



**Precios de los Derechos de Emisión en el Sistema de Comercio de Emisiones de la Unión
Europea**

Kelly Johana Córdoba Sepúlveda

Colegio de Estudio Superiores en Administración - CESA

Maestría en Finanzas Corporativas

Bogotá D.C.

2023

**Precios de los Derechos de Emisión en el Sistema de Comercio de Emisiones de la Unión
Europea**

Kelly Johana Córdoba Sepúlveda

Tutor:

Enrique Gilles

Colegio de Estudio Superiores en Administración - CESA

Maestría en Finanzas Corporativas

Bogotá D.C.

2023

Tabla de contenido

1. Introducción	5
2. Hipótesis.	14
3. Objetivo General.	14
4. Objetivos Específicos.	14
5. Revisión de la Literatura.	15
6. Desarrollo y Despliegue Metodológico.	24
7. Resultados.	29
8. Conclusión	38
9. Referencias.	41

Índice de Tablas

Tabla 1. <i>Modelo de Regresión Lineal Múltiple</i>	30
Tabla 2. <i>Modelo de Regresión Lineal Múltiple</i>	31
Tabla 3. <i>Factor de Inflación de la Varianza</i>	32
Tabla 4. <i>Test de Heteroscedasticidad de Harvey</i>	33
Tabla 5. <i>Resultados Modelo de Regresión Múltiple</i>	34
Tabla 6. <i>Prueba de raíz aumentada de Dickey – Fuller</i>	36
Tabla 7. <i>Modelo AR(2) MA(5)</i>	37

Índice de Figuras.

Figura 1. <i>Evolución del Área Glaciar en Colombia 1980 - 2020</i>	7
Figura 2. <i>Mapa de los impuestos al carbono y de los ETSs en el mundo</i>	12
Figura 3. <i>Matriz de Correlaciones</i>	29

1. Introducción.

El uso desmesurado de recursos no renovables, la quema de combustibles fósiles y la deforestación que resultan de potencializar el crecimiento económico del mundo han generado un importante crecimiento de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), así como de otros gases de efecto invernadero (GEI)¹.

De esta manera, según datos de la Agencia Internacional de Energía, las emisiones globales de CO₂ de la quema de energía y los procesos industriales aumentaron un 0,9% Mt² en 2022 hasta un nuevo máximo histórico de 36,8 Gt³, después de que en 2021 se presentara un repunte del 6%, asociado a los estímulos a las economías posteriores a la pandemia del Covid-19 (International Energy Agency, 2023).

Los siete principales emisores corresponden a China, la Unión Europea, India, Indonesia, Brasil, Rusia y Estados Unidos, más el transporte internacional con el 5% de las emisiones mundiales de GEI en 2020. Mientras que, colectivamente los miembros del G20⁴ son responsables del 75% de las emisiones globales de GEI (International Energy Agency, 2023).

En este sentido, el aumento en las concentraciones de gases de efecto invernadero lleva a incrementos en la temperatura de la tierra. De forma que, según el informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), las emisiones de gases ya han incrementado la temperatura en 1,1°C desde 1750 (Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA), s.f.).

¹ De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, los gases de efecto invernadero son gases que atrapan el calor en la atmósfera.

² Megatonnes métricos.

³ Gigatoneladas.

⁴ El Grupo de los Veinte (G20) es el principal foro para la cooperación económica internacional. Desempeña un papel importante en la configuración y el fortalecimiento de la arquitectura y la gobernanza mundiales en todas las principales cuestiones económicas internacionales (G20, s.f.).

Adicionalmente, de acuerdo con el Servicio Meteorológico del Reino Unido se espera que la temperatura mundial para 2023 esté entre 1,08 °C y 1,32 °C superior a la media del periodo preindustrial, con lo cual sería el décimo año sucesivo en el que las temperaturas sean al menos 1°C por encima de los niveles preindustriales (El Espectador, 2022).

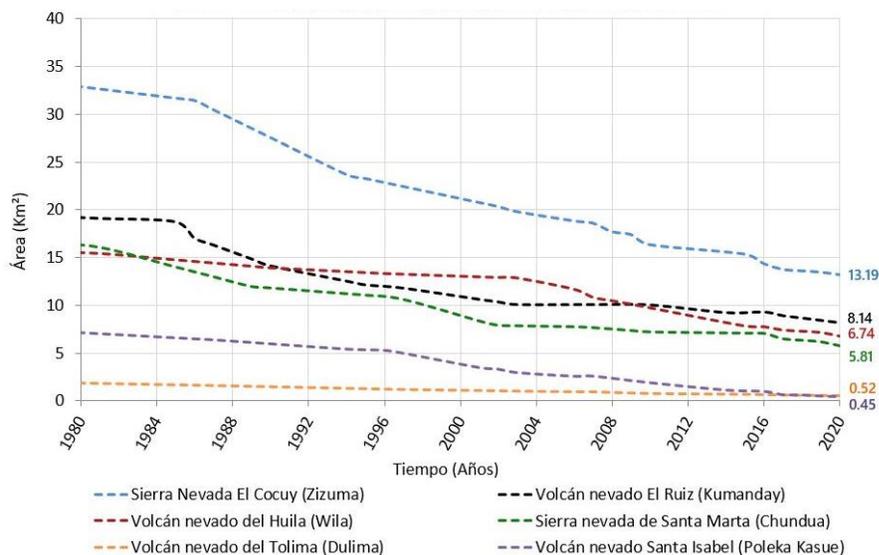
De esta manera, dentro de los efectos más recientes de este incremento en la temperatura del planeta se encuentran los fenómenos climáticos extremos, como las inundaciones en Pakistán, que ocasionaron que más de 30 millones de personas fueran desplazadas y al menos 1.300 fallecieron (El Espectador, 2022), entre otros.

En el caso de Estados Unidos según el Informe Nacional del Clima, en la década de 1980, el país experimentaba en promedio un evento climático extremo, con un costo de US\$ 1.000 millones cada cuatro meses, mientras que en la actualidad, hay uno cada tres semanas (Sutter, 2022).

Así, múltiples investigaciones han demostrado que, de mantenerse los niveles actuales de emisiones de CO₂ en la atmósfera, los impactos podrían ir desde la pérdida de la seguridad alimentaria, la disminución del agua potable, subidas del nivel del mar, extinción de especies, la desaparición de ecosistemas, el aumento de sequías, huracanes o tifones, hasta migraciones masivas por causas climáticas y geopolíticas asociadas (BBVA, 2022).

A pesar de que los esfuerzos a nivel internacional se han enfocado en frenar los efectos del cambio climático en zonas altamente vulnerables como la Antártida y Groenlandia, en el caso de Colombia, estudios del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) demuestran que la superficie glaciar se ha reducido en un 68% desde los años 50's, como se evidencia en la **Figura 1**. Entre tanto, para el periodo comprendido entre 2010 - 2020 se estableció una pérdida del área glaciar del 12,5 km² (26%) (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, 2021).

Figura 1.
Evolución del Área Glaciar en Colombia 1980 – 2020



Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – Ideam.

De igual forma, según análisis del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés (Invemar), las zonas costeras e insulares colombianas son vulnerables a los impactos del cambio climático, teniendo en cuenta las amenazas de inundación sobre las áreas de cultivos, afectaciones a la infraestructura y la población ubicada cerca de la zona costera, así como la pérdida de cobertura de ecosistemas marinos y costeros como manglares, de los cuales Colombia cuenta con la mayor extensión del Pacífico (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, s.f.).

En este sentido, según el informe de Benjamín Quesada, profesor investigador de la Universidad del Rosario, el sector agrícola es de los principales generadores de impactos ambientales, toda vez que participa en dos tercios de las emisiones de gases de efecto invernadero de Colombia que, si bien no es el país más contaminante de América Latina, si ocupa el quinto lugar debido a una dinámica de aumento de GEI de 15% en 20 años (Quesada, 2019).

Teniendo en cuenta lo anterior, y el potencial de afectación a nivel global, desde 1989 en el Panel Intergubernamental de Expertos sobre cambio climático se sentaron las bases para negociar un tratado internacional sobre cambio climático, que le permitiera a los gobiernos definir medidas para mitigarlo y conseguir beneficios colectivos a largo plazo (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible , 2021).

De esta manera, en 1992 durante la Cumbre de la Tierra, se estableció la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático-CMNUCC-, tratado universal y jurídicamente vinculante para los 197 estados parte de la ONU. Este incorporó que los estados miembros están obligados a actuar en interés de la seguridad humana incluso a falta de certeza científica, según lo definido previamente por el Protocolo de Montreal de 1987 (United Nations Climate Change, s.f.).

Posteriormente, con el fin de avanzar en el cumplimiento de este objetivo, se identificó la necesidad de negociar un Protocolo en el que se pudieran establecer metas concretas para los países signatarios con periodos de cumplimiento (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible , 2021). Es por esta razón que en 1997 en la 21ª Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático se adoptó y firmó el Protocolo de Kioto, a partir del cual, los países signatarios se comprometían a disminuir las emisiones de efecto invernadero conforme con las metas individuales planteadas. De forma que, en conjunto, esos objetivos suponían una reducción media de las emisiones del 5% en comparación con los niveles de 1990 en el quinquenio 2008-2012 (el primer período de compromiso) (United Nations Climate Change, s.f.).

En este sentido, el Protocolo de Kioto promueve la creación de un mercado de negociación de derechos de uso de la atmósfera, conocido como los mercados de carbono. En estos, el principal aspecto es la reducción de emisiones de los países desarrollados, que causan la

mayoría de las emisiones del mundo, y acelera una solución cambiando los valores del mercado para que la emisión se vuelva costosa, mientras que las tecnologías limpias y el desarrollo sostenible sean rentables (Chichilnisky, 2013).

Así, se establecieron tres mecanismos de flexibilidad que permiten la disminución de los costos de alcanzar los objetivos de emisiones. Estos tres mecanismos son: el mecanismo de Implementación Conjunta, el mecanismo de Desarrollo Limpio y el Comercio de Emisiones (Mansanet-Bataller & Pardo, 2008).

Los dos primeros mecanismos consisten en la ejecución de proyectos de reducción de emisiones que dan lugar a diferentes tipos de unidades, que hacen al titular elegible para el cumplimiento de las obligaciones de reducción⁵. Mientras que, en el Sistema de Comercio de Emisiones los gobiernos establecen un límite máximo, sobre las emisiones de GEI de uno o más sectores y expide unos derechos de emisión o cupos transables por el total de toneladas de GEI que conforman el límite. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020).

En estos sistemas de fijación de límites e intercambio de las emisiones se pone un techo al total de emisiones de gases de efecto invernadero, para después habilitar a aquellas industrias con bajas emisiones para vender los derechos de emisión que les sobran a emisores más grandes. De esta manera, los gobiernos establecen un precio inicial para subastar los derechos de emisión, posteriormente mediante los movimientos de oferta y demanda de derechos de emisión, se da la creación de un precio del carbono asociado a las fluctuaciones del mercado. El límite ayuda a garantizar que las reducciones de emisiones necesarias se llevarán a cabo para mantener a los emisores dentro de su presupuesto de carbono pre asignado (Banco Mundial, 2014).

⁵ Cada unidad permite la emisión de una tonelada métrica de CO₂.

Así, en 2005 el tercer mayor emisor de dióxido de carbono del mundo, la Unión Europea, creó el primer sistema de comercio de emisiones (SCE) de gases de efecto invernadero – el Sistema de Comercio de Emisiones Europeo (EU ETS por sus siglas en inglés), y desde entonces se ha convertido en el principal mercado de carbono internacional al representar más de tres cuartas partes del comercio mundial total y llegó a cubrir el 45% de las emisiones de GEI de los entonces 28 Estados Miembros junto con Noruega, Islandia y Liechtenstein (Gaztañaga, Calvo, Swysen, & Saraceno, 2022).

Posteriormente, en 2015 con la firma del Acuerdo de París se sienta un nuevo precedente en la lucha contra el cambio climático, toda vez que obliga a que los países participantes definan su contribución determinada a nivel nacional (NDC, son sus siglas en inglés: *Nationally Determined Contribution*) para reducir las emisiones de carbono generadas. Además, los países incluyeron compromisos sobre: mitigación, adaptación, construcción y fortalecimiento de capacidades, desarrollo y transferencia de tecnologías y financiamiento; sin dejar a un lado su obligación de revisar estos compromisos de reducción de emisiones cada 5 años (Cartes Mena, 2021).

Asimismo, establece el potencial de comercio de créditos de reducción de emisiones a través de fronteras, entre naciones o jurisdicciones, para fomentar la vinculación de los enfoques de fijación de precios del carbono entre países y jurisdicciones, lo que resulta en la reducción de emisiones en una magnitud mayor de lo que es posible únicamente a nivel nacional (United Nations, 2022).

Esto, con el objetivo de mantener el aumento de la temperatura mundial en este siglo por debajo de los 2 grados centígrados por encima de los niveles preindustriales, y dar continuidad a los esfuerzos para limitar aún más el aumento de la temperatura a 1,5 grados centígrados (United Nations Climate Change, s.f.).

Aspecto que, a su vez impulsó la creación de los SCE, de manera que, en la actualidad existen 24 en operación en cinco continentes cubriendo jurisdicciones que, en su conjunto, producen el 54% del PIB global. Además, existen más de una docena de gobiernos considerando implementar un SCE, el comercio de emisiones ha emergido como un instrumento clave para descarbonizar las economías de manera sostenida. (International Carbon Action Partnership - ICAP, 2021).

Otro de los mecanismos implementados, consiste en un impuesto al carbono, a través del cual se establece directamente un precio del carbono mediante la definición de una tasa impositiva sobre las emisiones de GEI, o sobre el contenido de carbono de los combustibles fósiles. Su principal diferencia en relación a un ETS es que no se predefine el resultado relacionado con la reducción de emisiones del impuesto sobre el carbono, pero sí el precio del carbono (Banco Mundial, 2014).

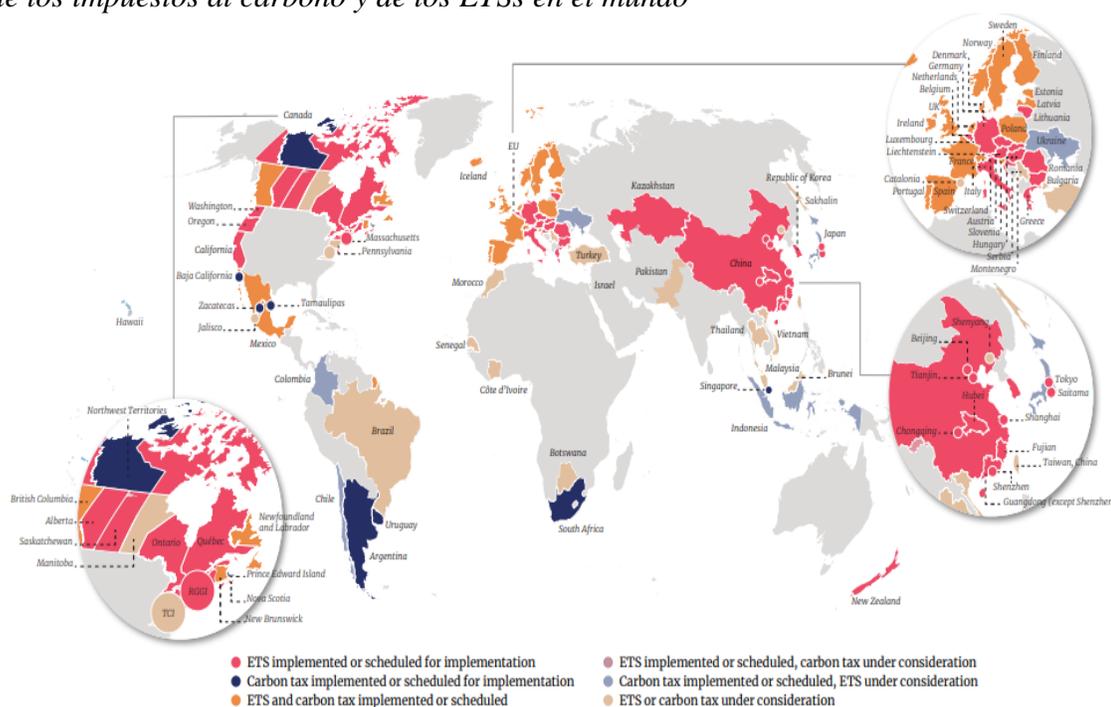
De esta manera, los sistemas de impuestos al carbono y de comercio pueden coexistir en un mismo país, con normas para los niveles de emisión recomendados o lineamientos técnicos de producción que alienten al sector privado a disminuir la intensidad de carbono de sus procesos de producción (Carbon Pricing Leadership Coalition, 2017).

De esta manera, al cierre de 2022 el 23% de las emisiones mundiales estaban cubiertas por algún tipo de mecanismo de precios del carbono, frente al 21% en 2021. De forma que, cada vez más empresas tienen que pagar a los reguladores por el derecho a liberar una tonelada de dióxido de carbono a la atmósfera. De igual modo, el valor transado en estos mercados creció 164%, hasta los 760.000 millones de euros (897.000 millones de dólares) (The Economist, 2022).

Sin embargo, de los 68 impuestos al carbono y sistemas de comercio de emisiones que existían en 2022 (como se evidencia en la **Figura 2**), solo una pequeña minoría, que cubre el

3,8% de las emisiones, fijó el precio del carbono por encima de 40 dólares por tonelada, el cual se considera es el costo social mínimo del carbono, que mide el daño causado al bienestar global por el aumento de las emisiones. Aspecto que, de acuerdo con algunos economistas hace que los mercados de carbono sean demasiado baratos para que permitan el cumplimiento de las metas de reducción de emisiones en el largo plazo (The Economist, 2022).

Figura 2.
Mapa de los impuestos al carbono y de los ETSs en el mundo



Fuente: State and Trends Of Carbon Pricing 2022

Esto, a pesar que en el primer trimestre de 2023, según lo reportado por la agencia de noticias Reuters, los precios de los futuros del EU ETS tocaron máximos históricos de 100 euros por tonelada en febrero del año en curso, teniendo en cuenta el incremento de los precios de la energía en la región, aún existen mercados como el de China que mantienen precios promedio de este gas de 8 dólares por tonelada.

Lo anterior, toma relevancia al considerar que el informe de la Comisión de Alto Nivel sobre Precios del Carbono identificó un rango de USD 50-100/CO₂ como el precio necesario

para 2030 para mantener el calentamiento global por debajo de 2°C, el extremo superior del límite acordado en el Acuerdo de París. Además, estimaciones más recientes indican que se pueden necesitar precios aún más altos para reducir las emisiones netas cero para 2050, lo que el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático dice que es necesario para alcanzar la meta de 1,5 °C (World Bank, 2022). En este sentido, mediante esta investigación se busca identificar cuáles son los factores que influyen en los precios actuales del carbono en el Sistema de Comercio de Emisiones de la Unión Europea.

2. Hipótesis.

Entre los principales factores que influyen en los precios actuales del carbono en el EU-ETS se encuentran las fluctuaciones de los precios de los combustibles fósiles y *commodities*, a la vez que su exposición a los cambios en el entorno socioeconómico. Esto, conjugado con un exceso de oferta de permisos de emisión reducen los incentivos para la búsqueda de eficiencias y generación de precios que hagan más costosa la emisión de CO₂ en la región.

3. Objetivo General.

Pronosticar el comportamiento de los precios del carbono en el Sistema de Comercio de Emisiones de la Unión Europea (EU ETS).

4. Objetivos Específicos.

- Describir la estructura y funcionamiento de los diferentes mecanismos de asignación de precio al carbono.
- Conocer la importancia e impactos globales de los mecanismos de fijación de precio al carbono.
- Identificar los determinantes de las fluctuaciones de los precios de los derechos de emisión en el EU ETS.
- Evidenciar cómo los cambios en la oferta de permisos de emisión han afectado sus precios en el EU ETS.
- Estimar bajo escenarios de estrés los efectos en los precios de los sistemas de comercio de emisiones.

5. Revisión de la Literatura.

De acuerdo con análisis del Banco Mundial, la mayoría de los países que han establecido mecanismos de fijación de precio del carbono toman como punto de partida el costo social de las emisiones de carbono (SCC por sus siglas en inglés), el cual corresponde a un estimado en dólares de los daños económicos resultantes de emitir una tonelada adicional de gases de efecto invernadero a la atmósfera.

En este sentido, el SCC proyecta las emisiones futuras con base en la población, el crecimiento económico, las futuras respuestas climáticas, así como los impactos monetarios que estos cambios tendrán en la agricultura, la salud, uso de energía y otros aspectos de la economía. Lo anterior, con el objetivo de determinar el valor presente de los daños futuros (Rennert & Kingdon, 2019).

Ahora bien, los modelos que estiman el SCC se soportan en lo que se conoce como Modelos de Análisis Integrados (MAI), que proporcionan una descripción cuantitativa de cómo el desarrollo humano y las elecciones sociales se afectan entre sí y al mundo natural, incluido el cambio climático (United Nations Climate Change, s.f.).

Estos modelos contemplan varios bloques en donde se destacan: (i) aquel que incluye las relaciones entre emisiones de gases de efecto invernadero y los niveles de concentración de CO₂ en la atmósfera, (ii) el que mide la correlación entre los niveles de concentración de las emisiones en la atmósfera y los cambios en la temperatura (en algunos casos se incluyen además probabilidades de eventos extremos) y (iii) el bloque donde se especifican las relaciones entre los cambios en la temperatura y los daños físicos y su valuación económica (Alatorre, Caballero, Ferrer, & Galindo, 2019).

Dentro de los modelos más conocidos, se encuentra el DICE (Dynamic Integrated Model of Climate-Economy) desarrollado por William Nordhaus en 1992, el cual considera la economía del cambio climático desde la teoría neoclásica, basado en inversiones de capital, educación y tecnología (Nordhaus, Revisiting the social cost of carbon, 2017).

Este modelo incluye una función de daño⁶ que vincula la temperatura promedio global con el impacto global en la economía mundial, que varía de forma cuadrática con el cambio de temperatura para capturar el aumento más rápido de los daños que se espera que ocurran en condiciones climáticas más extremas, y está calibrado para incluir los efectos del calentamiento en la producción de bienes y servicios de mercado y de no mercado (Cartes, 2018).

Con base en el modelo DICE, posteriormente en 1996 William Nordhaus y Zili Yang crean el modelo Regional dynamic Integrated model of Climate and the Economy), que divide el mundo en 12 regiones, representadas por una función de bienestar social⁷, que optimiza su consumo, políticas de GEI e inversión en el tiempo. De esta manera, la función de bienestar social es creciente de acuerdo con el consumo per cápita de cada generación, con una utilidad marginal decreciente del consumo (Nordhaus, Evolution of Modeling of the Economics of Global Warming: Changes in the DICE model, 2018).

Por tanto, la importancia del consumo per cápita de una generación depende de su tamaño relativo y se mide utilizando una tasa pura de preferencia temporal, y la curvatura de la función de utilidad viene dada por la elasticidad de la utilidad marginal del consumo. Estos parámetros están calibrados para garantizar que la tasa de interés real en el modelo esté cerca de

⁶ Es una expresión simplificada de los daños económicos (que teóricamente pueden abarcar efectos tanto positivos como negativos) en función de los aportes climáticos, como los cambios de temperatura. Estas funciones se basan en análisis de regresión.

⁷ El nivel de bienestar en una economía o sociedad expresado en función de variables económicas. Este es el sentido de Bergson-Samuelson. El bienestar social se puede expresar como una función $W(X_1, \dots, X_n)$ de los niveles de consumo agregado X_i de los bienes $i = 1, \dots, n$.

la tasa de interés real promedio y el rendimiento real promedio del capital en los mercados del mundo real (Nordhaus, National Bureau of Economic Research, 2011).

Otro modelo comúnmente utilizado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) para calcular el SCC es el Policy Analysis of the Greenhouse Effect (PAGE) diseñado por Chris Hope en 1991 para uso de la Comunidad Europea. Este modelo estocástico incorpora ecuaciones ambientales y económicas simplificadas para aproximar fenómenos como el forzamiento radiactivo y los impactos económicos. Lo anterior, mediante el uso de distribuciones de probabilidad para variables económicas y ambientales, el modelo calcula un rango, y no un mejor parámetro, para resultados como temperaturas, impactos y costos (Integrated Assessment Modeling Consortium, 2022).

Este modelo en particular divide los impactos en categorías económicas, no económicas y catastróficas y calcula estos impactos por separado para ocho regiones geográficas. Mientras que, los daños en cada región se expresan como una fracción de la producción, donde la fracción perdida depende del cambio de temperatura en cada región. Por su parte, en la versión PAGE2002 se modelan las consecuencias de eventos catastróficos en una sub función de daño separada. Asimismo, a diferencia de DICE, PAGE2002 modela estos eventos de forma probabilística, con probabilidad de una discontinuidad que aumenta con la temperatura por encima de un umbral especificado (Cartes, 2018).

Por su parte, el modelo Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution (FUND) creado por Ricardo Tol, inicialmente tenía como objetivo estudiar el papel de las transferencias internacionales de capital en la política climática, pero a su vez permitió estudiar los impactos del cambio climático en un contexto global, y ahora se usa para realizar análisis de costos y beneficios, de rentabilidad de las políticas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, entre otras aplicaciones (Velasco, 2017).

Al igual que PAGE, el modelo FUND trata el crecimiento del PIB como exógeno e incluye funciones de daños calibradas por separado para ocho sectores de mercado y de no mercado: agricultura, silvicultura, agua, energía, aumento del nivel del mar, ecosistemas, salud humana y clima extremo. En algunos sectores de impacto, la porción de producción perdida o ganada a razón del cambio climático depende no solo de las variaciones de la temperatura sino también de la tasa de cambio de temperatura y del nivel de ingreso por regiones (Cartes, 2018).

De igual forma, el modelo se ejecuta en pasos de tiempo de un año desde 1950 hasta 2300, y distingue 16 regiones principales del mundo y más de una docena de categorías de daños económicos asociados con el cambio climático (United States Environmental Protection Agency, 2012).

Sin embargo, de acuerdo con la CEPAL dentro de los principales puntos de debate frente a las diferentes metodologías de cálculo del SCC se encuentra: (i) Tasas de descuento y ponderaciones por equidad, teniendo en cuenta las diferencias por región en relación al ingreso per cápita (ii) los métodos de valoración económica para bienes y servicios que no tienen un valor económico asignado directamente o que su valor económico asignado resulta altamente debatible (iii) la incertidumbre frente relaciones entre las emisiones de GEI, el ciclo de vida del carbono y los efectos en el clima, y (iv) la incorporación de efectos catastróficos cuya distribución de probabilidad puede aumentar en el futuro, la presencia de efectos irreversibles y de puntos de quiebre (Alatorre, Caballero, Ferrer, & Galindo, 2019).

Adicionalmente, otros autores consideran que uno de los principales defectos de los modelos basados en los Modelos de Análisis Integrados es que estos representan la relación entre el aumento de la temperatura global y la actividad económica utilizando una función de daño, que es una ecuación que traduce el impacto de un cambio de temperatura debido a un aumento

en la concentración atmosférica de CO₂ en efectos sobre el bienestar humano, expresado como un equivalente cambio en la producción económica (a menudo medido como un porcentaje del PIB mundial) (Stern, Stiglitz, Karlsson, & Taylor, 2022).

En la mayoría de los IAM, esta función de daño supone que la tasa de crecimiento del PIB es exógena, lo que significa que es predeterminada y constante y, por lo tanto, no responde a los daños causados por el clima ni a las medidas políticas adoptadas para mitigar el cambio climático (Stern, Stiglitz, Karlsson, & Taylor, 2022).

Adicionalmente, Robert Pindyck en el artículo “The Social Cost Of Carbon Revisited” argumenta que los IAMs no cuentan con la suficiente evidencia para determinar altos cambios en las temperaturas o eventos realmente catastróficos. Razón por la cual diseña un modelo que calcula el SCC promedio como la relación entre el valor actual de los daños de un resultado extremo y la reducción total de emisiones necesaria para evitar ese resultado. Modelo que se basa en la obtención de opiniones de expertos con respecto a (i) las probabilidades de resultados económicos alternativos del cambio climático y, en particular, resultados extremos, pero no las causas particulares de esos resultados; y (ii) la reducción de emisiones que sería necesaria para evitar esos resultados extremos (Pindyck, 2016).

De forma que, en la actualidad según la CEPAL, además del mecanismo de fijación de precio a través del SCC, existe una tendencia a utilizar en los análisis de costo beneficio o un precio sombra del carbono derivado de los costos marginales de abatimiento. Así, se determina la diferencia entre los daños causados por el cambio climático por un cambio marginal en las emisiones de CO₂. En este sentido, las curvas de costos de abatimiento⁸ son una base

⁸ De acuerdo con la CEPAL este tipo de curvas muestran el costo marginal de implementar cada medida y el potencial de abatimiento de éstas con respecto a una línea base; la cual cambia a medida se incorpora una nueva medida de mitigación y es la variable decisiva para evaluar el costo y el potencial de abatimiento de cada una de las medidas.

cuantitativa de lo que cuesta reducir las emisiones, ya que representan los costos adicionales de reemplazar una tecnología de referencia por una alternativa de menores emisiones (Alatorre, Caballero, Ferrer, & Galindo, 2019).

Sin embargo, James K. Boyce en su estudio *Carbon Pricing: Effectiveness and Equity* (Boyce, *Carbon Pricing: Effectiveness and Equity*, 2018) argumenta, que medir los costos marginales de abatimiento presentan más dificultades al momento de encontrar un precio óptimo al carbono. Lo anterior, al considerar que no solo existe un alto nivel de incertidumbre frente a los costos marginales de reducción actuales, sino que las curvas de costos podrían modificar su trayectoria con el tiempo, al igual que las funciones de daño, la medición se hace más problemática al extrapolar fuera del rango de la experiencia pasada.

De otra parte, dentro de los estudios más recientes impulsados por Joseph Stiglitz y Nicholas Stern, se han propuesto alternativas como la fijación de un precio coherente con un objetivo, de manera que se estime cuánto costaría cada año lograr una reducción de una tonelada de carbono. Esta alternativa, se enfoca en determinar la forma más rentable de alcanzar un objetivo acordado, como un límite de temperatura para el calentamiento global. Adicionalmente, bajo este enfoque se da por sentado que el objetivo del Acuerdo de París de limitar el calentamiento global a muy por debajo de 2°C y el compromiso de la administración Biden de que EE. UU. alcance emisiones netas cero para 2050 debe cumplirse (Stern, Stiglitz, Karlsson, & Taylor, 2022).

Por tanto, los costos asociados a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero se pueden usar para informar el cálculo de una trayectoria temporal de los precios del carbono que refleje la trayectoria de menor costo para alcanzar estos objetivos. Se deben usar múltiples líneas de evidencia para guiar el cálculo de esta trayectoria de precios, por ejemplo, hojas de ruta tecnológicas que revelen los "precios cambiantes" necesarios para hacer que las

tecnologías bajas en carbono sean competitivas con sus contrapartes basadas en combustibles fósiles; ejercicios de modelado nacional que proporcionen estimaciones del precio sombra del carbono necesario para lograr la descarbonización en una economía determinada; y modelos de economía energética que producen escenarios globales de desarrollo socioeconómico y tecnológico futuro que son consistentes con diferentes objetivos de temperatura global (Stern, Stiglitz, Karlsson, & Taylor, 2022).

De acuerdo con un estudio realizado por William Nordhaus, en el que se compara el SCC derivado de DICE (Dynamic Integrated Model of Climate and the Economy) con el precio que estima que sería necesario para limitar el aumento de la temperatura media global a 2,5 °C, se determinó que el precio debería alcanzar los 230 dólares por tonelada de CO₂ en 2020, aumentando a alrededor de 1.000 dólares en 2050, brecha que aún mayor si la restricción de temperatura fuera el objetivo de París de 1,5-2 °C (Boyce, Carbon Pricing: Effectiveness and Equity, 2018).

De otra parte, en vista de la brecha entre los objetivos del Acuerdo de París y los compromisos y políticas de emisiones actuales, el Fondo Monetario Internacional (FMI) propuso establecer un precio mínimo del carbono (ICPF), que cree una plataforma para aumentar las ambiciones internacionales de reducción de emisiones. El ICPF tiene dos componentes clave: (1) sería negociado entre un pequeño número de grandes países emisores clave, y (2) la negociación se centraría en el precio mínimo de carbono que cada uno debe poner en sus emisiones de CO₂ (Parry, Black, & Roaf, 2021).

En principio se podrían especificar precios mínimos múltiples, de acuerdo con las convenciones aceptadas para el nivel de desarrollo del país, para promover una distribución más equitativa de las cargas entre los países (aunque la contrapartida sería cierta pérdida de eficiencia económica desde una perspectiva global) (Parry, Black, & Roaf, 2021).

Por su parte, respecto a la asignación de precios en los mercados de emisiones ETS, el mecanismo establece un límite máximo, o un “tope”, en las emisiones de GEI de las instalaciones y sectores cubiertos por la regulación. Esta cantidad total de asignaciones disponibles se encuentra por debajo de los niveles habituales, creando un precio de escasez o de mercado para los derechos de emisión basado en la oferta y la demanda (Carbon Pricing Leadership Coalition, 2017).

Los emisores “regulados”, aquellos sujetos al tope de emisiones, pueden comprar y vender derechos de emisión para cumplir con sus obligaciones de cumplimiento. Según cómo se asignen los derechos de emisión (p. ej., mediante subasta o en función de las emisiones históricas), las empresas pueden optar por cumplir con sus obligaciones reduciendo sus propias emisiones o comprando derechos de emisión (United Nations Global Compact, 2015).

Respecto a la formación de precios en estos, algunos análisis como el de Gary Koop y Lise Tole (Koop & Tole, *Forecasting the European Carbon Market*, 2011), dan a conocer que como cualquier mercado de commodities existen factores que influyen en los precios como la oferta de permisos que fija la Comisión Europea (para el caso del EU ETS), la incertidumbre sobre un acuerdo climático global, el tamaño del tope futuro y la elegibilidad y el número de algunos tipos de compensaciones permitidas, entre otros.

Adicionalmente, otros estudios han encontrado una importante influencia de los cambios en la oferta y demanda de energía en los precios del carbono, tal y como lo mencionan Bunn y Fezzi (2007) en su paper “Interaction of European Carbon Trading and Energy Prices”, que encontraron que el precio del carbono reacciona rápidamente al precio del gas y al precio del petróleo. Esta última relación, fue estudiada más a profundidad por Convery and Redmond

(2007) en el Market and Price Developments in the European Union Emissions Trading Scheme. Review of Environmental Economics and Policy.

Por su parte, Mansanet- Batallet et al (2010) midieron los precios de los combustibles en toda la UE y un índice meteorológico de varias ciudades en el primer año del mercado de carbono para analizar los precios de los permisos de carbono, y lograron evidenciar que por ejemplo, la temperatura en Alemania es el único impulsor significativo de los precios (Koop & Tole, Forecasting the European Carbon Market, 2011).

Asimismo, hay evidencia respecto a la relación de varios factores económicos y financieros asociados con los precios del carbono, sin embargo, Chevallier (2009) incluyó varios factores de riesgo macroeconómicos en un análisis de los determinantes macroeconómicos de los precios de EUA, pero solo encuentra una asociación débil entre los precios del carbono y las variables de acciones y bonos.

En este sentido, los principales estudios realizados en este tema, se han enfocado en analizar la relación de los precios del carbono con las fluctuaciones de otros *commodities* como el petróleo, el gas, el carbón y el oro, a la vez que con los precios de mercado de renta variable y fija.

6. Desarrollo y Despliegue Metodológico.

Para investigar las fluctuaciones de precios del sistema de comercio de emisiones de la Unión Europea (EU ETS), se analizaron los precios diarios de este mercado desde octubre de 2017 hasta marzo de 2023, los cuales se encuentran disponibles en la página web de International Carbon Action Partnership⁹ y cuya unidad de medida corresponde a euros por tonelada de CO₂.

A partir de la revisión de la literatura se pudo evidenciar que como cualquier *commodity*, los precios del carbono responden a ciertos fundamentales, así como a los cambios en la oferta y demanda de permisos de emisión. De esta manera, la mayor parte de los análisis se han enfocado en la relación con la demanda de energía y los precios de los combustibles fósiles.

De acuerdo con lo anterior, y según la disponibilidad de información para esta investigación se seleccionaron las siguientes variables:

- Precios del petróleo: Precios históricos diarios del petróleo WTI (West Texas Intermediate) y BRENT en dólares por barril, tomados de S&P Capital IQ Pro, teniendo en cuenta la relación que mantienen los precios del petróleo con los cambios en los precios de otras materias primas. Aspecto que toma relevancia al considerar la alta carga de CO₂ que conllevan las industrias extractivas.
- Precios del carbón: Futuros del API 2 (medido en dólares por tonelada métrica), principal referencia de precios para el carbón importado al noroeste de Europa, tomados de Investing. Se calcula como un promedio de la evaluación de precios cif ARA de Argus y el IHS McCloskey NW Europe Steam Coal (Argus Media, 2023). Esta variable influye en los precios del carbono, como consecuencia del cambio de suministro de las plantas de

⁹ La International Carbon Action Partnership (ICAP) es un foro internacional para gobiernos y autoridades públicas que han implementado o planean implementar sistemas de comercio de emisiones (ETS).

generación de energía a gas por el uso de carbón, el combustible fósil con mayor intensidad de CO₂ (Koop & Tole, Forecasting the European Carbon Market, 2011).

- Futuros de TTF Natural Gas Price Index: El TTF (Title Transfer Facility) es el principal mercado de referencia para el comercio de gas en Europa, con sede en Ámsterdam. Existen otros índices nacionales, como el índice PSV en Italia, el PEG en Francia o el NCG en Alemania, sin embargo, el TTF es la principal referencia del gas natural en el mercado europeo. En línea con lo mencionado anteriormente, y como lo relacionan Mansanet et al, 2007, los precios del gas influyen en los precios del carbono dependiendo el cambio de suministro de las plantas de generación de energía.
- Activos de Renta Variable: Precios diarios del Índice MSCI Europe (en dólares americanos) el cual captura las empresas de mediana y alta bursatilidad en 15 países de mercados desarrollados de Europa, el cual representa aproximadamente el 85% de la capitalización de mercado (Morgan Stanley Capital International - MSCI, 2023). Asimismo, los precios del Índice EuroStoxx 50, que se deriva del Índice Euro Stoxx y representa el desempeño de las 50 empresas más grandes en términos de capitalización de la Eurozona. De acuerdo con Gary Koop & Lise Tole (2011) los rendimientos del mercado de valores son un indicador de crecimiento de la economía, por lo cual, se espera que en etapa expansiva aumente la demanda de energía y, por lo tanto, de permisos de emisión de carbono.
- Tasa de cambio EUR/USD: Serie diaria tomada de S&P Capital IQ Pro, como una aproximación de los cambios en la economía de la zona euro. Al igual que, en los activos de renta variable, un euro fuerte es un indicador de crecimiento económico y expansión empresarial.

- Activos de Renta Fija: Rendimientos del bono alemán a 10 años, según Chevallier 2009 y 2011 la producción industrial y los cambios macroeconómicos de los países, impactan significativamente el mercado de carbono. De esta manera, el bono alemán recoge la evolución de la principal economía de la Unión Europea por PIB (3,87 trillones de euros en 2022), en la referencia más líquida del mercado.
- Futuros del precio del oro medido en dólares por gramo por centímetro cúbico, además de su relación con el precio de otros *commodities*, de acuerdo con la literatura, el oro se caracteriza por mantener un *status* de activo seguro frente a las pérdidas en los mercados financieros. De forma que, el oro se convierte en el activo más demandado en momentos de incertidumbre financiera.
- Futuros del precio del cobre de London Metal Exchange, el centro más importante para el comercio de metales industriales, medido en dólares por tonelada tomado de Investing. De igual forma, el cobre mantiene una correlación con el precio de otros *commodities* y en particular, según el IMF (International Monetary Fund), de ser un indicador de cambios en las condiciones económicas de un país o región, como en el caso de UE.

Adicionalmente, existen otros factores a los cuales la literatura ha denominado como institucionales, dentro de los cuales se incluyó el tope de permisos de emisión, que en los primeros años del mercado jugó un papel fundamental en mantener los precios relativamente bajos, teniendo en cuenta un exceso de permisos que fueron asignados de manera gratuita.

Los topes de emisión corresponden a los establecidos en cada una de las fases definidas por la Comisión Europea de la siguiente manera:

- Fase Uno (2005-2007) y Fase Dos (2008-2012): El tope se estableció de abajo hacia arriba, con base en la agregación de los planes de asignación de cada Estado miembro. La Fase 1

comenzó con un tope de 2096 MtCO en 2005. Mientras que la Fase 2 comenzó con un tope de 2049 MtCO en 2008.

- Fase Tres (2013-2020): Un límite único para toda la UE establecido en 2084 MtCO en 2013, reducido anualmente por un factor lineal del 1,74 % (de las emisiones de referencia de 2008-2012). Esto se tradujo en una reducción interanual del límite en unos 38 millones de derechos y resultó en un límite de 1.816 MtCO en 2020.
- Fase Cuatro (2021-2030): Un límite único para toda la UE de 1572 MtCO en 2021, sujeto a un factor de reducción lineal del 2,2 % anual (de las emisiones de referencia de 2008-2012). Esto se traduce en una reducción interanual del tope en unos 43 millones de derechos. El factor de reducción lineal no tiene una cláusula de caducidad y el tope seguirá disminuyendo más allá de 2030. A partir de 2021, las emisiones de las instalaciones del Reino Unido, anteriormente cubiertas por el EU ETS, ya no se consideran en el límite.

Con el fin de estandarizar esta variable con los demás datos recolectados, que son de periodicidad diaria, se tomó el total de permisos de emisión anuales y se dividieron en 365, de forma que la variable transformada pudiese ser incorporada en la base de datos.

Posterior a la selección y consolidación de estas series de precios, se realizó una depuración de la base de datos, según la disponibilidad de información y eliminación de datos atípicos, además de una transformación de los precios a retornos logarítmicos, con el fin de suavizar la volatilidad de la serie de datos. De esta manera, para el análisis se cuenta con un total de 1332 observaciones para cada una de las 12 variables seleccionadas.

Estos datos estandarizados serán objeto de análisis por medio de un modelo auto regresivo integrado de media móvil, conocido como metodología de Box-Jenkins, el cual de acuerdo con la teoría es “un método de pronóstico enfocado en el análisis de las propiedades

probabilísticas, o estocásticas, de las series de tiempo económicas, según la filosofía de que los datos hablen por sí mismos” (Damodar N. & Dawn C., 2009).

De igual forma, se empleará un modelo de regresión lineal múltiple, bajo el método de mínimos cuadrados ordinarios, toda vez que este permite evidenciar la dependencia de los precios del carbono respecto a las variables explicativas, a la vez que proporciona valores estimados únicos que reducen los términos de error (Damodar N. & Dawn C., 2009).

7. Resultados.

A través de esta investigación se busca evidenciar la magnitud e importancia del volumen transado en el sistema de comercio de emisiones de la Unión Europea, así como identificar las variables que tienen una mayor influencia en las fluctuaciones de precio.

En primer lugar, con el fin de identificar los determinantes del precio del carbono, se construyó la matriz de correlaciones con las variables seleccionadas previamente, la cual se presenta en la **Figura 3**:

Figura 3.
Matriz de Correlaciones

	PRECIOS_CARBONO	WTI	ORO	MSCI_EUROPE	EURO_STOXX_50	EUR_USD	EMISSIONS_CAP...	DUTCH_TTF...	COBRE	CARBON	BRENT	BONO_ALEMAN
PRECIOS_CARBONO	1.000000	0.730907	0.682171	0.410065	0.657940	-0.552499	-0.929937	0.761204	0.769981	0.765909	0.687489	0.539408
WTI	0.730907	1.000000	0.204094	0.431352	0.567716	-0.393393	-0.654761	0.729113	0.678282	0.850291	0.990938	0.604146
ORO	0.682171	0.204094	1.000000	0.342127	0.447871	-0.189042	-0.747731	0.366911	0.629313	0.365702	0.114223	0.045208
MSCI_EUROPE	0.410065	0.431352	0.342127	1.000000	0.902108	0.397352	-0.511713	0.123327	0.796046	0.156017	0.382380	-0.037587
EURO_STOXX_50	0.657940	0.567716	0.447871	0.902108	1.000000	0.002670	-0.692387	0.340635	0.811143	0.339707	0.524457	0.227255
EUR_USD	-0.552499	-0.393393	-0.189042	0.397352	0.002670	1.000000	0.386022	-0.636497	0.020775	-0.593994	-0.412647	-0.551686
EMISSIONS_CAP_AN...	-0.929937	-0.654761	-0.747731	-0.511713	-0.692387	0.386022	1.000000	-0.680692	-0.850922	-0.690110	-0.598281	-0.437613
DUTCH_TTF_GAS_P...	0.761204	0.729113	0.366911	0.123327	0.340635	-0.636497	-0.680692	1.000000	0.500876	0.917102	0.720009	0.559235
COBRE	0.769981	0.678282	0.629313	0.796046	0.811143	0.020775	-0.850922	0.500876	1.000000	0.567791	0.618701	0.275037
CARBON	0.765909	0.850291	0.365702	0.156017	0.339707	-0.593994	-0.690110	0.917102	0.567791	1.000000	0.834804	0.605526
BRENT	0.687489	0.990938	0.114223	0.382380	0.524457	-0.412647	-0.598281	0.720009	0.618701	0.834804	1.000000	0.633254
BONO_ALEMAN	0.539408	0.604146	0.045208	-0.037587	0.227255	-0.551686	-0.437613	0.559235	0.275037	0.605526	0.633254	1.000000

Fuente: Elaboración propia.

De lo anterior, se puede inferir que, alineado con la literatura, los precios de las materias primas como el cobre, el gas, el carbón, el oro, el WTI, el BRENT, así como el EuroStoxx 50 son los que presentan una correlación fuerte y directa con los precios del carbono, al tener una correlación superior al 0,68 (correlación más baja de los commodities). Mientras que, existe una correlación más débil, aunque positiva (inferior al 0,6) con los retornos del bono alemán a 10 años y el MSCI Europe. A diferencia de lo evidenciado con el total de permisos de emisión cuya correlación es fuerte negativa (-0,92).

Posteriormente, se realizó una regresión lineal múltiple en el software Eviews, bajo el método de mínimos cuadrados ordinarios, tomando como variable dependiente los retornos de los precios del carbono en función de los demás insumos, cuyos resultados se presentan en la

Tabla 1:

Tabla 1.

Modelo de Regresión Lineal Múltiple

Dependent Variable: PRECIOS_CARBONO

Method: Least Squares

Date: 09/20/23 Time: 21:00

Sample (adjusted): 10/24/2017 3/31/2023

Included observations: 1332 after adjustments

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
WTI	0.060319	0.043153	1.397803	0.1624
ORO	-0.010811	0.089278	-0.121093	0.9036
MSCI_EUROPE	0.069316	0.223149	0.310626	0.7561
EURO_STOXX_50	0.500145	0.199574	2.506064	0.0123
EMISSIONS_CAP_AND_ALLOWANCES	-0.081166	0.172773	-0.469785	0.6386
EUR_USD	0.094689	0.226050	0.418885	0.6754
DUTCH_TTF_GAS_PRICES	0.090704	0.015148	5.987980	0.0000
COBRE	0.165602	0.069781	2.373178	0.0178
CARBON	-0.003127	0.025159	-0.124298	0.9011
BRENT	0.017498	0.059143	0.295863	0.7674
BONO_ALEMAN	0.014066	0.094216	0.149300	0.8813
C	0.001635	0.000818	1.999133	0.0458
R-squared	0.125397	Mean dependent var		0.001865
Adjusted R-squared	0.118109	S.D. dependent var		0.030449
S.E. of regression	0.028594	Akaike info criterion		-4.262247
Sum squared resid	1.079280	Schwarz criterion		-4.215450
Log likelihood	2850.657	Hannan-Quinn criter.		-4.244710
F-statistic	17.20517	Durbin-Watson stat		2.045791
Prob(F-statistic)	0.000000			

Fuente: Elaboración propia.

De los resultados del modelo, se puede inferir mediante el R cuadrado ajustado que el 11,8% de las variaciones de los retornos de los precios del carbono, son explicados por las

variables seleccionadas. Adicionalmente, se puede determinar con un nivel de significancia del 5% y el criterio del p valor que el WTI, el Oro, el MSCI Europe, el carbón, los retornos del bono alemán y el número de permisos de emisión (Emissions Cap and Allowances) no tienen relevancia para explicar los cambios en los retornos de los precios del carbono.

Caso contrario se puede evidenciar con el gas, el cobre, el petróleo BRENT y los retornos del Euro Stoxx 50, los cuales con un criterio del P valor y un nivel de significancia del 5% muestran relevancia para explicar los retornos del carbono.

De esta manera, al remover aquellas variables que no presentaban relevancia para el análisis y al revisar los coeficientes de las variables seleccionadas, se puede inferir que un incremento del 1% en los retornos del Euro Stoxx 50 implica un aumento del 0,56% de los retornos del carbono, manteniendo las demás variables constantes. Mientras que, un aumento del 1% en los retornos del cobre tiene un impacto del 0,18% en los retornos del carbono. Aspecto que, también se evidencia en menor proporción con los cambios en los retornos del gas y del petróleo Brent, como se ilustra en la **Tabla 2:**

Tabla 2.
Modelo de Regresión Lineal Múltiple

Dependent Variable: PRECIOS_CARBONO
Method: Least Squares
Date: 08/27/23 Time: 20:43
Sample (adjusted): 10/24/2017 3/31/2023
Included observations: 1332 after adjustments

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
EURO_STOXX_50	0.564026	0.064844	8.698196	0.0000
DUTCH_TTF_GAS_PRICES	0.087368	0.014425	6.056739	0.0000
COBRE	0.183966	0.065170	2.822846	0.0048
BRENT	0.083999	0.031761	2.644735	0.0083
C	0.001670	0.000782	2.135025	0.0329
R-squared	0.123492	Mean dependent var		0.001865
Adjusted R-squared	0.120850	S.D. dependent var		0.030449
S.E. of regression	0.028550	Akaike info criterion		-4.270582
Sum squared resid	1.081631	Schwarz criterion		-4.251083
Log likelihood	2849.207	Hannan-Quinn criter.		-4.263275
F-statistic	46.74068	Durbin-Watson stat		2.045116

Prob(F-statistic) 0.000000

Fuente: Elaboración propia.

Una vez definidas las variables que presentan significancia para explicar los cambios en los retornos de los precios del carbono, se llevó a cabo una validación de los supuestos del modelo de regresión múltiple por el método de mínimos cuadrados ordinarios.

En primer lugar, se validó la existencia de no multicolinealidad mediante el factor de inflación de la varianza de cada una de las variables como se evidencia en la **Tabla 3**. Por tanto, con un VIF inferior a 10 se puede inferir que las variables del modelo no se encuentran altamente correlacionadas entre sí, permitiendo distinguir el efecto que cada una de las variables mantiene en las variaciones de los retornos de los precios del carbono.

Tabla 3.

Factor de Inflación de la Varianza

Variance Inflation Factors
Date: 09/20/23 Time: 21:09
Sample: 10/24/2017 3/31/2023
Included observations: 1332

Variable	Coefficient Variance	Uncentered VIF	Centered VIF
EURO_STOXX_50	0.004205	1.184293	1.184169
DUTCH_TTF_GAS_PRI			
CES	0.000208	1.034467	1.034286
COBRE	0.004247	1.213497	1.213254
BRENT	0.001009	1.201320	1.201218
C	6.12E-07	1.000411	NA

Fuente: Elaboración propia.

En segundo lugar, se comprobó el supuesto de homoscedasticidad o varianza constante de los errores con el Harvey Test, en la cual con un nivel de significancia del 5% inferior al P valor, se determina que la varianza de los errores es constante, como se evidencia en la **Tabla 4**.

Tabla 4.
Test de Heteroscedasticidad de Harvey

Heteroskedasticity Test: Harvey				
F-statistic	0.655781		Prob. F(4,1327)	0.6228
Obs*R-squared	2.627812		Prob. Chi-Square(4)	0.6219
Scaled explained SS	2.875519		Prob. Chi-Square(4)	0.5789
Test Equation:				
Dependent Variable: LRESID2				
Method: Least Squares				
Date: 09/20/23 Time: 21:11				
Sample: 10/24/2017 3/31/2023				
Included observations: 1332				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-8.719476	0.063741	-136.7948	0.0000
EURO_STOXX_50	-3.620823	5.282622	-0.685422	0.4932
DUTCH_TTF_GAS_PRICES	-0.239814	1.175155	-0.204070	0.8383
COBRE	-6.185209	5.309215	-1.164995	0.2442
BRENT	0.577245	2.587439	0.223095	0.8235
R-squared	0.001973	Mean dependent var		-8.721148
Adjusted R-squared	-0.001036	S.D. dependent var		2.324657
S.E. of regression	2.325861	Akaike info criterion		4.529804
Sum squared resid	7178.576	Schwarz criterion		4.549303
Log likelihood	-3011.849	Hannan-Quinn criter.		4.537111
F-statistic	0.655781	Durbin-Watson stat		1.882611
Prob(F-statistic)	0.622841			

Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, al evaluar el supuesto de no auto correlación de los errores con el Test de White se comprobó que existe una correlación sistemática entre los residuos de las variables en diferentes observaciones. Aspecto que, según la teoría está relacionado con las características de las series de tiempo con estacionalidad y tendencia, además de la relación que comparten las variables al estar en función de la ubicación geográfica, para este análisis la Unión Europea.

En este sentido, a partir del modelo presentado en la **Tabla 4**, se llevó a cabo una estimación de los precios del carbono para el periodo comprendido entre el 3 y el 5 de abril de 2023, con los datos reales del Euro Stoxx 50, del TTF Natural Gas Price Index, del Cobre y del Petróleo Brent, cuyos resultados se encuentran en la **Tabla 5**. Es así como, los precios estimados

presentan un error de pronóstico de subestimación promedio de 3,53 euros por tonelada de CO2 por día.

Tabla 5.
Resultados Modelo de Regresión Múltiple

Fecha	Euro Stoxx 50	Brent	Cobre	Dutch TTF	Precio Carbono Estimado	Precio Carbono Real
3/04/2023	4.311,1	84,9	8.917,0	51,4	90,2	93,0
4/04/2023	4.315,3	84,9	8.751,0	46,6	89,3	92,3
5/04/2023	4.298,4	85,2	8.782,0	44,6	89,0	94,0

Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, con base en el modelo, se diseñaron dos escenarios: El primero, relacionado con el cumplimiento de la meta de cero emisiones para 2050 establecido en el Acuerdo de París. Con lo cual, según las estimaciones de la International Energy Agency, los precios del petróleo y del gas natural serían significativamente más bajos, con disminuciones de hasta el 50% y 20%, respectivamente, frente a los observados en 2010. Lo anterior, al considerar el incremento en el uso de energías renovables, así como la reducción de los gastos por exploración y desarrollo (International Energy Agency, 2021).

Así, manteniendo las demás variables del modelo constantes, y sin incorporar los cambios en la demanda de permisos de emisión, se estima un precio del carbono de aproximadamente 81 euros por tonelada de CO2, cuya eficiencia en relación al aporte en la reducción de los niveles de CO2 en la atmósfera y mitigación del incremento de la temperatura, sobrepasan el alcance de esta investigación.

Ahora bien, el segundo escenario planteado corresponde a un choque externo en los mercados financieros similar al evidenciado en marzo de 2020 cuando la Organización Mundial de la Salud declaró al Covid-19 como una pandemia. Esto, teniendo en cuenta el riesgo que

representan los fenómenos climáticos extremos para la salud pública, ante un continuo incremento en los niveles de temperatura de la tierra.

En este sentido, al incluir en el modelo los precios del Euro Stoxx 50, del TTF Natural Gas Price Index, del Cobre y del Petróleo Brent evidenciados el 12 de marzo de 2020, se estimó un precio de 48,96 euros por tonelada de CO₂ frente al precio real de dicha jornada, en la que el precio del carbono descendió a 22,5 euros por tonelada de CO₂. Para este escenario, el error de estimación asciende a 26,46 euros por tonelada de CO₂, superior al evidenciado en el escenario base, teniendo en cuenta que eventos como el planteado en este escenario, que se caracterizan por una baja frecuencia, pero muy alta severidad, tienen efectos en otros factores no incluidos en esta investigación.

De otra parte, con el objetivo de realizar una estimación de los precios del carbono basada únicamente en las propiedades de la data y de su condición de serie de tiempo, se empleó un modelo auto regresivo de medias móviles (Modelos ARIMA). Para alcanzar este objetivo, se llevó a cabo nuevamente una transformación de la serie de precios a retornos medidos en logaritmo natural, con el fin de convertir la serie en estacionaria, con media y varianza constante.

Para este proceso se realizó la prueba de raíz unitaria aumentada de Dickey-Fuller (**Tabla 6**), en la cual con un nivel de significancia del 5% inferior al P valor, se determina que la serie es estacionaria.

Tabla 6.
Prueba de raíz aumentada de Dickey – Fuller

Null Hypothesis: DLOGPRECIOS_CARBONO has a unit root
 Exogenous: Constant
 Lag Length: 0 (Automatic - based on SIC, maxlag=22)

		t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic		-37.99818	0.0000
Test critical values:	1% level	-3.435052	
	5% level	-2.863504	
	10% level	-2.567865	

*MacKinnon (1996) one-sided p-values.
 Augmented Dickey-Fuller Test Equation
 Dependent Variable: D(DLOGPRECIOS_CARBONO)
 Method: Least Squares
 Date: 09/20/23 Time: 21:25
 Sample (adjusted): 10/25/2017 3/31/2023
 Included observations: 1331 after adjustments

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
DLOGPRECIOS_CARBONO(-1)	-1.041459	0.027408	-37.99818	0.0000
C	0.001942	0.000836	2.322324	0.0204

R-squared	0.520712	Mean dependent var	6.45E-06
Adjusted R-squared	0.520351	S.D. dependent var	0.043961
S.E. of regression	0.030446	Akaike info criterion	-4.144244
Sum squared resid	1.231902	Schwarz criterion	-4.136440
Log likelihood	2759.994	Hannan-Quinn criter.	-4.141319
F-statistic	1443.862	Durbin-Watson stat	1.995599
Prob(F-statistic)	0.000000		

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, a través de la función de auto correlación y la función de auto correlación parcial, así como el correlograma resultante, se determinó como rezagos óptimos el número 2 y el número 5, los cuales fueron utilizados para realizar diferentes modelos con estructuras auto regresivas y de medias móviles, de los cuales se seleccionó aquel que presentó el menor valor de los criterios de información de Akaike y Schwarz, que se presenta en la **Tabla 7**.

Tabla 7.
Modelo AR(2) MA(5)

Dependent Variable: DLOG(PRECIOS_CARBONO)
 Method: ARMA Maximum Likelihood (OPG - BHHH)
 Date: 08/17/23 Time: 15:56
 Sample: 10/24/2017 3/31/2023
 Included observations: 1332
 Convergence achieved after 13 iterations
 Coefficient covariance computed using outer product of gradients

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	0.001866	0.000807	2.311900	0.0209
AR(2)	0.050976	0.021521	2.368606	0.0180
MA(5)	-0.124962	0.021281	-5.872061	0.0000
SIGMASQ	0.000910	2.19E-05	41.57073	0.0000
R-squared	0.017704	Mean dependent var		0.001865
Adjusted R-squared	0.015485	S.D. dependent var		0.030449
S.E. of regression	0.030212	Akaike info criterion		-4.158073
Sum squared resid	1.212177	Schwarz criterion		-4.142474
Log likelihood	2773.277	Hannan-Quinn criter.		-4.152227
F-statistic	7.978194	Durbin-Watson stat		2.075161
Prob(F-statistic)	0.000028			
Inverted AR Roots	.23	-.23		
Inverted MA Roots	.66	.20-.63i	.20+.63i	-.53+.39i
	-.53-.39i			

Fuente: Elaboración propia.

De igual forma, los residuos estimados cumplen con el supuesto de ruido blanco, razón por la cual se realizó una estimación de los precios del carbono para los tres días hábiles siguientes a la fecha de corte de la serie. Así, los precios estimados ascienden a 89,51 euros por tonelada de CO₂ para el primer día, 89,45 euros por tonelada de CO₂ para el segundo y 89,53 euros por tonelada de CO₂ para el tercero. Mientras que, los valores observados reales para dicho periodo ascendieron a 93,04 euros por tonelada de CO₂, 92,29 euros por tonelada de CO₂ y 93,96 euros por tonelada de CO₂, con un error de pronóstico de subestimación de 3,53 euros por tonelada de CO₂, 2,84 euros por tonelada de CO₂ y 4,43 euros por tonelada de CO₂.

8. Conclusión

De acuerdo con los resultados de los modelos seleccionados, así como los escenarios planteados, entre los principales determinantes de los precios del carbono, se encuentran en su mayoría los precios de combustibles fósiles y materias primas como el petróleo, el gas y el cobre, siendo estos esenciales para el desarrollo industrial y económico de la Unión Europea.

Sin embargo, contrario a lo esperado inicialmente, las fluctuaciones de estos no impactan en la misma proporción las variaciones de los precios del carbono en el EU-ETS, lo cual afectó las estimaciones de precios realizadas, en las que se presentaron constantes errores de subestimación y sobreestimación.

Aspecto que, entre otros puede atribuirse a que en el desarrollo de los modelos la información histórica procesada contenía lapsos con alta incertidumbre para los mercados financieros, con eventos extremos caracterizados por su baja frecuencia y alta severidad, como lo fueron la pandemia del Covid -19 y la invasión de Rusia a Ucrania.

Estos eventos, durante largos periodos influenciaron significativamente los precios en relación a lo evidenciado previamente, lo que, sumado a la correlación sistemática entre los residuos de las variables, permitieron evidenciar las limitaciones de los modelos para realizar estimaciones precisas y consistentes en situaciones de alta turbulencia. Asimismo, llegaron a contradecir algunas relaciones entre variables que habían sido probadas previamente según la literatura.

De igual forma, si bien el modelo de regresión lineal empleado para reconocer las relaciones entre variables proporciona un entendimiento e interpretación intuitiva y de fácil entendimiento, se pueden explorar otras alternativas estadísticas que permitan modelar las relaciones más complejas que surgen de cada una de las variables estudiadas. Esto, a su vez para

lograr incorporar más rápidamente la nueva información suministrada por los datos a lo largo del tiempo y no solo los impactos directos de las variables explicativas en la variable de salida.

De otra parte, la inclusión de las cuotas anuales de permisos de emisión no suministró información relevante para la estimación de los precios, lo que hace necesario para próximos estudios su incorporación mediante otras alternativas de transformación de variables, de forma que logren transmitir sus efectos de manera adecuada. Adicionalmente, dicha incorporación deberá contemplar la diferenciación de cuotas que se tiene establecida para el funcionamiento del sistema.

Asimismo, será relevante identificar las características y fundamentales de la demanda de permisos de emisión, así como desde su entendimiento se puede cumplir con el objetivo para el cual fueron creados los sistemas de comercio de emisiones, siendo este el de contribuir a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, en los tiempos en que el deterioro climático del planeta lo requieren.

Ahora bien, el EU-ETS es por excelencia el mercado de permisos de emisión con mayor experiencia a nivel de operaciones, institucionalidad y concentración de emisiones globales, por lo cual, será importante precisar en próximos estudios su eficiencia para la formación de precios y su contribución al cumplimiento de los objetivos de descarbonización de las economías después de casi 18 años desde su creación.

Caso contrario, sí es necesario su reestructuración, sería importante entre otros incorporar nuevos sectores al sistema e incentivar la innovación en tecnologías con bajas emisiones de carbono. Esto, con el fin de robustecer la cooperación multilateral en política climática, hacer frente a los desafíos energéticos y al reto del aumento de los precios, aprovechando el peso político y económico que mantienen los países que conforman la Unión Europea.

Finalmente, se podría explorar la viabilidad de un sistema de comercio de emisiones para Latinoamérica, que permita alinear los esfuerzos en materia de cambio climático, teniendo en cuenta los impactos materiales en el largo plazo, puesto que esta región posee una alta proporción de la biodiversidad de la tierra.

9. Referencias.

- Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA). (s.f.). Global Climate Change For NASA. Obtenido de <https://climate.nasa.gov/en-espanol/datos/efectos/>
- Alatorre, J. E., Caballero, K., Ferrer, J., & Galindo, L. M. (Octubre de 2019). Comisión Económica para América Latina y el Caribe - Cepal. Obtenido de www.cepal.org
- Argus Media. (2023). Obtenido de www.argusmedia.com
- Banco Mundial. (11 de Junio de 2014). Banco Mundial. Obtenido de <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2014/06/11/what-does-it-mean-to-put-a-price-on-carbon>
- BBVA. (2022). BBVA. Obtenido de <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-el-dioxido-de-carbono-co2-y-como-impacta-en-el-planeta/>
- Boyce, J. K. (2018). Carbon Pricing: Effectiveness and Equity. *Ecological Economics* , 52-61.
- Carbon Pricing Leadership Coalition. (2017). Report of the High-Level Commission. Washington, DC: Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO.
- Cartes Mena, F. (2021). Metodología para la estimación del precio social del carbono en Chile y los países de América Latina y El Caribe. Santiago: Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
- Cartes, F. (2018). Observatorio de Planificación - CEPAL. Obtenido de https://observatorioplanificacion.cepal.org/sites/default/files/note/files/2_Metodologia%20PSC_compressed_0.pdf
- Chichilnisky, G. (27 de Junio de 2013). United Nations. Obtenido de www.un.org
- Damodar N., G., & Dawn C., P. (2009). *Econometría*. México: Mc Graw Hi Educación.
- El Espectador. (26 de Diciembre de 2022). El Espectador. Obtenido de <https://www.elespectador.com/ambiente/se-preve-que-2023-sea-uno-de-los-anos-mas-calurosos-registrados-en-la-tierra-noticias-hoy/>
- G20. (s.f.). G20. Obtenido de www.g20.org
- Gaztañaga, A., Calvo, B., Swysen, J., & Saraceno, S. (2022). Mercado de Emisiones: Presente y Futuro del EU- ETS. Equipo Europa.
- I2AM PARIS - Integrating Integrated Assessment Modelling in Support of the Paris Agreement. (s.f.). Obtenido de https://www.i2am-paris.eu/detailed_model_doc/dice

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2021). IDEAM. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/glaciares-colombia#:~:text=En%20t%C3%A9rminos%20generales%2C%20los%20glaciares,92%25%20de%20su%20%C3%A1rea%20glaciar.>
- Integrated Assessment Modeling Consortium. (27 de Abril de 2021). Obtenido de <https://www.iamconsortium.org/resources/model-resources/fund-climate-framework-for-uncertainty-negotiation-and-distribution/>
- Integrated Assessment Modeling Consortium. (27 de Julio de 2022). Obtenido de <https://www.iamconsortium.org/resources/model-resources/page2002-policy-analysis-of-the-greenhouse-effect/>
- International Carbon Action Partnership - ICAP. (21 de Junio de 2021). International Carbon Action Partnership - ICAP. Obtenido de www.icapcarbonaction.com
- International Energy Agency. (2021). Net Zero by 2050 a Roadmap for the Global Energy Sector. Paris: IEA Publications.
- International Energy Agency. (Marzo de 2023). CO2 Emissions in 2022. IEA Publications. Obtenido de <https://iea.blob.core.windows.net/assets/3c8fa115-35c4-4474-b237-1b00424c8844/CO2Emissionsin2022.pdf>
- Koop, G., & Tole, L. (2011). Forecasting the European Carbon Market. University of Strathclyde Business School.
- Koop, G., & Tole, L. (2012). Forecasting the European Carbon Market. University of Strathclyde.
- Mansanet-Bataller, M., & Pardo, Á. (17 de Diciembre de 2008). What You Should Know About Carbon Markets. *Energies*, 120-153. Obtenido de <https://www.mdpi.com/journal/energies>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible . (2021). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible . Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/mercados-de-carbono/marco-internacional/>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (Diciembre de 2020). Contexto Mercados de Carbono. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (s.f.). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Obtenido de <https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/cambio-climatico>

- Morgan Stanley Capital International - MSCI. (31 de Julio de 2023). Obtenido de www.msci.com
- Nordhaus, W. D. (Octubre de 2011). National Bureau of Economic Research. Obtenido de <https://www.nber.org/papers/w17540>
- Nordhaus, W. D. (2017). Revisiting the social cost of carbon. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1518-1523.
- Nordhaus, W. D. (2018). Evolution of Modeling of the Economics of Global Warming: Changes in the DICE model. Climate Change, 623-640.
- Parry, I., Black, S., & Roaf, J. (2021). Proposal for an International Carbon Price Floor Among Large Emitters. Washington, D.C.: MF Staff Climate Notes 2021/001.
- Pindyck, R. S. (2016). The social cost of carbon revisited. Cambridge: national bureau of economic research.
- Quesada, B. (Octubre de 2019). Universidad del Rosario. Obtenido de www.urosario.edu.co
- Rennert, K., & Kingdon, C. (1 de Agosto de 2019). Resources for the Future. Obtenido de https://media.rff.org/documents/SCC_Explainer.pdf
- Stern, N., Stiglitz, J., Karlsson, K., & Taylor, C. (Enero de 2022). Roosevelt Institute. Obtenido de https://rooseveltinstitute.org/wp-content/uploads/2022/01/RI_Social-Cost-of-Carbon_202201-1.pdf
- Sutter, J. D. (11 de Noviembre de 2022). CNN. Obtenido de <https://cnnespanol.cnn.com/2022/11/11/estados-unidos-crisis-climatica-informe-trax/>
- The Economist. (26 de Mayo de 2022). Obtenido de <https://www.economist.com/finance-and-economics/2022/05/26/carbon-markets-are-going-global>
- United Nations. (2022). United Nations - Climate Change. Obtenido de <https://storymaps.arcgis.com/stories/5417cd9148c248c0985a5b6d028b0277>
- United Nations Climate Change. (s.f.). Obtenido de <https://unfccc.int/topics/mitigation/workstreams/response-measures/modelling-tools-to-assess-the-impact-of-the-implementation-of-response-measures/integrated-assessment-models-iams-and-energy-environment-economy-e3-models#IMACLIM>
- United Nations Climate Change. (s.f.). Procesos y Reuniones: United Nations Climate Change. Obtenido de https://unfccc.int/es/kyoto_protocol

- United Nations Climate Change. (s.f.). United Nations Climate Change. Obtenido de <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/que-es-la-convencion-marco-de-las-naciones-unidas-sobre-el-cambio-climatico>
- United Nations Global Compact. (2015). Executive Guide to Carbon Pricing Leadership. UN Global Impact.
- United States Environmental Protection Agency. (16 de Enero de 2012). Obtenido de https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=OAP&dirEntryId=240425
- Velasco, M. R. (2017). Análisis del funcionamiento del modelo DICE y su aplicación a la economía del cambio climático. Universidad de Cantabria.
- World Bank. (2022). State and Trends of Carbon Pricing 2022. Washington, DC: Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO.