

Modelación de las dinámicas, volatilidades e interrelaciones de los rendimientos del petróleo mexicano, BRENT y WTI

Modeling the Dynamics, Volatilities and Interrelations of the Mexican, Brent and WTI Oil Returns

Antonio Ruiz-Porras*
Javier Emmanuel Anguiano Pita**

Fecha de recepción: 15 II 2016

Fecha de aceptación: 06 VI 2016

Resumen

Estudiamos las dinámicas, volatilidades e interrelaciones de los rendimientos del petróleo mexicano (MME), Brent y WTI con doce modelos GARCH multivariados. Los resultados sugieren que: 1) la volatilidad de la MME es mayor que la del WTI y menor que la del Brent; 2) el modelo AR(1)-TGARCH(1,1) con una distribución t-de-Student multivariada es el que mejor describe los rendimientos; 3) existen algunas interrelaciones entre las volatilidades de los rendimientos y 4) las buenas y malas noticias tienen impactos asimétricos sobre las volatilidades. El estudio usa datos diarios de los precios spot del petróleo y de sus rendimientos para el periodo 03/01/2000-11/02/2016.

Clasificación JEL: Q40; C32; C52.

Palabras Clave: Rendimientos del petróleo. MME. Brent. WTI. Modelos GARCH Multivariados.

* Departamento de Métodos Cuantitativos. Universidad de Guadalajara, CUCEA. Dirección: Periférico Norte 799, Núcleo Universitario Los Belenes, 45100, Zapopan, Jalisco, México. Email: antoniop@ucea.udg.mx

** Universidad de Guadalajara, CUCEA. Dirección: Periférico Norte 799, Núcleo Universitario Los Belenes, 45100, Zapopan, Jalisco, México. Email: je.ptt@hotmail.com

Los autores agradecen al Sistema Geológico Mexicano/Secretaría de Economía por facilitarles las series usadas en este estudio. Asimismo, agradecen los comentarios de Raúl Alberto Ponce Rodríguez (UACJ) a la versión preliminar del mismo.

Abstract

We study the dynamics, volatilities and interrelations of the Mexican (MME), Brent and WTI oil returns with twelve multivariate GARCH models. The main results suggest that: 1) The volatility of MME is bigger than the one of the WTI, but smaller than the one of Brent. 2) The AR (1)-TGARCH (1,1) model with a multivariate t-Student distribution is the best one to describe the returns. 4) There are some interrelations among the volatilities of returns; and 4) good and bad news have asymmetric impacts on the volatilities. The study uses daily data of oil spot prices and their returns for the period 01/03/2000- 11/02/2016.

JEL Classification: Q40; C32; C52.

Keywords: Oil returns. MME. Brent. WTI. Multivariate GARCH models.

Introducción

En la actualidad, el petróleo crudo es el recurso natural no renovable más importante en el mundo. El petróleo y sus derivados proveen energía, insumos y productos, vitales para las sociedades contemporáneas. En el nivel mundial, el petróleo es la fuente de energía más usada debido a su alta densidad energética, a su fácil transportación y a su relativa abundancia (Hilyard, 2012). La Organización de Países Productores de Petróleo (OPEC, por sus siglas en inglés) estima que el petróleo provee aproximadamente el 30 por ciento de la oferta mundial de energía primaria¹. Además, el petróleo y sus derivados se usan extensamente en la industria, los transportes, los hogares y los productos petroquímicos.

La importancia económica del petróleo también es considerable para la economía global. El petróleo es el commodity más extenso y activamente comercializado en el mundo (Fan y Li, 2015). Solamente durante los años 2015 y 2016, la demanda mundial de petróleo ha sido estimada en 92.92 y 94.17 millones de barriles diarios (OPEC, 2016). Por esta razón, los precios y rendimientos petroleros son monitoreados constantemente por los agentes económicos y financieros y por los hacedores de políticas y los analistas. De hecho, hay quienes argumentan que las dinámicas del petróleo explican en buena medida el comportamiento de la economía global (Hamilton, 1983; Morck, 1989; Fan y Li, 2015).

La relevancia del petróleo ha promovido el desarrollo de estudios para describir y analizar los rendimientos del mismo (i.e., las tasas de variación de los precios). Estos estudios suelen justificarse argumentando que las volatilidades de los

¹ Las estimaciones de la contribución del petróleo a la oferta mundial de energía son, para los años 2010 y 2020, 31.9 y 29.6 por ciento, respectivamente (OPEC, 2014).

rendimientos inducen los siguientes efectos: 1) variaciones en la producción, los rendimientos bursátiles, las tasas de interés de los países consumidores y en los términos de intercambio²; 2) inestabilidad financiera en los países productores³, 3) efectos negativos sobre la inversión y el crecimiento económico⁴ y 4) discrepancias entre los niveles óptimos y observados en el uso y conservación de energía por parte de los consumidores y las industrias⁵.

Las razones mencionadas justifican el estudio de los rendimientos del petróleo en la literatura. En México, dicho estudio se justifica, en añadidura a las mencionadas razones, porque los ingresos petroleros integran buena parte de las exportaciones totales del país⁶. Asimismo, se justifica porque dichos ingresos proveen más del 29.7 por ciento del total del presupuesto de gasto público (SHCP, 2015). En este contexto, puede explicarse porque los indicadores del mercado de petróleo spot⁷, junto con los cambiarios y los monetarios, son los más monitoreados en el país. Asimismo, puede explicarse porque la Reforma Energética fue la primera reforma estructural promulgada en este decenio (20 de diciembre de 2013).

Económicamente, muchos esfuerzos han sido desarrollados para describir y analizar las series de rendimientos del petróleo. Estos esfuerzos se explican porque las mencionadas series tienen comportamientos muy complejos de modelar, mediante técnicas tradicionales (véase Fattouh, 2007; Bashiri-Behmiri y Manso, 2013; Fan y Li, 2015). Las mencionadas series suelen manifestar comportamientos no lineales, clusters de volatilidad, volatilidades no constantes, shocks informacionales asimétricos, curtosis excesivas y distribuciones no normales. Por estas razones, los modelos de series de tiempo de la familia

² Hamilton (1983), Sadorsky (1999), Papapetrou (2001) y Backus y Crucini (2000) muestran los efectos que tiene la volatilidad del petróleo, respectivamente, sobre la producción agregada, los rendimientos bursátiles, las tasas de interés y los términos de intercambio. En el contexto latinoamericano, destacan los estudios de Sánchez-Albavera y Vargas (2005) y Lorenzo-Valdés, Durán-Vázquez y Armenta-Fraire (2012).

³ Iranzo (1993) explica que las caídas de los ingresos petroleros de los países productores durante 1959 y 1960 promovieron las reuniones que culminaron con la creación de la OPEC a finales de 1960. Más aún, este autor explicita que la OPEC se constituyó “teniendo como objetivo fundamental lograr la estabilización de los precios del petróleo” (Iranzo, 1993: 212).

⁴ Ferderer (1996) y Guo y Kliesen (2005) indican que la volatilidad del petróleo introduce incertidumbre, retrasa la inversión e induce reasignaciones costosas de recursos entre los sectores de la economía.

⁵ Véase Regnier (2007) para una explicación detallada de las vinculaciones entre la volatilidad de los precios del petróleo y la conservación de los energéticos.

⁶ En los años 2014 y 2015, las exportaciones petroleras contribuyeron, respectivamente, con el 9 y 6 por ciento del total de exportaciones. Así, las exportaciones petroleras equivalieron a 36,049 y 23,432 millones de dólares.

⁷ Los precios y rendimientos del mercado spot son aquellos vinculados a contratos que son comprados o vendidos en un plazo de tiempo muy corto y que se hacen efectivos de modo inmediato.

ARCH/GARCH se han utilizado con frecuencia para analizar y describir dichas series⁸.

Estadísticamente, la gran mayoría de los modelos ARCH/GARCH usados en la modelación de las series del petróleo son de tipo univariado. Son modelos que asumen que las dinámicas de las series de los distintos tipos de petróleo no tienen relación entre sí. Por tanto, no permiten analizar las potenciales interrelaciones entre las volatilidades de los distintos tipos de crudo que coexisten en el mercado. Particularmente, si se asume que la Mezcla Mexicana de Exportación (MME) es un sustituto cercano de otros tipos de petróleo que se comercian en los mercados internacionales; el uso de modelos univariados podría restringir el entendimiento de las dinámicas de las series mexicanas.

En este artículo se analizan y describen las dinámicas, volatilidades e interrelaciones de los rendimientos del petróleo mexicano y de los tipos de petróleo usados como referencia en el mercado global spot. Particularmente, se usan doce modelos GARCH multivariados con fines de modelación de las series de rendimientos del petróleo. La investigación se complementa con estadísticas descriptivas, pruebas de raíz unitaria y pruebas de efectos ARCH. La muestra incluye los precios spot de cierre diarios del barril de petróleo de los tipos mexicano (MME), del Mar del Norte (Brent) y Western Texas Intermediate (WTI), para el periodo del 03 de enero de 2000 al 11 de febrero de 2016.

La investigación complementa a la literatura referida a la modelación y análisis de los rendimientos del petróleo, desde una perspectiva multivariada. Particularmente, aquí se modelan las dinámicas, las volatilidades y las interrelaciones entre los rendimientos de los tres tipos de petróleo mencionados. Si bien existen estudios que analizan las interrelaciones de los rendimientos del petróleo mexicano con algunas variables económicas y financieras; aquí, se enfatizan sus interrelaciones con los tipos de petróleo de referencia usados en el mercado global. Además, los modelos se usan para estudiar las distribuciones de las perturbaciones y los efectos de “shocks informacionales” sobre la volatilidad de las series.

El artículo está organizado en cinco secciones. La sección 1 caracteriza el mercado global del petróleo y revisa la literatura referida a la modelación de los rendimientos del petróleo. La sección 2 explica la metodología de análisis. La sección 3 describe la base de datos e incluye el análisis estadístico; esta sección incluye las estadísticas descriptivas, las pruebas de raíz unitaria y las pruebas de efectos ARCH. La sección 4 incluye los ejercicios de modelación y análisis de

⁸ Los modelos de la familia ARCH/GARCH suponen una estructura dinámica autorregresiva de la varianza condicional de las series. En este contexto, no sobra señalar que ARCH y GARCH son acrónimos, respectivamente, de “*Autoregressive Conditional Heteroscedasticity*” y “*Generalized Autoregressive Conditional Heteroscedasticity*”.

las series, también las estimaciones de los modelos GARCH multivariados, el análisis de las series y una estimación de las varianzas y covarianzas condicionales. La sección 5 sintetiza y discute los resultados.

1. El mercado global de petróleo y la modelación de series

El mercado global de petróleo es un mercado monopolístico donde existen productos diferenciados. Esta situación explica por qué se manejan diversos contratos, precios y rendimientos del petróleo. En este contexto, algunos de los principales determinantes de los precios son las características físico-químicas de los tipos de petróleo⁹. Las características mencionadas se refieren a su densidad y a su contenido de azufre. Particularmente, los precios spot de los tipos de petróleo WTI y Brent, ligeros y con bajo contenido de azufre, se usan para establecer los precios de los otros tipos de petróleo¹⁰. Por esta razón, los precios y rendimientos del WTI y el Brent se consideran como referencias del mercado global¹¹.

La mezcla mexicana de exportación (MME) es una canasta compuesta por tres tipos de petróleo diferentes. De acuerdo con el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP, 2014), el tipo de petróleo Maya constituye cerca de la mitad del total de la canasta de producción y está clasificado en la categoría de tipo de petróleo pesado, con alto contenido de azufre. El tipo de petróleo Istmo constituye cerca de un tercio de la canasta de producción y está clasificado en la categoría de ligero, con bajo contenido de azufre. Por último, el tipo de petróleo Olmeca constituye aproximadamente un quinto del total de la canasta de producción y está clasificado en la categoría de extra ligero, con bajo contenido de azufre.

La naturaleza monopolística del mercado global induce que haya comportamientos dinámicos en los precios y rendimientos de los distintos tipos de petróleo. Estos comportamientos no son necesariamente iguales ni están completamente sincronizados entre sí, porque los tipos de petróleo no son sustitutos perfectos. Las similitudes y diferencias de los comportamientos son particularmente notorias en las series de rendimientos diarios de los tres tipos de petróleo analizados. De hecho, las gráficas de las series muestran la existencia de

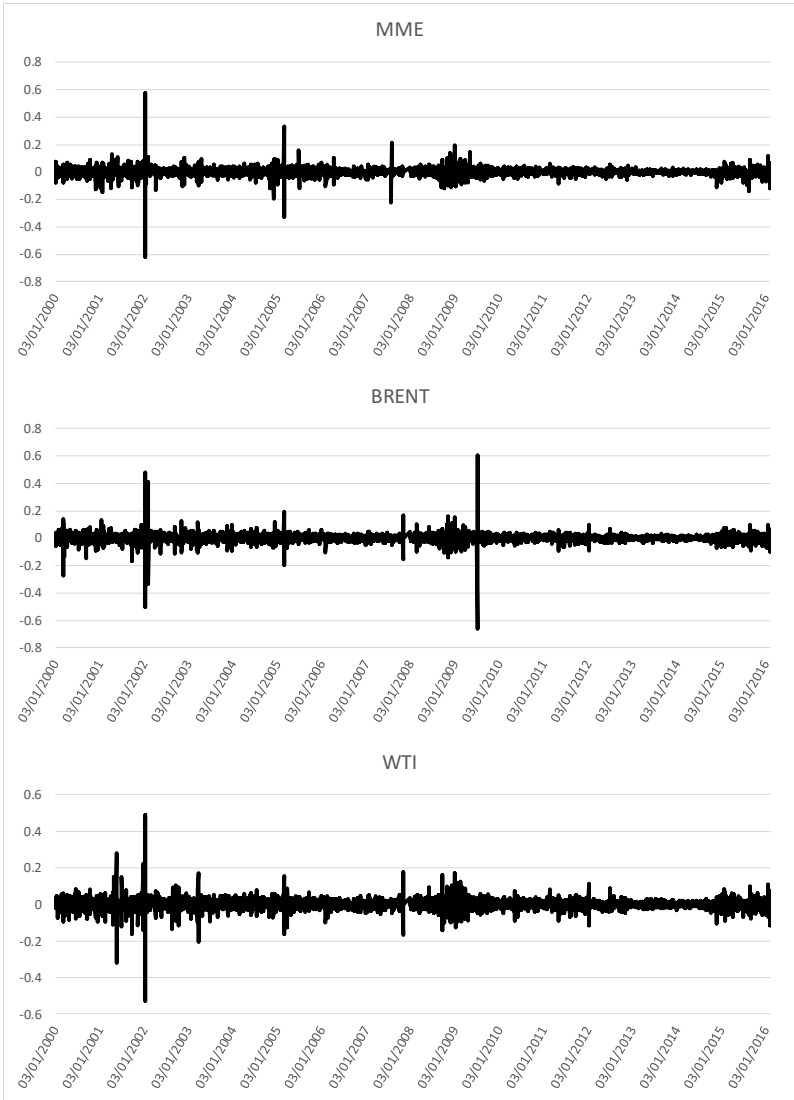
⁹ Entre los determinantes de los precios del petróleo que no están vinculados a sus características físico-químicas, sobresalen los desequilibrios de oferta y demanda de mercado, las tensiones geopolíticas, los ciclos económicos internacionales y los mercados financieros. Los precios spot suelen ser muy sensibles ante estos determinantes.

¹⁰ Los tipos de petróleo WTI y Brent establecen, respectivamente, los precios de referencia en Estados Unidos y Europa. Particularmente, el petróleo WTI resulta más ligero y tiene un menor contenido de azufre que el Brent (i.e., el WTI tiene una calidad mayor que el Brent).

¹¹ Debe señalarse que existen algunos precios de referencia alternativos. Entre estos se encuentran los precios del crudo de Dubai y de la canasta de referencia de la OPEC.

clusters de volatilidad, volatilidades no constantes y movimientos conjuntos de medias y varianzas (véase figura 1).

Figura 1
Rendimientos diarios de los tipos de petróleo MME, Brent y WTI del 04 de enero de 2000 al 11 de febrero de 2016



Nota: estimaciones propias.

Es interesante señalar que los modelos MGARCH no se han usado para estudiar las interrelaciones del petróleo spot mexicano con sus contrapartes internacionales¹². Los estudios que analizan la volatilidad histórica de los rendimientos mexicanos suelen usar modelos ARCH/GARCH univariados. Entre estos estudios se incluyen los de Dávila-Pérez, Núñez-Mora y Ruiz-Porras (2006), López-Sarabia y Venegas-Martínez (2010), De Jesús-Gutiérrez y Carvajal-Gutiérrez (2013), De Jesús-Gutiérrez, Vergara-González y Díaz-Carreño (2015). Usualmente, dichos estudios hallan que los rendimientos tienen estructuras autorregresivas y que existen efectos informacionales asimétricos sobre la volatilidad¹³.

Finalmente, no sobra señalar que entender las dinámicas, volatilidades e interrelaciones de los tipos de petróleo MME, Brent y WTI es pertinente por razones económicas y financieras. Las principales razones se vinculan a entender: 1) El grado de competencia monopolística en el mercado global del petróleo; 2) los mecanismos de transmisión de las volatilidades de corto plazo en los mercados internacionales; 3) los impactos de shocks informacionales sobre las volatilidades y 4) el diseño de instrumentos de cobertura y de estrategias de administración de riesgos. Por todas estas razones, puede argumentarse que la pertinencia del estudio aquí planteado queda plenamente justificada.

2. Metodología de análisis

En esta sección, se describe la metodología usada para modelar y analizar los rendimientos de los tipos de petróleo MME, Brent y WTI. Esta metodología refiere tanto al análisis estadístico de las series de tiempo como al ejercicio de modelación y análisis de las series. En este contexto, debe señalarse que las series de tiempo usadas aquí se estiman con los precios de cierre de cada tipo de petróleo i en el día t , P_{it} . Por convención, las series de precios se expresan en términos de logaritmos. Asimismo, los rendimientos diarios del tipo de petróleo i en el día t , r_{it} , se definen con base en la siguiente expresión:

¹² Cabe señalar que los modelos MGARCH se han usado para modelar las interrelaciones de los precios futuros del petróleo Istmo y Maya con el WTI. Véase el trabajo de De-Jesús-Gutiérrez (2016).

¹³ Dávila-Pérez, Núñez-Mora y Ruiz-Porras (2006) analizan la dinámica de la volatilidad del precio de la MME mediante la estimación de un modelo GARCH (1,1) simétrico. López-Sarabia y Venegas-Martínez (2010) analizan la eficiencia de las coberturas mexicanas usando un modelo simétrico para pronosticar la volatilidad del precio de la MME. De-Jesús -Gutiérrez y Carvajal-Gutiérrez (2013) estudian la dinámica de los rendimientos de la MME y del Maya mediante cuatro modelos de la familia ARCH/GARCH. De-Jesús-Gutiérrez, Vergara-González y Díaz-Carreño (2015) usan varios modelos de la misma familia para pronosticar la volatilidad de los rendimientos de la MME.

$$r_{it} = \ln P_{it} - \ln P_{it-1} \quad (1)$$

El análisis estadístico usa estadísticas descriptivas y pruebas de raíz unitaria y de efectos ARCH para estudiar las series de rendimientos. Particularmente, las estadísticas descriptivas se usan para caracterizar las series de rendimientos. La prueba de raíz unitaria, Aumentada de Dickey-Fuller (ADF), se usa para analizar el orden de integración de las series. La hipótesis nula de dicha prueba es que existen raíces unitarias. En este contexto, cabe señalar que las series deben ser estacionarias para evitar modelaciones espurias. La prueba ARCH-LM se usa para evaluar la existencia de efectos ARCH. La hipótesis nula de la prueba es que no existen efectos ARCH (Engle, 1982)¹⁴.

Los ejercicios de modelación y análisis de las series de rendimientos se sustentan en doce modelos GARCH multivariados. Los modelos usados aquí son de los tipos DVECH (*Diagonal VECH*), DBEKK (*Diagonal BEKK*) y CCC (*Constant Conditional Correlation*)¹⁵. Estos modelos se estiman considerando diferentes especificaciones dinámicas y distribuciones de densidad. Particularmente, aquí se usan especificaciones de tipo GARCH (*Generalized ARCH*) y TGARCH (*Threshold GARCH*) para evaluar los impactos de “shocks informacionales” sobre la volatilidad de las series¹⁶. Las distribuciones de densidad multivariada se usan para describir el comportamiento de las perturbaciones.

Matemáticamente, la estructura dinámica de cada uno de los modelos GARCH multivariados, usados aquí, se define como como un sistema de ecuaciones matriciales. Las tres expresiones que integran la estructura de cada modelo son las siguientes:

$$r_{it} = \phi_{i0} + \phi_{i1}r_{it-1} + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

$$\varepsilon_t = H^{\frac{1}{2}}(\theta)z_t \quad (3)$$

¹⁴ Las pruebas ARCH-LM usadas aquí se basan en la metodología propuesta por Brooks (2008).

¹⁵ Véase los trabajos de Bollerslev, Engle y Wooldridge (1988), Engle y Kroner (1995) y Bollerslev (1990) para una introducción a los modelos DVECH, DBEKK y CCC.

¹⁶ Los “shocks informacionales” son los impactos de las noticias, i.e., las perturbaciones rezagadas sobre la volatilidad de las series. Estos impactos pueden clasificarse como simétricos o asimétricos. La especificación GARCH asume que las buenas y malas noticias tienen impactos de similar magnitud sobre la volatilidad (i.e., impactos simétricos). La especificación TGARCH asume que las buenas y malas noticias pueden tener impactos de magnitud diferenciada (i.e., impactos asimétricos). Véase los estudios de Bollerslev (1986) y Zakoian (1994), respectivamente, para una descripción matemática de las especificaciones GARCH y TGARCH.

$$VarCov(r_t|I_{t-1}) = H^{\frac{1}{2}}Var_{t-1}(z_t) \left(H^{\frac{1}{2}} \right)' = H_t \tag{4}$$

donde r_t es un vector que incluye una serie de tiempo multivariada de N procesos estocásticos; θ es un vector de coeficientes; $H^{1/2}(\theta)$ es una matriz definida positiva $N \times N$; y z_t es un vector aleatorio $N \times 1$, tal que $E(z_t) = 0$ y $Var(z_t) = I_N$

Los modelos GARCH multivariados permiten modelar y analizar las volatilidades e interrelaciones con base en ciertos supuestos sobre: 1) la matriz de varianza-covarianza condicionada, H_t ; 2) la especificación del impacto de los shocks informativos y 3) la distribución de densidad multivariada. Particularmente, los supuestos sobre las matrices de varianza-covarianza condicionada incluyen aquellos que definen a los modelos DVECH, DBEKK y CCC¹⁷. Los supuestos sobre los impactos de shocks informativos incluyen aquellos que definen a las especificaciones GARCH y TGARCH. Las distribuciones asumidas incluyen a la normal y t de Student multivariadas.

Las modelación y análisis de las volatilidades e interrelaciones de las series del petróleo mediante los modelos MGARCH se realizan considerando que: 1) las estimaciones se obtienen iterativamente mediante el método de Máxima Verosimilitud; 2) las matrices de varianza-covarianza deben ser positivas semi-definidas y 3) las perturbaciones siguen procesos autorregresivos AR(1). Particularmente, aquí se evalúa si las matrices de varianza-covarianza son positivas semi-definidas con fines de validación de las estimaciones. Asimismo, se formaliza el supuesto autorregresivo definiendo la perturbación, ε_{it} , como: $\varepsilon_{it} = c + \rho \varepsilon_{it-1} + v_i$; donde c es una constante y v_{it} es ruido blanco.

El ejercicio de modelación de las dinámicas, volatilidades e interrelaciones de las series de rendimientos se sustenta en los doce modelos GARCH multivariados que aquí se usan. El análisis de series se centra en la evaluación de la significancia estadística de: 1) ρ , ϕ_{i0} y ϕ_{i1} , los coeficientes de las expresiones de las medias; 2) los coeficientes de las matrices de varianza-covarianza y 3) el coeficiente de la distribución t de Student multivariada. En todos los casos, se utilizan los p -values asociados a los estadísticos de significancia individual de coeficientes con fines de análisis. El nivel de significancia usado para evaluar las pruebas de hipótesis es del diez por ciento.

¹⁷ Una descripción de los supuestos estadísticos de las matrices de varianza-covarianza que definen a los modelos MGARCH usados en esta investigación se encuentra en Minovic (2009). Sin embargo, debe señalarse que aquí se adoptaron algunos supuestos adicionales para estimar los modelos MGARCH. Estos supuestos son los siguientes: 1) Para los modelos DVECH se asume una matriz indefinida de constantes; 2) para los modelos CCC se asumen constantes escalares y 3) para los modelos DBEEK se asume una matriz diagonal de constantes.

Finalmente, debe señalarse que el análisis de la bondad de ajuste de los modelos GARCH multivariados se sustenta en el criterio de información de Akaike (*AIC*). Se usa este criterio, en virtud de que el mismo permite seleccionar de manera unívoca el modelo que mejor describe la dinámica de un grupo de series, cuando se comparan estimaciones de modelos que pueden ser no anidados (Burnham y Anderson, 2002). Asimismo, se usa este criterio porque permite determinar, de una manera sencilla, las principales características que definen las dinámicas, volatilidades e interrelaciones de las series de rendimientos de los tipos de petróleo MME, Brent y WTI.

3. Base de datos y análisis estadístico

La base de datos usada en esta investigación utiliza una muestra de precios del petróleo de los tipos MME, Brent y WTI compilada por el Servicio Geológico Mexicano/Secretaría de Economía. La muestra incluye los precios de cierre diarios spot del barril de petróleo de los tres tipos mencionados, para el periodo del 03 de enero de 2000 al 11 de febrero de 2016. Todos los precios están expresados nominalmente en dólares estadounidenses. Por conveniencia estadística, las series de rendimientos son estimadas con base en la ecuación (1). Así, la muestra se integra con tres series de precios y tres de rendimientos. Particularmente, las series de rendimientos incluyen 4066 observaciones diarias.

Tabla 1

Estadística descriptiva de las series de rendimientos diarios y pruebas de normalidad de Jarque-Bera

	MME	Brent	WTI
Promedio	0.0000	0.0000	0.0000
Desv. Est.	0.0000	0.0000	0.0000
Mediana	0.0000	0.0001	0.0002
Mínimo	-0.6219	-0.6626	-0.5295
Máximo	0.5784	0.6055	0.4885
Coef. Asim.	-0.5608	-0.6205	-0.4363
Curtosis	98.3072	114.4394	54.8011
Jarque-Bera	1539102.00	2104203.00	454733.10
P-value	0.000	0.000	0.000
Observaciones	4066	4066	4066

Nota: los valores de las series son expresados en términos de las primeras diferencias de las series en logaritmos. Fuente: estimaciones propias

La tabla 1 presenta la estadística descriptiva y los estadísticos Jarque-Bera estimados para las series de rendimientos del petróleo. Particularmente, la tabla

muestra que las medias de las series de rendimientos, a su vez, muestran valores similares. En la tabla también se observa que la volatilidad de la MME es mayor que la del WTI y menor que la del Brent¹⁸. Además, las estimaciones permiten ver que las series de rendimientos tienen curtosis excesivas, sesgos negativos y distribuciones no normales. Estas características son importantes porque complementan a aquellas halladas previamente (i.e., clusters de volatilidad, volatilidades no constantes y movimientos conjuntos de medias y varianzas).

Tabla 2
Pruebas ADF de las series en niveles y en primeras diferencias

Serie	Niveles		Diferencias		I(d)
	P-value	Rezagos	P-value	Rezagos	
MME	0.9943	1	0.0001	0	1
Brent	0.9940	2	0.0000	1	1
WTI	0.9910	2	0.0000	1	1

Nota: la hipótesis nula de la prueba ADF es que hay raíz unitaria. Las pruebas incluyen una tendencia lineal e intercepto como regresores externos. El número de rezagos se estima con base en el criterio de información de Schwarz. El criterio de decisión supone un nivel de significancia del 5%. Las series en niveles son aquellas de los valores expresados en términos de logaritmos. Las series de diferencias son aquellas de los valores de rendimientos diarios.

Las tablas 2 y 3 sugieren que las series de rendimientos de los tres tipos de petróleo son susceptibles de ser analizadas mediante modelos GARCH multivariados. Particularmente, en la tabla 2, se observa que las series de rendimientos son estacionarias, I(0). La tabla 3, por su parte, muestra que en las series de rendimientos no se puede rechazar la hipótesis nula, que no existen efectos ARCH. Así, los resultados implican que únicamente las series de rendimientos cumplen los requisitos estadísticos para analizarse mediante modelos de la familia ARCH/GARCH. Por tanto, los resultados implican que se obtendrían estimaciones espurias de modelar los precios del petróleo.

Finalmente, los principales hallazgos del análisis estadístico pueden sintetizarse de la siguiente manera: 1) las medias de las tres series de rendimientos muestran valores similares y positivos; 2) la volatilidad de los rendimientos de la MME es mayor que la del WTI y menor que la del Brent; 3) los rendimientos tienden a manifestar curtosis excesivas, clusters de volatilidad, asimetrías, distribuciones no normales, volatilidades no constantes y movimientos conjuntos de medias y varianzas y 4) únicamente las series de rendimientos cumplen los requisitos para

¹⁸ Esta conclusión se deduce indirectamente, a través de los valores de la curtosis. Sin embargo, cabe destacar que se hicieron algunos ejercicios alternativos para otros periodos y la conclusión se mantiene. Incluso, los valores estimados de la desviación estándar son positivos en un nivel de diezmilésimos.

modelarse mediante modelos de la familia ARCH/GARCH (i.e., las series son estacionarias y manifiestan efectos ARCH).

Tabla 3
Prueba de efectos ARCH-LM para la serie de rendimientos

Serie	Estadístico F	P-value
MME	396.9150	0.0000
Brent	142.6604	0.0000
WTI	355.6302	0.0000

Nota: la prueba fue realizada considerando 5 rezagos. La hipótesis nula de la prueba es que no hay efectos ARCH. El criterio de decisión supone un nivel de significancia del 5%. Fuente: Estimaciones propias.

4. Ejercicios de modelación y análisis de las series

En esta sección se modelan las dinámicas, volatilidades e interrelaciones de las series de rendimientos de los tipos de petróleo MME, Brent y WTI. Asimismo, se hace el análisis de los doce modelos GARCH multivariados estimados. Particularmente, las estimaciones de los modelos se sintetizan en la tabla 4. Por simplicidad, en dicha tabla se indican los números de coeficientes estimados y significativos de las especificaciones de la media y varianza de cada modelo¹⁹. La tabla 5, por su parte, muestra las estimaciones del Criterio de Información de Akaike vinculadas a cada modelo. La importancia de dichas estimaciones es que permiten determinar la relativa bondad de ajuste de los modelos.

La tabla 4 muestra las estimaciones de los doce modelos multivariados que describen el conjunto de series de los rendimientos del petróleo. Estas estimaciones proveen elementos para entender las dinámicas, volatilidades e interrelaciones de las series. Particularmente, la tabla muestra que los rendimientos tienden a estar correlacionados en el tiempo: las estimaciones de ρ y de los coeficientes de las matrices de varianza-covarianza son en su mayoría significativas. Las estimaciones de ρ muestran, además, que existen relaciones comunes en la dinámica de la media de las tres series (dado que se asumen términos autorregresivos comunes).

¹⁹ Los coeficientes estimados de la matriz de varianza-covarianza, H_t , se muestran en forma “bruta” y “transformada”. La ventaja de presentar los coeficientes estimados en forma transformada es que hace explícito que puede haber coeficientes de las matrices que integran a H_t , que son el resultado de funciones asociadas a los coeficientes en forma bruta. Por tanto, bajo ciertas circunstancias, puede ocurrir que no exista una correspondencia uno-a-uno entre los coeficientes presentados en ambas formas.

Tabla 4
Modelos MGARCH estimados para las series de rendimientos diarios

Especificación Dinámica	Modelo	Parámetros	AR(1)-	AR(1)-	AR(1)-	AR(1)-	
			GARCH(1,1) Normal	TGARCH(1,1) Normal	GARCH(1,1) t-Student	TGARCH(1,1) t-Student	
		ρ	<i>-0.1573 ***</i>	<i>-0.1345 ***</i>	<i>-0.2061 ***</i>	<i>-0.2061 ***</i>	
Media	DVECH	Estimados	4	4	4	4	
		Significativos	3	2	1	1	
	CCC	ρ	<i>-0.1667 ***</i>	<i>-0.1633 ***</i>	<i>-0.1161 ***</i>	<i>-0.1147 ***</i>	
		Estimados	4	4	4	4	
	Significativos	2	2	4	4		
	DBEKK	ρ	<i>-0.1729 ***</i>	<i>-0.1584 ***</i>	<i>-0.1231 ***</i>	<i>-0.1197 ***</i>	
		Estimados	4	4	4	4	
	Significativos	2	2	4	4		
Varianza	DVECH	Estimados	18	24	18	24	
		Significativos	18	24	15	23	
	CCC	Estimados	12	15	12	15	
		Significativos	12	15	12	15	
	DBEKK	Estimados	9	12	9	12	
		Significativos	9	12	9	12	
	Distribución t	DVECH	Estimados		1	1	1
			Significativos		1	1	1
CCC		Estimados			1	1	
		Significativos			1	1	
DBEKK		Estimados			1	1	
		Significativos			1	1	
Varianza Transformada		DVECH	Estimados	18	24	18	24
			Significativos	18	24	15	15
	CCC	Estimados	12	15	12	15	
		Significativos	12	15	12	15	
	DBEKK	Estimados	9	12	9	12	
		Significativos	9	12	9	12	

Nota: el coeficiente del término autorregresivo se reporta en negritas e itálicas. Se reporta el número de parámetros estimados significativos de cada una de las especificaciones de los modelos. Se considera un nivel de significancia del 10 por ciento para determinar los parámetros significativos. Uno, dos y tres asteriscos denotan niveles de significancia del 10, 5 y 1 por ciento.

La tabla 5 permite comparar las estimaciones de bondad de ajuste de los modelos. Estas estimaciones son importantes porque sugieren que los modelos DBEKK y las especificaciones TGARCH tienen una mejor bondad de ajuste. Asimismo, sugieren que las perturbaciones no siguen una distribución normal multivariada. Así, las estimaciones indican que el modelo AR(1)-DBEKK-TGARCH(1,1) con una distribución t-de-Student multivariada es el que mejor describe las series de rendimientos²⁰. Por esta razón, las varianzas y covarianzas

²⁰ La tabla 4 también valida que las series de rendimientos pueden ser descritas por dicho modelo. De hecho, la totalidad de coeficientes estimados son significativos (17 de 17). Estos

estimadas con este modelo se grafican en la figura 2; esto con fines de ilustrar las volatilidades e interrelaciones entre los tres tipos de petróleo.

Tabla 5
Estimaciones de bondad de ajuste de los modelos MGARCH.

Modelo	Criterio de Información de Akaike			Modelo con mejor bondad de ajuste
	DVECH	CCC	DBEKK	
AR(1)-GARCH(1,1)	-15.168 *	-14.9355	-15.0982 *	CCC
AR(1)-TGARCH(1,1)	-15.200 *	-14.9447	-15.1292 *	CCC
AR(1)-GARCH(1,1) <i>t</i> Student	-16.093 *	-16.5093	-16.7104	DBEKK
AR(1)-TGARCH(1,1) <i>t</i> Student	-16.090 *	-16.5120	-16.7291	<i>DBEKK</i>

Nota: un asterisco denota que los modelos estimados no cumplen con la condición de que la matriz de varianza-covarianza sea definida como positiva. Se identifica con *itálicas y negritas* al modelo con mejor bondad de ajuste de cada grupo de series. Fuente: estimaciones propias.

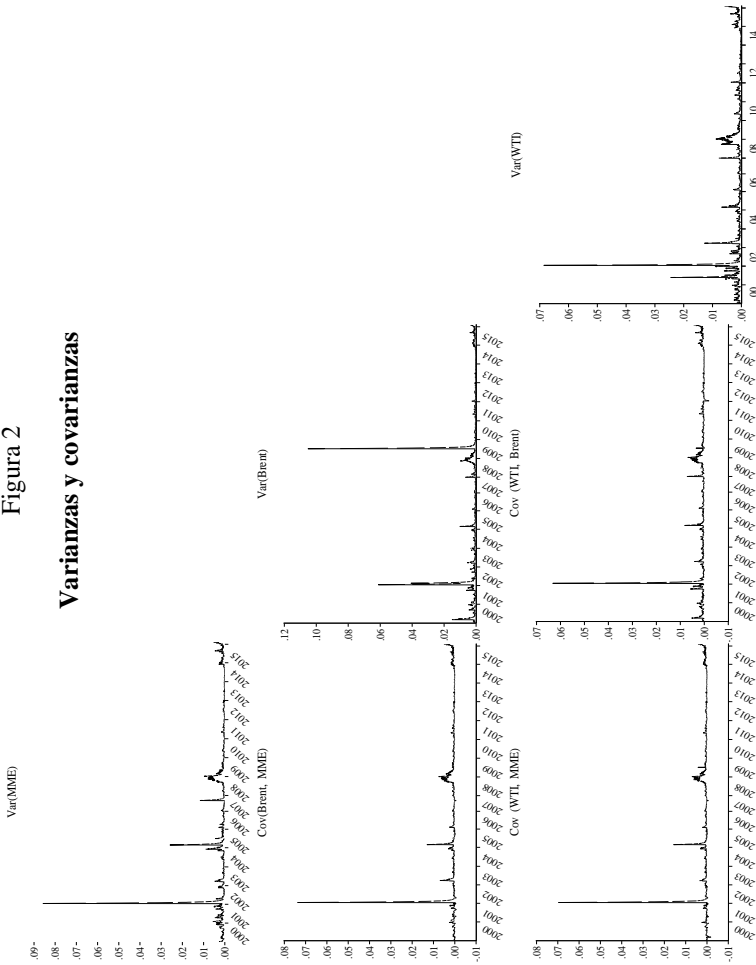
La consistencia de los resultados sugiere que hay algunos patrones que definen el comportamiento dinámico de las series de rendimientos del petróleo. Particularmente, la predominancia de los modelos de tipo DBEKK sugiere que hay algunas interrelaciones entre las volatilidades de las series analizadas en el mercado global²¹. La predominancia de la especificación TGARCH sugiere que las buenas y malas noticias tienen impactos asimétricos sobre la volatilidad de los rendimientos. Además, la predominancia de la distribución *t* de Student multivariada valida que las perturbaciones no se distribuyen normalmente.

Finalmente, los resultados del ejercicio de modelación y análisis econométricos pueden sintetizarse de la siguiente manera: 1) El modelo AR(1)-DBEKK-TGARCH(1,1) es el que mejor describe la dinámica conjunta de los rendimientos del petróleo de los tipos MME, Brent y WTI; 2) existen relaciones comunes en la dinámica de la media de las tres series; 3) hay algunas interrelaciones entre las volatilidades de los rendimientos; 4) las buenas y malas noticias tienen impactos asimétricos sobre la volatilidad de los rendimientos y 5) la distribución *t* de Student multivariada describe de mejor manera a las perturbaciones de los modelos.

coeficientes incluyen los correspondientes a las especificaciones de la media, de la matriz de varianza-covarianza transformada y de la distribución de densidad.

²¹ Los coeficientes de los modelos DBEKK son estimados asumiendo matrices de varianza-covarianza diagonales. Bajo este supuesto, las estimaciones de dichas matrices no consideran la existencia de interrelaciones entre las volatilidades de las series. Sin embargo, debe señalarse que la figura 2 sugiere que dichas interrelaciones pudieran existir al menos durante periodos cortos de tiempo.

Figura 2
Varianzas y covarianzas



Fuente: estimaciones propias. Varianzas y covarianzas condicionadas estimadas mediante el modelo AR(1)-DBEKK-TGARCH(1,1) con una distribución t-de-Student multivariada.

Conclusiones y discusión

En esta investigación se han estudiado las dinámicas, volatilidades e interrelaciones de los rendimientos del petróleo mexicano, Brent y WTI usando doce modelos GARCH multivariados. Sus principales resultados han sido los siguientes: 1) la volatilidad de la MME es mayor que la del WTI y menor que la del Brent; 2) el modelo AR(1)-TGARCH(1,1) con una distribución t-de-Student multivariada es el que mejor describe la dinámica conjunta de los rendimientos del petróleo; 3) hay algunas interrelaciones entre las volatilidades de los rendimientos y 4) las buenas y malas noticias tienen impactos asimétricos sobre las volatilidades. El estudio ha usado datos diarios de los precios spot del petróleo y de sus rendimientos entre el 03 de enero de 2000 al 11 de febrero de 2016.

El estudio tiene implicaciones económicas y financieras para México. La más importante se refiere a la necesidad de replantear la planeación, los objetivos y las estrategias de política económica. Actualmente, la SHCP fija los Criterios de Política Económica usando estimaciones anuales de los precios de la MME (y de otras variables). Sin embargo, los hallazgos implican que sería mejor usar estimaciones de los rendimientos. Además, implican que las estimaciones de los precios serían adecuadas solo por coincidencia o por factores no observables²². Por estas razones, podría argumentarse que la propuesta coadyuvaría a mejorar la planeación y el desempeño de la economía mexicana.

Los hallazgos del estudio también tienen implicaciones para el desarrollo de investigación en los mercados internacionales de petróleo. La existencia de algunas interrelaciones entre las volatilidades sugiere que las volatilidades tienen origen al interior de los mercados y que hay “efectos contagio”, entre ellos. Esta situación tiene implicaciones directas sobre las prácticas de administración de riesgos y, en particular, sobre las de cobertura. Los hallazgos validan la hipótesis de que sería posible mejorar las mencionadas prácticas usando modelos GARCH multivariados; incluso, validan la conveniencia de desarrollar más investigaciones sobre el tema²³.

Los hallazgos del estudio también tienen implicaciones adicionales para entender el comportamiento de los rendimientos del petróleo. Los “efectos apalancamiento” y la existencia de distribuciones no normales implican que las dinámicas y las volatilidades de los rendimientos son complejas. Intuitivamente,

²² Esta situación podría explicar las diferencias entre los promedios de precios estimados y los reales. En los Criterios Generales de Política Económica 2013, 2014 y 2015, los precios estimados de la MME para dichos años fueron, respectivamente, 84.9, 81.0 y 82.0 dólares por barril. Los precios reales fueron, respectivamente, 98.70, 87.70 y 44.20 dólares por barril.

²³ El estudio de De-Jesús-Gutiérrez (2016) es un ejemplo reciente de este tipo de investigación.

la presencia de “efectos apalancamiento” indica que los impactos informacionales de las malas noticias sobre la volatilidad son mayores que los impactos de las buenas noticias. Además, la existencia de distribuciones no normales implica que los modelos de administración de riesgos tradicionales (i.e., Black-Scholes) podrían valorar los riesgos de manera inadecuada.

Finalmente, debe enfatizarse que la investigación referida a las dinámicas y volatilidades e interrelaciones del petróleo tiene amplias posibilidades de desarrollo. El petróleo es una variable clave en la economía. Particularmente, la importancia de este tipo de investigación se vincula directamente con las políticas económicas, las finanzas públicas, las prácticas de administración de riesgos y el desarrollo económico del país. Asimismo, se vincula con la necesidad de mejorar las metodologías de modelación, el análisis y el pronóstico de las series del petróleo. Por estas razones, la importancia de realizar nuevas investigaciones sobre el tema queda plenamente justificada.

Referencias

- Backus, D., y Crucini, M. (2000). “Oil prices and the terms of trade”. *Journal of International Economics*, 50, 185-213.
- Bashiri-Behmiri, N. y Pires-Manso, J.R. (2013). “Crude oil forecasting techniques: A comprehensive review of literature”. *Alternative Investment Analysis Review*, 2(3), 30-49.
- Bollerslev, T. (1986). “Generalized autoregressive conditional heteroskedasticity”. *Journal of Econometrics*, 31(3), 307-327.
- Bollerslev, T. (1990). “Modeling the coherence in short-run nominal exchange rates: A multivariate generalized ARCH model”. *Review of Economics and Statistics*, 72(3), 498-505.
- Bollerslev, T., Engle, R.F. y Wooldridge, J.M. (1988). “A capital asset pricing model with time-varying covariances”. *Journal of Political Economy*, 96(1), 116-131.
- Brooks, C. (2008). *Introductory Econometrics for Finance*, Segunda edición, Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Burnham, K. P. y Anderson, D.R. (2002). *Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach*, Segunda edición, Nueva York, US: Springer-Verlag.
- Dávila-Pérez, J., Núñez-Mora, J.A. y Ruiz-Porras, A. (2006). “Volatilidad del precio de la mezcla mexicana de exportación”. *Economía, Teoría y Práctica*, 25, 37-52.

- De-Jesús-Gutiérrez, R. (2016). "Estrategias dinámicas de cobertura cruzada eficiente para el mercado del petróleo mexicano: Evidencia de dos modelos GARCH multivariados con término de corrección de error". *Economía, Teoría y Práctica*, 44, 115-146.
- De-Jesús-Gutiérrez, R. y Carvajal-Gutiérrez, L. (2013). "Modelación y predicción de la volatilidad con innovaciones de colas pesadas distribuidas: Evidencia empírica para los petróleos Maya y Mezcla Mexicana de Exportación". *Paradigma Económico*, 5(1), 67-105.
- De-Jesús-Gutiérrez, R., Vergara-González, R. y Díaz-Carreño, M.A. (2015). "Predicción de la volatilidad en el mercado de petróleo mexicano ante la presencia de efectos asimétricos". *Lecturas de Economía*, 34(65), 299-326.
- Engle, R.F. (1982). "Autoregressive conditional heteroscedasticity with estimates of the variance of United Kingdom inflation". *Econometrica*, 50(4), 987-1007.
- Engle, R.F. y Kroner, K.F. (1995). "Multivariate simultaneous generalized ARCH". *Econometric Theory*, 11(1), 122-150.
- Fan, L. y Li, H. (2015). "Volatility analysis and forecasting models of crude oil prices: A review". *International Journal of Global Energy Issues*, 38(1-3), 5-17.
- Fattouh, B. (2007). "The drivers of oil prices: the usefulness and limitations of non-structural model, the demand-supply framework and informal approaches". *EIB Papers*, 12(1), 128-156.
- Ferderer, J.P. (1996). "Oil price volatility and the macroeconomy". *Journal of Macroeconomics*, 18(1), 1-26.
- Guo, H. y Kliesen, K.L. (2005). "Oil price volatility and US macroeconomic activity", *Federal Reserve Bank of St. Louis Review*, 87(6), 669-683.
- Hamilton, J.D. (1983). "Oil and the macroeconomy since World War II". *Journal of Political Economy*, 91(2), 228-248.
- Hilyard, J.F. (2012). *The Oil and Gas Industry: A Non-Technical Guide*. Tulsa, US: Pen Well.
- IMP (2014). "Tipos de Petróleo". *Instituto Mexicano del Petróleo*. Ciudad de México, México: Instituto Mexicano del Petróleo.
- Iranzo, J.E. (1993). La OPEP: Del esplendor a la decadencia. En González, S., (coord.). *Temas de Organización Económica Internacional* (209-218). Madrid, España: McGraw-Hill.
- López-Sarabia, P. y Venegas-Martínez, F. (2010). "Sobre la eficiencia de las coberturas petroleras contratadas con opciones de venta: Un análisis con modelos GARCH". *Eseconomía*, 26, 7-23.

- Lorenzo-Valdés, A., Durán-Vázquez, R. y Armenta-Fraire, L. (2012). "Conditional correlation between oil and stock market returns: The case of Mexico". *Revista Mexicana de Economía y Finanzas*, 7(1), 49-63.
- Minovic, J.Z. (2009). "Modeling multivariate volatility processes: Theory and evidence". *Theoretical and Applied Economics*, 5(1), 21-44.
- Morck, K.A. (1989). "Oil and the macroeconomy when prices go up and down: An extension of Hamilton's results". *Journal of Political Economy*, 97(3), 740-744.
- OPEC. (2016). "OPEC Monthly Oil Market Report (18 January 2016)". *Organization of the Petroleum Exporting Countries*. Viena, Austria: Organization of the Petroleum Exporting Countries.
- OPEC. (2014). "2014 World Oil Outlook". *Organization of the Petroleum Exporting Countries*. Viena, Austria: Organization of the Petroleum Exporting Countries.
- Papapetrou, E. (2001). "Oil price shocks, stock market, economic activity and employment in Greece". *Energy Economics*, 23(5), 511-532.
- Regnier, E. (2007). "Oil and energy price volatility". *Energy Economics*, 29(3), 405-427.
- Sadorsky, P. (1999). "Oil price shocks and stock market activity". *Energy Economics*, 21(5), 449-469.
- Sánchez Albavera, F. y Vargas, A. (2005). *La Volatilidad de los Precios del Petróleo y su Impacto en América Latina*. Santiago de Chile, Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
- SHCP (2015). "Ley de Ingresos de la Federación para el Ejercicio Fiscal de 2016". *Secretaría de Hacienda y Crédito Público*. Ciudad de México, México: Gobierno Federal.
- Zakoian, J.M. (1994). "Threshold heteroskedastic models". *Journal of Economic Dynamics and Control*, 18(5), 931-055.