimiento semanal, como veremos. En caso de que el viernes sea festivo se pasa el vencimiento al día hábil anterior.
- **Fecha de liquidación:** Día en el que se liquida el contrato de opción.
- **Fecha de vencimiento:** Último día en el que contrato de opción vence y se realiza la liquidación.
- **Gamma:** es una medida de la tasa de cambio de la delta de la opción por unidad de cambio del precio del activo subyacente.
- **Garantías / Margins:** Capital mínimo que se solicita como cobertura de riesgo de incumplimiento de las obligaciones contraídas en los contratos de opciones. Varían según los brokers.
- **Griegas / Greeks:** Son una serie de variables que afectan al precio de una opción y que están denominadas con letras griegas (Delta, Gamma, Vega, Theta, Rho, Charm, Color, Speed, Weezu).
- **Horquilla:** Diferencia entre el precio Bid (Venta-Demanda) y el precio Ask (Compra-Oferta).
- **Interés Abierto / Open Interest:** Número de contratos vivos de opciones pendientes en una serie determinada del activo subyacente. Son el total de contratos no cerrados o liquidados.
- **In the money / Dentro de dinero:** Opciones con valor intrínseco. Una opción call está “in the money” cuando el precio del activo está por encima del precio de ejercicio. Una opción put está “in the money” cuando el precio del activo subyacente está por debajo del precio de ejercicio.
- **Intrinsic Value:** es la diferencia entre el precio del activo subyacente y el precio de ejercicio. La caída está cuantificada por Theta.
- **Liquidación a Vencimiento**: Cumplimiento del contrato a la fecha de liquidación. Si la liquidación es por entrega, supone la transmisión del activo subyacente a cambio del precio que corresponda. Si es por diferencias, se transmite el dinero correspondiente a la diferencia entre el precio de ejercicio y el precio de liquidación al vencimiento.
- **Liquidación por Diferencias:** Forma de liquidación de un contrato, que puede sustituir la obligación de comprar y vender un activo subyacente. Se transfiere el efectivo correspondiente a la diferencia entre el precio pactado en el contrato (precio de ejercicio) y el precio de liquidación a vencimiento.

- **Liquidación por Entrega:** El cumplimiento del contrato en la fecha de liquidación, se realiza mediante la entrega del activo subyacente, entre el obligado a vender y el comprador, a cambio del precio pactado en el contrato (precio de ejercicio).
- **Margin Requirement:** es el capital mínimo requerido para respaldar una inversión.
- **Naked option:** es una posición corta con opciones que no está totalmente garantizada si le ejercen la opción. Una posición call corta está descubierta cuando no posee una posición larga en el activo subyacente o no se encuentra cubierto por otra operación con derivados.
- **Opción Call / Call Option:** Modelo tipo de contrato de opciones. El comprador adquiere el derecho, no la obligación, de comprar el activo subyacente al precio de ejercicio y el vendedor adquiere la obligación, a vender dicho activo subyacente, si el comprador ejercita su derecho.
- **Opción estilo americano:** Opciones que pueden ejercerse en cualquier momento antes de la fecha de vencimiento.

Tipo de opción	Americana	Europea
Ejercicio	En cualquier momento	Solo en el vencimiento

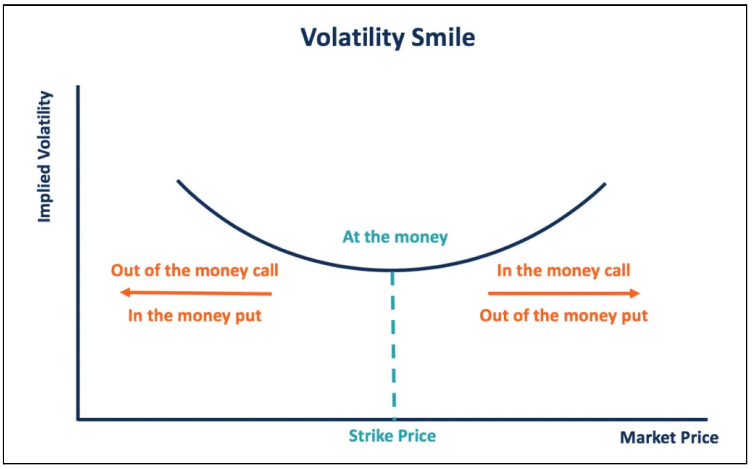
- **Opción estilo europeo:** Opciones que solo se ejercen en la fecha de vencimiento.
- **Opción financiera:** Derecho u obligación sobre un activo subyacente financiero a una fecha determinada.
- **Opción Put / Put Option:** Modelo tipo de contrato de opciones. El comprador adquiere el derecho, no la obligación, de vender el activo subyacente al precio de ejercicio. Y el vendedor adquiere la obligación de comprar dicho activo subyacente si el vendedor ejerce su derecho.
- **Open Interest:** es el número total de contratos de opciones pendientes en una serie determinada del activo subyacente.
- **Orden institucional / Smart Money**: Son órdenes masivas realizadas por instituciones (hedge funds, fondos de pensiones o de inversión, …) que toman posiciones con gran número de contratos al tener gran poder de compra y de venta. Suelen ser posiciones a corto plazo en el caso de especulación o a más largo plazo como cobertura.
- **Out the money / Fuera de dinero:** Opción que no tiene valor intrínseco. El precio de la opción está constituido solo por valor extrínseco. Una opción call está "out the money" cuando el precio del activo subyacente está por debajo del precio de ejercicio. Una opción put está está "out the money" si el precio del activo está por encima del precio de ejercicio de la opción. Para el vendedor de opciones put el contrato representa la obligación de comprar el activo subyacente si la opción es ejercida.
- **Precio de cierre:** Precio al que se realiza la opción.
- **Precio de compra:** Precio al que se contrata la prima de la opción en el mercado, suele diferir del precio teórico.
- **Precio de ejercicio / Strike Price:** Es el precio pactado en el contrato de opción. Precio al que el comprador de una opción puede comprar (Call) o vender (Put), el activo subyacente. Precio al que el vendedor de una opción, se obliga respectivamente a vender o comprar, en el caso de que el comprador ejerza su derecho.

- **Precio teórico:** Es el valor técnico de una opción. Se compone de valor intrínseco y valor extrínseco.
- **Prima / Premium:** Precio de la opción. Importe que el comprador de una opción paga al vendedor. En el caso de opciones sobre acciones, la prima se cotiza por acción y sabiendo que un contrato representa 100 acciones, debemos multiplicar el precio de la prima por 100 acciones para determinar el precio del contrato.
- **Primer día de cotización:** Es el primer día de negociación del contrato. Siempre será un día hábil.
- **Ratio C/P Open interest:** indica la cantidad de contratos call y put pendientes de negociar para un activo subyacente.
- **Ratio Call/Put:** indica la cantidad de contratos call y put para un activo subyacente.
- **Rho:** Variable que mide el cambio del precio de una opción, cuando el tipo de interés cambia un punto porcentual. Es otra griega actualmente con poca relevancia por los tipos de interés en el mercado.
- **Saldo / Pay-off:** Es el pago que recibe el comprador de una opción a fecha de vencimiento.
- **Serie:** Dentro de una clase de contrato, son los que tienen el mismo precio de ejercicio y la misma fecha de vencimiento.
- **Spread**: Estrategia mediante combinación de opciones básicas y un plan de trading establecido con capacidad de ajuste de los spread. Es una de las estrategias más conocidas, se trata de la compra y la venta del mismo tipo de opción y/o el propio subyacente. Por ejemplo, Straddle, Covered Call, Put Calendar, los Credit Spread, se trata de Spread vendidos, los Débit Spread son los Spread comprados



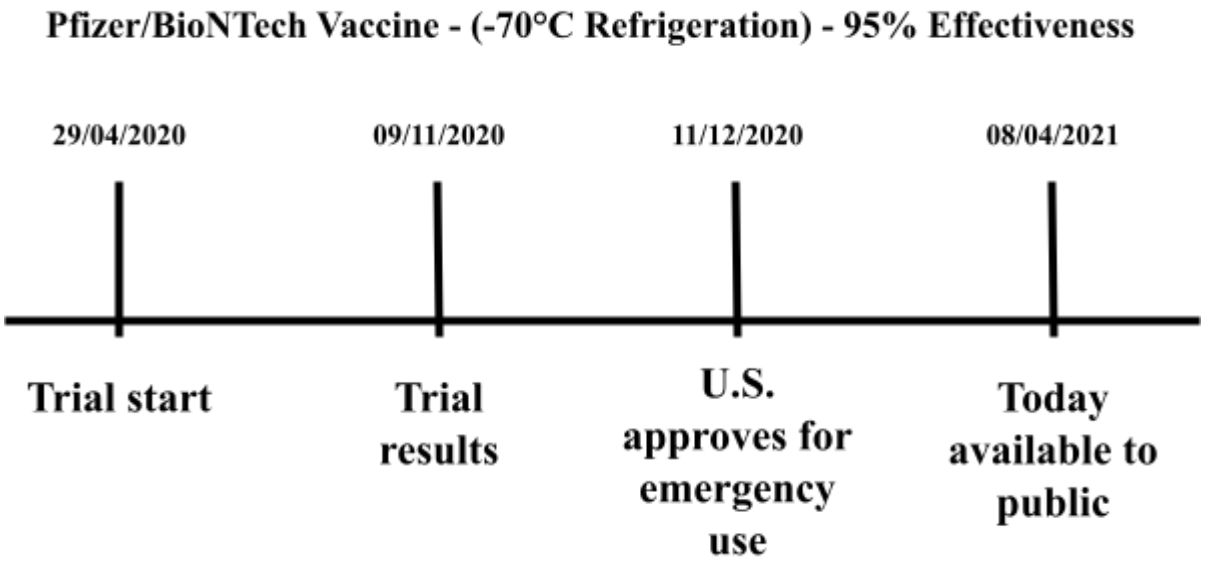
- **Tamaño del contrato:** Nominal del contrato o cantidad del activo subyacente cubierto por el contrato de opción. Normalmente una opción sobre acciones representa 100 acciones.
- **Theta:** Es una medida de la tasa de cambio de valor teórico de una opción por unidad de cambio en el tiempo de la fecha de expiración.
- **Tiempo a vencimiento:** Es una variable muy importante en el valor de las opciones, en la forma que dicho valor se va perdiendo con el paso del tiempo.

- **Time Decay:** es el término usado para describir cómo cambia el valor teórico se reduce con el paso del tiempo
- **Tipos de opciones:** Opciones de compra (CALL) y opciones de venta (PUT). Una opción call está in the money cuando el precio del activo está por encima del precio de ejercicio. Una opción call está out the money cuando el precio del activo subyacente está por debajo del precio de ejercicio. Una opción put está está out the money si el precio del activo está por encima del precio de ejercicio de la opción. Una opción put está in the money cuando el precio del activo subyacente está por debajo del precio de ejercicio.
- **Unidad de negociación:** Es el contrato de opción.
- **Valor Extrínseco / Time Value:** Valor de una opción determinado por las afecciones de una serie de factores variables que afectan al precio de la prima durante su vida hasta el vencimiento, es decir, se encuentra basado entre otras cosas, en el tiempo a vencimiento, la volatilidad, tipo de interés, Estos factores están definidos por las denominadas "griegas". Su valor queda determinado por la diferencia entre el precio de una opción y su valor intrínseco. Se conoce como el valor temporal
- **Valor Intrínseco / Intrinsic Value:** Depende exclusivamente del precio de la acción y del precio del strike. Su valor se determina por diferencia de precio entre el strike (precio de ejercicio) y el precio del subyacente. Se conoce como el valor real.
- **Vega:** es la medida de la tasa de cambio en el valor teórico de una opción para un cambio de una unidad de la volatilidad.
- Vega: es la medida de la tasa de cambio en el valor teórico de una opción para un cambio de una unidad de la volatilidad. Otra griega.
- **Volatilidad / Volatility**: es una medida de la fluctuación del precio del activo. Es la desviación estándar anualizada de los cambios de precios diarios de un activo subyacente.
- **Volatilidad histórica / Historical Volatility:** Calculada a partir de los datos históricos del activo subyacente. Es el comportamiento del mercado en el pasado y dependerá del período de tiempo escogido y el intervalo de precios escogidos.
- **Volatilidad implícita / Implied Volatility:** Es el porcentaje de volatilidad que incorpora el precio de una opción en el mercado. Volatilidad determinada por el mercado que se incorpora al cálculo del valor teórico de una opción.



Apéndice C - Línea de tiempo de la fabricación de las vacunas contra la COVID-19

Noticia publicada por la compañía de asesoría financiera *Bloomberg*[19] en el transcurso del desarrollo de las vacunas contra la COVID-19 para observar las fases que tuvieron las vacunas americanas y la vacuna europea.



PFIZER-BIONTECH (BNT162B2)

Vacuna de ARN mensajero

La primera vacuna aprobada para su aplicación en el mundo y el reto de la ultra congelación.

País: Estados Unidos – Alemania

Vía de administración: Intramuscular

Dosis: 2

Intervalo de dosis: 21 días

Eficacia en fase 3: 95%

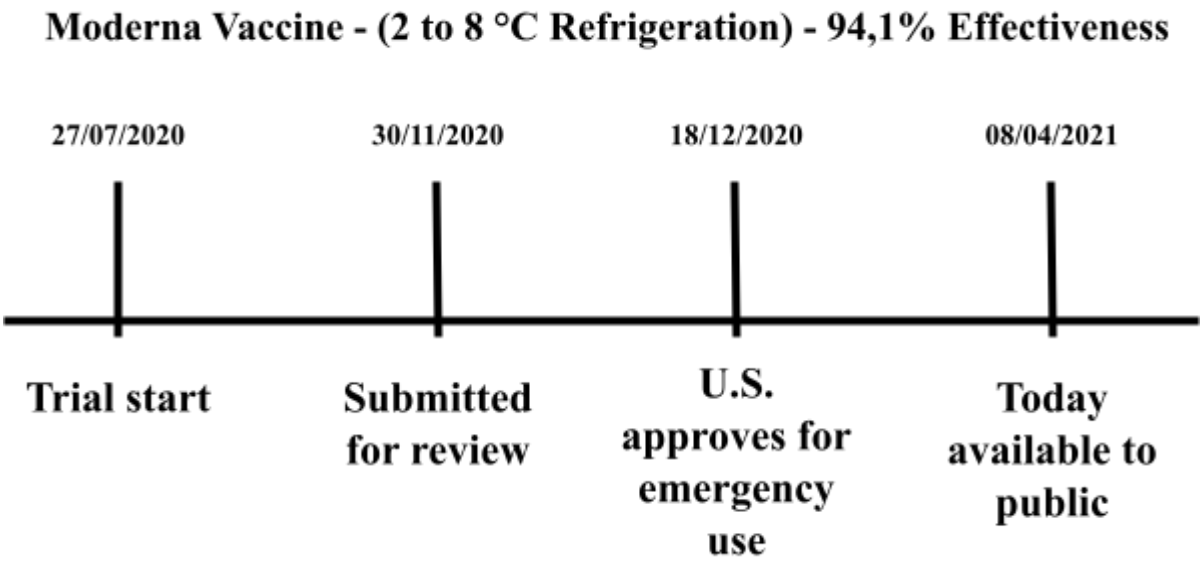
Eficacia contra enfermedad grave y muerte: 89%

Efectos adversos: Dolor, hinchazón y enrojecimiento en la zona inyectada; escalofríos, cansancio y dolor de cabeza en el resto del cuerpo. La mayoría fueron de leves a moderados.

Conservación: Ultra congelación (-80 grados). En congelación normal su vida útil es de 5 días.

Precio: $20 dólares por dosis.

[19] https://www.bloomberg.com/graphics/covid-vaccine-tracker-global-distribution/



MODERNA (ARNM-1273)

Vacuna de ARN mensajero

Vacuna con tecnología de vanguardia, pero que no necesita temperaturas tan frías, como la de Pfizer.

País: Estados Unidos

Vía de administración: Intramuscular

Dosis: 2

Intervalo de dosis: 28 días

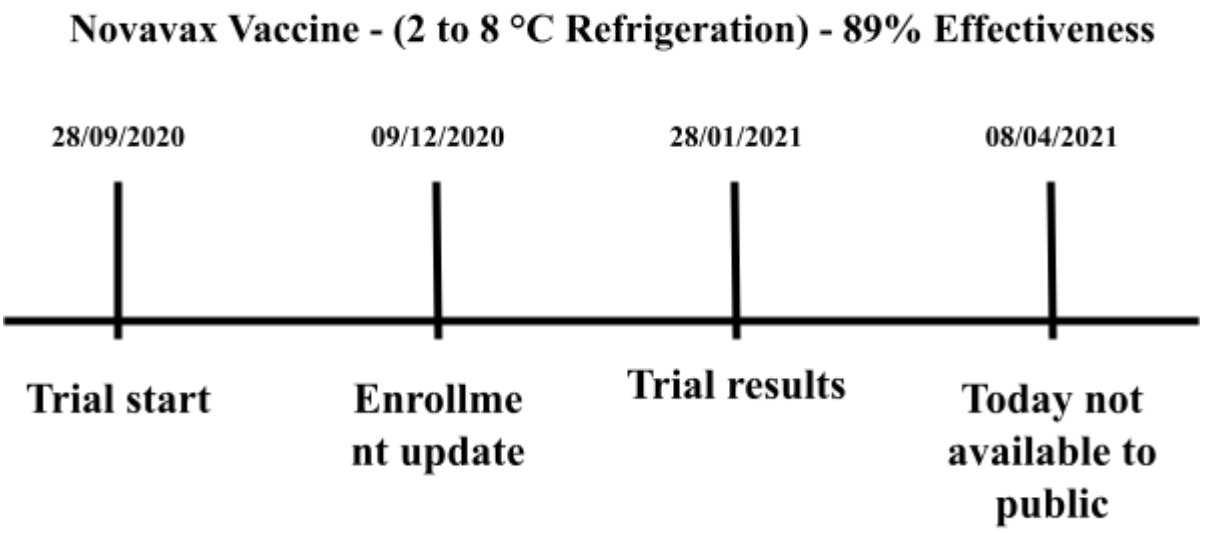
Eficacia en fase 3: 94.1%

Eficacia contra enfermedad grave y muerte: 100%

Efectos adversos: Dolor, hinchazón y enrojecimiento en la zona inyectada; escalofríos, cansancio y dolor de cabeza en el resto del cuerpo. La mayoría fueron de leves a moderados.

Conservación: 2-8 grados

Precio: $15-18 dólares por dosis.



NOVAVAX (NVX-COV2373)

Vacuna con Subunidades de proteína

Vacuna de características prometedoras en fase 3.

País: Estados Unidos

Vía de administración: Intramuscular

Dosis: 2

Intervalo de dosis: 21 días

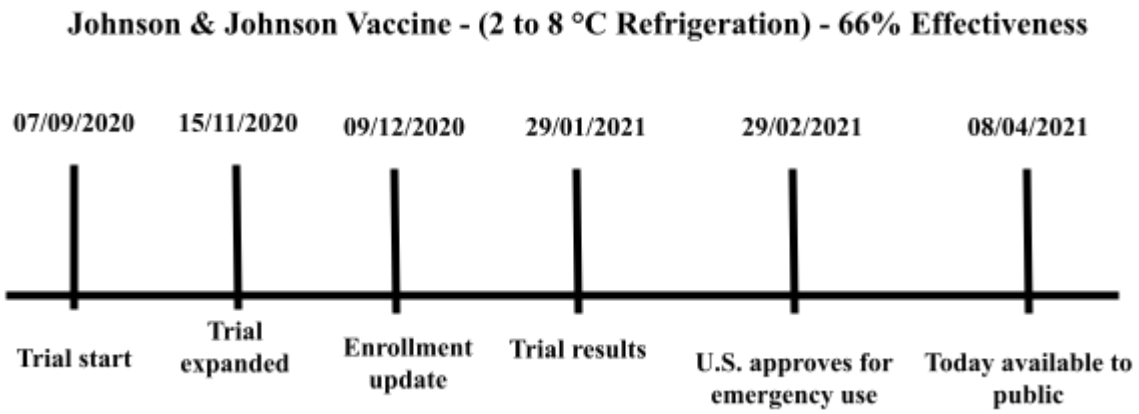
Eficacia en fase 3: 89.3%

Eficacia contra enfermedad grave y muerte: 100%

Efectos adversos: Dolor, hinchazón y enrojecimiento en la zona inyectada; escalofríos, cansancio y dolor de cabeza en el resto del cuerpo.

Conservación: 2-8 grados

Precio: Por determinar



JANSSEN – JOHNSON & JOHNSON (AD26.COV2-S)

Vacuna de adenovirus o vector adenoviral

De las pocas vacunas de una sola dosis. Económica y de fácil distribución.

País: Estados Unidos

Vía de administración: Intramuscular

Dosis: 1

Eficacia en fase 3: 66%

Eficacia contra enfermedad grave y muerte: 85%

Efectos adversos: Dolor, hinchazón y enrojecimiento en la zona inyectada; escalofríos, cansancio y dolor de cabeza en el resto del cuerpo. La mayoría fueron de leves a moderados.

Conservación: 2-8 grados

Precio: Menos de $10 dólares por dosis

Apéndice D -Métodos para la estimación de la densidad neutral al riesgo

Tabla 3: Métodos paramétricos para estimar DNR

Autor (año)	Tipo de método	Tipo de distribución y características
Abadir and Rockinger (1997)	Método de expansión	*CONFLUENT HYPERGEOMETRIC functions*
Abken, Madan, and Ramamurtie (1996a, 1996b)	Método de expansión	*Four-parameter HERMITE POLYNOMIALS*
Aparicio and Hodges (1998)	Método de distribución generalizado	*Beta function of the second kind*
Brenner and Eom (1997)	Método de expansión	*LAGUERRE POLYNOMIALS, corrections to gamma distribution*
Corrado (2001)	Método de distribución generalizado	*LAMBDA DISTRIBUTION*
Corrado and Su (1996)	Método de expansión	*GRAM–CHARLIER EXPANSION, normal distribution, two expansion terms*
Corrado and Su (1997)	Método de expansión	*Hermite polynomial with Gram–Charlier expansion*
De Jong and Huisman (2000)	Método de distribución generalizado	*Skewed Student t-distribution*
Giamouridis and Tamvakis (2001, 2002)	Método de expansión	*EDGEWORTH EXPANSION, lognormal distribution, two expansion terms*
Jarrow and Rudd (1982)	Método de expansión	*Edgeworth expansion, normal distribution, two expansion terms*
Jondeau and Rockinger (2001)	Método de expansión	*Hermite polynomial with Gram–Charlier expansion, restrictions added*
Longstaff (1995)	Método de expansión	*Edgeworth expansion, two expansion terms*
Melick and Thomas (1997)	Método mixto	*Three lognormal distributions*
Posner and Milevsky (1998)	Método de distribución generalizado	*JOHNSON FAMILY OF DENSITIES (see Johnson 1949 and Tadikamalla and Johnson 1982)*
Potters, Cont, and Bouchaud (1998)	Método de expansión	*Edgeworth expansion, single expansion term*

Ritchey (1990)	Método mixto	*Mixture of normal distributions*
Rubinstein (1998)	Método de expansión	*Edgeworth expansion, binomial distribution, two expansion terms*
Sherrick, Garcia, and Tirupattur (1995)	Método de distribución generalizado	*BURR-TYPE DISTRIBUTION (see Burr 1942)*
Sherrick, Irwin, and Forster (1992, 1996)	Método de distribución generalizado	*Burr XII distribution*
Young, Jabbour, Kramin, and Kramin (2001)	Método de expansión	*Edgeworth expansion, normal distribution, two expansion terms*

Fuente: Option-Implied Risk-Neutral Distributions and Risk Aversion (2004).

Tabla 4: Métodos no paramétricos para estimar DNR

Autor (año)	**Tipo de método**	**Tipo de distribución y características**
Aït-Sahalia and Lo (1998)	Método de kernel	*Kernel estimator in stock price, strike, maturity, interest rate, and dividends*
Andersen and Wagener (2002)	Método de ajuste de curvas	*Higher-order splines fitted to implied volatilities*
Aparicio and Hodges (1998)	Método de ajuste de curvas	*Cubic B-splines fitted to implied volatilities*
Bondarenko (2000)	Método de kernel	*Convolution of kernel and standard densities*
Branger (2002)	Método de máxima entropía	*Maximum entropy*
Brown and Toft (1999)	Método de ajuste de curvas	*Seventh-order splines fitted to implied volatilities*
Buchen and Kelly (1996)	Método de máxima entropía	*Maximum entropy with uniform and lognormal priors*
Campa, Chang, and Reider (1998)	Método de ajuste de curvas	*Cubic splines fitted to implied volatilities*
Härdle and Yatchew (2002)	Método de kernel	*Nonparametric least squares through option prices*
Hartvig, Jensen, and Pedersen (1999)	Método de ajuste de curvas	*Piecewise linear fit of log of the risk-neutral probability distribution*
Hayes and Shin (2002)	Método de ajuste de curvas	*Cubic splines fitted to implied volatilities across deltas*
Jackwerth (2000)	Método de ajuste de curvas	*Maximizing the smoothness of pointwise implied volatilities*
Malz (1997)	Método de ajuste de curvas	*Quadratic polynomials fitted to implied volatilities across deltas*

Mayhew (1995)	Método de ajuste de curvas	*Cubic splines fitted to implied volatilities*
Pritsker (1998)	Método de kernel	*Kernel estimator*
Rockinger and Jondeau (2002)	Método de máxima entropía	*Maximum entropy with normal, t, and generalized error distribution priors, added restrictions*
Rookley (1997)	Método de kernel	*Bivariate kernel in moneyness and time to expiration*
Rosenberg (1998, 2003)	Método de ajuste de curvas	*Bivariate polynomial fitted to log implied volatilities*
Rosenberg and Engle (2002)	Método de ajuste de curvas	*Polynomial fitted to log implied volatilities*
Rubinstein (1994)	Método de máxima entropía	*Maximum entropy with lognormal prior*
Rubinstein (1994)	Método de ajuste de curvas	*Minimum distance between discrete and lognormal distribution*
Shimko (1993)	Método de ajuste de curvas	*Quadratic polynomial fitted to implied volatilities*
Stutzer (1996)	Método de máxima entropía	*Maximum entropy with historical distribution as prior*

Fuente: Option-Implied Risk-Neutral Distributions and Risk Aversion (2004).

Tabla 5: Aplicaciones de Distribuciones Neutrales al Riesgo (DNR)

Autor (año)	**Descripción y características**
Andersen and Wagener (2002)	*Euribor interest rate futures around 11 September 2001 attack*
Bates (1991)	*S&P 500 around 1987 market crash*
Brenner, Eom, and Landskroner (1996)	*Implied foreign exchange rate from option prices only, not whole distribution*
Campa and Chang (1996, 1998)	*Foreign exchange around exits from the ERM*
Campa, Chang, and Refalo (1999)	*Brazilian real/U.S. dollar around Brazil's 1994–99 Real Plan*
Coutant, Jondeau, and Rockinger (2001)	*Interest rate distributions around the French 1997 snap election*
Gemmill and Saflekos (2000)	*Found that option-implied risk-neutral distributions do not anticipate FTSE 100 crashes and do not show pronounced bimodalities before elections*
Gereben (2002)	*New Zealand dollar/U.S. dollar around the 11 September 2001 attack*
Jondeau and Rockinger (2000)	*French franc/German mark exchange rate around the French 1997 snap election*
Leahy and Thomas (1996)	*Canadian foreign exchange around the 1995 Quebec sovereignty referendum*
Malz (1996)	*Found estimates of realignment probabilities in the European*

	Monetary System by using risk-reversal options
Mandler (2002)	*Euribor interest rates around the European Central Bank Governing Council meetings*
McCauley and Melick (1996)	*Yen/U.S. dollar and German mark/U.S. dollar by using risk reversal options*
Melick and Thomas (1997)	*Crude oil prices around the first Gulf War*
Mizrach (1996)	*British pound exchange rate around devaluation of the pound*
Söderlind and Svensson (1997)	*Options on bonds used to extract interest rates and inflation expectations*

Fuente: Option-Implied Risk-Neutral Distributions and Risk Aversion (2004).