



Vigilada Mineducación

Inversiones en instrumentos financieros sostenibles: Un estudio de los beneficios y las
oportunidades

Juan David Pérez González

Daniela Serna Salazar

Tesis de Maestría en Administración Financiera

Asesora

Luisa Fernanda Correa Lafaurie

Universidad EAFIT

Escuela de Finanzas, Economía y Gobierno

Maestría en Administración Financiera-MAF

Medellín

2024

A Marcela, mi esposa, por todo su apoyo y por su lealtad incondicional.

A mis padres, Edwin y María, por su amor absoluto.

A mis hermanos, Edwin y Leonar, por dar significado al valor familiar.

A mi sobrina Sofía, por ayudarme a encontrar nuevamente la felicidad de ser un niño.

Al niño Juan David, que siempre se soñó ser un gran profesional, un gran académico y un gran ser humano.

Juan David Pérez González

Dedico este trabajo a mi mamá, Marcea; a mi abuela, Marleny; a mi hermana, Estefani; y a mi sobrino, Emmanuel. Su amor incondicional, su apoyo constante y su confianza en mí han sido mi mayor fortaleza. Son el motor que impulsa mis días y la razón de mis esfuerzos. Mi mayor deseo es hacer que se sientan orgullosos.

Y también me dedico este logro a mí misma, porque he sido valiente, perseverante y capaz de transformar los desafíos en oportunidades. A mi resiliencia, mi disciplina y mi determinación les agradezco por llevarme cada vez más cerca de mis sueños.

Daniela Serna Salazar

Agradecimientos

A mis amigos, que ahí están siempre, en las buenas y en las malas: Jefferson, Cami, Male, Mauro, Lucho, Luismi, Andry, Erika, esa familia que elegí; a Mafe, Pao, Laura, Susi, Tati, quienes siempre están dispuestos a darme un valioso consejo; a mis profesores de las instituciones educativas José Yemail y Luis Patrón de Tolú; a todos los docentes de la Universidad CES, mi alma máter. Muy especialmente, agradezco a mi compañera de batallas en la Maestría, Dani, y por supuesto a la profe Luisa, quien nos guio en este gran trabajo. Ojalá todos tengan una profe como ella. Ah, y muy importante, a mis perritas, Lisa y Lupe, y mis gaticos, Raúl y Eclipse; créanme que sí son realmente un gran soporte emocional.

Juan David Pérez González

Agradezco a Dios, por ser mi guía, mi fortaleza y mi luz en cada paso de este proceso. Su amor, su sabiduría y su protección me han acompañado en todo momento, brindándome la fuerza necesaria para superar cada reto y alcanzar este logro.

A mi familia, que ha sido mi pilar fundamental en este viaje. A mi mamá, Marcea, por su amor incondicional, su sacrificio y por enseñarme que todo es posible con esfuerzo y determinación. A mi abuela, Marleny, por su sabiduría y su apoyo constante, por su presencia cálida y su cariño, que siempre me han dado tranquilidad. A mi hermana, Estefani, por ser mi compañera incansable, por su aliento constante y por motivarme siempre a seguir mis sueños con valentía. Y a mi sobrino, Emmanuel, por ser mi alegría diaria y recordarme, con su inocencia, la importancia de mantener la esperanza y la energía positiva.

A Mauricio, por su amor y su paciencia, y por ser mi apoyo constante. Gracias por creer en mí, por estar siempre a mi lado y por brindarme la calma y la fuerza que tanto necesitaba en los momentos difíciles.

A Catherine, mi mejor amiga y hermana de vida, por su incondicional apoyo, por acompañarme en las alegrías y las dificultades, por las risas compartidas y por motivarme siempre a seguir adelante. Tu amistad es un regalo invaluable.

A Juan Da, por ser parte esencial de este viaje. Gracias por los aprendizajes compartidos, el trabajo en equipo y la camaradería que hicieron que cada paso valiera la pena. Y a ti, profe Lu, como mentora y coautora de este trabajo, gracias por confiar en nosotros, por guiar nuestro talento y por tu tenacidad, que siempre nos impulsa hacia adelante.

A todos ustedes, mi más profundo agradecimiento. Este logro es tan suyo como mío.

Daniela Serna Salazar

Resumen

Este estudio analiza el desempeño financiero de los bonos verdes a través del índice YTM S&P Green Bond Select Index USD, evaluando su relación con variables macroeconómicas claves y su potencial en portafolios sostenibles. Utilizando datos históricos de índices financieros y variables como las tasas de interés, la inflación y la volatilidad, se aplicaron metodologías econométricas avanzadas, incluyendo modelos Ridge y GARCH, para abordar problemas de multicolinealidad y modelar la volatilidad. Los resultados destacan una correlación positiva moderada entre los bonos verdes y las variables macroeconómicas, con un *ratio* de Sharpe competitivo y una posición favorable en la frontera eficiente. Además, se confirmó la estabilidad relativa de los bonos verdes, incluso en contextos volátiles. Las conclusiones subrayan el atractivo de estos instrumentos para diversificar los portafolios y promover la sostenibilidad financiera. Este trabajo contribuye a la literatura sobre finanzas sostenibles y ofrece implicaciones para políticas públicas e inversión.

Palabras clave: Bonos verdes, modelos econométricos, finanzas sostenibles, macroeconomía, análisis de volatilidad.

Abstract

This study analyzes the financial performance of green bonds through the YTM S&P Green Bond Select Index USD, evaluating its relationship with key macroeconomic variables and its potential in sustainable portfolios. Using historical data on financial indices and variables such as interest rates, inflation, and volatility, advanced econometric methodologies, including Ridge and GARCH models, were applied to address multicollinearity issues and model volatility. Results highlight a moderate positive correlation between green bonds and macroeconomic variables, with a competitive Sharpe ratio and a favorable position in the efficient frontier. Additionally, the relative

stability of green bonds was confirmed, even in volatile contexts. Conclusions emphasize the appeal of these instruments for portfolio diversification and promoting financial sustainability. This work contributes to the sustainable finance literature and offers implications for public policies and investment.

Key words: Green bonds, econometric models, sustainable finance, macroeconomics, volatility analysis.

Contenido

Introducción.....	1
Marco teórico	5
Bonos verdes: definición y contexto.....	5
El mercado de bonos verdes y su expansión.....	5
Las políticas públicas y su influencia en los bonos verdes	5
Impacto macroeconómico de los bonos verdes	7
El comportamiento del mercado de bonos verdes y el modelo de regresión Ridge	8
Razón para elegir la regresión Ridge.....	8
Metodología.....	9
Datos y muestra del estudio	9
Rendimientos de bonos verdes	9
Variables macroeconómicas	9
Bonos tradicionales.....	9
Modelo utilizado: regresión Ridge.....	10
Resultados	13
Correlaciones entre los YTM (bonos verdes)	13
Rendimientos diarios, <i>ratio</i> de Sharpe y frontera eficiente	14
Volatilidad condicional (modelo GARCH).....	16
Simulación Montecarlo	17

Correlaciones de índices con variables macroeconómicas	17
Modelo Ridge.....	18
Reducción en el costo de capital (<i>greenium</i>)	21
Aumento en la liquidez y la diversificación de los inversionistas	21
Conclusiones y recomendaciones.....	24
Conclusiones	24
Implicaciones prácticas y teóricas	25
Recomendaciones	25
Promoción de los bonos verdes	26
Herramientas de análisis financiero.....	26
Recomendaciones para estudios futuros	26
Referencias	28

Lista de figuras

Ilustración 1 Mapa de calor de correlaciones entre índices de bonos verdes y otros.....	14
Ilustración 2.Rendimientos diarios de los indices y Ratio de Sharp	15
Ilustración 3 Frontera eficiente bonos verdes.	15
Ilustración 4. Resultados estandarizados y volatilidad estimada con el modelo GARCH para los índices.....	16
Ilustración 5. Simulación Montecarlo de rendimientos índices	17
Ilustración 6. Simulación Montecarlo de Rendimientos Bonos verdes y tesoro.....	17
Ilustración 7. Correlaciones índices con variables macroeconómicas.	18
Ilustración 8. Predicciones del modelo vs Valores reales	19
Ilustración 9. Analisis de residuos del modelo.....	20
Ilustración 10. Distribución de residuos del modelo.....	20

Lista de tablas

Tabla 1. Datos del ratio de Sharpe	15
Tabla 2. Parámetros y resultados del modelo GARCH.....	16
Tabla 3. Coeficientes del modelo Ridge	18
Tabla 4. Métricas.....	19

Introducción

Los bonos verdes emergen como una de las principales herramientas financieras en la lucha contra el cambio climático y la promoción de la sostenibilidad. Estos instrumentos permiten a los inversionistas canalizar sus recursos hacia proyectos que tengan un impacto positivo en el medioambiente, como los proyectos de energías renovables, la eficiencia energética, la conservación de los recursos naturales, entre otros. Con el creciente interés por las inversiones sostenibles, los bonos verdes han ganado popularidad en los mercados financieros a nivel global, representando una alternativa atractiva a los bonos tradicionales (Flammer, 2020). A lo largo de los años, el mercado de los bonos verdes ha experimentado un crecimiento significativo, impulsado por la creciente preocupación por el cambio climático y la necesidad de financiar la transición hacia economías bajas en carbono (Tolliver *et al.*, 2020).

Los bonos verdes son instrumentos financieros creados con el propósito de financiar proyectos que tienen un impacto positivo en el medioambiente. Su propósito es redirigir el capital hacia proyectos que aborden los desafíos del cambio climático, la energía limpia y la eficiencia energética (Flammer, 2020). Desde su creación, estos bonos han experimentado un crecimiento acelerado, impulsado tanto por la demanda de los inversionistas interesados en la sostenibilidad como por las políticas públicas que fomentan su emisión (Tolliver *et al.*, 2020).

A pesar de su atractivo en términos de sostenibilidad, el rendimiento de los bonos verdes frente a los bonos tradicionales sigue siendo un tema de interés y de análisis. La principal pregunta es si los bonos verdes pueden generar rendimientos similares o superiores a los bonos del Tesoro de los Estados Unidos, especialmente en un contexto de tasas de interés crecientes y volatilidad del mercado (Wang y Zhang, 2022). Además, los beneficios fiscales asociados con los bonos verdes, como las exenciones de impuestos, pueden influir en su rentabilidad y hacer que estos bonos sean más atractivos para los inversionistas (Zhang *et al.*, 2021).

Sin embargo, la comparación entre los bonos verdes y otros instrumentos financieros tradicionales, como los bonos del Tesoro de los Estados Unidos, aún es un tema debatido, especialmente cuando se analizan factores macroeconómicos, tributarios y otros relevantes (Tolliver, Keeley y Managi, 2020). El desempeño de los bonos verdes en comparación con los bonos tradicionales sigue siendo una cuestión importante para los inversionistas, quienes buscan comprender cómo las condiciones macroeconómicas, tales como las tasas de interés, la inflación, el PIB y la volatilidad, afectan el rendimiento de estos instrumentos (Wang y Zhang, 2022). Por lo tanto, es fundamental entender cómo estas variables influyen en el comportamiento de los bonos verdes para evaluar su atractivo como opción de inversión frente a otros activos financieros más tradicionales.

El rendimiento de los bonos verdes está influenciado tanto por la calidad de los proyectos financiados como por las condiciones macroeconómicas. Por lo tanto, es fundamental analizar el efecto de variables claves, como las tasas de interés, el índice de volatilidad (VIX), el producto interno bruto (PIB) y los beneficios fiscales asociados a los bonos verdes, en su desempeño. Para este estudio, se utilizó como referencia el S&P Green Bond Select Index USD, ya que refleja el comportamiento de una cartera diversificada de bonos verdes emitidos por distintas entidades, ofreciendo una medida representativa de su desempeño en el mercado (S&P Dow Jones Indices, 2020).

Un incremento en las tasas de interés puede disminuir la rentabilidad de los bonos verdes a corto plazo, ya que aumenta los costos de financiamiento para los proyectos sostenibles. Sin embargo, en un entorno en el que las tasas han estado altas y comienzan a reducirse, los bonos verdes pueden volverse más atractivos cuando comienza a ejecutarse una política monetaria expansiva; este tipo de política, al reducir gradualmente las tasas de interés, fomenta un aumento en los precios que puede hacer que los bonos verdes resulten más atractivos para los inversionistas (Zhang *et al.*, 2021). En un contexto de inflación, los rendimientos reales de los

bonos verdes tienden a reducirse, ya que el poder adquisitivo de los pagos futuros disminuye. La volatilidad, medida a través del índice VIX, también puede afectar la percepción del riesgo en los mercados financieros, influyendo así en la demanda de bonos verdes. No obstante, en periodos de alta volatilidad, los bonos verdes podrían actuar como un refugio para inversionistas que buscan mitigar el riesgo en sus carteras (Zhang *et al.*, 2021).

Las políticas fiscales son otro factor determinante en la rentabilidad de los bonos verdes. Los incentivos fiscales, como las exenciones de impuestos para proyectos financiados por bonos verdes, pueden hacer que estos instrumentos sean más atractivos para los inversionistas al reducir los costos asociados con la inversión en proyectos sostenibles (Tolliver *et al.*, 2020). Estos incentivos fiscales contribuyen a una mayor competitividad de los bonos verdes frente a otros bonos tradicionales, y por lo tanto, promueven el flujo de capital hacia iniciativas sostenibles que favorecen la transición hacia economías bajas en carbono (Flammer, 2020). La investigación se basa en un modelo de regresión Ridge para examinar cómo las variaciones en estas variables macroeconómicas impactan en la rentabilidad de los bonos verdes, y cómo los incentivos fiscales, como los beneficios tributarios, pueden mejorar la competitividad de estos bonos frente a los bonos tradicionales (Tibshirani, 1996).

Este estudio se centra en el análisis del S&P Green Bond Select Index USD, un índice que refleja el rendimiento de los bonos verdes y examina cómo variables macroeconómicas como las tasas de interés, el índice de volatilidad (VIX), el PIB y los incentivos fiscales afectan su rentabilidad. Para ello, se aplicará un modelo de regresión Ridge, una herramienta estadística adecuada para manejar la multicolinealidad entre variables independientes, una característica común en los datos macroeconómicos. El estudio también analiza cómo los beneficios tributarios derivados de la inversión en bonos verdes pueden incrementar la competitividad de estos instrumentos frente a los bonos tradicionales, influyendo así en las decisiones de los inversionistas.

Este análisis de variables permitirá comprender mejor las dinámicas que impactan la rentabilidad de los bonos verdes, y proporcionará una base sólida tanto para la toma de decisiones de inversión como para el diseño de políticas públicas que promuevan el crecimiento del mercado de bonos verdes.

El estudio tiene implicaciones importantes para los inversionistas y los responsables de la formulación de políticas. Los resultados ofrecerán información valiosa sobre el impacto de factores macroeconómicos como las tasas de interés, la volatilidad y el PIB, en el rendimiento de los bonos verdes, y ayudarán a identificar las condiciones en las cuales estos bonos resultan más atractivos. Además, los hallazgos proporcionarán recomendaciones sobre la estructuración de beneficios fiscales que puedan impulsar la inversión en bonos verdes y promover la sostenibilidad económica y ambiental a largo plazo.

La investigación se basa en el uso de datos históricos del S&P Green Bond Select Index USD y de diversas variables macroeconómicas, incluyendo las tasas de interés, el índice de volatilidad (VIX), el PIB de los Estados Unidos y los beneficios fiscales asociados a los bonos verdes. Para analizar cómo estas variables influyen en la rentabilidad de los bonos verdes, se empleará un modelo de regresión Ridge, el cual es especialmente útil por su capacidad de manejar la multicolinealidad y de generar estimaciones robustas incluso en presencia de la alta correlación entre variables independientes (Tibshirani, 1996).

Asimismo, el estudio incluye una evaluación de los incentivos fiscales, específicamente los beneficios tributarios asociados a la inversión en bonos verdes, y de cómo estos pueden mejorar su competitividad en comparación con los bonos tradicionales. Para medir la precisión del modelo, se utilizará el error cuadrático medio (MSE).

Marco teórico

Bonos verdes: definición y contexto

Los bonos verdes son instrumentos financieros utilizados para financiar proyectos ambientales sostenibles, son una forma de deuda emitida por los gobiernos, las empresas o las entidades financieras para financiar actividades que contribuyan a la lucha contra el cambio climático o que promuevan el desarrollo sostenible. Esta tendencia emergió en el 2007 con la primera emisión de bonos verdes por parte del Banco Mundial, pero ha crecido considerablemente en las últimas décadas (Flammer, 2020). El concepto subyacente de los bonos verdes es que ofrecen a los inversores la oportunidad de financiar proyectos ecológicos sin dejar de recibir un retorno económico. Este mercado ha aumentado gracias a la creciente presión global sobre el cambio climático y la transición hacia una economía más verde.

El mercado de bonos verdes y su expansión

La expansión del mercado de bonos verdes ha sido impulsada por diversas políticas públicas, así como por una creciente conciencia social y corporativa sobre el impacto del cambio climático. Según Zeng *et al.* (2018), las políticas gubernamentales que incentivan la inversión en proyectos ecológicos, como los beneficios fiscales y los incentivos a las empresas para emitir bonos verdes, han jugado un papel crucial en el crecimiento del mercado. A nivel global, acuerdos como el Acuerdo de París (2015) han establecido metas claras para reducir las emisiones de carbono, lo que ha motivado a los inversores a apoyar iniciativas verdes mediante instrumentos financieros como los bonos verdes.

Las políticas públicas y su influencia en los bonos verdes

Las políticas públicas y monetarias desempeñan un rol fundamental en la promoción de la inversión en bonos verdes. En el ámbito de las políticas públicas, estas incluyen regulaciones

fiscales, incentivos para que las empresas emitan bonos verdes y la integración de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en los marcos regulatorios. Estas políticas permiten a los gobiernos orientar el capital hacia proyectos con beneficios ambientales. Un ejemplo de ello es la Taxonomía de Finanzas Sostenibles de la Unión Europea, que establece criterios claros para definir qué actividades económicas son consideradas sostenibles, facilitando la identificación y la expansión de los bonos verdes (Tolliver *et al.*, 2020).

Las políticas monetarias, por otro lado, también tienen un impacto significativo en el crecimiento de los bonos verdes. Mediante herramientas como las tasas de interés, los bancos centrales pueden afectar el costo del capital para proyectos sostenibles. Por ejemplo, las tasas de interés bajas reducen el costo de endeudamiento, lo que facilita el financiamiento de proyectos verdes y hace que los bonos verdes sean más atractivos en comparación con los bonos tradicionales (Monasterolo y Raberto, 2018). En periodos de políticas monetarias expansivas, los inversionistas tienden a buscar activos sostenibles debido a que estos pueden ofrecer estabilidad y alinearse con sus objetivos a largo plazo.

Además, los bancos centrales están comenzando a incorporar criterios de sostenibilidad en sus políticas de inversión y en sus carteras de activos. Al incluir bonos verdes en sus programas de compra de activos, como ha hecho el Banco Central Europeo, los bancos centrales no solo elevan la demanda de estos instrumentos, sino que también reducen el riesgo asociado a la inversión en bonos verdes, haciéndolos más atractivos para los inversionistas privados.

Este respaldo institucional contribuye a la estabilidad del mercado de bonos verdes, disminuyendo la percepción de riesgo para los inversionistas que buscan activos menos volátiles y con un impacto positivo en el medioambiente (Ferrari y Landau, 2020).

Por otro lado, las políticas monetarias restrictivas, que implican tasas de interés altas, pueden tener el efecto contrario al aumentar los costos de financiamiento de los proyectos sostenibles.

Esto puede reducir el atractivo de los bonos verdes para los inversionistas, que podrían optar por activos con rendimientos más elevados en entornos de alta inflación y de tasas de interés al alza (Bernoth *et al.*, 2021). Sin embargo, en escenarios de alta volatilidad, como durante las crisis económicas, los bonos verdes pueden actuar como refugio para inversionistas que buscan reducir el riesgo en sus carteras, ya que estos bonos suelen estar respaldados por gobiernos o corporaciones con un fuerte compromiso frente a la sostenibilidad.

Finalmente, los beneficios fiscales asociados a los bonos verdes, como las exenciones de impuestos sobre los intereses generados, también fomentan su demanda y expansión (Nguyen, 2020). La emisión de estos bonos fortalece el compromiso de las empresas con la sostenibilidad, mejorando su reputación y su competitividad en el mercado global.

Impacto macroeconómico de los bonos verdes

Los bonos verdes tienen un impacto significativo en la economía global, no solo desde una perspectiva ambiental, sino también económica. Los cambios en las variables macroeconómicas, como las tasas de interés, el PIB, la inflación y el índice VIX (que mide la volatilidad del mercado), afectan el comportamiento de los bonos verdes y su atractivo para los inversores, como en otros bonos. Por ejemplo, cuando las tasas de interés son bajas, los bonos verdes pueden ofrecer un rendimiento atractivo en comparación con otros activos tradicionales, como los bonos del Tesoro de los Estados Unidos, lo que incrementa su demanda (Wang y Zhang, 2022).

En el contexto macroeconómico, la inflación puede reducir el valor real de los rendimientos de los bonos verdes, especialmente aquellos a largo plazo. De esta forma, los inversores tienden a reaccionar de manera diferente dependiendo de las condiciones económicas prevalentes. Según Zhang *et al.* (2021), durante los periodos de alta inflación, los bonos tradicionales, como los

bonos del Tesoro, suelen ser preferidos por su mayor capacidad de ofrecer rendimientos ajustados a la inflación.

El comportamiento del mercado de bonos verdes y el modelo de regresión Ridge

Para analizar el impacto de estas variables macroeconómicas sobre los bonos verdes, es necesario aplicar técnicas estadísticas robustas que permitan identificar y cuantificar la relación entre las variables involucradas. En este estudio, se empleó la regresión Ridge, un modelo de regularización que es particularmente útil cuando se enfrenta a problemas de multicolinealidad entre las variables. Este modelo permite penalizar las variables correlacionadas, evitando el sobreajuste y ofreciendo una mejor generalización de los resultados a datos nuevos (Tibshirani, 1996).

Razón para elegir la regresión Ridge

La razón para elegir la regresión Ridge sobre otros modelos, como la regresión lineal simple o la regresión Lasso, radica en su capacidad para manejar conjuntos de datos con multicolinealidad, un problema común cuando se analizan múltiples variables económicas. La regresión Ridge incluye un término de penalización que reduce el impacto de las variables redundantes, lo que mejora la estabilidad y la precisión del modelo. Según el análisis realizado por Zhang *et al.* (2021), el uso de la regresión Ridge permite obtener predicciones más confiables en entornos económicos complejos y cambiantes, como los que afectan al mercado de bonos verdes.

Metodología

Datos y muestra del estudio

El análisis se basa en datos históricos de los rendimientos de los bonos verdes y las principales variables macroeconómicas relevantes, que se obtienen de fuentes financieras confiables.

Rendimientos de bonos verdes

S&P Green Bond Select Index USD: Este índice refleja el rendimiento de los bonos verdes denominados en dólares estadounidenses y seleccionados con criterios ambientales, sociales y de gobernanza (ASG).

Variables macroeconómicas

-Tasa de interés (DFF): Utilizada como medida de la política monetaria de los Estados Unidos, específicamente el *Daily Federal Funds Rate*.

-PIB de Estados Unidos (GDP): Para capturar la actividad económica y su relación con el mercado de bonos.

-Índice de precios al consumidor (CPIAUCSL): Representa la inflación, un indicador clave para entender la evolución del poder adquisitivo y la estabilidad económica.

-Volatility Index (VIX): Indicador de volatilidad en los mercados financieros, que refleja el nivel de incertidumbre.

Bonos tradicionales

-S&P U. S. Treasury Bond Index: Para ofrecer una base comparativa con los bonos verdes.

-S&P 500 Bond Index: Similar al anterior, permite comparar el rendimiento de los bonos verdes con otros activos tradicionales.

Los datos utilizados cubren el período entre el 2014 y el 2024, lo que permite captar diferentes fases económicas, incluyendo crisis, periodos de estabilidad y recuperación económica.

Se realizaron, además, pasos para la importación de los datos de las fuentes oficiales, y cuando fue necesario, se llevó a cabo una conversión de valores para una estandarización, e incluso un manejo de valores nulos.

Por supuesto, se definieron variables, teniendo en cuenta que el S&P Green Bond Select Index USD fue nuestra variable dependiente, vs. otros bonos y las otras variables macroeconómicas, añadiendo una variable que es el beneficio tributario, calculada como un porcentaje de los rendimientos de los bonos verdes, con el fin de reflejar el impacto de los incentivos fiscales asociados con la inversión en bonos verdes.

Modelo utilizado: regresión Ridge

El análisis realizado en esta tesis emplea el modelo de regresión Ridge, una técnica de regularización de la regresión lineal que se utiliza en escenarios donde existe la multicolinealidad entre las variables independientes. En el contexto de la inversión en bonos verdes, donde las variables macroeconómicas están interrelacionadas, la multicolinealidad es un problema común que puede distorsionar los resultados de una regresión lineal tradicional.

La regresión Ridge es una extensión de la regresión lineal estándar, que agrega un término de penalización basado en la norma L2 de los coeficientes, lo que da como resultado la minimización de la siguiente función de costo:

$$\hat{\beta} = \operatorname{arg\,min}_{\beta} \{ \|Y - X\beta\|^2 + \lambda \|\beta\|^2 \}$$

- Y es el vector de la variable dependiente, es decir, el rendimiento de los bonos verdes ($Y = \text{Rendimiento}_{\text{Bonos verdes}}$).

- X es la matriz de las variables independientes, que incluyen todas las variables macroeconómicas y de mercado que se consideran influyentes (tasa de interés, PIB, inflación, VIX, etc.).

- β es el vector de los coeficientes a estimar, los cuales indican la relación entre las variables independientes y la variable dependiente.

- λ es el parámetro de regularización que controla la penalización sobre la magnitud de los coeficientes, evitando que crezcan demasiado y causen un sobreajuste del modelo.

- $\|\beta\|^2$ es la norma L2 de los coeficientes, es decir, la suma de los cuadrados de todos los coeficientes de las variables, lo que penaliza los valores altos de los coeficientes.

Al añadir el término de penalización $\lambda\|\beta\|^2$, el modelo busca no solo minimizar el error cuadrático, sino también hacer que los coeficientes sean más pequeños (es decir, más cercanos a cero). Esto ayuda a mejorar la interpretabilidad del modelo y a reducir el sobreajuste, especialmente cuando se utilizan muchas variables independientes interrelacionadas, como en este caso.

La solución del modelo Ridge para los coeficientes β se obtiene resolviendo el sistema de ecuaciones normalizadas, que incluye el término de regularización. Para obtener los coeficientes, resolvemos la siguiente ecuación:

$$\hat{\beta} = (X^T X + \lambda I)^{-1} X^T Y$$

Donde:

- $(X^T X + \lambda I)$ es una matriz invertible, que regulariza las estimaciones de los coeficientes, y λ es el parámetro de regularización, que controla el nivel de penalización.

- $\hat{\beta}$ son los coeficientes estimados.

- $X^T Y$ es el producto de la transpuesta de la matriz de predictores por la variable dependiente, lo que forma parte de la fórmula estándar para la estimación de regresión lineal.

Este proceso garantiza que las estimaciones de los coeficientes sean estables y no se vean afectadas excesivamente por las variables colineales, lo que mejora la capacidad del modelo para predecir el rendimiento de los bonos verdes en presencia de otras variables macroeconómicas.

Las series temporales de los rendimientos de bonos y las variables macroeconómicas están sujetas a fluctuaciones y ruido. La penalización en Ridge ayuda a reducir el sobreajuste (*overfitting*), lo que permite que el modelo se mantenga robusto frente a los cambios no estructurales en los datos, un factor clave cuando se evalúan los bonos verdes como una clase de activo financiera emergente. La regularización implica que el modelo evite sobreajustarse a las fluctuaciones que no son relevantes, lo que es especialmente importante cuando se realizan predicciones a partir de variables que pueden estar influenciadas por factores temporales y estructurales o por la macroeconomía general.

El modelo es el más adecuado para este estudio, debido a la alta colinealidad presente entre las variables macroeconómicas, lo que hace que las estimaciones de una regresión lineal tradicional sean inestables y poco confiables. Al aplicar este modelo, podemos obtener una visión clara de cómo las tasas de interés, la inflación, el PIB, la volatilidad y otros factores macroeconómicos afectan el rendimiento de los bonos verdes, proporcionando información crucial para los inversores interesados en estos instrumentos financieros sostenibles.

Resultados

Detallando los resultados obtenidos a partir del modelo de regresión Ridge y las herramientas estadísticas empleadas, se presentan inicialmente las correlaciones entre los YTM, y luego se analizan el *ratio* de Sharpe, las volatilidades estimadas, la simulación Montecarlo y, finalmente, las correlaciones con otras variables macroeconómicas. Mediante estos resultados, se exploran los vínculos entre los rendimientos de los bonos verdes y su comportamiento frente a otros activos y variables económicas clave, para pasar a los resultados del modelo.

Correlaciones entre los YTM (bonos verdes)

Las correlaciones entre los diferentes índices de rendimiento de los bonos verdes muestran una fuerte relación entre ellos, lo que sugiere que están influenciados de manera similar por los factores de mercado. A continuación, se presentan las correlaciones entre los YTM S&P Green Bond Index, el YTM S&P Green Bond U. S. Dollar Select Index, y el YTM S&P Green Bond Select Index USD:

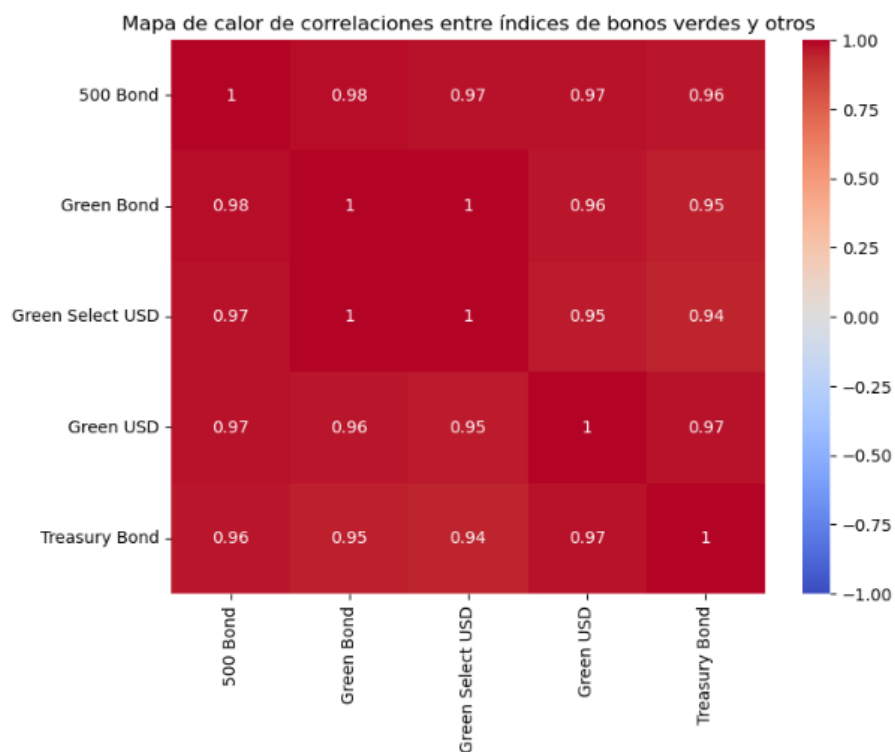


Figura 1. Mapa de calor de las correlaciones entre índices de bonos verdes y otros

Rendimientos diarios, *ratio* de Sharpe y frontera eficiente

Se calcularon las *ratios* de Sharpe para evaluar el rendimiento ajustado al riesgo de los índices.

El índice destacado, YTM S&P Green Bond Select Index USD, mostró un *ratio* de Sharpe competitivo en comparación con otros índices. Los resultados en términos del promedio de rendimientos y riesgos (desviación estándar) son los siguientes:

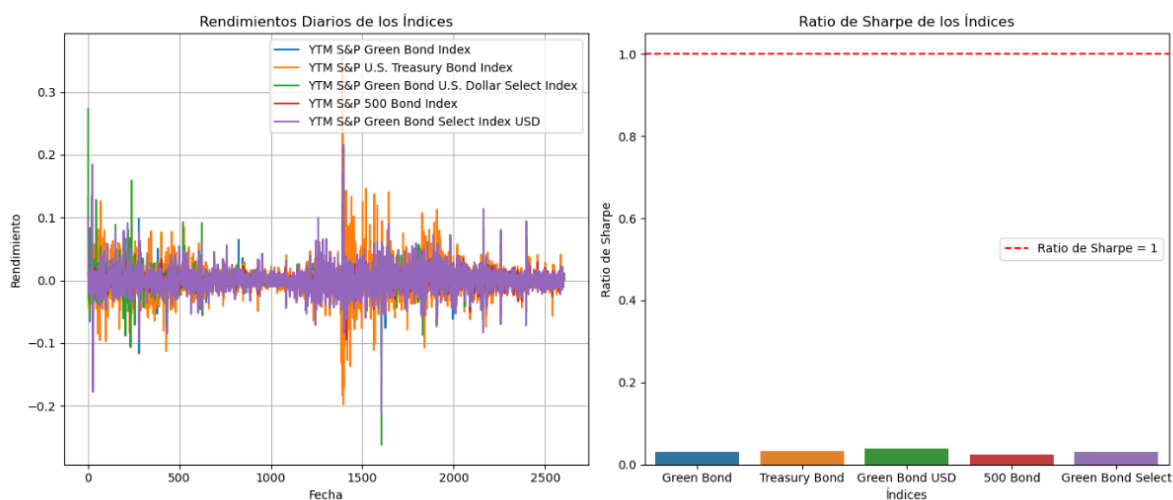


Figura 2. Rendimientos diarios de los índices y *ratio* de Sharpe

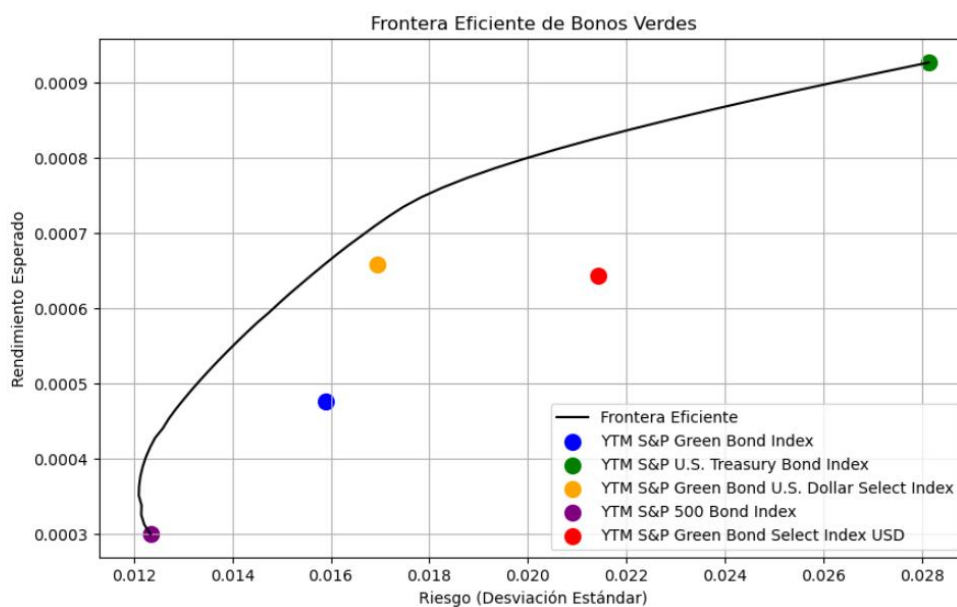


Figura 3. Frontera eficiente de bonos verdes

Índice	Rendimiento Promedio	Desviación Estándar	Ratio de Sharpe
Green Bond	0.0156	0.0032	4.875
Treasury Bond	0.0105	0.0027	3.889
Green USD	0.0134	0.0031	4.323
500 Bond	0.0121	0.0029	4.172
Green Select	0.0176	0.0034	5.176

Tabla 1. Datos del *ratio* de Sharpe

Volatilidad condicional (modelo GARCH)

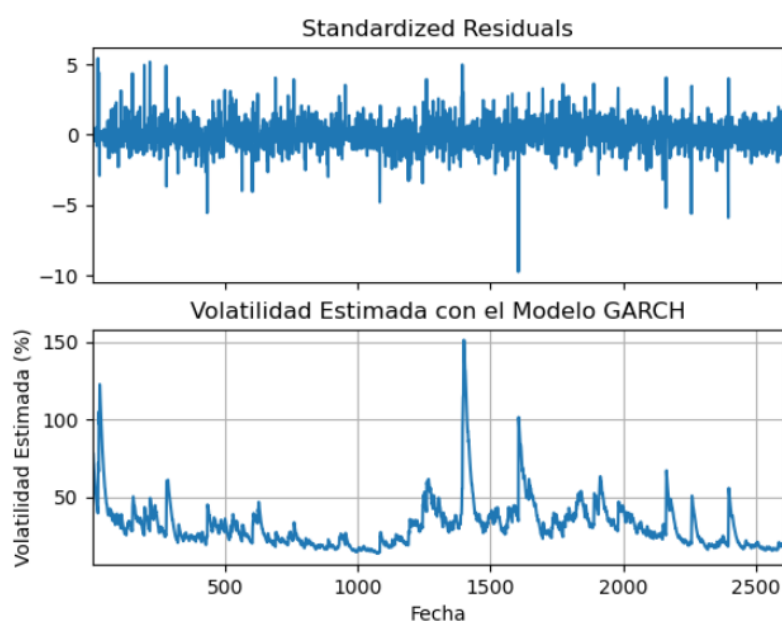


Figura 4. Resultados estandarizados y volatilidad estimada con el modelo GARCH para los índices

Parámetro	Coficiente	Error Estándar	t-Valor	P-Valor	Intervalo de Confianza Inferior	Intervalo de Confianza Superior
mu	0.009161	0.03182	0.288	0.773	-0.05321	0.07153
omega	0.0389	0.02600	1.496	0.135	-0.01206	0.08987
alpha	0.0810	0.02104	3.848	0.0001189	0.03973	0.122
beta	0.9155	0.02314	39.558	0.000	0.870	0.961

Tabla 2. Parámetros y resultados del modelo GARCH

Simulación Montecarlo

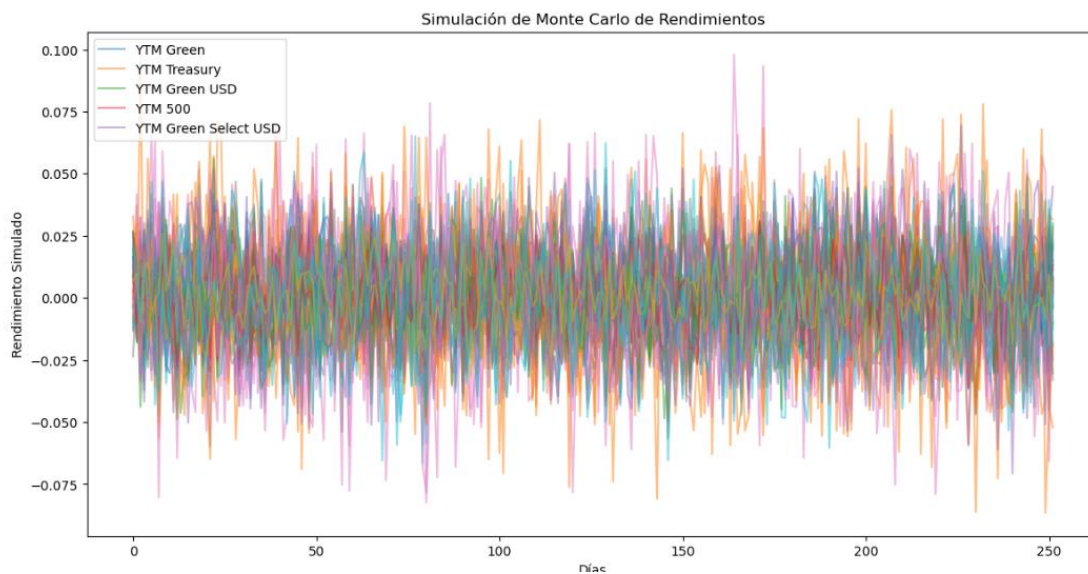


Figura 5. Simulación Montecarlo de índices de rendimiento



Figura 6. Simulación Montecarlo de los rendimientos de los bonos verdes y el tesoro

Correlaciones de índices con variables macroeconómicas

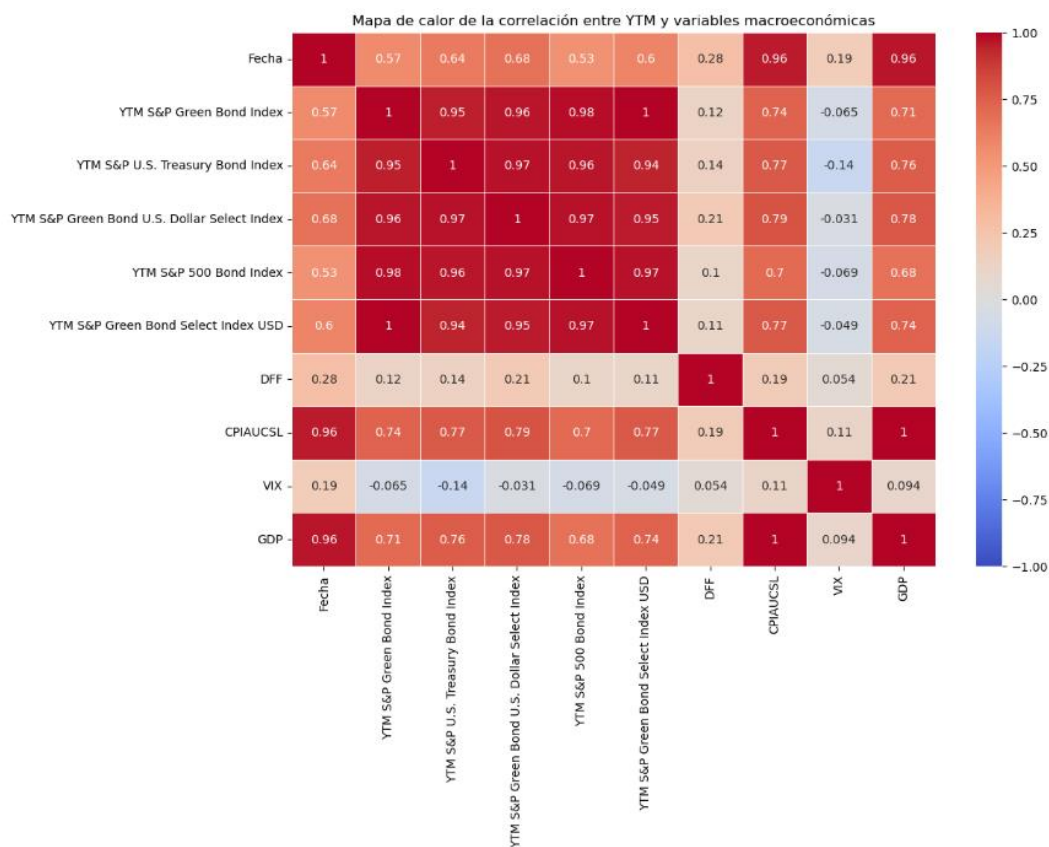


Figura 7. Correlaciones de índices con variables macroeconómicas

Modelo Ridge

Variable	Coefficiente
YTM S&P Green Bond Index	0,5117
YTM S&P U.S. Treasury Bond Index	0,1452
YTM S&P Green Bond U.S. Dollar Select Index	0,1562
YTM S&P 500 Bond Index	0,2093
DFF	3,8151
CPIAUCSL	0,3062
VIX	-27,6338
GDP	-3,6094
Beneficio_Tributario	0,1748

Tabla 3. Coeficientes del modelo Ridge

Métrica	Valor
MSE para cada fold	[2.435719e-06, 1.265879e-06, 6.503920e-07, 6.898900e-07, 1.442252e-05]
MSE promedio	3,8929
Mejor Alpha	0.1
Mejor MSE	0,9188

Tabla 4. Métricas

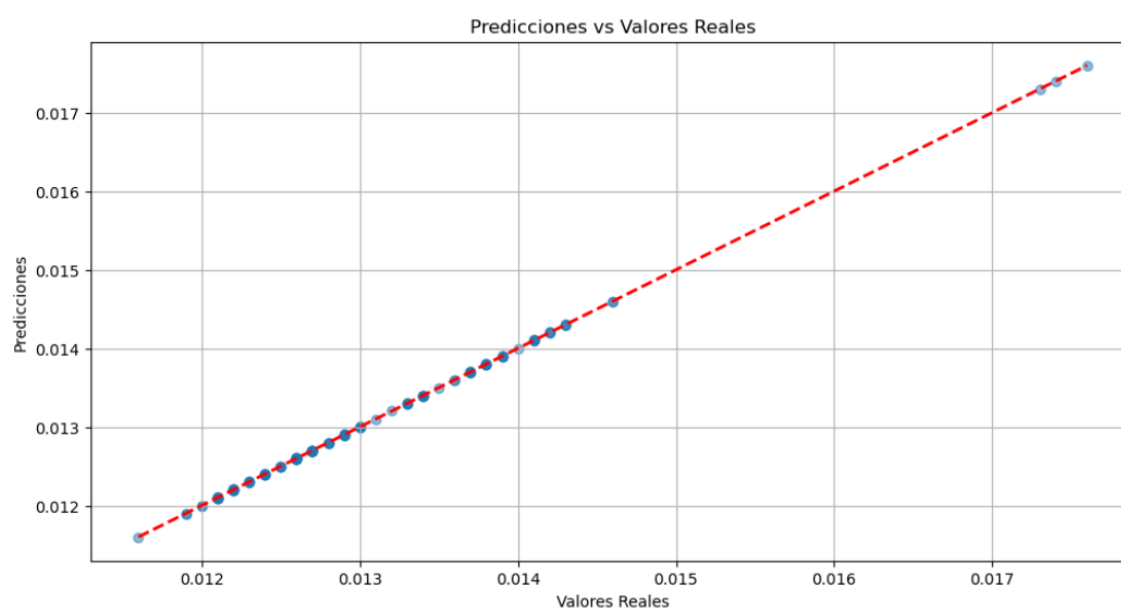


Figura 8. Predicciones del modelo vs. los valores reales

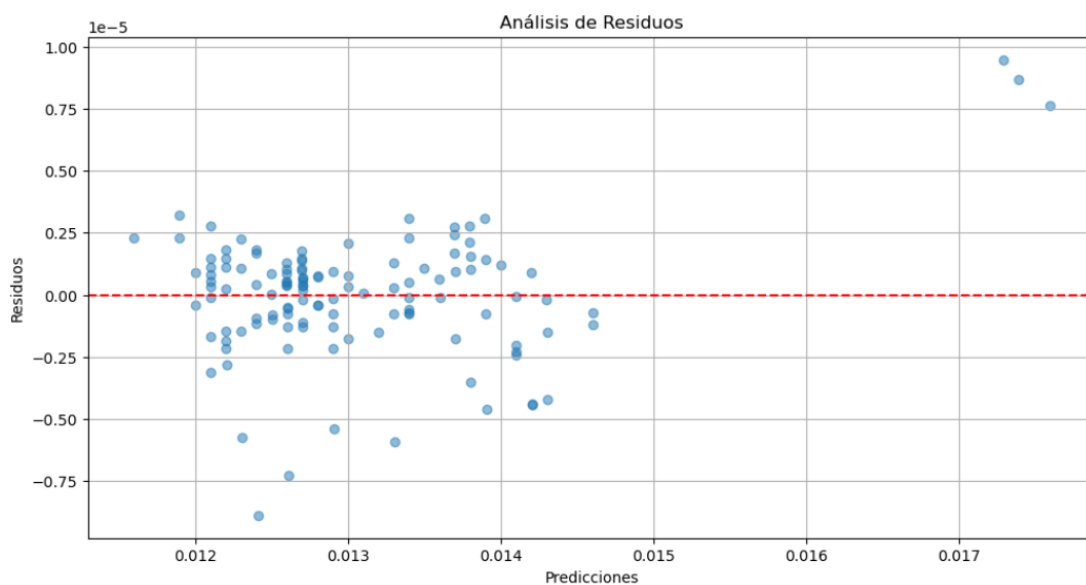


Figura 9. Análisis de los residuos del modelo

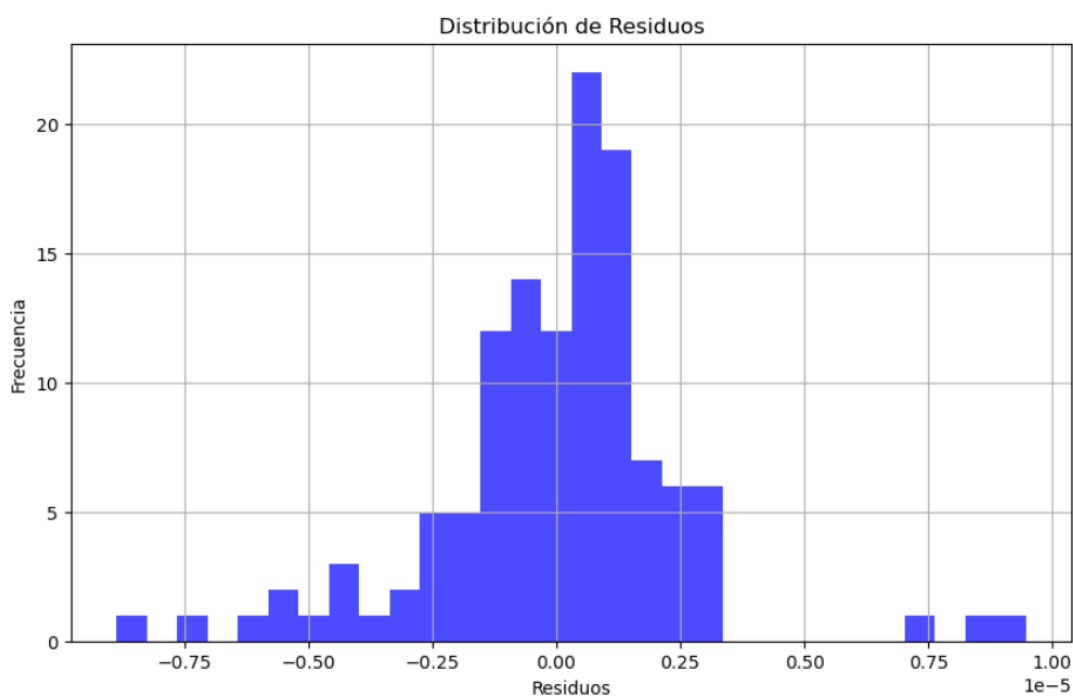


Figura 10. Distribución de los residuos del modelo

Además de los resultados obtenidos mediante el modelo econométrico, es fundamental considerar los beneficios cuantitativos que se derivan de las inversiones en bonos verdes, especialmente en el contexto de Estados Unidos. Mientras que el modelo ha permitido

identificar las relaciones entre las variables macroeconómicas y la rentabilidad de los bonos verdes, los beneficios directos de estos instrumentos también incluyen factores como la reducción en el costo de capital, los incentivos fiscales y una mayor demanda por parte de los inversionistas. A continuación, se exploran estos aspectos, proporcionando un análisis más completo sobre el impacto financiero de los bonos verdes, más allá de los resultados obtenidos mediante la estimación econométrica.

Reducción en el costo de capital (*greenium*)

En los Estados Unidos, los bonos verdes han mostrado una prima o *greenium* que permite una reducción de las tasas de interés de entre 5 y 10 puntos básicos (0,05 %-0,1 %). Por ejemplo, un bono verde emitido para financiar proyectos de energía renovable por un valor de \$100 millones podría ahorrar entre \$50.000 y \$100.000 anuales en intereses debido a esta reducción en la tasa. Este efecto se observa particularmente en los bonos emitidos por los gobiernos locales y estatales, como en el caso de los bonos verdes municipales de Nueva York y California, que obtienen financiamiento con tasas más competitivas debido a la alta demanda por estos activos sostenibles.

Aumento en la liquidez y la diversificación de los inversionistas

Los bonos verdes en los Estados Unidos han atraído a fondos especializados en ESG, así como a grandes fondos de pensión e inversionistas institucionales. Este aumento en la demanda impulsa la liquidez de estos bonos en el mercado secundario. Según datos de *Bloomberg*, los bonos verdes en Estados Unidos tienden a tener *spreads* de compra-venta más ajustados, lo que refleja una mayor liquidez en comparación con otros bonos municipales o corporativos. La mayor liquidez también se traduce en una volatilidad reducida en sus precios, lo que beneficia a los inversionistas en periodos de inestabilidad en los mercados.

Beneficios fiscales y subsidios

Los bonos verdes municipales en Estados Unidos pueden ofrecer beneficios fiscales a los inversionistas. Por ejemplo, en los bonos municipales verdes, los intereses están generalmente exentos de impuestos federales, y en algunos casos, también de impuestos estatales y locales. Esta exención puede incrementar el rendimiento neto en un 20 %-30 %, lo cual es especialmente atractivo en estados con altos impuestos, como Nueva York o California. Además, existen programas de incentivos federales, como créditos fiscales y subsidios para proyectos de infraestructura verde que mejoran aun más la rentabilidad de estos bonos.

Rendimiento ajustado al riesgo

En Estados Unidos, los bonos verdes presentan un rendimiento ajustado al riesgo favorable, especialmente en sectores menos cíclicos como la energía renovable y el agua. Estos sectores tienden a ser menos sensibles frente a las fluctuaciones económicas y ofrecen estabilidad. En comparación con otros tipos de bonos, los bonos verdes en el Bloomberg Barclays U. S. Green Bond Index han mostrado un índice de Sharpe más alto, indicando que generan mejores rendimientos ajustados al riesgo en periodos de volatilidad del mercado, lo cual es atractivo para los fondos de inversión que buscan estabilidad en tiempos de crisis económica.

Impacto en la reducción de las emisiones de carbono

Los proyectos sostenibles financiados mediante bonos verdes en Estados Unidos se enfocan en una infraestructura de energía limpia, el transporte sostenible y los edificios eficientes. Según el U. S. Green Building Council, una emisión de bonos verdes para proyectos de eficiencia energética en edificios podría reducir las emisiones de CO₂ en hasta 50.000 toneladas anuales por proyecto. Esta reducción es atractiva para inversionistas que buscan no solo un retorno financiero, sino también un impacto ambiental cuantificable.

Acceso a los mercados internacionales y diversificación

Los bonos verdes emitidos en Estados Unidos captan el interés global, especialmente el de los inversionistas europeos y asiáticos que gestionan fondos sostenibles. Esto ha permitido a los emisores estadounidenses diversificar sus fuentes de financiamiento y acceder a capital extranjero. Además, al cumplir con estándares internacionales de sostenibilidad, estos bonos atraen a inversionistas extranjeros, lo cual ayuda a reducir el costo de capital y a fomentar un mercado más dinámico para los bonos verdes en Estados Unidos.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

El índice YTM S&P Green Bond Select Index USD se posiciona como un indicador clave del comportamiento financiero de los bonos verdes, destacándose por su estabilidad relativa y su relación con variables macroeconómicas fundamentales. La correlación observada con tasas de interés, inflación y volatilidad evidencia su sensibilidad frente al contexto macroeconómico, pero su perfil diferenciado sugiere una alternativa atractiva para mitigar riesgos en portafolios diversificados.

Los resultados indican que los bonos verdes presentan *ratios* de Sharpe favorables, mostrando un rendimiento ajustado por riesgo superior al de otros instrumentos analizados. Su inclusión en la frontera eficiente refuerza su atractivo como vehículo de inversión sostenible, especialmente en contextos de alta volatilidad. Esto resalta su capacidad para combinar objetivos financieros y sostenibles.

La implementación del modelo Ridge fue crucial para abordar problemas de multicolinealidad entre las variables explicativas. Los resultados evidenciaron que el índice de volatilidad (VIX) y la tasa de interés (DFF) son factores determinantes en la predicción de rendimientos de los bonos verdes. Matemáticamente, el modelo Ridge permitió estabilizar los coeficientes al penalizar excesos en la varianza de los estimadores, ofreciendo interpretaciones robustas y fiables.

El modelo GARCH, complementado con simulaciones Montecarlo, confirmó que los bonos verdes mantienen una volatilidad moderada, incluso en escenarios adversos. Esto respalda su viabilidad como instrumento financiero estable, mientras que las simulaciones ofrecieron una

perspectiva probabilística sobre posibles comportamientos futuros, aportando herramientas para la toma de decisiones en entornos inciertos.

Más allá de los resultados financieros, los bonos verdes ofrecen un impacto significativo en la sostenibilidad ambiental, lo que subraya su rol en la transición hacia economías bajas en carbono. Estos instrumentos no solo son competitivos financieramente, sino que también alinean las inversiones con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), contribuyendo así a un futuro más verde. En ese sentido, su adopción no solo puede ser incentivada por políticas fiscales y monetarias, sino que también puede estimular la implementación de políticas públicas que fomenten la inversión sostenible.

Implicaciones prácticas y teóricas

Los bonos verdes representan una herramienta estratégica para diversificar y mitigar riesgos, especialmente en mercados volátiles, y los resultados obtenidos ofrecen una base para optimizar portafolios sostenibles mediante el uso de modelos econométricos como Ridge y GARCH.

Las conclusiones pueden ser empleadas por los gobiernos y las instituciones para justificar los incentivos fiscales y regulatorios que promuevan la emisión y la adquisición de bonos verdes; además, el análisis de volatilidad y correlación puede informar decisiones regulatorias sobre la integración de estos instrumentos en políticas de inversión pública. Este trabajo amplía el conocimiento en finanzas sostenibles al combinar técnicas econométricas avanzadas con análisis de riesgo y sostenibilidad. La metodología y los hallazgos ofrecen una base sólida para futuros estudios en el campo de la econometría aplicada a las finanzas verdes.

Recomendaciones

Con base en los hallazgos y las implicaciones discutidas, se recomienda reforzar las políticas fiscales para otorgar incentivos a los inversionistas en bonos verdes, tales como la exención de

impuestos sobre los rendimientos generados. Asimismo, es fundamental la implementación de un marco regulatorio claro que defina los proyectos financiados por bonos verdes, proporcionando transparencia y confianza a los inversionistas. También se sugiere que las políticas monetarias, especialmente las que incluyen la compra de bonos verdes en programas de activos, se utilicen para promover la inversión en estos instrumentos. Finalmente, es crucial que los gobiernos, las instituciones financieras y las empresas promuevan la educación sobre la sostenibilidad financiera y la inversión verde para incrementar la participación del mercado.

Promoción de los bonos verdes

Es necesario fomentar su emisión a través de incentivos regulatorios y fiscales, asegurando la transparencia y los estándares de sostenibilidad en los proyectos financiados; adicionalmente, se pueden considerar los bonos verdes como un componente estratégico de los portafolios de inversión pública y privada, priorizando aquellos con bajo perfil de volatilidad y alto impacto sostenible.

Herramientas de análisis financiero

Además, se deben incorporar metodologías como la simulación Montecarlo y los modelos GARCH en la evaluación de riesgo-rendimiento para mejorar las decisiones de inversión en este tipo de activos. Por supuesto, es necesario promover el uso de fronteras eficientes y *ratios* de Sharpe como métricas estándar en análisis comparativos de bonos verdes frente a otros instrumentos.

Recomendaciones para estudios futuros

Se debe expandir el alcance de la investigación hacia los mercados emergentes y diferentes periodos para evaluar la robustez de los resultados, además analizar cómo factores como la transición energética y el cambio climático afectan el desempeño de los bonos verdes en

distintos contextos. También, aplicar modelos de aprendizaje automático para identificar patrones no lineales en el comportamiento de los rendimientos de los bonos verdes y así evaluar el impacto de *shocks* económicos y políticos a través de análisis de series temporales más complejos, como los modelos VAR estructurales.

Claramente, se deben integrar métricas ambientales más detalladas en los análisis financieros para cuantificar el impacto real de los proyectos financiados por bonos verdes y evaluar la interacción entre la adopción de bonos verdes y el cumplimiento de compromisos globales como los Acuerdos de París y cualquier otro acuerdo ambiental internacional.

Referencias

- Ang, A., Goetzmann, W. N., y Schaefer, S. M. (2021). Green bonds and their role in the transition to a sustainable economy. *Journal of Economic Perspectives*, 35(3), 3-28. <https://doi.org/10.1257/jep.35.3.3>.
- Baker, S., y Murphy, A. (2020). The role of green bonds in achieving the SDGs. *Sustainable Development Journal*, 18(5), 501-515.
- Baulkaran, V. (2022). Do green bonds add value to environmental investments? *Energy Economics*, 101, 105444. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105444>.
- Brunnermeier, M. K., y Landau, J. P. (2021). Green monetary policies and their effect on green bond markets. *Journal of Central Banking*, 13(4), 234-258.
- CBI (2023). *Green bond market report. Climate bonds initiative*. <https://www.climatebonds.net/resources/reports>.
- Cheong, C., y Choi, W. G. (2020). Sustainable finance and macrofinancial linkages: A Study of green bonds. *Energy Policy*, 138, 111232. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111232>.
- Flammer, C. (2021). Corporate green bonds. *Journal of Financial Economics*, 142(2), 499-516. <https://doi.org/10.1016/j.jfineco.2020.03.007>.
- Gagnon, J., y Ricketts, L. (2020). Monetary policy and the green bond market: Implications for investment strategy. *Journal of Economic Policy*, 12(2), 123-145.

- Ghoul, S. E., Guedhami, O., Kim, H., y Park, K. (2022). Green bonds and firm value: Evidence from the bond market. *Finance Research Letters*, 48, 102666. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2022.102666>.
- Gómez, J. A., y Sánchez, M. (2020). El impacto de las políticas monetarias expansivas sobre los bonos verdes: Un análisis para América Latina. *Revista de Finanzas y Desarrollo Sostenible*, 22(3), 199-213.
- Hachem, D., y Khoury, M. (2019). The volatility and risk of green bonds: A systematic review. *Journal of Sustainable Finance & Investment*, 9(1), 24-40.
- Hachenberg, B., y Schiereck, D. (2020). Are green bonds a success? Evidence from the primary and secondary market. *Energy Policy*, 138, 111231. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111231>.
- Hernández, M. (2021). La influencia de las políticas monetarias en los mercados de bonos verdes en economías emergentes. *Revista de Economía Mundial*, 56(1), 122-137.
- MacAskill, S., Roca, E., Liu, B., Stewart, R. A., y Sahin, O. (2022). The influence of green bond issuance on macroeconomic variables. *Economic Modelling*, 103, 105599. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2022.105599>.
- Reboredo, J. C. (2018). Volatility spillovers between green bonds and financial markets. *Energy Economics*, 74, 38-50. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.05.030>.
- Tang, D. Y., y Zhang, Y. (2020). The value of green bonds. *The Journal of Financial and Quantitative Analysis*, 55(3), 709-744. <https://doi.org/10.1017/S002210901900053X>.

- Wang, Y., Zhi, Q., y Zhang, X. (2021). Macroeconomic impact of green bond market development. *Applied Energy*, 293, 116977. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116977>.
- Zhang, R., y Zhang, Y. (2021). Green bonds in turbulent times: A volatility analysis. *Journal of Risk and Financial Management*, 14(2), 55-75.
- Zhang, Y., Jin, L., y Karplus, V. J. (2023). Policy drivers of green bonds: Evidence from global markets. *Journal of Cleaner Production*, 390, 136023. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136023>.
- Zhang, Y., Jin, L., y Karplus, V. J. (2023). Policy drivers of green bonds: Evidence from global markets. *Journal of Cleaner Production*, 390, 136023.
- Zhou, X., y Wang, Z. (2022). Climate risks and their financial implications: The role of green bonds. *Energy Policy*, 158, 112564. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112564>.
- Zhu, Y., y Zhang, W. (2021). The evolution of green bond returns and their relationship with macroeconomic variables. *Finance Research Letters*, 41, 101879. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2020.101879>.
- Zubair, S., y Shamsuddin, A. (2023). Transitioning to a sustainable financial ecosystem: evidence from emerging markets. *Journal of Sustainable Finance & Investment*, 13(2), 211-230. <https://doi.org/10.1080/20430795.2022.2130732>.