

Universidad de Cantabria



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN



*Tesis Doctoral*

**Estudio de las organizaciones industriales  
en relación con un entorno complejo para  
el desarrollo sostenible mediante un  
enfoque de sistemas socioecológicos y  
análisis econométrico**

**Autor:**

D. Fernando Pigazo López

**Directora:**

Dra. Dña. María del Carmen Ruiz Puente

Santander a 1 de marzo de 2025



## **AGRADECIMIENTOS**

Gracias por tu ayuda y motivación Carmen,  
los ratos compartidos han sido  
provechosos y de aprendizaje.

Gracias Alberto, gracias miles,  
por compartir  
y por tu ayuda indispensable con artículos y tesis.

Gracias Familia,  
sois parte indispensable, motivacional  
y vital para "meterme" en estos asuntos.



## RESUMEN

Las organizaciones industriales actuales se hallan sometidas a un entorno cambiante y complejo debido al desarrollo tecnológico, la globalización y la liberalización de los mercados financieros. Adicionalmente, la consecución de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) incrementa la presión sobre las organizaciones industriales ancladas en modelos productivos tradicionales. Dado el triple carácter de los ODS: el económico, el social y el ambiental, la modernización de las organizaciones se enfrenta al reto de implementar actuaciones integrales que atiendan a estos aspectos.

La crisis sanitaria COVID-19 ha evidenciado la interrelación de estas facetas y su efecto en las organizaciones. Con origen en el ámbito de la salud, rápidamente se desataron consecuencias en el contexto social, económico y ambiental: paradas de las cadenas de suministro, transformación y parada de la actividad industrial, con los consiguientes efectos económicos en particulares, organizaciones y administraciones públicas, así como en el medio ambiente, por ejemplo, reduciéndose las emisiones de gases contaminantes.

Esta crisis mundial puso en relieve la necesidad de comprender en mayor profundidad las relaciones entre las organizaciones y su entorno desde las vertientes social, económica y medioambiental: tipo de relación y forma de interactuar de estos aspectos, efectos a corto y largo plazo, capacidad de alcanzar un estado de equilibrio, resistencia a las perturbaciones e incluso el efecto de eventos extremos, como el de la crisis sanitaria COVID-19.

La presente tesis doctoral aborda el estudio de la sostenibilidad de las organizaciones en el sector industrial desde una perspectiva integral, focalizando en la dimensión medioambiental (representado por la concentración de material particulado,  $PM_{10}$ ) y considerando las interacciones socioeconómicas en el ámbito regional a diferentes escalas temporales. Se considera también el efecto de la crisis sanitaria por COVID-19 en la sostenibilidad.

Partiendo de un estudio de la evolución histórica de las organizaciones en relación con su entorno, se identifican modelos organizativos y se establece un marco teórico a partir del cual desarrollar modelos analíticos de las interacciones entre indicadores de los ámbitos social, económico y medioambiental.

Bajo la novedosa perspectiva de los Sistemas Soci ecológicos (SES), se ha elaborado una metodología propia basada en métodos econométricos y series de datos temporales para caracterizar el comportamiento conjunto y su evolución en el tiempo del sistema conformado por el sector industrial y su entorno natural y económico en el contexto regional.



## ABSTRACT

Current industrial organizations are subject to a changing and complex environment due to technological development, globalization, and the liberalization of financial markets. Additionally, the achievement of the Sustainable Development Goals (SDG) increases the pressure on industrial organizations anchored in traditional production models. Given the triple nature of the SDG: economic, social, and environmental, the modernization of organizations faces the challenge of implementing comprehensive actions that address these aspects.

The COVID-19 health crisis has highlighted the interrelation of these facets and their effect on organizations. Originating in the health sector, consequences quickly spread to the social, economic, and environmental contexts: supply chain stoppages, transformation and halt of industrial activity, with the consequent economic effects on individuals, organizations, and public administrations, as well as on the environment, for example, reducing emissions of polluting gases.

This global crisis underscored the need to understand in greater depth the relationships between organizations and their environment from social, economic, and environmental perspectives: the type of relationship and how these aspects interact, short- and long-term effects, the ability to achieve a state of equilibrium, resistance to disturbances, and even the effect of extreme events, such as the COVID-19 health crisis.

This doctoral thesis addresses the study of the sustainability of organizations in the industrial sector from a comprehensive perspective, focusing on the environmental dimension (represented by the concentration of particulate matter,  $PM_{10}$ ) and considering socioeconomic interactions at the regional level over different time scales. The effect of the COVID-19 health crisis on sustainability is also considered.

Starting from a study of the historical evolution of organizations in relation to their environment, organizational models are identified, and a theoretical framework is established from which to develop analytical models of the interactions between indicators of the social, economic, and environmental fields.

Under the novel perspective of Socio-Ecological Systems (SES), a methodology based on econometric methods and time series data has been developed to characterize the joint behavior and its evolution over time of the system formed by the industrial sector and its natural and economic environment in the regional context.



# Índice

<b>1. CONTEXTO Y FUNDAMENTO DE LA TESIS</b>	<b>21</b>
1.1. Marco y motivación de la tesis . . . . .	21
1.2. Preguntas de la tesis . . . . .	22
1.3. Organización de la tesis . . . . .	22
<b>2. EVOLUCIÓN DE LA TEORÍA ORGANIZATIVA Y SU RELACIÓN CON EL ENTORNO</b>	<b>25</b>
2.1. Concepto de organización . . . . .	25
2.2. Evolución y modelos de la teoría organizativa . . . . .	26
2.2.1. Etapa de la industrialización clásica . . . . .	26
2.2.2. Etapa de la industrialización neoclásica . . . . .	29
2.2.3. Etapa de la información . . . . .	34
2.3. Relación de los enfoques teóricos con el entorno y la sostenibilidad . . . . .	36
<b>3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO</b>	<b>43</b>
3.1. Hipótesis de partida . . . . .	43
3.2. Objetivo general . . . . .	43
3.3. Objetivos específicos . . . . .	44
<b>4. ANÁLISIS DE LA TEORÍA ORGANIZATIVA EN LA ACTUALIDAD</b>	<b>45</b>
4.1. Introducción . . . . .	45
4.1.1. Niveles de sostenibilidad . . . . .	46
4.1.2. Ecología Industrial y Economía Circular . . . . .	47

4.1.3.	Transformación de los sistemas socioeconómicos. Decrecimiento . . . . .	47
4.2.	Metodología . . . . .	48
4.3.	Resultados . . . . .	49
4.3.1.	Conexión con otros enfoques teóricos . . . . .	53
4.4.	Conclusiones . . . . .	54
4.4.1.	Los Sistemas Socioecológicos (SES) y los sistemas industriales . . . . .	54
4.4.2.	Hueco del conocimiento . . . . .	55
<b>5.</b>	<b>REPRESENTACIÓN DE LOS SES Y SU RELEVANCIA EN LA SOSTENIBILIDAD</b>	<b>59</b>
5.1.	Introducción . . . . .	59
5.1.1.	Representación conceptual . . . . .	59
5.1.2.	Representación analítica . . . . .	62
5.2.	Metodología . . . . .	65
5.3.	Resultados . . . . .	66
5.4.	Conclusiones . . . . .	69
5.4.1.	Técnicas cuantitativas para el estudio de los SES . . . . .	70
<b>6.</b>	<b>CASO DE ESTUDIO: SOSTENIBILIDAD DEL SECTOR INDUSTRIAL CÁNTABRO</b>	<b>73</b>
6.1.	Introducción . . . . .	73
6.1.1.	Cantabria y su economía . . . . .	74
6.1.2.	Cantabria y los ODS . . . . .	77
6.1.3.	Sistema de estudio . . . . .	78
6.1.4.	Relación de la variable ambiental con los aspectos industriales y socioecológicos . . . . .	81
6.1.5.	Impacto de un evento externo. La crisis sanitaria COVID-19 . . . . .	83
6.2.	Metodología . . . . .	86
6.2.1.	Fuentes de datos . . . . .	86
6.2.2.	Recolección de los datos del estudio . . . . .	86
6.2.3.	Herramientas para el tratamiento de los datos . . . . .	88
6.2.4.	Fundamentos teóricos de MARDL . . . . .	89
6.3.	Resultados . . . . .	91
6.3.1.	Independencia de las variables. Correlación y multicolinealidad . . . . .	94
6.3.2.	Estabilidad de los datos iniciales . . . . .	96

6.3.3. Determinación del número óptimo de retrasos y cointegración . . . . .	100
6.3.4. Resiliencia y conexiones entre dominios y escalas temporales . . . . .	105
6.3.5. Retroalimentación . . . . .	109
6.3.6. Vulnerabilidad . . . . .	113
6.4. Conclusiones . . . . .	116

**7. EL SECTOR INDUSTRIAL CÁNTABRO Y LA SOSTENIBILIDAD EFECTIVA A LARGO PLAZO** **119**

**8. CONCLUSIONES DE LA TESIS** **123**

**9. BIBLIOGRAFÍA** **129**

ANEXOS

**A. TÉCNICAS CUANTITATIVAS** **147**

A.1. Estabilidad de los datos en el tiempo. Estacionariedad . . . . .	147
A.2. Relaciones estables a largo plazo. Cointegración . . . . .	152
A.3. Efectos a corto y largo plazo. MARDL y MARDL-ECM . . . . .	152
A.4. Relación predictiva entre variables a lo largo del tiempo. Causalidad de Granger . . . . .	155
A.5. Consistencia . . . . .	155
A.5.1. Validación de la estabilidad del modelo . . . . .	155
A.5.2. Comprobación de la estabilidad de los resultados . . . . .	158
A.5.3. Especificación del modelo . . . . .	159

**B. ESTADÍSTICAS FUNDAMENTALES PARA EL PERÍODO ANTERIOR AL COVID-19** **161**

**C. DATOS** **163**

**D. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO ÓPTIMO DE RETRASOS** **165**

**E. PUBLICACIONES** **169**

• <i>Organizational Theoretical Approaches to Sustainability in a Complex Environment</i> . . .	171
---	-----

- *Analysis of the Dynamic Relationships Between Industrial and Environmental Factors and Unemployment Rate. An Econometric Approach . . . . . 173*

# Índice de tablas

Tabla 5.1. Técnicas de modelado, dominios involucrados, horizonte temporal y propósito. . . . .	61
Tabla 6.1. Variables de estudio. . . . .	81
Tabla 6.2. Estadísticas fundamentales de las series de datos, para el período completo. . . . .	93
Tabla 6.3. Matriz de correlación para el período anterior al COVID-19. . . . .	95
Tabla 6.4. Matriz de correlación para el período completo. . . . .	95
Tabla 6.5. FIV para el período anterior al COVID-19. . . . .	96
Tabla 6.6. FIV para el período completo. . . . .	96
Tabla 6.7. Pruebas de raíz unitaria para el período anterior al COVID-19. . . . .	97
Tabla 6.8. Resultados de las pruebas de raíz unitaria en el período completo. . . . .	98
Tabla 6.9. Resultados de las pruebas de raíz unitaria de las variables no estacionarias en niveles diferenciadas, en el periodo previo al COVID-19. . . . .	98
Tabla 6.10. Resultados de las pruebas de raíz unitaria para las variables no estacionarias en niveles diferenciadas en el período completo. . . . .	100
Tabla 6.11. Resultado de la prueba de límites para $PM_{10}$ en el período completo. . . . .	103
Tabla 6.12. Prueba de cointegración para la concentración de $PM_{10}$ para el modelo anterior al COVID-19. . . . .	103
Tabla 6.13. Relaciones a largo plazo de HRS, SICK, WAGE, IPI y GDP, con respecto a la concentración de $PM_{10}$ para el modelo anterior al COVID-19. . . . .	104
Tabla 6.14. Relaciones a largo plazo de HRS, SICK, WAGE, IPI y GDP, con respecto a la concentración de $PM_{10}$ para el modelo correspondiente al período completo. . . . .	104
Tabla 6.15. Comparativa del comportamiento a largo plazo en ambos períodos. . . . .	105

Tabla 6.16. MARDL-ECM para $PM_{10}$ en el período anterior al COVID-19. . . . .	106
Tabla 6.17. Modelo ECM para el período completo. . . . .	107
Tabla 6.18. Resultados a corto plazo sobre $PM_{10}$ , antes del COVID-19 y en el período completo. . . . .	110
Tabla 6.19. Resultados de la causalidad de Granger en el periodo anterior al COVID-19. . . . .	111
Tabla 6.20. Resultados de la Causalidad de Granger para el período completo. . . . .	112
Tabla 6.21. Pruebas de robustez. . . . .	114
Tabla B.1. Estadísticas fundamentales para el período anterior al COVID-19. . . . .	161
Tabla C.1. Datos empleados en el estudio. . . . .	163
Tabla C.2. Datos empleados en el estudio (continuación). . . . .	164

# Índice de figuras

Figura 2.1. Principales enfoques teóricos clásicos ordenados en cuanto a su relación con el entorno y su grado de complejidad. . . . .	29
Figura 2.2. Principales enfoques teóricos clásicos y neoclásicos ordenados en cuanto a su relación con el entorno y su grado de complejidad. . . . .	33
Figura 2.3. Principales enfoques teóricos correspondientes a las tres etapas de desarrollo de la teoría organizativa. . . . .	36
Figura 2.4. Clasificación de las teorías organizativas en cuanto a su conexión con elementos del entorno y su preocupación por la sostenibilidad. . . . .	41
Figura 4.1. Número de publicaciones anuales en el marco de la teoría organizativa en relación con el entorno complejo y de sostenibilidad. . . . .	50
Figura 4.2. Mapa de cocitación de referencias. . . . .	51
Figura 4.3. Representación de un SES integrado por el sistema industrial, su entorno económico y natural. . . . .	57
Figura 5.1. Representación conceptual del comportamiento multinivel de los SES en cuanto al dominio de análisis y el horizonte temporal. . . . .	62
Figura 5.2. Clasificación de las técnicas de análisis de series temporales. . . . .	65
Figura 5.3. Número de artículos publicados por año, entre 2015 y 2023, que emplean MARDL econométricos en relación con la sostenibilidad y las ciencias ambientales. . . . .	66
Figura 5.4. Aspectos más relevantes objeto de estudio, mediante el MARDL, en el marco de la sostenibilidad. . . . .	67
Figura 5.5. Esquema de las técnicas econométricas empleadas. . . . .	72

Figura 6.1. Cantabria, sistema de estudio. La intersección de los aspectos industriales, socio-económicos y medioambientales define el DS del sistema. . . . .	80
Figura 6.2. Representación conceptual de la potencial transformación de un SES a causa de un evento extremo como el COVID-19. . . . .	85
Figura 6.3. Series temporales representativas del sistema. . . . .	92
Figura 6.4. Series temporales diferenciadas. . . . .	99
Figura 6.5. Selección del número óptimo de retrasos para el MARDL (período anterior al COVID-19). . . . .	101
Figura 6.6. Selección del número óptimo de retrasos para el MARDL (período completo). . .	102
Figura 6.7. Causalidad de Granger antes del COVID-19 y en el período completo. . . . .	113
Figura 6.8. Resultados de las pruebas de la suma acumulativa de residuos recursivos y de sus cuadrados en el período anterior al COVID-19. . . . .	115
Figura 6.9. Resultados de las pruebas de la suma acumulativa de los residuos recursivos y de sus cuadrados en el período completo. . . . .	115
Figura 6.10. Interacciones entre dominios, en los distintos horizontes temporales. . . . .	117
Figura A.1. Estacionariedad en series temporales. A la izqda. una serie temporal estacionaria; a la dcha. una no estacionaria. . . . .	148
Figura A.2. Concepto de raíz unitaria. . . . .	149
Figura A.3. Esquema general de las pruebas de robustez para modelos econométricos. . . . .	157
Figura D.1. MARDL para el período anterior al COVID-19. . . . .	166
Figura D.2. MARDL para el período completo. . . . .	167

## ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

CIA	Criterio de Información de Akaike
CNAE	Clasificación Nacional de Actividades Económicas
DS	Desarrollo Sostenible
DdS	Dinámica de Sistemas
FIV	Factor de Inflación de la Varianza
IA	Inteligencia Artificial
ICANE	Instituto Cántabro de Estadística
INE	Instituto Nacional de Estadística
IPI	Índice de Producción Industrial
MARDL	Métodos/Modelos Autorregresivos con Retraso Distribuido
MARDL-ECM	Modelo Autorregresivo con Retraso Distribuido con Corrección de Error
MARDL-LP-PL	Modelo Autorregresivo con Retraso Distribuido a Largo Plazo con Prueba de Límites
MARGCH	Modelos Autorregresivos Generalizados Condicionales Heterocedásticos
MARIMA	Modelos Autorregresivos Integrados de Media Móvil
MCE	Modelos de Corrección de Errores
MC2E	Mínimos Cuadrados en Dos Etapas
MCO	Mínimos Cuadrados Ordinarios
MRAG	Métodos de Regresión Aditivos Generalizados
MVAR	Modelos Vectoriales Autorregresivos
MVCE	Modelos Vectoriales de Corrección de Error
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OSO	Orientación a la Sostenibilidad Organizativa
$PM_{10}$	Partículas de diámetro aerodinámico $< 10 \mu\text{m}$

PADF	Prueba de Dickey-Fuller Aumentada
PYMEs	Pequeñas y Medianas Empresas
PIB	Producto Interior Bruto (GDP)
PJB	Prueba de Jarque-Bera
PKPSS	Prueba Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin
PPP	Prueba de Phillips-Perron
RNMCL	Redes neuronales con Memoria a Corto y Largo Plazo
RNR	Redes Neuronales Recurrentes
SCA	Sistemas Complejos Adaptativos
SES	Sistemas Sociocológicos
TGS	Teoría General de Sistemas
VBR	Visión Basada en Recursos
WoS	Web of Science

## CONTEXTO Y FUNDAMENTO DE LA TESIS

### 1.1. Marco y motivación de la tesis

Esta tesis doctoral, vinculada a la línea de investigación *Innovación sistémica para la sostenibilidad industrial* que desarrolla el grupo de investigación Ingeniería y Gestión de Proyectos (INGEPRO) del Departamento de Transportes y Tecnología de Proyectos y Procesos, viene motivada por el interés del autor en el estudio de la sostenibilidad en el contexto del sector industrial, tras más de quince años de experiencia en el sector productivo desempeñando, con diferentes niveles de responsabilidad, actividad en los tres ámbitos de interés a efectos de la sostenibilidad en el sector. Fruto de esta experiencia, así como de la proliferación de estudios técnicos y científicos que ahondan en el bienestar laboral, la sostenibilidad y otros estudios de carácter económico que ponen en tela de juicio la capacidad de crecimiento, suscitan, al menos, una reflexión sobre el actual estado de las organizaciones y su relación con el entorno. La actividad diaria propia de los procesos productivos a menudo pone de manifiesto una limitada consciencia organizativa, así como desconexión con los citados aspectos, evidenciando la necesidad de alinear teoría y práctica para poder mantenerse en el camino de la sostenibilidad y lograr alcanzar los objetivos marcados.

En esta tesis doctoral se pretende profundizar en el estudio de la complejidad de las relaciones del sistema industrial y su contexto actual, desde el prisma de la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y poner de manifiesto el comportamiento conjunto, como sistema, de

las facetas socioeconómicas, naturales y organizativas del sector industrial. Se toma Cantabria como caso de estudio, para mostrar la evolución en el tiempo de las relaciones entre estos aspectos y sus implicaciones en cuanto al desarrollo sostenible (DS) conjunto.

## 1.2. Preguntas de la tesis

A tenor de lo anterior se suscitan las siguientes cuestiones:

- ¿Cómo se han relacionado históricamente las organizaciones con el entorno socioeconómico del momento? Para ello se llevará a cabo una revisión de la teoría organizativa a lo largo de la historia, adquiriendo los enfoques empleados históricamente para afrontar los desafíos del momento.
- Actualmente, ¿se relaciona el comportamiento organizativo con el entorno socioeconómico y natural del momento?, ¿Cuál es el marco teórico más adecuado para abordar el objeto de estudio de esta tesis? Se revisará el estado del conocimiento actual de forma sistemática.
- En un sistema real, ¿se puede evidenciar de forma cuantitativa la existencia de relaciones entre el comportamiento organizativo y su entorno?, ¿cómo son esas relaciones, estáticas, dinámicas...?, ¿cómo influyen factores o cambios relevantes en estas relaciones? Se analiza el caso de Cantabria en base a datos existentes, para analizar mediante métodos econométricos y series temporales de datos las relaciones dinámicas subyacentes entre los distintos ámbitos.

## 1.3. Organización de la tesis

Para responder a las preguntas anteriores la presente tesis se estructura en ocho capítulos que abordan de forma integral los aspectos teóricos, metodológicos y empíricos del estudio sobre la interacción entre los sistemas organizativos industriales y su entorno en el marco del DS.

- Capítulo 1. Contexto y fundamento de la tesis. En este capítulo se establece el marco de desarrollo de la tesis y la motivación del estudio. Se establecen las preguntas a las que responde la investigación y que guían el trabajo. Se presenta la estructura la tesis.
- Capítulo 2. Evolución de la Teoría Organizativa y su relación con el entorno. Se realiza una revisión histórica de la teoría organizativa, analizando cómo cada enfoque teórico ha abordado

la relación entre las organizaciones y su entorno socioeconómico y natural. Además, se evalúan los modelos teóricos organizativos en función del grado de conexión con el entorno y su preocupación con la sostenibilidad.

- **Capítulo 3. Hipótesis y objetivos del estudio.** En este capítulo se establece la hipótesis de partida, el objetivo general y los objetivos específicos.
- **Capítulo 4. Análisis de la Teoría Organizativa en la actualidad.** Este capítulo presenta una revisión actualizada de la teoría organizativa en el contexto de la complejidad y la sostenibilidad, identificando las principales corrientes teóricas relevantes para el análisis del sistema industrial. Se introduce el modelo teórico de los Sistemas Soci ecológicos (SES), propiedades y aplicación. Se define el hueco de conocimiento del estudio.
- **Capítulo 5. Representación de los SES.** En este capítulo se aborda la representación conceptual de los SES, su estructura de dominios y horizontes temporales. Se introducen las técnicas econométricas, características y limitaciones. Se introduce el concepto de series temporales y los métodos autorregresivos con retraso distribuido (MARDL), así como la justificación de su uso.
- **Capítulo 6. Caso de estudio: sostenibilidad del sector industrial cántabro.** Se introducen las variables representativas del caso de estudio su relevancia y justificación. Se realiza una descripción del marco de Cantabria, su actividad industrial y desarrollo en el marco de la sostenibilidad. Se describe las fuentes de datos y las herramientas utilizadas para su tratamiento. Se describe la metodología empleada en la toma de datos, así como los análisis preliminares efectuados, para comprobar la adecuación de los datos al análisis llevado a cabo posteriormente. Se desarrollan los modelos analíticos en los dos períodos de tiempo considerados extrayendo los principales hallazgos.
- **Capítulo 7. El sector industrial cántabro y la sostenibilidad efectiva a largo plazo.** En este capítulo se enmarcan y evalúa los resultados obtenidos para el caso real del sector industrial de Cantabria, con respecto a la sostenibilidad efectiva a largo plazo.
- **Capítulo 8. Conclusiones:** Se resumen los principales hallazgos del estudio, limitaciones y direcciones futuras del estudio.



## EVOLUCIÓN DE LA TEORÍA ORGANIZATIVA Y SU RELACIÓN CON EL ENTORNO

### 2.1. Concepto de organización

El concepto de *organización* es antiguo y se asienta sobre la base de que la coordinación o asociación de individuos en colectividades es más eficaz para la supervivencia, que la individualidad.

De este modo, ya en la prehistoria el hombre se asociaba para la caza, la recolección de alimentos, así como para la defensa ante amenazas externas (Medina Macias & Avila Vidal, 2002).

Antiguas civilizaciones como la egipcia, la mesopotámica o la asiria pusieron de manifiesto el hecho de la asociación como medio para la construcción de obras monumentales que perdura hoy en día.

En la Edad Media, la estructura productiva se basaba en la producción artesanal y las estructuras organizativas eran de carácter corporativo, hasta que, en el S. XVIII, tuvo lugar la primera revolución industrial (1760-1860) suponiendo la sustitución de la producción artesanal por industrial.

Desde 1860 hasta 1914 la revolución industrial entró en una segunda fase caracterizada por la sustitución del hierro por el acero como material básico, y también la sustitución de la energía generada por el carbón por el petróleo y la electricidad como principales fuentes de energía. En esta etapa se desarrollaron máquinas automáticas, se incrementó la especialización de los trabajadores, tuvo lugar la penetración de la ciencia en la industria, se desarrollaron los medios logísticos, así como nuevas formas de organización capitalista.

Este cambio fundamental a comienzos del s. XX, dio lugar al estudio del fenómeno organizativo desde la perspectiva de distintos campos del conocimiento, tales como: las ciencias humanas (psicología, sociología, educación, etc.), las ciencias matemáticas (estadística), la física, la ingeniería o la tecnología de información (de la Rosa Albuquerque, 2019; Koontz, 2000; Mele et al., 2010), de modo que la teoría organizativa va adquiriendo una identidad, aunque proveniente de distintos enfoques.

La teoría administrativa recibe múltiples influencias, lo que se evidencia al estudiar el concepto de *organización*. Este término se utiliza indistintamente para referirse a: la empresa como entidad, al conjunto de comportamientos de los individuos que la conforman, y a la estructura formal e intencional de funciones, tareas y responsabilidades que componen dicha empresa (Koontz et al., 2014).

Para Chester Barnard (Barnard, 1968) *"una organización es un sistema de actividades conscientemente coordinadas de dos o más personas"*.

Bertalanffy (Bertalanffy, 1976), desde la perspectiva de la Teoría General de Sistemas (TGS), define la *organización* como *"un sistema que tiene por objeto el alcanzar ciertas metas u objetivos"*.

Chiavenato (Chiavenato, 2019) también define la organización desde la perspectiva social y desde la perspectiva de la teoría de sistemas. En el plano social, las organizaciones son *"unidades sociales (o agrupaciones humanas) intencionalmente construidas para el logro de objetivos específicos"*, mientras que, en el plano de la TGS las organizaciones son *"un conjunto de elementos que se relacionan e interaccionan entre sí de modo dinámico para el logro del objetivo común"*.

En esta tesis, el concepto *organización* se utilizará para designar indistintamente una empresa, industria o sector industrial; una representación de elementos que interaccionan entre ellos y con el medio en que desarrollan su actividad.

## **2.2. Evolución y modelos de la teoría organizativa**

### **2.2.1. Etapa de la industrialización clásica**

La época de la industrialización clásica, que se extendió desde 1900 hasta 1950-1960 se caracterizó por una producción masiva y poco eficiente en un entorno estable. Este periodo comenzó con el ocaso de la segunda revolución industrial, y durante su transcurso se intensificó la actividad industrial, surgiendo grandes industrias dedicadas a la producción masiva, pero de manera desorganizada y poco eficiente (Chiavenato, 2019; Medina Macias & Avila Vidal, 2002; Rivas Tovar, 2009).

Las organizaciones de la época buscaban mejorar la eficiencia mediante la estandarización y formalización de sus actividades y procesos de manera racional y científica. Aunque el mundo estaba cambiando, lo hacía de manera lenta y predecible, permitiendo a los administradores adoptar un enfoque introspectivo centrado en el interior de las organizaciones.

Durante ese período, los planteamientos dominantes se basaban en la resolución de problemas mediante su descomposición en partes más pequeñas, así como en una firme creencia en la existencia de reglas predecibles de causa y efecto. Bajo estos planteamientos, influenciados por filósofos como René Descartes y científicos como Isaac Newton, subyacía una concepción del mundo como una máquina ordenada y predecible (mecanicismo), donde todo estaba determinado por leyes fijas (determinismo) y podía ser comprendido a través de la observación y la ciencia (positivismo). También se aplicaba al comportamiento de las personas que, como si de las partes de un mecanismo se trataran, respondían de forma predecible (Chiavenato, 2019; Coronado, 1996; Pardo-Ramos, 2010; Rivas Tovar, 2002).

La teoría administrativa en América, influida por los primeros inmigrantes europeos, era práctica y curiosa, alineada con el pensamiento positivista lógico que postulaba el conocimiento científico como el único auténtico, basado en lo empírico y verificable (Bertalanffy, 1976; Carro & Caló, 2012).

La estructura organizativa predominante era jerárquica, con estructuras piramidales y centralización del poder, repartido en niveles y departamentos funcionales.

Procedente del campo de la ingeniería, Frederick W. Taylor (1856-1915), considerado el padre de la teoría científica de la administración, propuso una teoría orientada hacia la consecución de la eficiencia óptima mediante la racionalización del trabajo y la creación de procedimientos estándar para lograr el mejor rendimiento: los trabajadores eran considerados meros recursos en la teoría de Taylor (Carro & Caló, 2012; Chiavenato, 2019; Rivas Tovar, 2009; Taylor, 2016).

Desde una perspectiva más global, Henry Fayol (1841-1925) desarrolla la teoría clásica de la administración, con un enfoque integral y universal aplicable a todas las estructuras organizativas. A diferencia de Taylor, Fayol enfatizó la estructura organizativa y el nivel gerencial, reconociendo el valor de la representación de los trabajadores y armonizando la autonomía del trabajador con la eficiencia empresarial (Chiavenato, 2019; Koontz et al., 2014; Parker & Ritson, 2005).

Procedente del campo de la sociología y la economía, Max Weber (1864-1920) desarrolló la teoría burocrática, influenciado por valores como la disciplina y el trabajo metódico. La teoría burocrática fue necesaria para gestionar el incremento en tamaño y complejidad de las organizaciones,

promoviendo una organización más racional con reglas y controles. Para Weber las relaciones dentro de la organización eran impersonales y regidas por criterios formales con una división del trabajo y especialización como principios fundamentales (de la Rosa Albuquerque, 2019; Petrella & Joyanes Aguilar, 2007; Rivas Tovar, 2009).

George E. Mayo (1880-1949), influenciado por el pensamiento holístico según el cual "*el todo es más que la suma de las partes*" proveniente de la escuela Gestalt y por los aportes de Kurt Lewin, pionero de la psicología organizacional, desarrolló la teoría de las relaciones humanas entre 1920 y 1930. Esta teoría constituye una respuesta a la deshumanización del trabajo asociada con los modelos científicos y clásicos de administración. Mayo destacó la importancia de los grupos informales y su impacto en la productividad organizacional, basándose en los resultados del experimento Hawthorne. Esta teoría introdujo una perspectiva más humana y psicológica en la gestión organizacional, aunque su influencia disminuyó hacia finales de los años 50 (Chiavenato, 2019; Rivas Tovar, 2002).

Del ámbito de la administración de empresas, Chester Barnard (1930-1940), influido por el funcionalismo (que estudia cómo funcionan las diferentes partes de una organización), el estructuralismo de Parsons (que analiza cómo las estructuras sociales afectan el comportamiento), y el desarrollo organizativo de Lewin (que se enfoca en la dinámica del cambio en las organizaciones), concibió la organización como un sistema social complejo, desarrollando la teoría de los sistemas cooperativos. Barnard introdujo el concepto de *organización informal*, destacando su influencia en cómo las personas actúan dentro de las organizaciones. Su teoría rompía con las ideas predominantes de la época que veían todo de manera muy mecanicista y científica, y se ubicaba entre el enfoque estructural y la teoría de las relaciones humanas. Barnard subrayaba la importancia de equilibrar el componente humano y tecnológico en la gestión organizacional (Gabor & Mahoney, 2013).

Del campo de la economía, Ronald Coase (1910-2013), en 1937, introdujo la teoría de los costes de transacción, basada en la idea de que las empresas y los mercados existen para minimizar los costes de realizar transacciones económicas. Coase argumentó que, si no existieran estos costes, toda transacción económica podría ser realizada en el mercado sin necesidad de una organización. La existencia de las empresas se justifica por su capacidad para reducir los costes de transacción mediante la internalización de las operaciones. Esta teoría tuvo una gran influencia en el análisis económico de las organizaciones y ofreció una explicación sobre por qué existen las empresas y cómo se organizan internamente (Coase, 1937). La teoría de los costes de transacción complementa el enfoque

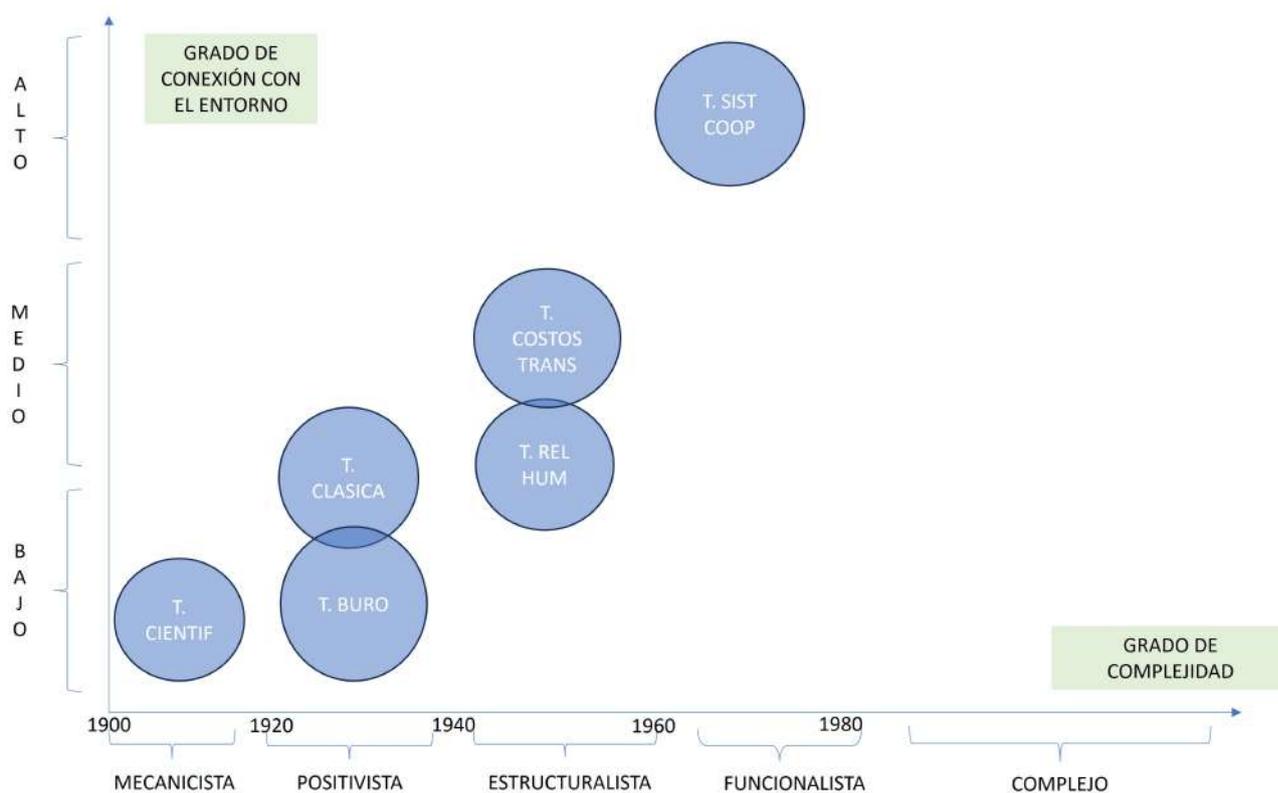


Figura 2.1: Principales enfoques teóricos clásicos ordenados en cuanto a su relación con el entorno y su grado de complejidad.

mecanicista y racional de la época clásica al proporcionar un marco para entender la estructura y el funcionamiento de las organizaciones desde una perspectiva económica.

La Figura 2.1 recoge los enfoques teóricos más relevantes de la etapa de la industrialización clásica ordenados en cuanto a su grado de conexión con el entorno y su grado de complejidad. En ella, los diferentes enfoques teóricos clásicos se refieren de la siguiente forma: Teoría Científica de la Organización (T. CIENTIF), Teoría Clásica de la Organización (T. CLASICA), Teoría Burocrática (T. BURO), Teoría de las Relaciones Humanas (T. REL HUM), Teoría de los Costes de Transacción (T. COSTOS TRANS), Teoría de los Sistemas Cooperativos (T. SIST COOP).

### 2.2.2. Etapa de la industrialización neoclásica

La etapa de la industrialización neoclásica, comprendida entre los años 60 y los 90, se caracteriza por una aceleración del entorno, el desarrollo de las telecomunicaciones y la aparición de las empresas multinacionales. Este periodo comienza a finales de la Segunda Guerra Mundial, cuando los cambios empiezan a suceder con mayor rapidez y de manera más intensa e impredecible. El impulso de la

guerra propició el crecimiento acelerado de la economía de Estados Unidos, sumado a la recuperación económica de Europa y Japón, lo que se tradujo en un rápido crecimiento de la producción y la aparición de las empresas multinacionales (Chiavenato, 2019).

Durante ese periodo, las organizaciones, que seguían modelos burocráticos y se dotaban de estructuras piramidales, se mostraron excesivamente lentas para dar respuesta a las demandas de un entorno cambiante. En ese contexto, surge la estructura organizacional de tipo matricial, adoptada por grandes compañías que se estructuran en divisiones según el producto o servicio. Este nuevo enfoque organizativo permitía una mayor flexibilidad y rapidez en la toma de decisiones, adaptándose mejor a un entorno en cambio permanente (Burns & Wholey, 1993).

El pensamiento y las influencias de esta época muestran un cambio de paradigma, sustituyendo el pensamiento reduccionista, mecanicista y determinista de la época anterior por una visión sistémica y holística. En el contexto de los sistemas organizativos, se hizo relevante la importancia del todo por encima de sus partes constitutivas, por su capacidad de desarrollar cualidades que no se encuentran en los elementos aislados (Becht, 1974; Bertalanffy, 1976; Mulej, 2007).

Del ámbito de la Biología, la TGS desarrollada por Ludwig von Bertalanffy (1901-1972) (Bertalanffy, 1976), constituyó una alternativa al pensamiento mecanicista y reduccionista. Esta teoría supuso la llegada del enfoque sistémico a la teoría general de la administración, momento a partir del cual cobraron fuerza otras aproximaciones más integrales y orgánicas. La TGS, de carácter científico, holístico y transdisciplinar, unifica y desarrolla principios de diversas ciencias involucradas, como la cibernética, la dinámica de sistemas y la teoría de la información (Bertalanffy, 1976; Skyttner, 2001).

La TGS se asienta sobre tres premisas básicas: los sistemas están constituidos por subsistemas y, a la vez, son parte de un sistema más grande o supra sistema; los sistemas son abiertos; y las funciones del sistema dependen de su estructura.

La teoría de sistemas abiertos (Ludwig Von Bertalanffy 1950), como consecuencia directa de la formulación de la TGS, sostiene que cada sistema existe dentro de un entorno (o subsistema mayor) con el que intercambia energía o información.

Del ámbito de la antropología, el estructuralismo, que alcanza su madurez en la década de los 50, permea en la teoría organizativa de la mano de autores como Thompson y Blau. El estructuralismo supone un desdoblamiento de la teoría burocrática y una aproximación a la teoría de las relaciones humanas buscando fusionar la teoría clásica y la teoría de las relaciones humanas bajo el influjo de Max Weber. El estructuralismo visualiza la organización como una unidad social grande y compleja

que comprende grupos sociales que interactúan entre sí y comparten los objetivos de la organización (Chiavenato, 2019; Di Tomaso, 1993).

Del ámbito de la ingeniería y la sociología, y bajo la influencia de la TGS y la concepción holística de la Gestalt, el enfoque sociotécnico, desarrollado por Emery y Trist en 1960, concibe la organización como un sistema abierto, comprendido por el subsistema técnico y un subsistema social, los cuales interactúan con el ambiente.

De los ámbitos de la sociología y la psicología, y bajo el paradigma conductista (que pone atención a la conducta observable del individuo independientemente de sus procesos mentales), la teoría del comportamiento, influenciada por Kurt Lewin y Chester Barnard, Elton Mayo y Douglas McGregor, destacó el carácter dinámico de las organizaciones que evolucionan naturalmente por la integración de factores informales del comportamiento humano como los estados de ánimo, la intuición y la motivación.

Bajo el mismo paradigma conductista, el desarrollo organizacional enfatiza los conceptos de cambio y capacidad de adaptación de la organización a los cambios en el ambiente. Este enfoque, promovido por autores como Lewin y McGregor ve la organización como un sistema abierto y flexible, promoviendo el cambio planeado (Chiavenato, 2019; Rivas Tovar, 2009).

Herbert A. Simon (1916-2001), bajo el paradigma cognitivista (opuesto al conductismo), considera los procesos internos de las personas en los procesos de toma de decisiones, que están influenciados por procesos mentales subyacentes en contextos complejos en los que la información y el tiempo para tomar la decisión son limitados (Estrada Gallego, 2007).

De las ciencias administrativas y la sociología organizativa, la teoría de la contingencia, nacida a finales de los años 50, representada mediante autores como Burns, Slater, Woodward y Child, sostiene que la estructura organizacional más eficaz depende de la relación con el ambiente externo y la tecnología adoptada por la organización. Esta teoría responde a los cambios del entorno, sugiriendo que no existe una estructura fija y que la eficacia organizacional está condicionada por factores contingentes (Chiavenato, 2019).

Del ámbito de la sociología organizativa y la ecología biológica, la teoría ecológica de las poblaciones, bajo la influencia darwiniana del principio de la selección natural, estudia los procesos de selección que afectan a las organizaciones en relación con su entorno. Hannan y Freeman, como exponentes clave, propusieron que la muerte o desaparición de organizaciones son procesos de selec-

ción natural condicionado por el entorno (Baum & Shipilov, 2006; Hannan & Freeman, 1984; Singh & Lumsden, 1990).

Procedente de la sociología organizativa, y con influencias de la política y economía, el institucionalismo destaca el papel de las instituciones y su influencia en el comportamiento organizativo (Caballero & Arias, 2013; de la Rosa Alburquerque, 2019; Fernández Ruvalcaba & Buendía Espinosa, 2014; Vargas Hernández, 2008).

El nuevo institucionalismo, surgido bajo la influencia de Herbert Simon y Max Weber, rompe con el determinismo y funcionalismo, adoptando una perspectiva cognitivista y reconociendo la influencia de las reglas institucionales en las estructuras organizativas. Esta visión tiene dos vertientes: el nuevo institucionalismo económico, representado por Oliver E. Williamson, y el nuevo institucionalismo social, con Meyer, Rowan, Di Maggio y Powell como principales exponentes (de la Rosa Alburquerque, 2019; Powell & Maggio, 1999).

El nuevo institucionalismo social sostiene que las estructuras organizativas están influenciadas por las reglas institucionales del entorno social, reflejando las estructuras sociales en las que están inmersas (isomorfismo) (Caballero & Arias, 2013; Powell & Maggio, 1999; Vargas Hernández, 2008).

El nuevo institucionalismo económico, basado en la teoría de la agencia y teoría de los costes de transacciones, se originó en las investigaciones de Ronald Coase y se desarrolló en la década de los 70-80 por Williamson. Esta teoría desplaza el foco de la teoría económica de la producción a la esfera del intercambio de bienes económicos, considerando la transacción como la unidad básica de análisis (Correa López, 2010; Hoskisson et al., 2010; Rivas Tovar, 2009; Salgado, 2003).

De las ciencias empresariales y administrativas, la teoría de los recursos y capacidades, desarrollada por Barney en 1991, se orienta a la gestión estratégica de los recursos internos de la organización para obtener una ventaja competitiva. Este enfoque endógeno se consolidó en las décadas de los 80 y 90, permitiendo a las organizaciones analizar y explotar sus recursos y capacidades para lograr una ventaja competitiva sostenible (Huerta Riveros et al., 2004; Ibarra Mirón & Suárez Hernández, 2002; Rivas Tovar, 2009; Wernerfelt, 2007).

Del ámbito de la gestión, la teoría de la información, desarrollada por Cyert y March, en 1992, se centra en la toma de decisiones dentro de las organizaciones, considerando la limitación de la información y la racionalidad. Esta teoría sugiere que las decisiones organizacionales no siempre son racionales, sino que están condicionadas por la información disponible y los procesos internos (Cyert & March, 1992).

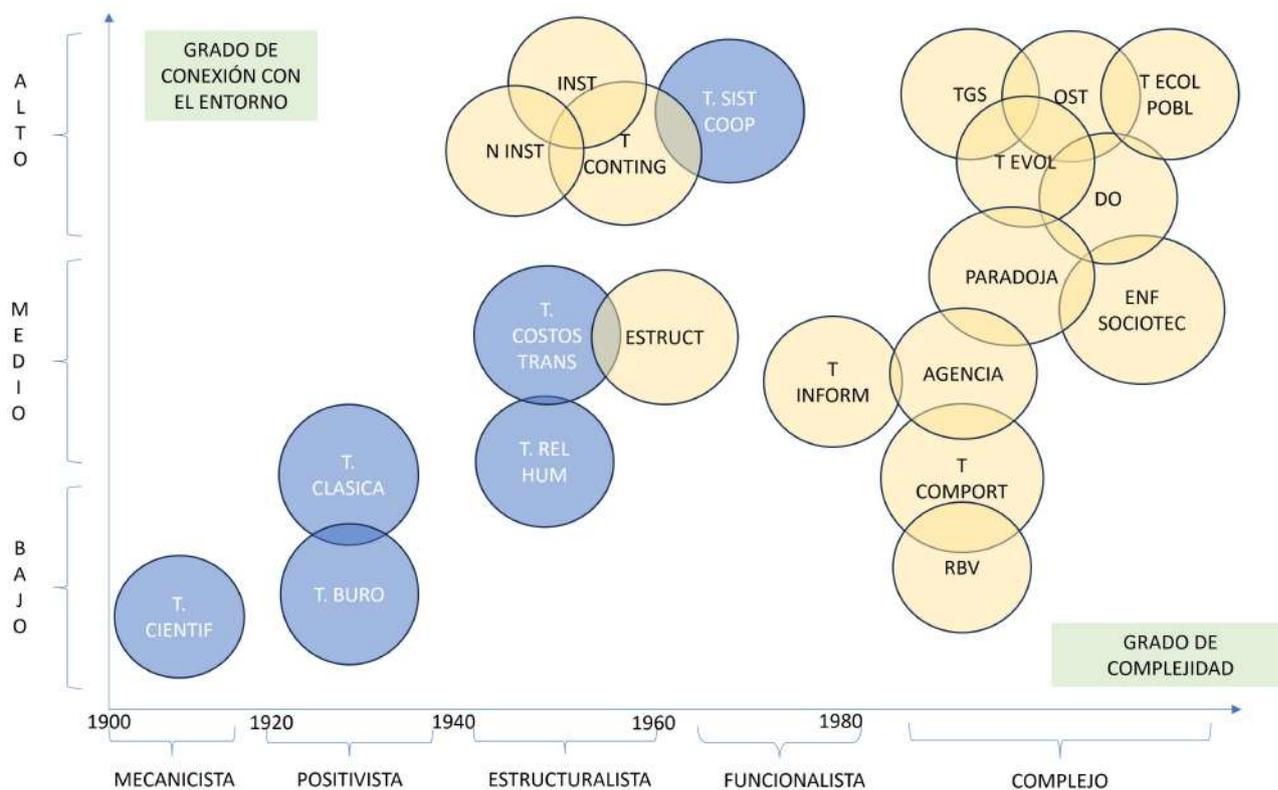


Figura 2.2: Principales enfoques teóricos clásicos y neoclásicos ordenados en cuanto a su relación con el entorno y su grado de complejidad.

De múltiples influencias como la gestión empresarial, la economía y la biología evolutiva, la teoría evolutiva de las organizaciones de Nelson y Winter, desarrollada en 2004, examina cómo las organizaciones evolucionan y se adaptan a su entorno a través de rutinas y procesos de aprendizaje, enfatizando su naturaleza dinámica y cambiante (Nelson & Winter, 2004).

Procedente del ámbito de la sociología y la psicología social, la teoría de la paradoja ofrece una perspectiva para comprender y gestionar tensiones contradictorias que son simultáneamente interdependientes y persistentes. La idea central es que, en lugar de resolver estas tensiones, los actores organizacionales deben aceptarlas, comprometerse con ellas y navegar en ellas (Jay, 2013). La Figura 2.2 recoge los enfoques teóricos más relevantes de la etapa neoclásica ordenados en cuanto a su grado de conexión con el entorno y su grado de complejidad. A las teorías detalladas en la etapa clásica se le añaden las siguientes correspondientes a la etapa neoclásica: Teoría Institucional (INST), Nuevo Institucionalismo (N INST), Estructuralismo (ESTRUCT), Teoría de la Contingencia (T CONTING), Teoría de la Información (T INFORM), Teoría General de Sistemas (TGS), Teoría Evolutiva (T EVOL), Teoría de la Paradoja (PARADOJA), Teoría de la Agencia (AGENCIA), Teoría del Com-

portamiento Humano (T COMPORT), Teoría de los Recursos (RBV), Teoría de los Sistemas Abiertos (OST), Desarrollo Organizativo (DO), Teoría de los Sistemas Socio-Técnicos (ENF SOCIOTEC), Teoría Ecológica de las Poblaciones (T ECOL POBL).

### **2.2.3. Etapa de la información**

La etapa de la información, iniciada en los años 90, se caracteriza por la globalización y la complejidad, conformando un entorno en constante cambio impulsado por el desarrollo tecnológico y las transacciones globales. Este fenómeno transforma las estructuras organizacionales y los paradigmas científicos, promoviendo enfoques holísticos y adaptativos para gestionar la complejidad y la interdependencia entre distintos ámbitos.

Como respuesta a un entorno cambiante, las estructuras organizativas también se transforman, adoptando modelos más eficaces, flexibles y adaptables. Las organizaciones evolucionan de un paradigma jerárquico y centralizado a uno más horizontal y descentralizado, con liderazgo compartido. Estas nuevas estructuras se adaptan mejor a las necesidades del entorno y a las demandas personales en un contexto socioeconómico marcado por la transición hacia una sociedad postindustrial (tecnológicamente avanzada, con una economía basada en los servicios y el conocimiento) y post materialista (orientada hacia la autorrealización, la calidad de vida y el respeto a los derechos humanos) (Chiavenato, 2019; del Águila Obra & Meléndez Padilla, 2003; Mintzberg, 1989; Rivas Tovar, 2002).

Los descubrimientos en diversos ámbitos científicos transformaron el paradigma reduccionista hacia una visión más holista y compleja. En física, la teoría cuántica de Planck, la teoría de la relatividad de Einstein y el principio de incertidumbre de Heisenberg rompieron con el paradigma newtoniano, demostrando la no generalidad de sus leyes. En la previsión meteorológica, Edward Lorenz descubrió en la década de 1960 que cambios infinitesimales en las condiciones iniciales pueden generar alteraciones significativas con el tiempo, desafiando el determinismo clásico y dando origen a la teoría del caos.

La teoría de los sistemas alejados del equilibrio, aplicada a la teoría de la organización por Prigogine en 1997, concluye que el equilibrio es prácticamente imposible de alcanzar debido al número de variables internas y externas que influyen en la evolución de una organización. Las organizaciones que mejor se adapten a estos cambios del entorno y se reorganicen consecuentemente serán las que logren perdurar en el tiempo.

El enfoque de los sistemas complejos adaptativos (SCA), surgido como campo de estudio de las ciencias de la complejidad desarrolladas por el *Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity* en 1984, sostiene que las organizaciones, como sistemas no lineales alejados del equilibrio, son altamente sensibles a alteraciones o cambios, y sus patrones de comportamiento emergen sin intencionalidad (autoorganización). Según esta teoría, la mejor forma de organización es la que permite ajustes continuos de sus elementos entre sí y con su entorno (Bohórquez Arévalo, 2013; Holland, 2006; Kauffman, 1995; Ruiz Ballesteros & Solana Ruiz, 2013).

La teoría de la autopoiesis, introducida por Varela et al. en 1974, se originó en el campo de la biología. Autopoiesis significa autoproducción y es la cualidad de un sistema capaz de reproducirse y mantenerse por sí mismo. En este marco, las organizaciones, como los seres vivos, poseen una red de procesos o mecanismos propios que les permiten crear y destruir elementos de sí mismos como respuesta a las perturbaciones del entorno, llevándose a cabo este proceso de forma continua e indefinida.

Las organizaciones de aprendizaje, conceptualizadas inicialmente por Chris Argyris y Donald Schön en las décadas de 1970 y 1980, y posteriormente popularizadas por Peter Senge en los años 90, se centran en el conocimiento como ventaja competitiva y promueven un proceso organizacional continuo de creatividad e innovación (Argyris & Schön, 1997; Senge, 2011).

Las organizaciones TEAL, como propone Frederic Laloux, evolucionan hacia un modelo de autogestión, plenitud y propósito último, basando su estrategia en la observación y adaptación constante al entorno (Coughlan, 2016; Laloux & Vidal, 2017).

La teoría de las capacidades dinámicas permite a las organizaciones reconfigurar sus recursos y habilidades para adaptarse rápidamente a los cambios del entorno (Luhmann, 1989; Prigogine & Stengers, 1988; Senge, 2011; Sterman, 2009; Teece, 2007; Teece et al., 1997; Weick, 1995).

Los sistemas también se benefician de esta perspectiva, ya que reconocen la importancia de la adaptabilidad y la resiliencia en un entorno global cada vez más complejo (Charmaz, 2014; Gunderson & Holling, 2002; Miles & Huberman, 1994; Seuring & Müller, 2008; Wu & Pagell, 2011; Yin, 2013). La Figura 2.3 recoge los enfoques teóricos más relevantes de la etapa de la información ordenados en cuanto a su grado de conexión con el entorno y su grado de complejidad. A los enfoques detallados en las etapas clásica (Figura 2.1) y neoclásica (Figura 2.2), se le añaden los siguientes enfoques de la etapa de la información ordenados en cuanto a su relación con el entorno y su grado de complejidad: Teoría del Caos (CAOS), Teoría de los Sistemas Complejos Adaptativos (SCA), Teoría de la

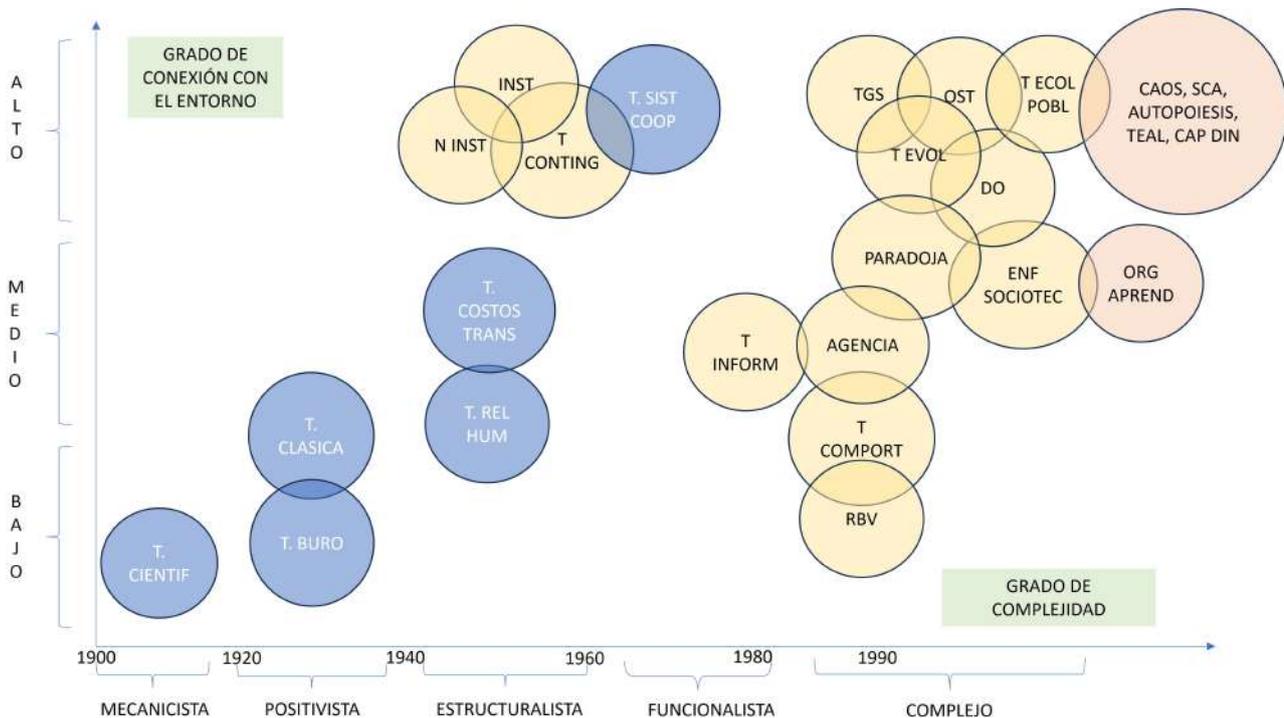


Figura 2.3: Principales enfoques teóricos correspondientes a las tres etapas de desarrollo de la teoría organizativa.

Autopoiesis (AUTOPOIESIS), Teoría de las Capacidades Dinámicas (CAP DIN), Organizaciones de Aprendizaje (ORG APREND).

### 2.3. Relación de los enfoques teóricos con el entorno y la sostenibilidad

La teoría organizativa ha experimentado una evolución significativa a lo largo del tiempo, desde enfoques mecanicistas centrados exclusivamente en la eficiencia interna hasta teorías más modernas que consideran la interdependencia con el entorno y la sostenibilidad como factores cruciales para la supervivencia organizacional. Dado el creciente desafío de equilibrar el desarrollo económico con la sostenibilidad ambiental y social, es imprescindible analizar cómo las distintas teorías han abordado esta relación.

El análisis de la relación entre las teorías organizativas y el entorno permitirá identificar los modelos que mejor integran la sostenibilidad, proporcionando un marco para comprender cómo las organizaciones pueden adaptar sus estructuras y estrategias para enfrentar los retos actuales.

Para este análisis, se ha utilizado una escala del 1 al 3, donde:

- 1: Indica un bajo nivel de conexión con el entorno o una baja preocupación por la sostenibilidad. Las teorías que reciben esta calificación tienden a centrarse en la eficiencia interna y en procesos estructurales, sin tener en cuenta las interacciones con factores externos o las cuestiones sociales, económicas y ambientales.
- 3: Representa un alto grado de integración con el entorno o una profunda preocupación por la sostenibilidad. Estas teorías consideran la interdependencia con factores externos y muestran una preocupación explícita por las tres dimensiones de la sostenibilidad: social, económica y medioambiental.

A cada teoría organizativa se le ha asignado una puntuación basada en sus características fundamentales. Por ejemplo, teorías clásicas como la Teoría Científica de la Administración y la Teoría Burocrática se calificaron con un 1 en ambos aspectos, ya que se enfocan principalmente en la eficiencia interna y la estructura sin considerar las interacciones con el entorno o la sostenibilidad.

Por otro lado, teorías más recientes, como la Teoría de SCA y la de SES, obtienen un 3 tanto en conexión con el entorno como en sostenibilidad, ya que su enfoque está orientado hacia la adaptabilidad, la interdependencia y una preocupación activa por los tres pilares de la sostenibilidad.

Este análisis muestra la evolución de las teorías organizativas, desde un enfoque más introspectivo y estructurado hacia uno más sistémico, adaptativo, y sensibilizado con la sostenibilidad.

- Teoría científica de la administración.
  - Conexión con el entorno. 1 - Se enfoca en la eficiencia interna.
  - Sostenibilidad. 1 - no aborda el aspecto.
- Teoría clásica de la administración:
  - Conexión con el entorno: 1 - Se enfoca en la eficiencia y la estructura interna.
  - Sostenibilidad: 1 - No aborda la sostenibilidad.
- Teoría burocrática:
  - Conexión con el entorno: 1 - Se enfoca en la estructura interna y las reglas.
  - Sostenibilidad: 1 - No aborda la sostenibilidad.

- Teoría de las relaciones humanas:
  - Conexión con el entorno: 2 - Reconoce la importancia de los factores humanos y las relaciones.
  - Sostenibilidad: 2 - Se preocupa por el bienestar de los empleados.
- Teoría de los costes de transacción:
  - Conexión con el entorno: 2 - Considera las transacciones y los costes externos.
  - Sostenibilidad: 1 - Enfocada en la eficiencia económica.
- Teoría de los sistemas cooperativos:
  - Conexión con el entorno: 2 - Considera la cooperación y las relaciones.
  - Sostenibilidad: 2 - Reconoce la importancia del equilibrio entre lo social y lo económico.
- Institucionalismo:
  - Conexión con el entorno: 2 - Se enfoca en las instituciones y sus influencias.
  - Sostenibilidad: 1 - Principalmente en la estructura y reglas.
- Teoría general de sistemas:
  - Conexión con el entorno: 3 - Se enfoca en la interdependencia y la totalidad del sistema.
  - Sostenibilidad: 2 - Reconoce la importancia de la adaptabilidad y la interdependencia.
- Teoría de sistemas abiertos:
  - Conexión con el entorno: 3 - Se enfoca en el intercambio con el entorno.
  - Sostenibilidad: 2 - Similar a TGS, pero más abierto a influencias externas.
- Teoría del comportamiento:
  - Conexión con el entorno: 2 - Considera los factores humanos y el entorno.
  - Sostenibilidad: 2 - Se enfoca en el bienestar de los empleados.
- Desarrollo organizacional:

- Conexión con el entorno: 2 - Se enfoca en la adaptación y el cambio.
- Sostenibilidad: 2 - Enfocado en el cambio organizacional y el bienestar.
- Teoría de la contingencia:
  - Conexión con el entorno: 2 - Sostiene que no hay una estructura fija, depende del entorno.
  - Sostenibilidad: 1 - Principalmente enfocado en la eficiencia.
- Teoría ecológica de las poblaciones:
  - Conexión con el entorno: 3 - Considera la selección natural y el entorno.
  - Sostenibilidad: 1 - Enfocada en la adaptación y supervivencia.
- Visión Basada en Recursos:
  - Conexión con el entorno: 3 - Enfocada en la utilización de recursos internos.
  - Sostenibilidad: 2 - Enfocada en la ventaja competitiva.
- Nuevo institucionalismo:
  - Conexión con el entorno: 2 - Similar al institucionalismo clásico.
  - Sostenibilidad: 2 - Reconoce las influencias externas y las instituciones.
- Teoría de la evolución organizativa:
  - Conexión con el entorno: 3 - Similar a la teoría biológica de la evolución.
  - Sostenibilidad: 2 - Enfocada en la adaptación y evolución.
- Autopoiesis:
  - Conexión con el entorno: 3 - Se enfoca en la auto sustentación y adaptación.
  - Sostenibilidad: 3 - Similar a los sistemas biológicos.
- Sistemas complejos adaptativos:
  - Conexión con el entorno: 3 - Altamente adaptativos y sensibles a los cambios.
  - Sostenibilidad: 3 - Enfocados en la resiliencia y adaptabilidad.

- Teoría de la información:
  - Conexión con el entorno: 3 - Enfocada en la información y la adaptación.
  - Sostenibilidad: 2 - Enfocada en la eficiencia informacional.
- Teoría de la agencia:
  - Conexión con el entorno: 3 - Considera las relaciones entre agentes y principales.
  - Sostenibilidad: 2 - Principalmente económica.
- Teoría de la paradoja:
  - Conexión con el entorno: 3 - Enfocada en la gestión de tensiones y contradicciones.
  - Sostenibilidad: 3 - Considera múltiples dimensiones.
- Teoría de las capacidades dinámicas:
  - Conexión con el entorno: 3 - Enfocada en la adaptabilidad y cambio rápido.
  - Sostenibilidad: 2 - Enfocada en la competitividad y eficiencia.
- Sistemas socio ecológicos:
  - Conexión con el entorno: 3 - Considera la interdependencia entre sistemas sociales y ecológicos.
  - Sostenibilidad: 3 - Altamente preocupada por la sostenibilidad.

La Figura 2.4 muestra como las teorías organizativas en el transcurso del tiempo reflejan un mayor carácter sistémico y complejo, además de mostrar una mayor preocupación por las cuestiones relacionadas con alguno de los tres pilares de la sostenibilidad.

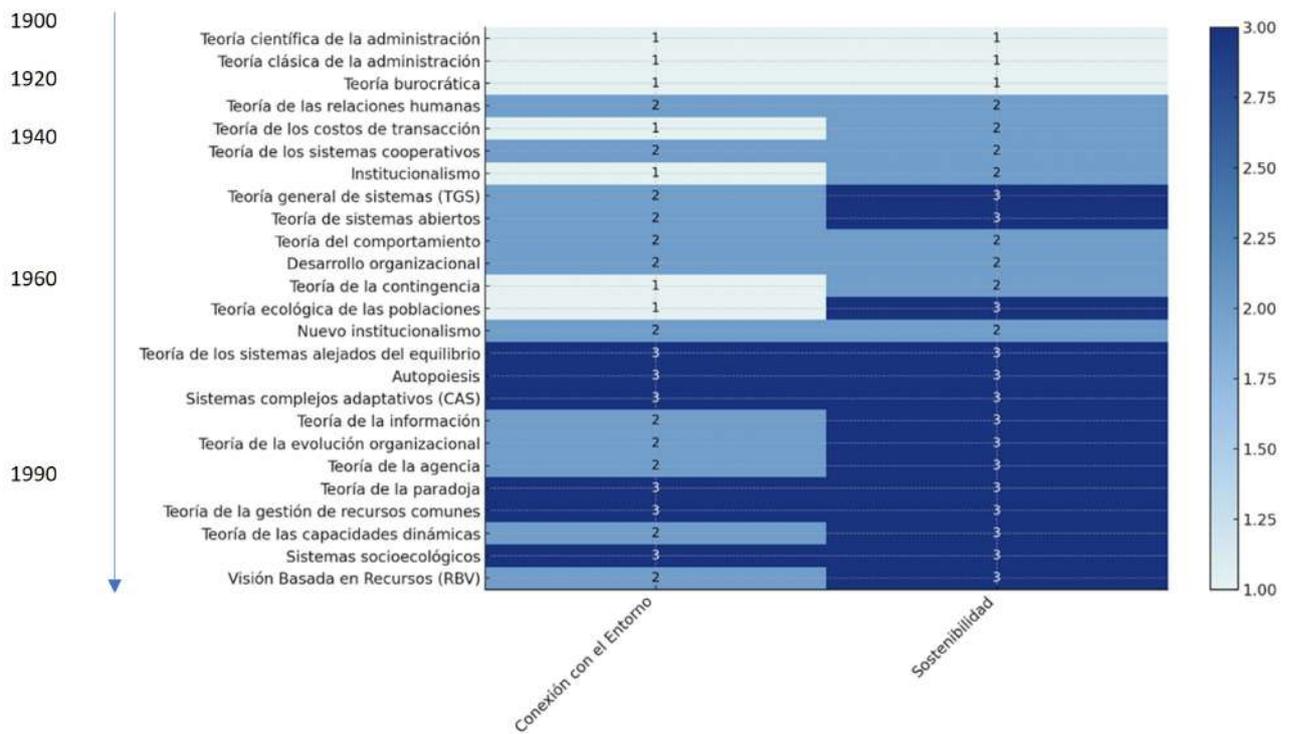


Figura 2.4: Clasificación de las teorías organizativas en cuanto a su conexión con elementos del entorno y su preocupación por la sostenibilidad.



### **3.1. Hipótesis de partida**

Los factores socioeconómicos, ambientales y organizativos de la industria forman un sistema interdependiente a través del cual se influyen mutuamente y cuya sostenibilidad y equilibrio se favorecen mediante un enfoque transdisciplinar e integrador que permita cuantificar estas relaciones y asegurar su funcionalidad frente a perturbaciones externas.

### **3.2. Objetivo general**

Determinar la existencia de interdependencia y equilibrio entre factores organizativos industriales, el entorno socioeconómico y el entorno ambiental, evidenciando la necesidad de abordar estas áreas de manera conjunta, sistémica y adaptable frente a perturbaciones, a fin de implementar políticas eficaces para el DS.

### 3.3. Objetivos específicos

- Cuantificar la interdependencia entre los aspectos organizativos industriales, el entorno socioeconómico y el entorno natural, evidenciando su comportamiento conjunto y su capacidad de recuperación para adaptarse a perturbaciones externas.
- Identificar las influencias significativas en el corto y largo plazo entre los factores industriales, socioeconómicos y ambientales, destacando los elementos clave para implementar actuaciones que fomenten la sostenibilidad y la resiliencia del sistema.
- Evaluar el impacto de perturbaciones externas, como es el caso de la crisis sanitaria originada por la COVID-19, en la estructura, estabilidad y resiliencia de los sistemas industriales y su entorno socioeconómico y ambiental.
- Aplicar y validar herramientas cuantitativas avanzadas para asegurar la consistencia y robustez de las relaciones identificadas entre los factores industriales, socioeconómicos y naturales, estableciendo una base sólida para la toma de decisiones en sostenibilidad.

## **ANÁLISIS DE LA TEORÍA ORGANIZATIVA EN LA ACTUALIDAD**

### **4.1. Introducción**

La creciente aceleración de los sistemas socioeconómicos y productivos han centrado la atención en el consumo de recursos naturales no renovables propiciando la creciente contaminación del medio natural, que pone en riesgo el medio ambiente y la disponibilidad de recursos para las generaciones futuras (Brundtland, 1987). Esta situación ha derivado en una creciente preocupación por la sostenibilidad en distintos niveles, lo que ha dado lugar a diferentes enfoques teóricos que permiten analizar la relación entre las organizaciones y su entorno.

El contexto actual, caracterizado por su volatilidad, incertidumbre, complejidad y ambigüedad (Bennett & Lemoine, 2014), favorece una mayor conexión y retroalimentación entre las organizaciones y el entorno, siendo ambos, cada más sensibles a los cambios y propiciando comportamientos difícilmente predecibles fruto de la complejidad. En este sentido, el concepto de sostenibilidad ha ido evolucionando dando lugar a diferentes interpretaciones que se han estructurado en torno a tres niveles en función de la conservación del capital natural frente al capital tecnológico o manufacturado, lo que ha dado lugar a la distinción entre sostenibilidad débil, fuerte y superfuerte (Daly, 1977; Martinez-Alier, 2002; Pearce & Atkinson, 1993).

### 4.1.1. Niveles de sostenibilidad

La sostenibilidad débil parte de la premisa de que el capital natural puede ser sustituido por el capital manufacturado o tecnológico sin afectar el bienestar de las generaciones futuras. Bajo este enfoque, el desarrollo económico y el progreso tecnológico pueden compensar la degradación ambiental a través de innovaciones que mejoren la eficiencia en el uso de recursos.

Este nivel de sostenibilidad ha sido dominante en las políticas económicas tradicionales y en el enfoque del DS promovido por organismos como el Banco Mundial y la OCDE. En el ámbito organizacional, la sostenibilidad débil se manifiesta en estrategias como la ecoeficiencia (Weizsacker, 2013) que busca reducir el impacto ambiental sin modificar los fundamentos del modelo económico actual.

La sostenibilidad fuerte, en cambio, argumenta que el capital natural no es completamente sustituible, ya que ciertos recursos y servicios ecosistémicos son insustituibles para la vida y el bienestar humano. Este enfoque enfatiza la necesidad de establecer límites ecológicos estrictos para evitar la degradación ambiental irreversible y asegurar la resiliencia de los ecosistemas.

Desde el punto de vista organizacional, este nivel de sostenibilidad requiere una transformación en los modelos de negocio, promoviendo prácticas como el diseño regenerativo (Lyle, 1994) y los sistemas productivos circulares (Geissdoerfer et al., 2017). Las empresas que adoptan la sostenibilidad fuerte buscan no solo minimizar su impacto ambiental, sino también restaurar los ecosistemas y contribuir a la regeneración del capital natural.

La sostenibilidad superfuerte lleva este enfoque un paso más allá, al argumentar que el capital natural debe mantenerse en su estado original y que no se debe permitir ninguna compensación con otras formas de capital. Este nivel de sostenibilidad prioriza la preservación absoluta de los ecosistemas, independientemente de su valor económico para la humanidad.

En términos organizacionales, este nivel de sostenibilidad plantea un desafío estructural, ya que implica una reconfiguración completa del paradigma económico actual. Ejemplos de iniciativas alineadas con la sostenibilidad superfuerte incluyen proyectos de restauración de los ecosistemas degradados, estrategias de no-intervención ecológica, y modelos económicos alternativos a los actuales que cuestionan el actual modelo de producción y consumo y se alinean con una definición transversal de desarrollo y bienestar no directamente vinculada con el crecimiento económico (Jackson, 2009).

### 4.1.2. Ecología Industrial y Economía Circular

La Ecología Industrial y la Economía Circular surgen como alternativas para transformar los sistemas productivos y organizacionales en respuesta a la crisis ambiental.

La Ecología Industrial (Frosch, 1992) propone un enfoque sistémico donde los procesos industriales funcionan de manera análoga a los ecosistemas naturales, minimizando los residuos y cerrando los ciclos de materiales y energía. Bajo una perspectiva de sostenibilidad fuerte, la Ecología Industrial fomenta la simbiosis industrial, donde los subproductos de una empresa pueden convertirse en insumos para otra, reduciendo el impacto ambiental global (Chertow, 2000).

La Economía Circular (Stahel, 2016) busca eliminar el concepto de residuo mediante el diseño de productos y sistemas regenerativos. Su implementación varía dependiendo del nivel de sostenibilidad adoptado:

- Desde una perspectiva de sostenibilidad débil, se enfoca en la eficiencia en el uso de recursos y la extensión del ciclo de vida de los productos.
- En el marco de la sostenibilidad fuerte, impulsa la regeneración del capital natural mediante estrategias como la restauración ecológica.
- Bajo la sostenibilidad superfuerte, la Economía Circular podría ser considerada insuficiente, ya que sigue dependiendo de la actividad humana y no prioriza la conservación absoluta de los ecosistemas.

Por tanto, abordar el desafío de la conservación y restauración de los ecosistemas naturales en el actual marco complejo requiere un replanteamiento y transformación de los sistemas socioeconómicos actuales, de los hábitos de consumo y de la reconfiguración de los conceptos de bienestar y desarrollo.

### 4.1.3. Transformación de los sistemas socioeconómicos. Decrecimiento

En este contexto, el decrecimiento surge como una alternativa que cuestiona la dependencia estructural del crecimiento económico infinito y propone una reorganización socioeconómica basada en la reducción planificada del consumo y la producción, priorizando la equidad social y el bienestar dentro de los límites ecológicos del planeta (Latouche, 2009). A diferencia de la Economía Circular y la Ecología Industrial, que buscan mejorar la eficiencia dentro del sistema económico existente,

el decrecimiento propone una transformación más profunda, reduciendo la demanda de recursos en lugar de optimizar su uso. Este enfoque promueve una reestructuración del modelo de desarrollo, impulsando formas de organización descentralizadas, economías relocalizadas y modelos basados en la suficiencia y el reparto del trabajo. En el ámbito organizacional, esto implica la transición hacia modelos empresariales cooperativos, estrategias de producción a pequeña escala y la priorización del bienestar humano sobre el beneficio económico, alineándose con los principios de sostenibilidad superfuerte y desafiando la idea de que el progreso está ligado al crecimiento económico (Kallis, 2017).

Estos procesos de transición de las organizaciones, a través de los cuales deben adaptarse y transformarse para dar respuesta a los retos de una nueva realidad marcada por el cambio climático, requieren disponer de un marco teórico adecuado que sustente la investigación de nuevas formas organizacionales que comprendan su papel en la sociedad y sus interacciones con el entorno como premisa fundamental.

A tenor de lo visto en el Capítulo 2, la teoría organizativa evidencia una creciente conexión de las organizaciones con el entorno a lo largo de la historia; pero ¿qué ocurre en la actualidad?, ¿cuáles son los enfoques teóricos organizativos más relevantes en el marco de la sostenibilidad en un entorno complejo?. Para responder a estas preguntas se ha elaborado un mapa actualizado de la teoría organizativa, elaborado en base a un análisis bibliométrico de la literatura científica.

## 4.2. Metodología

Para llevar a cabo este mapa actualizado de la teoría organizativa se recurrió a la base de datos Web of Science (WoS) y se empleó el software VOSviewer, que es un software gratuito diseñado para construir y visualizar mapas bibliométricos, desarrollado por Nees Jan van Eck y Ludo Waltman (Jan & Ludo, 2010). Esta herramienta es esencial para el análisis de la estructura y dinámica de la investigación científica mediante el uso de datos bibliográficos, permitiendo:

- Crear mapas de redes basados en datos de cocitación, coautoría y coocurrencia de palabras clave. VOSviewer facilita la visualización de conexiones y relaciones en el ámbito de la investigación científica.
- Visualizar de forma intuitiva y clara la estructura de la literatura científica, dada la codificación por colores y tamaños, capaces de representar distintas métricas y relaciones.

- Agrupar los resultados en grupos para facilitar la detección de tendencias emergentes y áreas de interés en campos específicos.
- Importar y personalizar datos mediante la importación de datos de fuentes como WoS, Scopus y PubMed, adaptando la visualización según las necesidades del investigador.

VOSviewer es una herramienta clave para analizar la literatura científica, identificar redes académicas, y evaluar el impacto de publicaciones e instituciones, proporcionando una perspectiva estructurada de la investigación en curso.

### 4.3. Resultados

Se introdujo y ejecutó la siguiente consulta en el motor de búsqueda de WoS:

*”organizati\* AND theory AND complex\* AND sustainab\*”*

El resultado de la búsqueda proporcionó 1335 documentos publicados entre los años 1990 y 2022. Estos resultados fueron filtrados por área de conocimiento seleccionando las siguientes áreas: *gestión, ciencias ambientales, negocios, estudios ambientales y tecnología de ciencia sostenible*. Además, se seleccionó el tipo de soporte documental *artículo*. Tras todo lo anterior, resultaron 197 artículos que se distribuyen temporalmente tal como muestra la Figura 4.1.

La evolución temporal del número de artículos publicados en relación con el tema de estudio, entre los años 1990 y 2022, evidencia el interés creciente de la teoría organizativa en el estudio de sistemas organizativos complejos en relación con la sostenibilidad.

El análisis bibliométrico se completó con la realización de un mapa de cocitación de referencias y con un mapa de coocurrencia de los términos más relevantes. Ambas técnicas bibliométricas tienen carácter retrospectivo y se emplean para extraer información acerca de la evolución de la investigación en un campo de interés concreto, para detectar estructuras colaborativas, así como líneas de estudio o temas de interés (Waltman et al., 2010).

El mapa de cocitación proporciona información relativa a la relación entre los documentos más citados permitiendo detectar corrientes teóricas (White & Griffith, 1981). El mapa de coocurrencia permite detectar aspectos o temas de interés objeto de estudio (Leydesdorff & Welbers, 2011).

El mapa de cocitación representa los artículos citados simultáneamente en un tercer artículo, permitiendo detectar la estructura del tema de estudio.

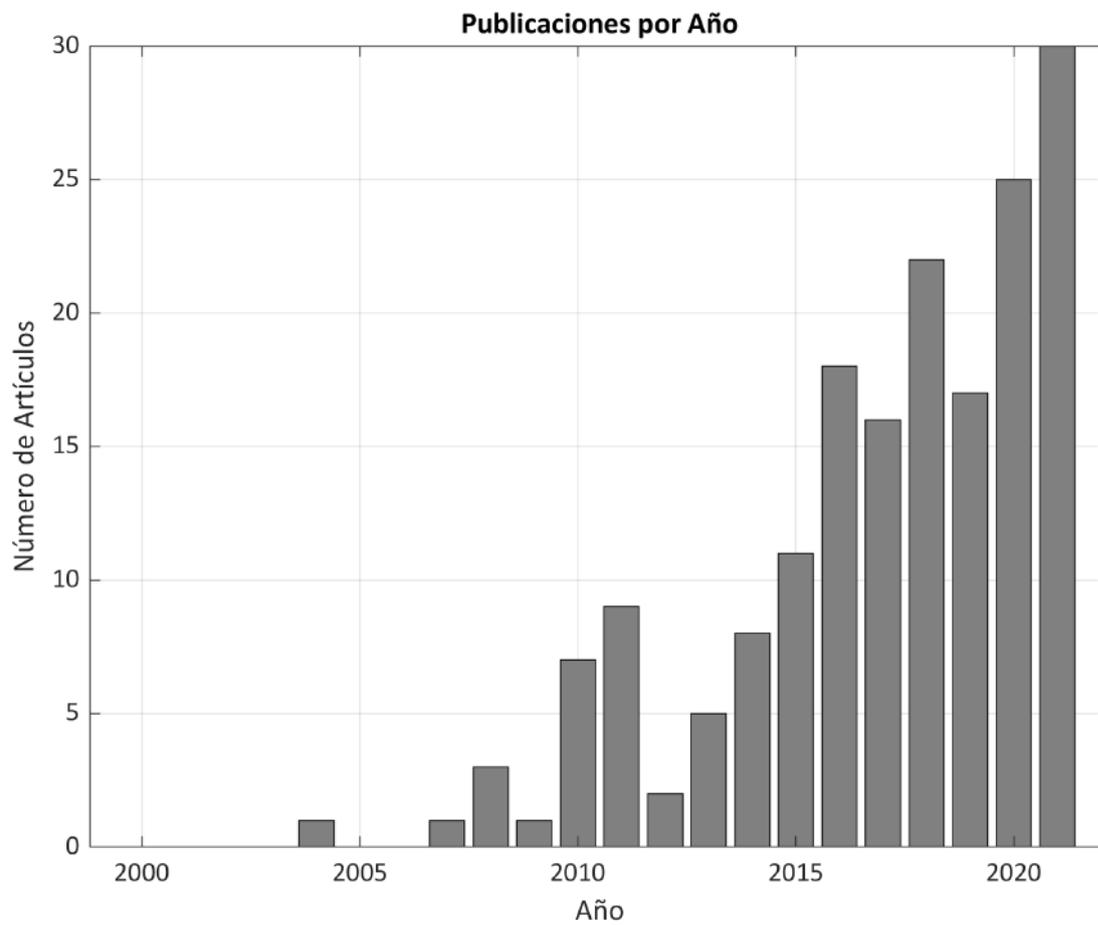


Figura 4.1: *Número de publicaciones anuales en el marco de la teoría organizativa en relación con el entorno complejo y de sostenibilidad.*

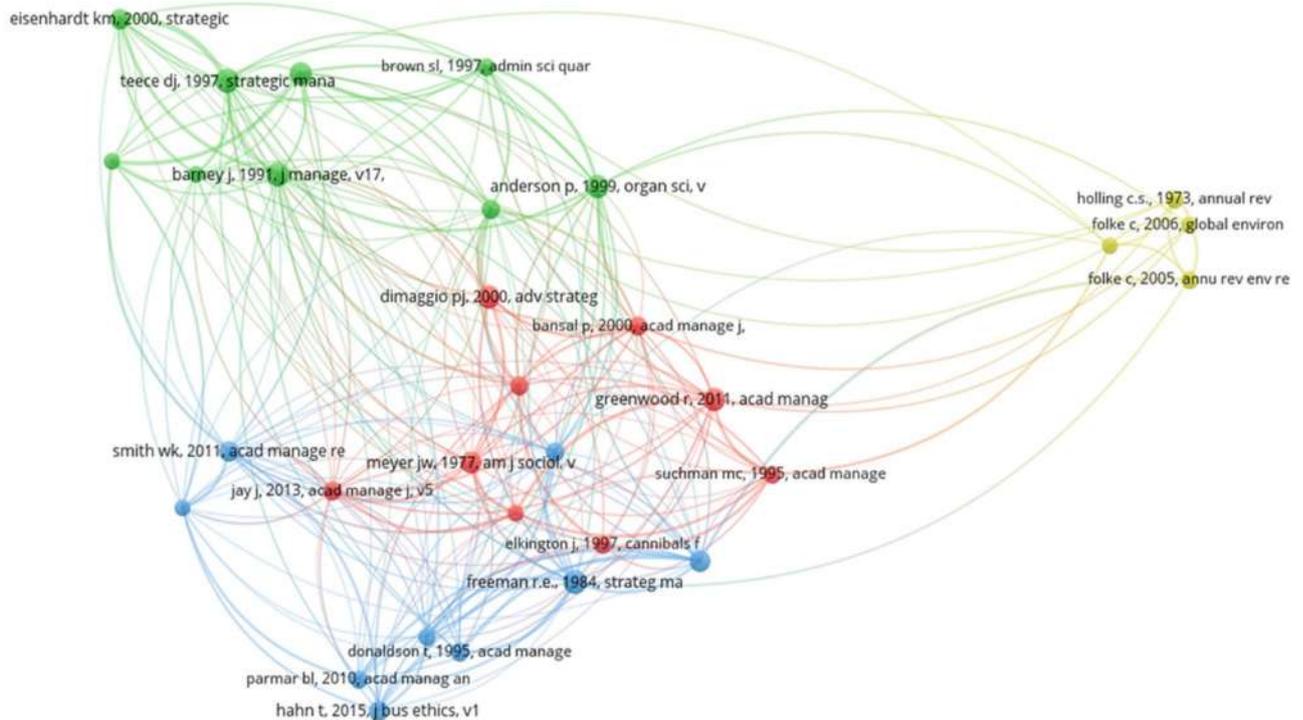


Figura 4.2: *Mapa de cocitación de referencias.*

En el mapa de cocitación del autor se obtienen 34 resultados, de los 14112 resultados disponibles, para un número mínimo de ocho citas de una referencia. De los 34 artículos, un resultado se repitió dos veces y dos no se relacionaron con el resto en la red de cocitación; finalmente, treinta resultados fueron considerados tal como se representa en la Figura 4.2.

La visualización en red de los treinta resultados evidencia cuatro grupos representados por los colores: rojo, verde, azul y amarillo. Cada color agrupa referencias que tratan conceptos similares, mientras que el tamaño del nodo representa la frecuencia con la cual cada referencia ha sido citada. Las líneas que los conectan indican la frecuencia con la cual dos referencias han sido citadas juntas, de modo que un mayor grosor representa una frecuencia de citación más alta (Jan & Ludo, 2010).

- El grupo verde, formado por las referencias: Anderson (2008), Barney (1991), Gibson y Birkinshaw (2004), Hart (1995), Eisenhardt y Matin (2000), March (1991), Brown y Eisenhardt (1997), Teece (2007), Teece, Pisano y Shuen (1997), se basa en la teoría de la complejidad, la visión basada en los recursos, las capacidades dinámicas, la ambidestreza organizativa y el aprendizaje organizativo.
- El grupo rojo, formado por las referencias: Bansal (2005), Bansal y Roth (2000), Besharov y Smith (2014), Elkington (1998), Greenwood (2011), Jay (2013), Meyer y Rowan (1977), Di

Maggio y Powell (1983), Suchman (1995), representa un enfoque teórico basado en la teoría institucional.

- El grupo azul comprende las referencias de: Donaldson y Preston (1995), Freeman (2010), Gladwin, Kennelly y Krause (1995), Hahn (2015), Margolis y Walsh (2003), Mitchell, Agle y Wood (1997), Parmar (2010), Poole y Van De Ven (1989), Smith y Lewis (2011), representa un enfoque teórico basado en la teoría de las partes interesadas y la teoría de la paradoja.
- El grupo amarillo, formado por las referencias: Folke (2006) y (2005) y Geels y Scholt (2007), representa un enfoque teórico basado en los SES.

El grupo azul destaca el papel de los grupos de interés y las relaciones que se establecen con la organización, que condicionan el desempeño organizativo y la toma de decisiones (Donaldson & Preston, 1995; Freeman, 2010; Mitchell et al., 1997; Parmar et al., 2010), siendo fuente de tensiones y paradojas a lo largo del tiempo (Hahn et al., 2015; Smith & Lewis, 2011). En este proceso de adaptación y equilibrio entre los diferentes intereses, la incorporación de factores de sostenibilidad es vital para la supervivencia de la organización (Gladwin et al., 1995; Margolis & Walsh, 2003).

El grupo verde hace referencia al proceso de adaptación organizativo, marcado por la complejidad del sistema organización-entorno (Anderson, 2008), en el que los procesos de exploración y explotación se llevan a cabo simultáneamente (Gibson & Birkinshaw, 2004; March, 1991; Shona L. Brown & Kathleen M. Eisenhardt, 1997). Un factor crítico en estos procesos son los recursos organizativos, fuente de ventaja competitiva (Barney, 1991; Hart, 1995), y el aprendizaje, capacidad dinámica central que facilita la adaptación y transformación de los recursos organizativos (Eisenhardt & Jeffrey A. Matin, 2000; March, 1991; Teece, 2007; Teece et al., 1997).

El grupo rojo se centra en el papel desempeñado por las instituciones. Las normas, los valores y las creencias condicionan el comportamiento organizativo (John W. Meyer & Brian Rowan, 1977; Paul J. Di Maggio & Walter W. Powell, 1983; Suchman, 1995). La multiplicidad de intereses en juego (Besharov & Smith, 2014; Greenwood et al., 2011), son fuente de tensiones, y la adaptación de la organización puede llevarse a cabo a través de procesos de cambio e innovación (Jay, 2013); estos procesos pretenden integrar la sostenibilidad en el funcionamiento organizativo (Bansal, 2005; Jay, 2013), y dada su triple naturaleza, lo hacen integrándose en las diferentes áreas de negocio y determinando sus resultados (Elkington, 1998).

En el grupo amarillo destaca el papel de los SES. Estos sistemas se caracterizan por su capacidad para adaptarse, aprender y transformarse en respuesta a las perturbaciones y los cambios (Geels & Schot, 2007). La naturaleza dinámica de estos procesos requiere una gobernanza adaptativa que comprenda la complejidad de las interacciones entre los sistemas humanos y naturales y base su actuación en el aprendizaje continuo y la acción colaborativa en la gestión de los recursos naturales (Folke et al., 2005).

#### **4.3.1. Conexión con otros enfoques teóricos**

Estos cuatro enfoques se interconectan con otras perspectivas contemporáneas que amplían su aplicabilidad en el estudio de la sostenibilidad organizativa, como se detalla a continuación.

El grupo azul, centrado en la teoría de las partes interesadas y la teoría de la paradoja, se vincula estrechamente con la Orientación a la Sostenibilidad Organizativa (OSO). Esta perspectiva amplía la visión tradicional al destacar cómo las empresas pueden desarrollar estrategias sostenibles teniendo en cuenta los intereses, expectativas y posibles tensiones entre los distintos grupos de interés. De este modo, la OSO no solo reconoce la diversidad de actores involucrados en la sostenibilidad, sino que también ofrece un marco para gestionar conflictos y encontrar soluciones equilibradas y duraderas (Tardin et al., 2024).

El grupo verde se alinea con los paradigmas de la complejidad y el aprendizaje organizativo, los cuales permiten a las organizaciones mejorar continuamente sus prácticas sostenibles. Este enfoque se materializa en el marco de los procesos de evaluación, considerándolos herramientas fundamentales para la sostenibilidad. Su valor radica en que, cuando se aplican desde una perspectiva dinámica y sistémica, pueden adaptarse a contextos cambiantes y complejos permitiendo a las organizaciones mejorar continuamente sus prácticas sostenibles. En este sentido, la evaluación no debe verse como un proceso estático o meramente formal, sino como una estrategia de mejora continua basada en la retroalimentación y la adaptación (Porter & Hawkins, 2019).

El grupo rojo amplía su alcance al considerar la importancia de la coherencia entre las buenas intenciones, los valores institucionales y su aplicación en la práctica. En muchas organizaciones, los principios sostenibles están presentes en discursos y normativas, pero no siempre se traducen en acciones concretas y efectivas. Por ello, es esencial revisar y alinear los objetivos estratégicos con medidas tangibles que realmente impulsen la sostenibilidad. De este modo, se evita que la sostenibilidad sea

solo una declaración de principios y se convierte en una realidad operativa dentro de la organización (Munck & Tomiotto, 2019).

El grupo amarillo pone el foco en la gobernanza adaptativa y las interacciones con diversos actores, elementos fundamentales dentro de los SES. Sin embargo, su impacto no se limita a este ámbito, ya que estos factores también juegan un papel clave en el desarrollo de nuevos modelos teóricos sobre sostenibilidad. En particular, la motivación de los distintos actores dentro de un sistema organizativo es crucial para impulsar cambios efectivos y sostenibles. Una gobernanza flexible y participativa, que tenga en cuenta las necesidades y aspiraciones de las personas involucradas, puede facilitar una transición más eficaz hacia modelos organizativos sostenibles (Rahman et al., 2023).

## 4.4. Conclusiones

Como se ha visto anteriormente, las relaciones e implicaciones de los diversos enfoques teóricos son múltiples y diversas. En lo que concierne a los SES, son un subconjunto de los sistemas complejos que se centran específicamente en las interacciones entre sistemas humanos (sociales, económicos, políticos) y sistemas ecológicos (naturaleza, biodiversidad, recursos naturales) (Colding & Barthel, 2019). Esta aproximación es especialmente aplicable a la resolución de problemas relacionados con la sostenibilidad y la gobernanza de recursos comunes (Ostrom, 2009).

La sostenibilidad, como objetivo central de este trabajo, implica el equilibrio del sistema integrado por estos tres subsistemas. Desde la perspectiva de los SES se pueden analizar estas interacciones de manera integral y multinivel, considerando tanto las dimensiones sociales como las ecológicas en niveles interdependientes. Esto facilita la comprensión de cómo los comportamientos organizativos e industriales influyen en la conservación ambiental y el desarrollo económico, identificando mecanismos de retroalimentación y puntos de equilibrio entre estos factores (Folke et al., 2005; Ostrom, 1990).

### 4.4.1. Los Sistemas Socioecológicos (SES) y los sistemas industriales

Los SES presentan una serie de características que resultan esenciales para analizar los sistemas industriales en el marco de la sostenibilidad:

- **Interdependencia:** Las actividades humanas y los procesos ecológicos están íntimamente ligados, y los cambios en uno pueden tener consecuencias significativas en el otro. Por ejemplo,

un aumento en la producción industrial puede generar impactos negativos en el entorno natural que, a su vez, repercuten en la sociedad.

- **Resiliencia:** Es la capacidad del sistema para absorber perturbaciones y reorganizarse sin perder su funcionalidad. Esto es crucial para mantener el equilibrio en un sistema sometido a choques externos, como crisis económicas o ambientales.
- **Retroalimentación:** Los SES se caracterizan por bucles de retroalimentación entre los subsistemas. Las acciones humanas pueden modificar los procesos ecológicos, y estos, a su vez, influyen en las decisiones humanas, generando ciclos que amplifican o atenúan los cambios.
- **Escalas Múltiples:** Los SES operan a través de diferentes escalas temporales y espaciales, lo que implica que las dinámicas locales pueden tener impactos globales y que las decisiones a corto plazo pueden influir en la sostenibilidad a largo plazo.

Estas propiedades hacen de los SES un marco adecuado, adaptable y flexible particularmente relevante para analizar la sostenibilidad industrial, ya que permite una visión integral de las interacciones entre las dimensiones sociales, industriales y ambientales. Al identificar y comprender estas interacciones, se pueden diseñar estrategias que fomenten el equilibrio entre el desarrollo económico y la conservación del entorno.

La literatura ha profundizado en la capacidad de los SES para gestionar, adaptarse y ser resilientes a través de distintos sistemas naturales y humanos. Algunos ejemplos incluyen el estudio del impacto del entorno humano y natural en la provisión de servicios ecosistémicos (Bruckmeier, 2016), el rol de la gestión adaptativa como mecanismo facilitador de la adaptación y la resiliencia (Olsson et al., 2004), el impacto del cambio climático en SES habitados por pueblos indígenas (Reyes-García et al., 2024), la capacidad de los conocimientos sobre agrobiodiversidad para adaptarse a los cambios sociales y ecológicos (Ibarra et al., 2024) o la gobernanza en sistemas pesqueros (Syddall et al., 2021).

#### **4.4.2. Hueco del conocimiento**

A pesar de los citados avances en el estudio de la intersección entre los sistemas humanos y ecológicos (Epstein et al., 2020; Fischer et al., 2015), las interacciones específicas entre los factores industriales y las dinámicas socio ecológicas aún no han sido exploradas de manera exhaustiva desde una perspectiva cuantitativa. Este vacío limita la comprensión de cómo los factores industriales, como

el tiempo de trabajo, las condiciones laborales o la productividad, interactúan entre sí y con su entorno, afectando a la sostenibilidad del sistema.

Si bien se han identificado características fundamentales de los SES, como la interdependencia entre subsistemas, la resiliencia frente a perturbaciones, la retroalimentación dinámica, las escalas múltiples y la vulnerabilidad del sistema, estas no han sido plenamente cuantificadas en el contexto industrial. La falta de cuantificación específica de estas características, como la velocidad de ajuste del sistema ante perturbaciones, la dirección e intensidad de las interacciones entre subsistemas o la existencia de relaciones de equilibrio a largo plazo, impide desarrollar modelos robustos que permitan predecir comportamientos y diseñar estrategias efectivas para fomentar la sostenibilidad. Esto subraya la necesidad de herramientas metodológicas capaces de capturar no solo los efectos directos, sino también las interdependencias complejas y dinámicas de los SES industriales.

Además, las perturbaciones externas, como las crisis económicas o sanitarias, destacan la importancia de evaluar la vulnerabilidad y resiliencia de los SES industriales, a la vez que permiten analizar cambios estructurales en las dinámicas subyacentes. La medición cuantitativa de estas propiedades permitiría comprender cómo los sistemas industriales se reorganizan para mantener su funcionalidad tras el impacto de dichas crisis. Sin embargo, este análisis debe integrar perspectivas transdisciplinarias que conecten los factores industriales con dimensiones socioeconómicas y ecológicas, asegurando un enfoque holístico que permita desarrollar políticas inclusivas y efectivas para la gestión de los SES.

Esta tesis doctoral llena estas lagunas al analizar y cuantificar las interacciones críticas entre los indicadores representativos de los subsistemas industriales, sociales y ecológicos, abordando las dinámicas a corto y largo plazo, los bucles de retroalimentación y la estabilidad del sistema ante perturbaciones. Los resultados obtenidos constituyen los pilares para el establecimiento de un marco de gobernanza transdisciplinario e integrador, que no solo considere la conservación del entorno y su comportamiento económico, sino también el bienestar de los trabajadores y la resiliencia organizativa. De esta forma, esta investigación puede emplearse en el diseño de estrategias sostenibles que equilibren el desarrollo industrial con la preservación de los recursos naturales y el bienestar social. La Figura 4.3 representa un SES industrial que integra los aspectos mencionados anteriormente.

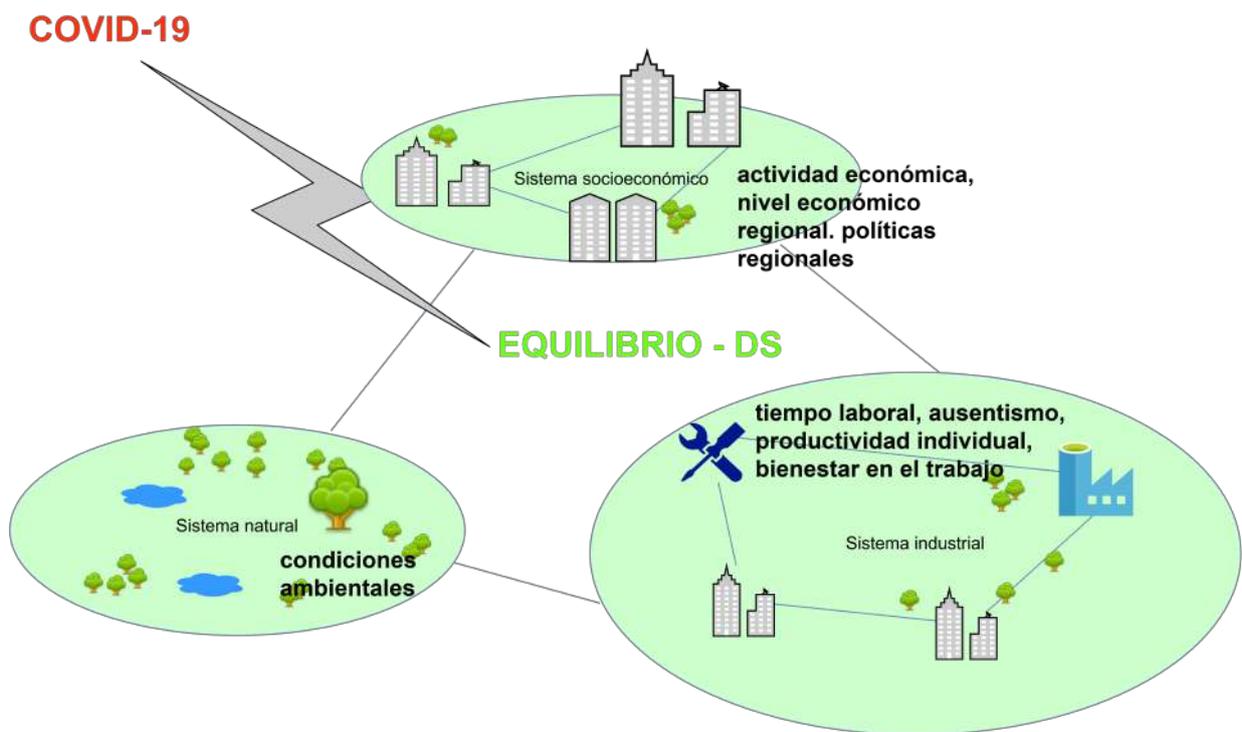


Figura 4.3: Representación de un SES integrado por el sistema industrial, su entorno económico y natural.



## **REPRESENTACIÓN DE LOS SES Y SU RELEVANCIA EN LA SOSTENIBILIDAD**

### **5.1. Introducción**

Los SES comprenden las interacciones dinámicas, adaptativas y multinivel entre factores humanos (sociales, económicos, políticos) y factores ecológicos (naturaleza, biodiversidad, recursos). Estas interacciones están profundamente interconectadas y retroalimentadas, y se caracterizan por propiedades como la interdependencia, la resiliencia y la retroalimentación. Estas propiedades varían según los dominios de estudio y los horizontes temporales considerados, determinando así la sostenibilidad del sistema.

#### **5.1.1. Representación conceptual**

El estudio de los SES desde una perspectiva multinivel requiere analizar tres dominios principales: el industrial, el económico y el medioambiental, además de incorporar diferentes horizontes temporales para captar las dinámicas inmediatas (corto plazo), las transitorias (medio plazo) y las estructurales (largo plazo). Este enfoque permite capturar de forma más precisa las complejas interacciones entre los subsistemas y su comportamiento a través del tiempo.

- Estructura de dominios:

- El dominio industrial se centra en las dinámicas productivas y organizativas, como la relación entre el Índice de Producción Industrial (IPI) y las condiciones laborales (horas trabajadas, costes salariales, bajas por enfermedad profesional). El propósito es analizar cómo las actividades industriales impactan las emisiones contaminantes ( $PM_{10}$ ) y, a su vez, cómo estas repercuten en la productividad y la salud laboral. En el corto plazo, el objetivo es valorar impactos ambientales inmediatos de cambios en la actividad productiva. En el largo plazo, el objetivo es medir la sostenibilidad de estas actividades y su relación con el equilibrio económico y ambiental.
  - El dominio económico aborda las dinámicas socioeconómicas relacionadas con los costes laborales, el desempleo y el comportamiento económico. Analiza cómo estos factores interactúan entre sí y con los subsistemas industrial y medioambiental. El propósito es identificar relaciones entre las variables de producto interior bruto, productividad industrial y emisiones contaminantes, evidenciando cómo los choques económicos afectan la sostenibilidad. En el corto plazo el objetivo es analizar respuestas económicas inmediatas ante cambios en los costes salariales o regulaciones ambientales. En el largo plazo, el objetivo es evaluar cómo se establecen equilibrios entre el producto interior bruto y la sostenibilidad medioambiental.
  - El dominio medioambiental se enfoca en los impactos de las actividades humanas sobre el entorno natural, como las emisiones de  $PM_{10}$  y la capacidad regenerativa de los ecosistemas. El propósito es analizar cómo los cambios en el entorno natural afectan la productividad y la salud, y cómo las políticas ambientales pueden influir en la sostenibilidad del sistema. En el corto plazo, el objetivo es identificar impactos inmediatos de actividades industriales. En el largo plazo el objetivo es valorar tendencias de sostenibilidad ecológica y regeneración del sistema.
- Horizontes temporales:
- El corto plazo evalúa los efectos inmediatos de perturbaciones externas (por ejemplo, crisis económicas o cambios en la producción industrial). Técnicas como los modelos de corrección de errores (MCE) permiten analizar estas dinámicas rápidas y su relación con la sostenibilidad.

- En el medio plazo se analizan transiciones entre estados del sistema, observando cómo las decisiones industriales y económicas afectan la sostenibilidad ambiental. Por ejemplo, se puede analizar la transición hacia tecnologías limpias impulsada por cambios en políticas económicas o ambientales.
- En el largo plazo se miden los efectos estructurales y los equilibrios sostenibles entre los dominios industrial, económico y medioambiental. Las pruebas de cointegración y análisis de resiliencia permiten evaluar la estabilidad de estas relaciones a lo largo del tiempo.

La Tabla 5.1 resume las diferentes técnicas econométricas empleadas, el horizonte temporal implicado y el propósito de su aplicación. Gráficamente, la Figura 5.1 representa el dinamismo de los SES a través del cambio en las relaciones entre los aspectos que lo integran es representado en la Figura 5.1.

Tabla 5.1: *Técnicas de modelado, dominios involucrados, horizonte temporal y propósito.*

<b>Técnica de modelado</b>	<b>Dominio de análisis</b>	<b>Horizonte temporal</b>	<b>Detalle de la información proporcionada</b>
MARDL	Industrial, Económico	Corto, Medio y Largo plazo	Cuantifican relaciones directas entre variables y proporcionan resultados precisos para decisiones en sistemas estructurados
Modelos ARDL con corrección de error	Industrial, Económico	Corto y Medio plazo	Analizan ajustes dinámicos hacia el equilibrio tras perturbaciones externas.
Causalidad de Granger	Todos	Corto plazo	Identifica la dirección de las relaciones causales entre variables.
Cointegración	Todos	Largo plazo	Evalúa relaciones de equilibrio sostenibles entre variables interdependientes.

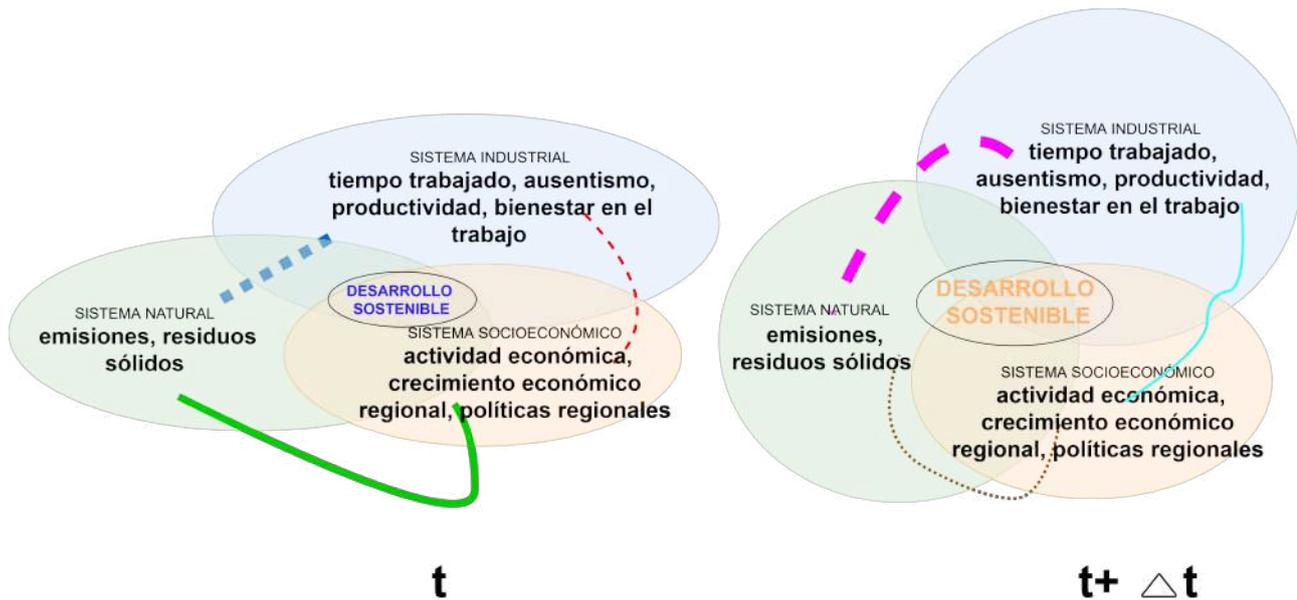


Figura 5.1: Representación conceptual del comportamiento multinivel de los SES en cuanto al dominio de análisis y el horizonte temporal.

### 5.1.2. Representación analítica

#### Análisis econométrico

Para analizar el equilibrio a largo plazo y las influencias mutuas a corto y largo plazo entre aspectos industriales, económicos y medioambientales, los métodos econométricos permiten obtener datos cuantitativos basados en datos empíricos.

De este modo, los métodos econométricos permiten:

- Identificar relaciones causales entre variables, lo que es crucial para entender cómo, por ejemplo, cambios en el tiempo de trabajo o la productividad influyen en el comportamiento económico y la contaminación medioambiental.
- Cuantificar efectos a corto y largo plazo mediante el uso de herramientas orientadas al análisis dinámico de series temporales de datos, tales como los modelos vectoriales autorregresivos (MVAR), los modelos vectoriales de corrección de error (MVCE), o los MARDL; que capturan tanto las interacciones inmediatas como los efectos acumulativos y de ajuste a largo plazo.
- Estimar parámetros de manera precisa a través de datos históricos y realizar predicciones basadas en regresiones, lo que ayuda a cuantificar con exactitud las influencias mutuas entre las variables.

- Capturar tanto influencias mutuas a corto plazo como equilibrios a largo plazo. Los métodos econométricos permiten evaluar cómo las variables están relacionadas en el largo plazo (equilibrio) y cómo se ajustan a este equilibrio a lo largo del tiempo.
- Analizar los choques temporales y sus impactos inmediatos en variables ambientales o laborales, así como la forma en que el sistema se ajusta a largo plazo.

Sin embargo, aunque los métodos econométricos son útiles para capturar relaciones cuantitativas precisas y basadas en datos, pueden ser limitados al representar las interacciones cualitativas y complejas dentro del sistema. En este aspecto, otros métodos de análisis, como la Dinámica de Sistemas (DdS), son capaces de complementar el análisis al ofrecer una comprensión más detallada de las retroalimentaciones y dinámicas complejas dentro del sistema industrial. La DdS se orienta hacia la representación cualitativa y la simulación de procesos complejos, lo que resulta útil en escenarios donde los datos cuantitativos son insuficientes (Apel et al., 1978; Sommer, 1984).

### **Series temporales de datos**

El análisis de series temporales se utiliza para examinar datos recolectados a lo largo del tiempo. Esta técnica es particularmente relevante en el contexto del *Big Data* y la inteligencia artificial (IA) debido a su capacidad para modelar y predecir comportamientos futuros basados en patrones históricos. Su aplicación es amplia y diversa en aspectos como:

- **Predicción:** El análisis de series temporales es esencial para la predicción de tendencias futuras en una variedad de campos. Por ejemplo, en la gestión de recursos naturales, los modelos de series temporales pueden predecir cambios climáticos y fenómenos meteorológicos, lo que es crucial para la sostenibilidad ambiental. En el sector energético, estas técnicas permiten prever la demanda de energía y optimizar la distribución, apoyando el uso eficiente de recursos y la integración de energías renovables.
- **Detección de Anomalías:** Los algoritmos de análisis de series temporales pueden detectar patrones anómalos en datos, lo cual es vital para la identificación temprana de problemas o cambios significativos en el entorno. Esto se aplica en la monitorización de redes eléctricas, donde la detección temprana de fallos puede prevenir apagones y mejorar la fiabilidad de las fuentes de energía renovable.

- **Optimización de Procesos:** En la agricultura, el análisis de series temporales ayuda a optimizar los procesos agrícolas mediante el seguimiento y la predicción de factores como el clima, la humedad del suelo y las tasas de crecimiento de los cultivos. Esto mejora la eficiencia y reduce el impacto ambiental, alineándose con los objetivos de sostenibilidad.
- **Finanzas y Economía:** En el ámbito financiero, el análisis de series temporales se utiliza para prever movimientos del mercado, identificar tendencias económicas y gestionar riesgos. La capacidad de analizar grandes volúmenes de datos históricos ayuda a desarrollar estrategias más robustas y sostenibles.

En el ámbito de la sostenibilidad, el análisis de series temporales sirve para anticipar y mitigar impactos negativos en el medio ambiente, la economía y la sociedad. Al permitir una mejor comprensión y gestión de los recursos, estas técnicas contribuyen a la creación de sistemas resilientes y adaptativos que pueden responder eficazmente a los desafíos del cambio climático, la escasez de recursos y otras presiones ambientales. Además, la capacidad de predecir y planificar a largo plazo fomenta prácticas más sostenibles que pueden ser implementadas en políticas públicas y estrategias corporativas, asegurando un equilibrio entre el desarrollo económico y la preservación del medio ambiente (Box et al., 2016; Shumway, 2017).

Existen diversos métodos cuantitativos para el análisis de series temporales de datos. La Figura 5.2 presenta una clasificación de diversas técnicas diferenciando entre métodos paramétricos (los que asumen unas determinadas propiedades de la distribución de los datos) y no paramétricos, así como entre aquellos que consideran o no la estructura temporal de los datos (Box et al. 2016; Shumway 2017).

En función del objetivo de su utilización, los métodos se clasifican de pueden agrupar de la siguiente forma:

- **Predicción.** Los modelos dinámicos como: los modelos autorregresivos integrados de media móvil (MARIMA), los MVAR o los modelos autorregresivos generalizados condicionales heterocedásticos (MARGCH) son ampliamente utilizados para predecir tendencias futuras. El MARDL es útil cuando se analizan relaciones a corto y largo plazo entre variables, lo cual es crucial en la predicción de fenómenos económicos y energéticos, apoyando una mejor toma de decisiones en sostenibilidad.

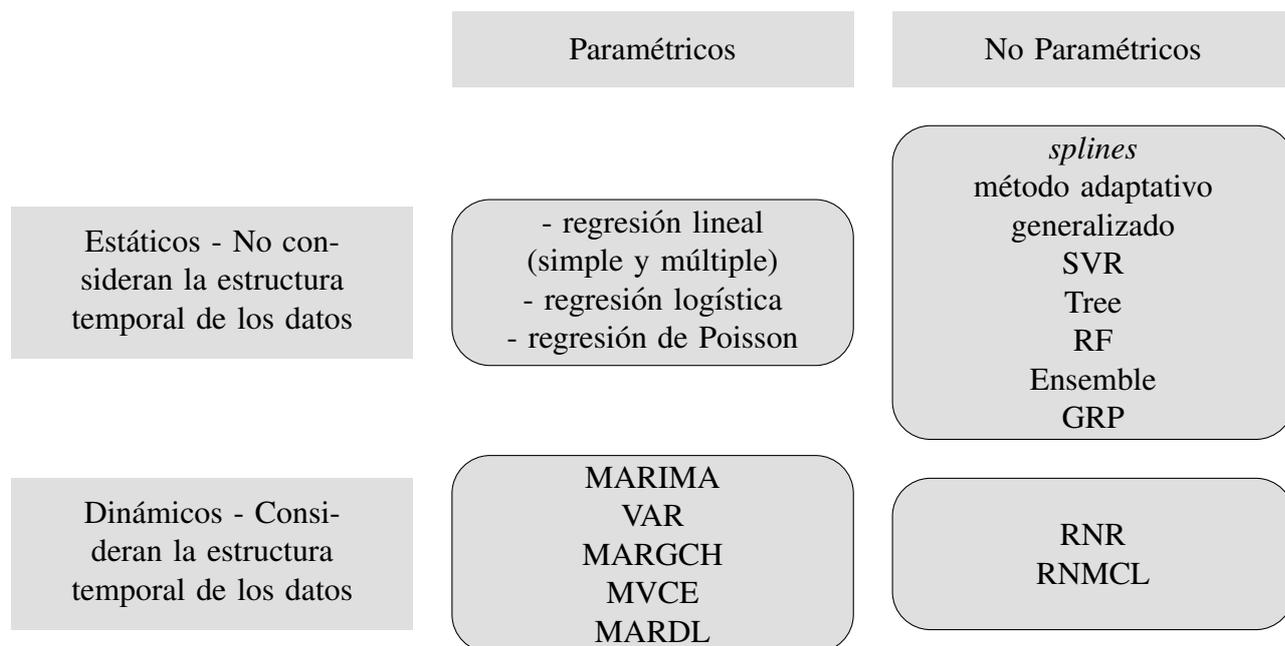


Figura 5.2: Clasificación de las técnicas de análisis de series temporales.

- **Detección de Anomalías.** Las redes neuronales recurrentes (RNR) y su variante con memoria a corto y largo plazo (RNMCL), permiten identificar patrones anómalos en datos temporales, facilitando la monitorización de sistemas complejos.
- **Optimización de Procesos.** Técnicas no paramétricas como Splines y Métodos de Regresión Aditivos Generalizados (MRAG) ayudan a modelar relaciones no lineales en procesos agrícolas y otros campos donde la estructura temporal es crítica.

Esta clasificación de técnicas facilita una mejor comprensión de cómo seleccionar y aplicar el método adecuado según el objetivo del análisis y el tipo de datos disponibles.

## 5.2. Metodología

Para establecer la relevancia de MARDL en el marco de la sostenibilidad se llevó a cabo un análisis bibliométrico ejecutando una búsqueda en la base de datos WoS y empleando nuevamente el software VOSviewer para el análisis de resultados.

### 5.3. Resultados

Tras ejecutar la búsqueda "ARDL AND sustainability" en WoS (que proporcionó 1182 resultados) y aplicar un filtro por campo seleccionando: "Environmental Sciences", "Green Sustainable Science Technology" y "Environmental Studies", se obtuvieron 895 resultados comprendidos entre 2015 y 2023 distribuidos tal como se muestra en la Figura 5.3.

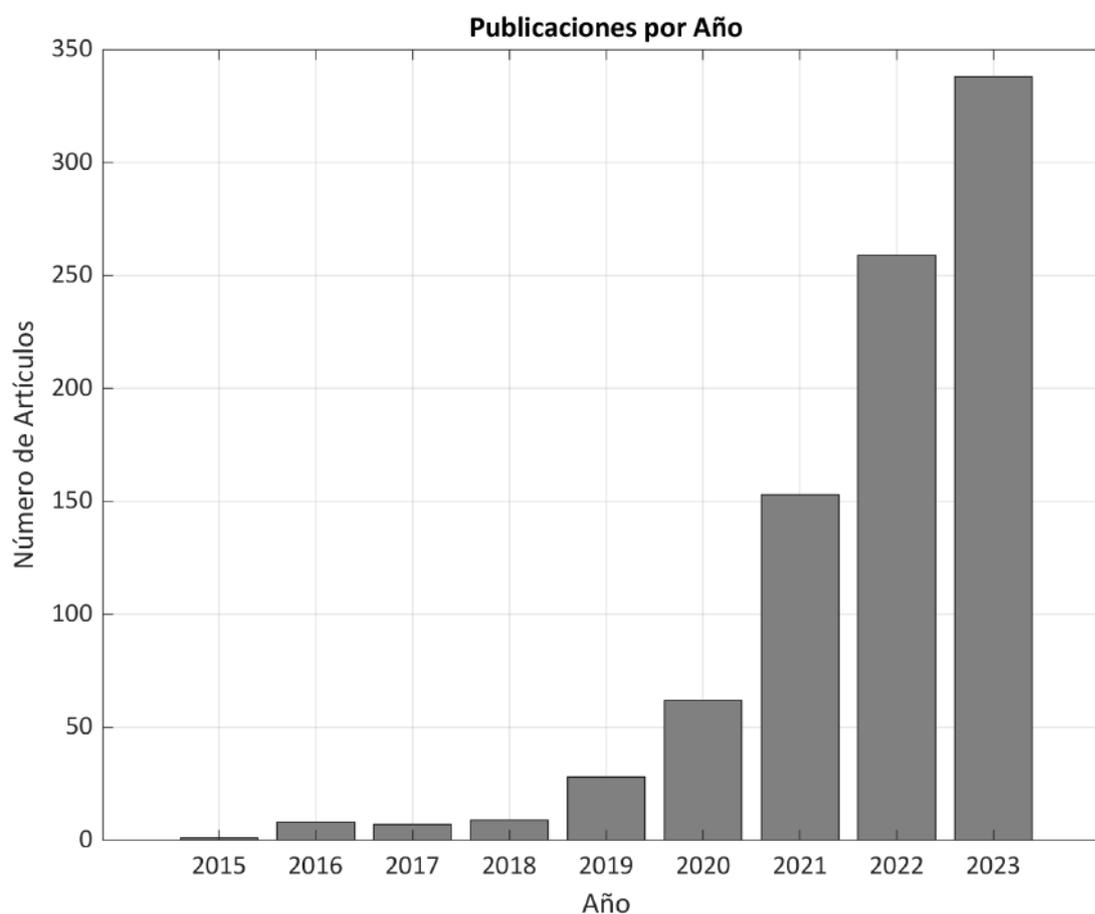


Figura 5.3: Número de artículos publicados por año, entre 2015 y 2023, que emplean MARDL econométricos en relación con la sostenibilidad y las ciencias ambientales.

Exportados los resultados y analizados mediante el software VOSviewer, se obtuvo la visualización de coocurrencia mostrada en la Figura 5.4, que ha permitido detectar los temas de interés y su relevancia en el momento actual.

En el mapa de coocurrencia, basado en un mínimo de 150 repeticiones de palabras clave en los títulos y resúmenes de los artículos considerados, se muestran, representados por los nodos más grandes, los términos más relevantes. Estos términos coloreados de claro a oscuro indican la evolución temporal de los temas de interés, de más antiguos a más nuevos .

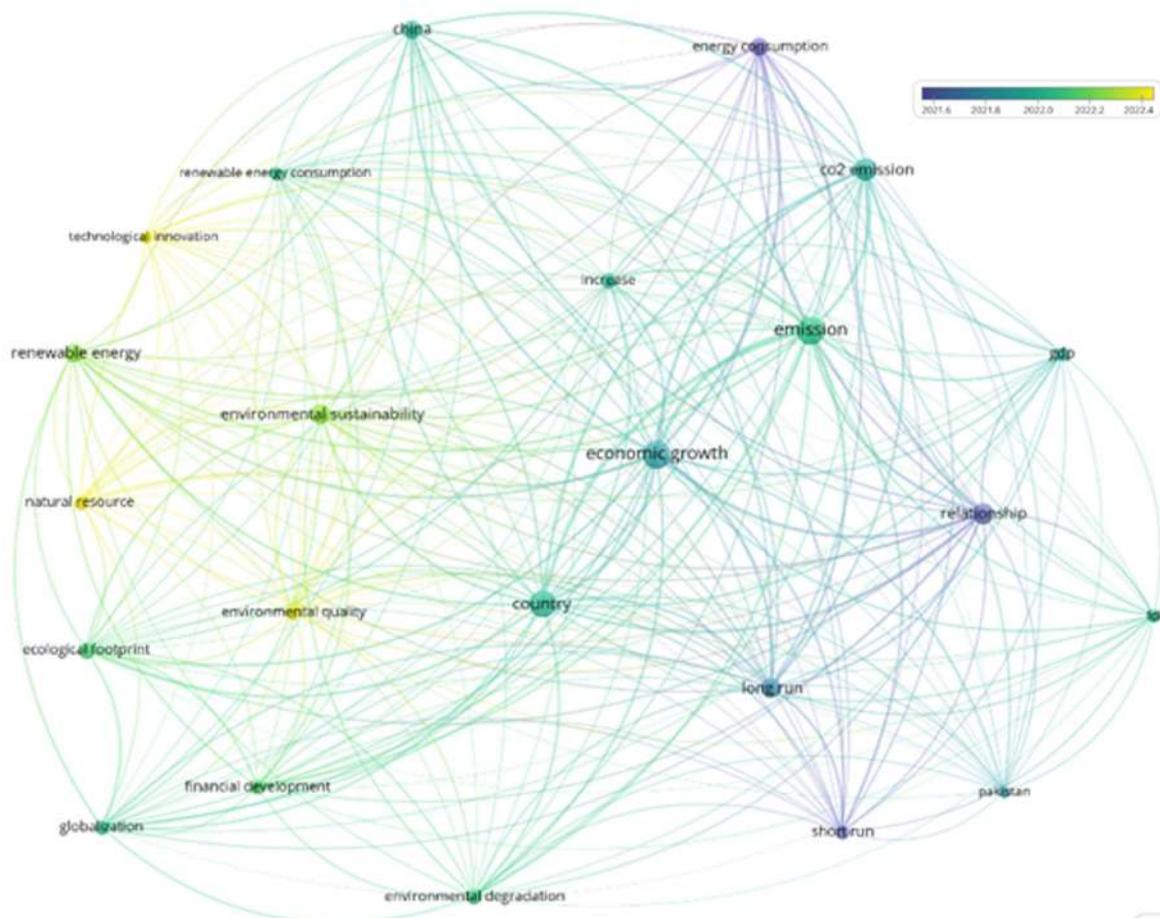


Figura 5.4: Aspectos más relevantes objeto de estudio, mediante el MARDL, en el marco de la sostenibilidad.

Entre los temas más destacados se encuentran el estudio del crecimiento económico y las emisiones de  $CO_2$ . En cuanto a los términos más recientes, destacan el consumo de energía, y las relaciones a corto plazo y largo plazo.

Los resultados destacan que el crecimiento económico, el consumo de energía y las emisiones de  $CO_2$  son objeto de numerosos estudios, revelando interacciones complejas a corto y largo plazo que involucran otros aspectos de análisis como es el caso del consumo de energía renovable (Abbasi et al., 2022; Bekun et al., 2019), la apertura comercial (Alola, 2019), la globalización (Ahmad et al., 2021; Baloch et al., 2021) o el apoyo financiero como motor de la eco-innovación y el desarrollo tecnológico (Ahmad et al., 2021; Hassan et al., 2020; Sarkodie et al., 2020). Estos factores interactúan entre sí afectando a la sostenibilidad económica y ambiental, destacando la necesidad de un enfoque integrado para abordar los desafíos ambientales.

Otros aspectos como la calidad institucional y la implementación de políticas efectivas juegan un papel destacado en la mejora de la sostenibilidad ambiental. Una buena calidad institucional puede mitigar los impactos negativos del crecimiento económico sobre el medio ambiente promoviendo un uso más eficiente de los recursos y la adopción de tecnologías limpias (Hassan et al., 2020).

Asimismo, la innovación tecnológica, especialmente en el ámbito de la energía, es esencial para reducir la huella ecológica y las emisiones de carbono (Sarkodie et al., 2020). La dependencia de los combustibles fósiles sigue siendo un desafío significativo para la sostenibilidad ambiental, particularmente en economías en desarrollo. Es esencial que estas economías inviertan en energías renovables y desarrollen capacidades institucionales que favorezcan una transición hacia un modelo de desarrollo más sostenible (Adebayo et al., 2021).

La globalización, cuando se gestiona adecuadamente, también puede contribuir a la sostenibilidad ambiental (A. Mujtaba et al., 2022).

La urbanización, motor de crecimiento económico, contribuye a aumentar las presiones sobre el medio ambiente si no se gestiona adecuadamente. La integración de políticas que promuevan el uso de energías renovables en áreas urbanas es esencial para contrarrestar estos efectos adversos (Sarkodie et al., 2019).

## 5.4. Conclusiones

En el marco de esta tesis, el objeto de estudio y el marco conceptual adoptado tienen un carácter dinámico acorde al cambio constante del contexto actual. El carácter dinámico de las relaciones entre los componentes del sistema es una característica relevante, por lo que se adopta un modelo de regresión capaz de considerar la estructura temporal de los datos.

Los modelos de regresión estáticos, aunque útiles para establecer relaciones entre variables en un punto específico del tiempo, no son capaces de capturar la naturaleza temporal y la evolución de estas relaciones. En un entorno en constante cambio, es crucial contar con herramientas que puedan incorporar y analizar estas fluctuaciones temporales.

La propia naturaleza de este estudio, dado que su principal objeto es determinar la existencia de equilibrio a largo plazo entre variables y, dado que involucra a diversas variables representativas de los distintos aspectos cuyas relaciones se pretende analizar, sugiere que los métodos más adecuados son el MVCE y MARDL.

Ventajas de MARDL sobre modelos estáticos:

- Incorporación de la dinámica temporal. Los MARDL permiten capturar tanto las relaciones a corto como a largo plazo entre las variables. Esto es particularmente útil en estudios donde las relaciones entre variables pueden cambiar con el tiempo y donde los efectos retardados son importantes (Natsiopoulos & Tzeremes, 2022).
- Flexibilidad en la estructura de los retrasos. A diferencia de los modelos estáticos, los MARDL permite incluir diferentes retrasos para distintas variables, ofreciendo una mayor flexibilidad para modelar la dinámica real del sistema bajo estudio (Jordan & Philips, 2018).
- Cointegración en serie de tiempo. Una de las principales ventajas del MARDL es su capacidad para modelar la cointegración, es decir, la existencia de una relación de equilibrio a largo plazo entre las variables, incluso cuando las series temporales individuales son no estacionarias. Esto proporciona una visión más completa y robusta de las relaciones subyacentes (Murthy & Okunade, 2016).
- Aplicabilidad en muestras pequeñas. El MARDL es adecuado para muestras pequeñas, donde otros métodos econométricos pueden fallar. Esto es crucial cuando los datos disponibles son limitados, pero se necesita un análisis preciso y robusto (Pesaran & Shin, 1999).

- **Análisis de impacto en diferentes horizontes temporales:** Al utilizar un MARDL, es posible evaluar cómo los cambios en una variable independiente afectan a la variable dependiente tanto en el corto como en el largo plazo. Esto ofrece una visión más detallada y matizada de las relaciones económicas o financieras que se están estudiando (Cho et al., 2023).
- **Facilidad de implementación y estimación:** Los MARDL son relativamente fáciles de implementar y estimar utilizando software econométrico estándar, lo cual facilita su uso práctico sin requerir técnicas de modelado excesivamente complejas (Demirhan, 2020).

La elección de MARDL sobre modelos de regresión estáticos y otros como el MVCE se justifica por su capacidad para incorporar la dinámica temporal de las relaciones entre variables, su flexibilidad en la estructura de los retrasos, su aptitud para modelar la cointegración y su aplicabilidad en contextos con muestras pequeñas. Estas características lo hacen particularmente adecuado para el análisis de sistemas dinámicos en un entorno de constante cambio.

#### **5.4.1. Técnicas cuantitativas para el estudio de los SES**

En el ámbito del modelado econométrico, existen diversas técnicas y pruebas que permiten verificar hipótesis relacionadas con las propiedades de los SES. A continuación, se resumen las principales herramientas econométricas utilizadas para analizar distintas características de los SES. Una descripción más detallada de cada técnica puede consultarse en el Anexo A:

- **Estabilidad de los datos iniciales: Pruebas de estacionariedad:** Dickey-Fuller Aumentada (PADF), Phillips-Perron (PPP), Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin (KPSS). Determinar si las series temporales utilizadas tienen una media y varianza constante en el tiempo (estacionariedad) es fundamental para asegurar que las propiedades estadísticas de las variables no cambien en el tiempo para la obtención de análisis econométricos robustos.
- **Equilibrio y Sostenibilidad:** modelo autorregresivo con retraso distribuido a largo plazo con prueba de límites (MARDL-LP-PL). Fenómenos disruptivos como el cambio climático, la degradación de recursos y las crisis económicas pueden desestabilizar las relaciones de largo plazo. El MARDL-LP-PL evalúa si estas relaciones se mantienen sostenibles, alertando sobre desequilibrios que requieren intervención.

- Resiliencia y conexiones entre dominios y horizontes temporales: modelo autorregresivo con retraso distribuido con corrección de error (MARDL-ECM). Las perturbaciones externas, como desastres naturales, crisis sanitarias o choques regulatorios, generan desviaciones en los SES. El MARDL-ECM mide la capacidad del sistema para recuperarse en el corto plazo y estabilizarse en el largo plazo, proporcionando un análisis de su resiliencia.
- Retroalimentaciones. Prueba de Causalidad de Granger. Los bucles de retroalimentación entre subsistemas son esenciales para el manejo adaptativo de los SES. La causalidad de Granger permite entender cómo las acciones en un subsistema afectan a otros y cómo estas respuestas regresan para influir en las dinámicas originales, facilitando la gestión adaptativa y sostenible del sistema.
- Vulnerabilidad. Pruebas: Breusch-Pagan-Godfrey, Durbin-Watson y Jarque-Bera (PJB), Ramsey-RESET, CUSUM y CUSUMQ. La vulnerabilidad de los SES refleja su susceptibilidad a daños ante perturbaciones externas e internas, incluyendo fenómenos naturales, eventos sociales y cambios económicos. Estas perturbaciones generan impactos desiguales, alteran relaciones clave dentro del sistema y exponen las sensibilidades de sus subsistemas.

La Figura 5.5 representa las diferentes técnicas de análisis empleadas, el objeto de su utilización y el nombre de la técnica concreta empleada.

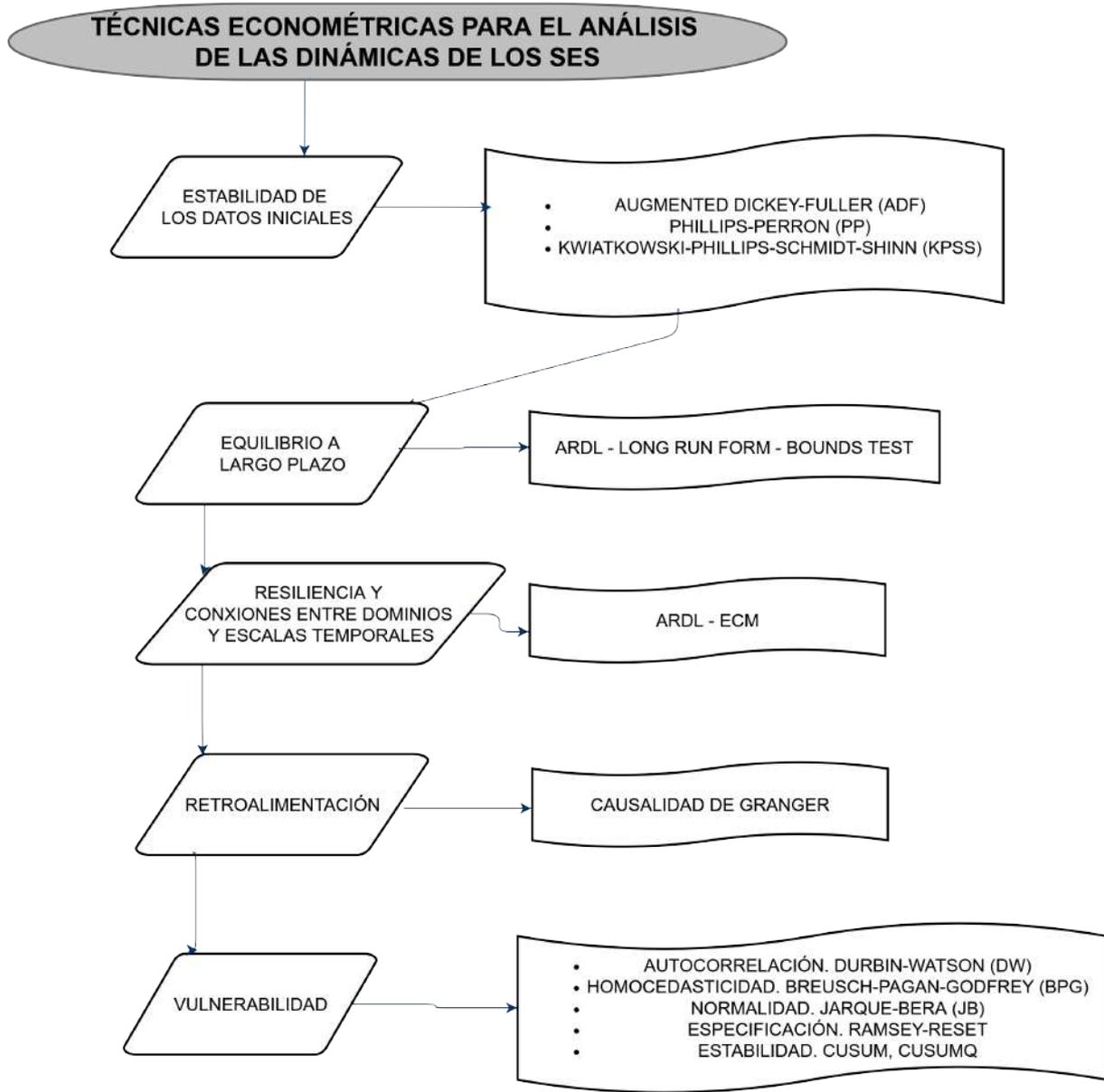


Figura 5.5: Esquema de las técnicas econométricas empleadas.

## **CASO DE ESTUDIO: SOSTENIBILIDAD DEL SECTOR INDUSTRIAL CÁNTABRO**

### **6.1. Introducción**

El estudio de la sostenibilidad organizativa requiere un enfoque integral que considere la interconexión entre aspectos industriales, socioeconómicos y medioambientales. La interacción entre estos factores influye directamente en la efectividad de las medidas implementadas para alcanzar un desarrollo sostenible.

Investigaciones previas han demostrado que el tiempo de trabajo, los salarios y la salud ocupacional en el ámbito industrial tienen un impacto significativo en el bienestar social y la conservación del medio ambiente. Por ejemplo, la cantidad total de horas trabajadas está vinculada al consumo excesivo de recursos y al incremento de emisiones de carbono, lo que cuestiona la idea de que la tecnología por sí sola puede garantizar la sostenibilidad en el futuro (Hayden & Shandra, 2009; Jackson & Victor, 2011). Esto sugiere la necesidad de replantear las prácticas laborales y los patrones de consumo para minimizar su impacto ambiental y social.

En cuanto a la relación entre salarios y equidad, el desarrollo sostenible presenta desafíos complejos. En el contexto de la economía circular, la implementación de sus principios permite mantener el nivel salarial y, al mismo tiempo, reducir el impacto ambiental mediante la optimización de los recursos y la reducción del tiempo de trabajo (Dey et al., 2022; Geissdoerfer et al., 2020; Pieroni et al., 2019). No obstante, algunas investigaciones advierten que la transición a energías más limpias

puede profundizar desigualdades existentes, lo que resalta la necesidad de políticas integrales que promuevan equidad y sostenibilidad de manera simultánea (García-García et al., 2020).

Desde una perspectiva organizativa, la reducción de la jornada laboral no solo tiene beneficios ambientales, sino que también mejora la productividad y el bienestar de los trabajadores. Estudios han demostrado que jornadas más cortas reducen la fatiga y aumentan la eficiencia, generando un equilibrio entre vida personal y laboral (Collewet & Sauermann, 2017; Gálvez et al., 2020; Shepard & Clifton, 2000). Además, prácticas empresariales alineadas con la sostenibilidad y el compromiso social tienen un impacto positivo en el desempeño de las organizaciones (Delmas & Pekovic, 2013).

Este enfoque se encuentra en consonancia con el ODS 8, que establece una relación clave entre la salud ocupacional y los factores industriales (Rai et al., 2019). La regulación del tiempo de trabajo ha demostrado ser una estrategia efectiva para reducir enfermedades laborales relacionadas con el estrés, los trastornos cardiovasculares y musculoesqueléticos (Goh et al., 2016; Hassard et al., 2018; Johnson & Lipscomb, 2006; Virtanen et al., 2012). Por ello, se recomienda el desarrollo de un marco regulatorio que integre políticas laborales sostenibles con programas de salud y seguridad ocupacional (European Agency for Safety and Health at Work., 2023; Landrigan et al., 2018; Watts et al., 2015).

Desde una perspectiva de gobernanza regional, la implementación de estas acciones requiere un enfoque coordinado que abarque objetivos económicos, sociales y ambientales. Esto implica la formulación de políticas, apoyo financiero y la adopción de tecnologías limpias y eficientes. Asimismo, es esencial fomentar prácticas de consumo responsable y modelos de negocio circulares que minimicen residuos y maximicen la reutilización de recursos (Qayyum et al., 2021).

Además, las políticas de bienestar laboral pueden desempeñar un papel clave en la sostenibilidad. La promoción de entornos de trabajo saludables y seguros, junto con la inversión en educación y capacitación, facilita la transición hacia sectores económicos más sostenibles. Estas estrategias no solo mejoran la calidad de vida de los trabajadores, sino que también impulsan la innovación y la competitividad en un mercado global cada vez más orientado hacia la sostenibilidad (B. G. Mujtaba & Cavico, 2013).

### **6.1.1. Cantabria y su economía**

Cantabria es una comunidad autónoma del norte de España con una población de aproximadamente 580,000 habitantes. Su economía ha experimentado una importante transformación en las

últimas décadas, pasando de una estructura basada en la producción primaria a un modelo más diversificado, con un mayor peso del sector servicios y la manufactura ligera.

El Producto Interior Bruto (GDP) regional representa el 1,1 % del GDP nacional, con un sector industrial que contribuye aproximadamente al 21,1 % del GDP y emplea al 14,4 % de la población activa, cifras que superan la media nacional («Cantabria», 2024). La industria cántabra se caracteriza por la predominancia de pequeñas y medianas empresas (PYMEs) y por su especialización en sectores estratégicos como la metalurgia, la automoción, la química y la agroalimentación (Tabarés, R. & Arrizabalaga, E., 2020).

Los sectores más relevantes en la economía industrial de Cantabria incluyen:

- **Metalurgia y fabricación de productos metálicos:** Representa uno de los pilares de la economía regional, con empresas que producen desde componentes básicos hasta maquinaria especializada.
- **Industria química:** Cantabria alberga compañías dedicadas a la producción de productos químicos básicos y especializados, con una fuerte orientación exportadora.
- **Sector agroalimentario:** Destaca en la producción de conservas de pescado, siendo líder nacional en semiconservas. Además, la industria láctea y de bebidas tiene un peso considerable en la economía regional.
- **Automoción:** Aunque en menor medida que otros sectores, Cantabria participa en la cadena de suministro de la industria automotriz, fabricando componentes y piezas para vehículos (Gobierno de Cantabria, 2024).

En 2023, la región exportó bienes por un valor de 3.360 millones de euros, lo que representó el 0,9 % de las exportaciones españolas. Los principales sectores exportadores fueron hierro y acero (14,3 %), productos químicos (13,7 %) y aparatos eléctricos (11,5 %).

El sector servicios es el principal motor económico de Cantabria, concentrando la mayor parte del empleo. En 2024, el turismo consolidó su papel como un factor clave en el crecimiento económico, contribuyendo a un incremento del 2,3 % del PIB en el segundo trimestre del año. Sin embargo, la fuerte estacionalidad del turismo sigue representando un desafío, lo que ha llevado a promover estrategias de desestacionalización y diversificación de la oferta turística.

Otros subsectores de servicios que han ganado relevancia incluyen:

- Comercio: Concentra su actividad principalmente en Santander y Torrelavega, con un crecimiento sostenido gracias a iniciativas locales y la presencia de grandes cadenas comerciales.
- Servicios financieros: Cantabria es la cuna del Banco Santander, una de las instituciones financieras más importantes a nivel global, reflejando la tradición financiera de la región.
- Educación y salud: Instituciones como la Universidad de Cantabria y el Hospital Universitario Marqués de Valdecilla desempeñan un papel crucial no solo en la atención local, sino también en la atracción de talento y la generación de conocimiento en el ámbito científico y sanitario (Gobierno de Cantabria, 2024).

A pesar de sus avances, Cantabria enfrenta varios retos estructurales que requieren atención:

- Envejecimiento poblacional y emigración de jóvenes cualificados.
- Necesidad de modernización de infraestructuras para mejorar la conectividad y la competitividad industrial.
- Cumplimiento de los ODS, especialmente en lo referente a sostenibilidad ambiental e innovación tecnológica («Cantabria», 2024; Gobierno de Cantabria, 2023).

Para abordar estos desafíos, la región está implementando diversas estrategias de desarrollo, entre ellas:

- Innovación y digitalización: Se fomenta la adopción de tecnologías avanzadas en sectores tradicionales y emergentes para mejorar la productividad y la competitividad.
- Sostenibilidad: Se están promoviendo proyectos de energía renovable y prácticas industriales ecológicas, como el proyecto Besaya Futura, que busca la descarbonización del área industrial del Besaya.
- Atracción de inversiones: Se han diseñado incentivos para emprendedores y empresas que apuesten por el crecimiento sostenible y la generación de empleo de calidad.

Cantabria avanza hacia un modelo económico más diversificado, sostenible e innovador, con el objetivo de consolidar su crecimiento y mejorar la calidad de vida de su población en un contexto global en constante transformación.

### 6.1.2. Cantabria y los ODS

El desarrollo sostenible es un objetivo clave en la estrategia económica y social de Cantabria. Para alinear sus actividades industriales y socioeconómicas con los ODS de la Agenda 2030, la región ha desarrollado el Plan para la Territorialización de los ODS en Cantabria. Este plan busca fomentar la innovación, la sostenibilidad y la transición hacia un modelo económico más equilibrado a través de estrategias como la especialización inteligente (S3) y la política de innovación (Gobierno de Cantabria, 2023).

Si bien la región ha avanzado en la integración de los ODS en su planificación, enfrenta varios desafíos que requieren atención:

- **Baja inversión en I+D+i:** En 2018, la inversión en innovación representó solo el 0,85 % del PIB regional, lo que evidencia la necesidad de fortalecer la cultura de innovación y la adopción de tecnologías sostenibles (Tabarés, R. & Arrizabalaga, E., 2020).
- **Impacto ambiental de la industria:** A pesar de los esfuerzos por reducir la huella ecológica, algunos sectores productivos siguen generando emisiones contaminantes y consumiendo recursos a un ritmo elevado.
- **Desafíos en la calidad del aire:** La contaminación del aire en Cantabria se ve afectada por la presencia de partículas  $PM_{10}$ , un contaminante derivado principalmente de la actividad industrial y el transporte.

Para mejorar la calidad del aire y reducir las emisiones, Cantabria ha implementado el Plan de Calidad del Aire, que establece acciones específicas para reducir la contaminación en sectores clave. Sin embargo, la evolución de estos contaminantes depende no solo de las regulaciones ambientales, sino también de la transformación del modelo económico y de los patrones de movilidad urbana.

El material particulado  $PM_{10}$  es un indicador clave del impacto ambiental de las actividades industriales y del transporte. Sus niveles están influenciados por la quema de combustibles fósiles, las emisiones industriales y el tráfico vehicular (Hao et al., 2020). La gestión efectiva de la calidad del aire es fundamental para garantizar un entorno saludable y mejorar la sostenibilidad urbana y rural en la región.

Para cumplir con los ODS y mejorar la sostenibilidad a largo plazo, Cantabria está promoviendo diversas estrategias de adaptación:

- Incentivos para la eficiencia energética en industrias y empresas locales.
- Fomento de la movilidad sostenible, impulsando el transporte público y la electrificación del parque vehicular.
- Planes de restauración y conservación ambiental, con iniciativas para la reforestación y protección de ecosistemas locales.
- Educación y sensibilización ciudadana, para fomentar prácticas de consumo responsable y un mayor compromiso con la sostenibilidad.

Cantabria ha avanzado en la integración de los ODS en su planificación territorial, pero aún enfrenta desafíos en inversión en innovación, calidad del aire e impacto ambiental industrial. La adopción de un enfoque integral y multisectorial será clave para lograr un desarrollo sostenible que beneficie tanto a la economía como al bienestar de la población.

### 6.1.3. Sistema de estudio

Para implementar medidas eficaces y reorientar el comportamiento de la región hacia la sostenibilidad, es fundamental garantizar un equilibrio entre los aspectos industriales, socioeconómicos y medioambientales. Además, resulta esencial comprender las interacciones entre estos factores, ya que esto permite evaluar cómo las distintas acciones y políticas en un ámbito específico pueden influir en los demás y en el equilibrio general del sistema.

Si bien el análisis inicial se enfoca en organizaciones industriales, las variables macroeconómicas son una aproximación válida para estudiar tendencias a gran escala que afectan a estas organizaciones. Existen varias razones que respaldan esta elección:

- Influencia del contexto socioeconómico. Las empresas operan dentro de un entorno económico y social más amplio, por lo que variables macroeconómicas reflejan condiciones estructurales que condicionan sus estrategias y dinámicas.
- Limitación de datos longitudinales a nivel organizacional. La falta de bases de datos con series temporales detalladas a nivel de empresa obliga a recurrir a indicadores macroeconómicos como referencia del entorno en el que operan.

- Uso en investigaciones previas: Estudios en sostenibilidad y resiliencia empresarial han utilizado este enfoque para modelar el impacto de crisis económicas y sanitarias en el desempeño organizativo (Feng, 2023; Zeng, 2023; Zhang et al., 2021).

Para representar la interacción entre la industria, la economía y la sostenibilidad, se han seleccionado indicadores clave que reflejan distintas dimensiones del comportamiento organizacional. Estos indicadores permiten capturar dinámicas relevantes del sector industrial y su relación con el entorno socioeconómico y ambiental.

La Figura 6.1 representa el sistema de estudio aplicado a Cantabria, incluyendo los indicadores clave:

- En el ámbito industrial:
  - Horas totales trabajadas al mes (HRS), mide la dedicación laboral y su equilibrio con la vida personal.
  - Número de bajas por enfermedad profesional (SICK), refleja el bienestar y la salud laboral.
  - Coste salarial horario (WAGE), representa la capacidad de los trabajadores para mantener un nivel de vida adecuado.
  - Índice de Producción Industrial (IPI), representa la actividad productiva en la industria cántabra.
- En el ámbito económico:
  - Producto interior bruto (GDP). Refleja el nivel de riqueza y bienestar regional.
- En el ámbito medioambiental:
  - La concentración de partículas de tamaño menor que  $10\ \mu\text{m}$  ( $PM_{10}$ ), representa el impacto de la actividad industrial en el medio natural.

La Tabla 6.1 recoge las variables empleadas, la fuente de origen y su significado:

Representando los aspectos anteriores, se aplicaron los siguientes criterios en la selección de variables:

- Número de observaciones por variable: Para la realización de los MARDL, es recomendable tener al menos 30 a 50 observaciones por variable para obtener estimaciones con un nivel de

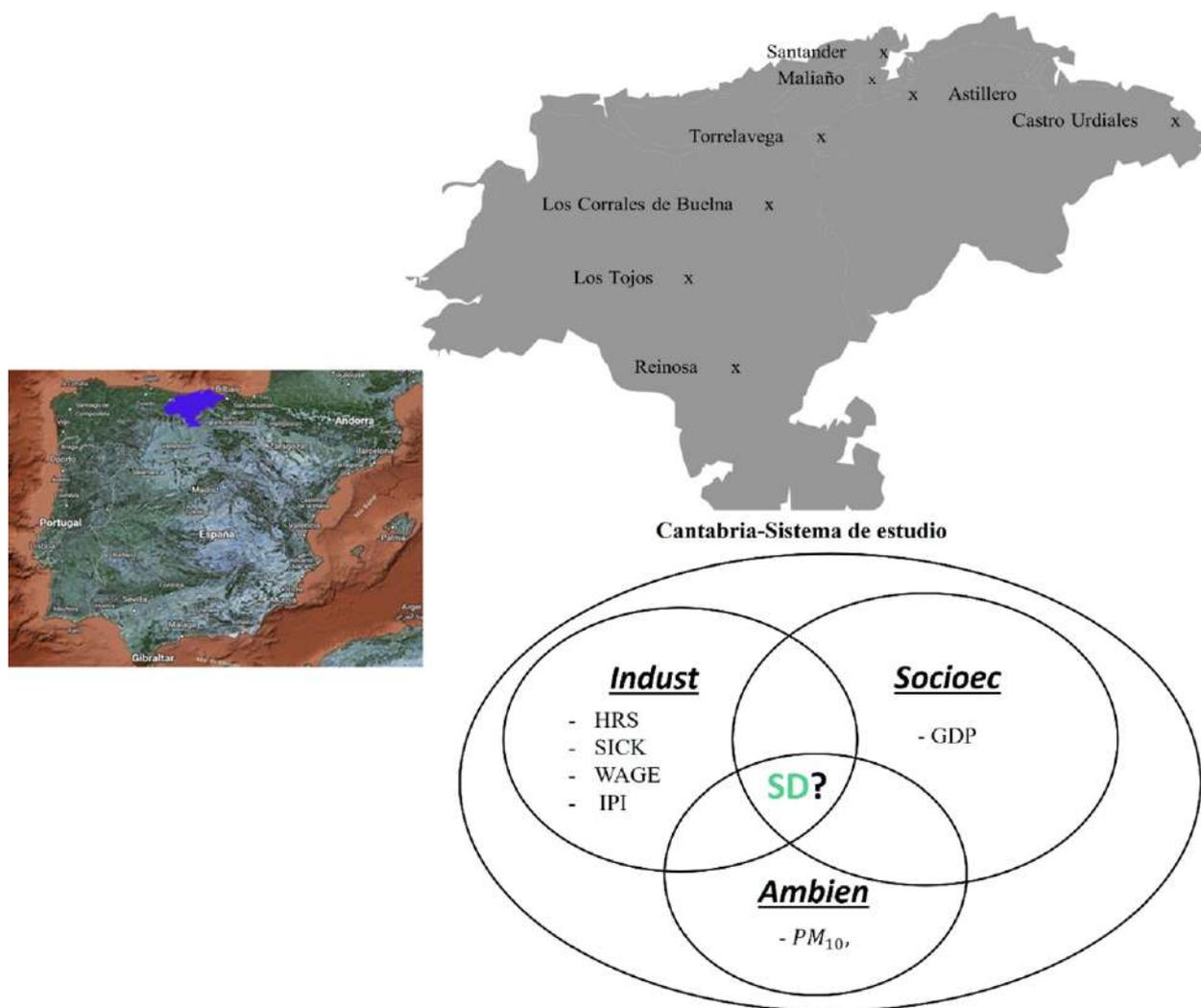


Figura 6.1: Cantabria, sistema de estudio. La intersección de los aspectos industriales, socioeconómicos y medioambientales define el DS del sistema.

Tabla 6.1: *Variables de estudio.*

<b>Variab</b> les	<b>Abreviatura</b>	<b>Fuente</b>	<b>Representatividad</b>
Horas totales trabajadas al mes	HRS	INE	Bienestar físico y mental en el entorno industrial
Número de bajas por enfermedad profesional	SICK	INSST	Bienestar físico
Coste salarial horario	WAGE	INE	Bienestar y repercusión social
Índice de producción industrial	IPI	INE	Comportamiento industrial
Producto interior bruto	GDP	ICANE	Comportamiento socioeconómico
Concentración de partículas de tamaño menor o igual que 10 $\mu\text{m}$	$PM_{10}$	ICANE	Comportamiento medioambiental

confianza suficiente. Cuantos más retrasos se incluyan en el modelo, mayor cantidad de datos será necesaria para evitar problemas de ajuste excesivo o falta de grados de libertad. Para datos trimestrales, esto equivaldría a alrededor de 7-12 años de datos (28-48 observaciones) (Gujarati & Porter, 2009; Harris et al., 2005).

- Sincronicidad. Las variables han de representar un mismo período de tiempo y estar medidas con la misma frecuencia.
- Estabilidad de las relaciones a largo plazo. Para llevar a cabo la metodología planteada en el presente estudio, es necesario que las variables seleccionadas establezcan relaciones, o se muevan de forma conjunta, en el tiempo, a largo plazo. De no hacerlo, habría que utilizar otra metodología.

#### **6.1.4. Relación de la variable ambiental con los aspectos industriales y socio-ecológicos**

En este estudio, se selecciona la concentración de  $PM_{10}$  como variable representativa del estado del medio ambiente y como variable dependiente dentro del análisis. El objetivo es evaluar cómo los factores industriales y socioeconómicos influyen en su comportamiento y en la sostenibilidad del sistema en Cantabria.

El material particulado  $PM_{10}$  es un contaminante clave que afecta la calidad del aire, la salud pública y el equilibrio ecológico. Su origen está vinculado a fuentes industriales, emisiones de transporte y otros procesos que generan partículas finas en suspensión. Numerosos estudios han demostrado que una exposición prolongada a niveles elevados de  $PM_{10}$ :

- Impactar la salud humana, aumentando el riesgo de enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Chen & Kan, 2008).
- Generar costos económicos elevados, debido al incremento en gastos de atención médica y la pérdida de productividad laboral (Dockery et al., 1993).
- Influir en el desarrollo sostenible, afectando la habitabilidad de las ciudades y la sostenibilidad de los ecosistemas urbanos y rurales (Pope & Dockery, 2006).

El impacto ambiental de la actividad industrial no solo está determinado por las emisiones directas de las fábricas, sino también por la estructura económica y las políticas de producción y consumo. La calidad del aire está influenciada por diversos factores industriales y socioeconómicos, entre los que destacan:

- Tiempo de trabajo (HRS). Jornadas laborales extensas están asociadas con un mayor nivel de actividad industrial, lo que incrementa la demanda energética y la emisión de contaminantes.
- Producción industrial (IPI). Un aumento en la actividad productiva tiende a elevar la emisión de partículas  $PM_{10}$ , especialmente en sectores con alta dependencia de combustibles fósiles.
- Condiciones laborales (SICK y WAGE). Un entorno laboral más saludable y salarios adecuados pueden favorecer la adopción de tecnologías limpias, al incentivar a las empresas a mejorar sus prácticas ambientales.
- Crecimiento económico (GDP). Un aumento en el PIB puede estar acompañado de un incremento en el consumo de recursos y en la contaminación, a menos que se implementen políticas sostenibles.
- Patrones de movilidad. La concentración de  $PM_{10}$  también está influenciada por la cantidad de vehículos en circulación, lo que resalta la importancia de políticas de transporte sostenible.

Para mitigar los efectos negativos de la contaminación del aire, es fundamental adoptar un enfoque sistémico que considere la interconexión entre la actividad industrial, la economía y el medio ambiente. Entre las estrategias clave para reducir la concentración de  $PM_{10}$  se encuentran:

- Uso de tecnologías limpias en procesos industriales para minimizar emisiones.
- Regulación del tiempo de trabajo y la productividad para optimizar la eficiencia sin aumentar el impacto ambiental.
- Fomento de modelos de producción sostenibles basados en la economía circular.
- Inversión en transporte público y movilidad sostenible para reducir la contaminación derivada del tráfico vehicular.

La calidad del aire en Cantabria es un reflejo de su modelo económico e industrial, por lo que su mejora requiere acciones coordinadas entre empresas, administraciones y la sociedad. La gestión sostenible de la contaminación atmosférica no solo beneficia al medio ambiente, sino que también contribuye a la salud pública y al bienestar socioeconómico.

### **6.1.5. Impacto de un evento externo. La crisis sanitaria COVID-19**

Bajo la asunción del carácter dinámico del sistema, se asume que las relaciones entre los aspectos involucrados evolucionan con el tiempo. Además, bajo el paradigma de la complejidad es intuitivo el hecho de que eventos o alteraciones relevantes del sistema en cualquiera de los ámbitos tenga su repercusión en los restantes ámbitos, pero ¿es realmente así?, ¿cómo se comporta el sistema ante eventuales acontecimientos extremos como una crisis económica o sanitaria global?

### **INTRODUCCIÓN A LOS EFECTOS DE LA CRISIS SANITARIA COVID-19**

La pandemia de COVID-19 ha generado efectos sin precedentes en la sostenibilidad global, impactando significativamente en los sistemas económicos, industriales, sociales y ambientales. Desde la declaración de la pandemia en 2020, se han implementado medidas de contención a nivel mundial que han afectado gravemente a los sectores productivos, alterando las dinámicas laborales, la productividad y el comercio internacional. La crisis sanitaria no solo ha puesto en evidencia la vulnerabilidad de los sistemas socioeconómicos, sino que también ha reconfigurado las prioridades en términos de sostenibilidad y resiliencia.

Uno de los aspectos más destacados de la crisis ha sido su impacto sobre la estabilidad industrial y la producción global. Durante los primeros meses de confinamiento, muchas empresas experimentaron interrupciones en sus cadenas de suministro, cierres temporales y una reducción drástica en la demanda de bienes y servicios. Esto ha obligado a las industrias a replantear su enfoque hacia estrategias más resilientes y sostenibles, promoviendo la digitalización y la adopción de tecnologías innovadoras para mitigar futuras crisis similares (Feng, 2023).

En el ámbito del transporte y la movilidad, la pandemia ha afectado de manera significativa a la industria aeronáutica, uno de los sectores con mayor huella de carbono. Las restricciones de movilidad han provocado una disminución drástica de los vuelos comerciales, afectando a las aerolíneas y su sostenibilidad a largo plazo. Aunque algunas medidas de adaptación, como la reducción de rutas y el uso de aeronaves más eficientes, han sido implementadas, la crisis ha puesto de manifiesto la fragilidad del sector y la necesidad de estrategias sostenibles para garantizar su viabilidad en el futuro (Zeng, 2023).

El turismo, otro sector clave de la economía global, también ha sido severamente afectado. Con las restricciones a la movilidad y el cierre de fronteras, la industria turística ha experimentado una crisis sin precedentes, con pérdidas económicas masivas y la reducción de empleos en hoteles, aerolíneas y operadores turísticos. La pandemia ha impulsado la necesidad de un modelo turístico más sostenible, enfocado en la diversificación de mercados y la digitalización de servicios (Abrar et al., 2021).

A nivel macroeconómico, la crisis ha evidenciado desigualdades sociales y ha acentuado problemas estructurales en la economía global. Factores como el aumento de la pobreza, la inseguridad alimentaria y la precarización del empleo han sido exacerbados por los efectos de la pandemia, lo que ha generado una mayor presión sobre los gobiernos y las instituciones para implementar políticas de recuperación inclusivas y sostenibles (Wei et al., 2021).

Desde una perspectiva ambiental, la pandemia ha tenido un impacto mixto en la sostenibilidad. Por un lado, las restricciones de movilidad y la paralización de actividades industriales redujeron significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero y mejoraron la calidad del aire en muchas ciudades del mundo. Sin embargo, el incremento en el uso de materiales desechables, como mascarillas y guantes, ha generado un nuevo desafío en términos de residuos y contaminación. A largo plazo, la pandemia ha resaltado la necesidad de integrar la sostenibilidad en los procesos de

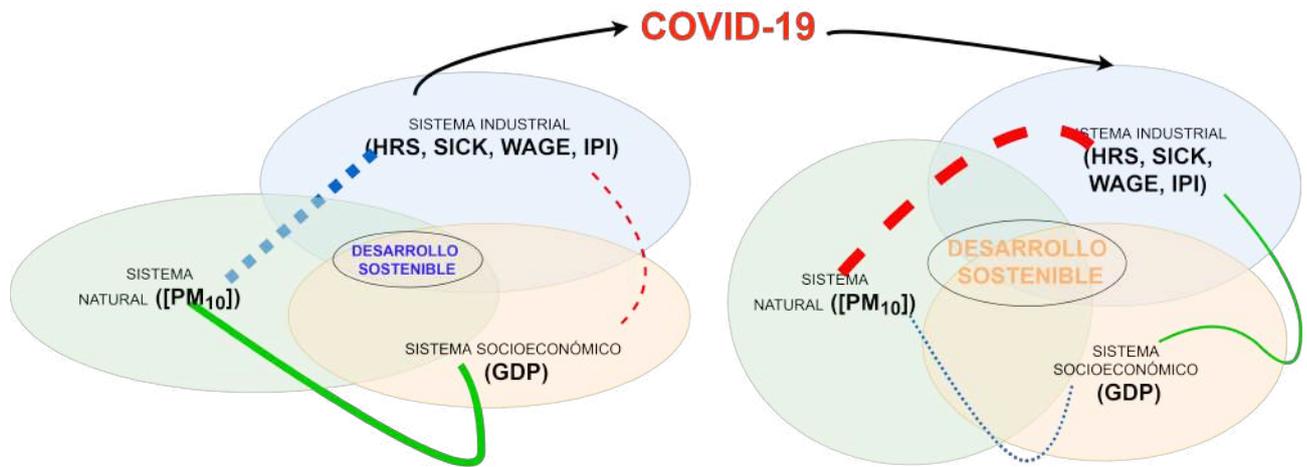


Figura 6.2: Representación conceptual de la potencial transformación de un SES a causa de un evento extremo como el COVID-19.

producción y consumo, evitando que futuras crisis generen impactos negativos en el medio ambiente (Begum et al., 2021).

Dado que la crisis sanitaria ha demostrado tener un impacto transversal en la sostenibilidad de los sistemas industriales y económicos, resulta fundamental analizar cómo estas relaciones han evolucionado antes y después de la pandemia. Para ello, se ha comparado la dinámica del sistema en dos períodos diferenciados. El período anterior al COVID-19, abarcando desde el primer trimestre de 2008 (momento desde el cual hay datos) hasta el último trimestre de 2019, que incluye 47 datos. El segundo período, es el período completo, compuesto por 52 datos, y abarca desde el primer cuatrimestre de 2008 hasta el último trimestre de 2020 incluido.

Aunque la muestra posterior a la COVID-19 es relativamente corta, el análisis econométrico permite detectar tendencias emergentes y cambios en los patrones de relación, los cuales pueden ser interpretados como señales de transformaciones estructurales.

La Figura 6.2 muestra la potencial transformación de un SES a raíz de un evento extremo, como la crisis sanitaria del COVID-19. La figura representa el carácter dinámico en el tiempo de las relaciones y como la situación de equilibrio se puede ver alterada por un evento externo relevante, recuperando el equilibrio posteriormente. En la figura se observan las relaciones entre los sistemas natural, industrial y socioeconómico, representados por las variables del estudio y la transformación del sistema y sus relaciones.

## 6.2. Metodología

### 6.2.1. Fuentes de datos

Una fuente de datos fiable se caracteriza por su precisión, consistencia, completitud y actualidad (Wang & Strong, 1996). La validez de los datos también depende de la metodología utilizada para recopilarlos y procesarlos, así como de la transparencia de estos procesos (Lee, 2010). Además, las fuentes de datos confiables deben ser capaces de minimizar errores sistemáticos y aleatorios para asegurar la reproducibilidad de los resultados (Karr et al., 2006). En este contexto, las instituciones estadísticas oficiales juegan un papel fundamental, ya que proporcionan datos estructurados y validados que son ampliamente utilizados en la investigación y el desarrollo de políticas públicas.

El Instituto Nacional de Estadística (INE) de España es la entidad oficial encargada de recopilar, analizar y publicar datos estadísticos sobre diversos aspectos económicos, demográficos, sociales y ambientales del país. Fundado en 1945, el INE tiene como misión proporcionar información estadística objetiva y de alta calidad para el desarrollo de políticas públicas y la toma de decisiones en diferentes ámbitos. Sus estadísticas incluyen datos sobre población, economía, empleo, precios, y muchas otras áreas relevantes para el análisis social y económico. El INE sigue estrictos estándares metodológicos y de calidad para asegurar la fiabilidad y validez de los datos que produce, siendo una fuente de referencia tanto a nivel nacional como internacional.

El Instituto Cántabro de Estadística (ICANE) es la entidad oficial responsable de la producción y difusión de estadísticas en la comunidad autónoma de Cantabria, España. Establecido para proporcionar información estadística específica de la región, el ICANE juega un papel crucial en el análisis y desarrollo de políticas a nivel regional. Sus actividades incluyen la recopilación, análisis y publicación de datos sobre economía, demografía, salud, educación y otros aspectos sociales y económicos de Cantabria. Al igual que el INE, el ICANE sigue rigurosos protocolos metodológicos para asegurar la calidad y fiabilidad de sus estadísticas, ofreciendo datos cruciales para investigadores, gobiernos y el público en general.

### 6.2.2. Recolección de los datos del estudio

La recopilación de datos de las procedentes de las fuentes que se acaban de mencionar se efectuó tal como se describe a continuación.

En el portal del INE, en el apartado "*Mercado laboral*" y el subapartado "*Salarios y costes laborales*", se accedió a la Encuesta Trimestral de Coste Laboral, que proporciona las encuestas correspondientes a las siguientes variables:

- **WAGE.** Coste laboral por trabajador, desglosado por comunidad autónoma, sectores de actividad, componentes del coste y período. Esta encuesta permite descargar datos en formato *.xls* y *.csv*, seleccionándose el formato Excel (*.xls*) para la recopilación de los datos. Se obtuvieron datos específicos para la comunidad autónoma de Cantabria, seleccionando el sector de la industria y considerando el coste salarial total. El período más antiguo disponible corresponde al primer trimestre de 2008 y se seleccionaron los datos hasta el último trimestre de 2020, sumando un total de 52 observaciones.
- **HRS.** Tiempo de trabajo por trabajador y mes, desglosado por comunidad autónoma, tipo de jornada y sectores de actividad. Esta encuesta permite filtrar los datos por comunidad autónoma, tipo de jornada, sector de actividad según la Clasificación Nacional de Actividades Económicas (CNAE) 2009, tipo de tiempo de trabajo y período. El límite inferior del período de análisis proporcionado por la encuesta corresponde al primer trimestre de 2008. Se seleccionaron datos hasta el año 2021, obteniendo un total de 52 observaciones para el sector industrial, incluyendo las jornadas parciales y completas, y considerando las horas pactadas.
- **IPI.** En el apartado "*Industria, energía y construcción*", dentro del subapartado "*Industria y energía*", se accedió a los "*Índices de producción industriales*" en la encuesta "*General y por destino económico de los bienes. Nacional y Comunidades Autónomas*". Esta encuesta permite filtrar los datos por comunidad autónoma, destino económico de los bienes, tipo de índice y tasas, y período (mensual). Para los fines de este análisis, se seleccionaron datos de la comunidad autónoma de Cantabria, con el destino económico de "*industria total*", usando el índice como indicador y abarcando el período de 2008 a 2021.

En la página web del ICANE, en el apartado "*Cuentas Económicas*" y dentro de "*Datos regionales*", se encuentra la encuesta "*Contabilidad trimestral de Cantabria*", que permite acceder a datos del PIB regional (GDP). Los datos se pueden filtrar por trimestre, sector, tipo de ajuste y variable. Para mantener la consistencia con otras encuestas, se seleccionó el mismo período de análisis, desde el primer trimestre de 2008 hasta el último trimestre de 2020. En este caso, se eligió el PIB total, que

incluye todos los sectores productivos, con datos en bruto (sin ajuste) y en formato de índice para representar las series temporales.

Para la obtención de los datos correspondientes al número de bajas por enfermedad profesional (SICK), se utilizó la página del INSST. En el apartado "*Documentación*" y subapartado "*Documentos técnicos*", se encuentra la "*Encuesta Nacional de Condiciones de Trabajo*", que abarca los años 1988 a 2024. Para este estudio, se revisaron los documentos individuales de la encuesta para recopilar el número de bajas por enfermedad laboral en formato trimestral.

Los datos de concentración de material particulado en el aire se obtuvieron de la página del ICA-NE, en el apartado "*Territorio y Medio ambiente*", subapartado "*Medio ambiente*", en la sección "*Calidad del aire*". Aquí se accede a la estadística "*Concentración media de: partículas, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono y ozono*". Entre todos los contaminantes, se seleccionó el  $PM_{10}$ , ya que es un subproducto directo de muchas actividades industriales como la combustión de combustibles fósiles, la manipulación de materiales y las emisiones de polvo, lo que lo convierte en el contaminante más representativo de la actividad industrial de entre todos los disponibles.

### 6.2.3. Herramientas para el tratamiento de los datos

Para realizar un análisis riguroso y fiable en el ámbito de la investigación científica y en el desarrollo de políticas, se hace necesario el uso de herramientas especializadas que permitan tanto el procesamiento como la interpretación de grandes volúmenes de datos y literatura académica.

Adicionalmente a las herramientas de análisis bibliométrico empleada anteriormente, VOSviewer, para el análisis de datos se empleó el software especializado Eviews 12, una herramienta de análisis econométrico y estadístico ampliamente utilizada en la investigación académica. Este software es conocido por su facilidad de uso y su interfaz gráfica intuitiva, lo que facilita el trabajo con datos económicos y financieros. Algunas de sus características clave incluyen:

- **Análisis de Series Temporales:** EViews proporciona una amplia gama de herramientas para el análisis de series temporales, incluyendo MARIMA, MARGCH, MVAR, y muchas otras técnicas avanzadas.

- **Modelado Econométrico:** Permite realizar regresiones lineales y no lineales, estimaciones por Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO), y técnicas de estimación más avanzadas como Mínimos Cuadrados en Dos Etapas (MC2E).
- **Gráficos y Visualización de Datos:** EViews facilita la creación de gráficos de alta calidad y la visualización de datos de manera interactiva.
- **Integración de Datos:** Soporta la importación y exportación de datos en múltiples formatos (Excel, CSV, SQL, etc.), lo que facilita el manejo de grandes bases de datos.
- **Automatización:** Incorpora su lenguaje de programación permitiendo la automatización de tareas repetitivas y la creación de scripts para análisis complejos.

EViews es una elección adecuada para investigadores que buscan un entorno robusto y fácil de usar para el análisis econométrico y estadístico.

#### 6.2.4. Fundamentos teóricos de MARDL

La herramienta de software permite analizar el comportamiento conjunto de las series temporales de datos a largo plazo, relacionando los aspectos ambientales (concentración de  $PM_{10}$ ), los aspectos industriales (HRS, SICK, WAGE e IPI) y el entorno económico (GDP).

Desde la perspectiva de los MARDL, se va a analizar la dependencia de la concentración de  $PM_{10}$  con sus propios valores pasados y con los del resto de variables, así como los valores actuales de estas.

La formulación general y detallada se presenta en el Anexo A: Técnicas Cuantitativas. En este apartado se presentan las expresiones aplicadas al caso de estudio.

La ecuación del MARDL, en base a la expresión (A.3) del Anexo A, adquiere la forma de la expresión

$$\begin{aligned}
 PM_{10,t} = & \alpha + \sum_{i=1}^p \beta_1 PM_{10,t-i} + \sum_{j=0}^q \theta_{1,j} HRS_{t-j} + \sum_{k=0}^r \theta_{2,k} SICK_{t-k} \\
 & + \sum_{l=0}^s \theta_{3,l} WAGE_{t-l} + \sum_{m=0}^u \theta_{4,m} IPI_{t-m} + \sum_{n=0}^v \theta_{5,n} GDP_{t-n} + \epsilon_t,
 \end{aligned} \tag{6.1}$$

siendo

- $PM_{10}$  la variable dependiente,

- $HRS_t, SICK_t, WAGE_t, IPI_t, GDP_t$  las variables independientes o predictores,
- $p, q, r, s, u, v$  los retrasos o períodos,
- $\alpha$  es la constante del modelo, y
- $\epsilon_t$  es el término de error aleatorio.

Diferenciando la expresión, se separan los efectos a corto plazo, representados a través de las diferencias, y los efectos a largo plazo, representados por los términos en sus niveles. Las expresiones (A.4) y (A.5) del Anexo A, se transforman en las expresiones

$$\begin{aligned}
 \Delta PM_{10,t} &= \alpha + \lambda (\beta_0 PM_{10,t-i} - \theta_1 HRS_{t-1} - \theta_2 SICK_{t-1} - \theta_3 WAGE_{t-1} - \theta_4 IPI_{t-1} - \theta_5 GDP_{t-1}) \\
 &= + \sum_{i=1}^{p-1} \beta_1 \Delta PM_{10,t-i} + \sum_{j=0}^{q-1} \theta_{1,j} \Delta HRS_{t-j} + \sum_{k=0}^{r-1} \theta_{2,k} \Delta SICK_{t-k} \\
 &= + \sum_{l=0}^{s-1} \theta_{3,l} \Delta WAGE_{t-l} + \sum_{m=0}^{u-1} \theta_{4,m} \Delta IPI_{t-m} + \sum_{n=0}^{v-1} \theta_{5,n} \Delta GDP_{t-n} + \epsilon_t, y
 \end{aligned} \tag{6.2}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta PM_{10,t} &= \alpha + \lambda ECT_{t-1} + \sum_{i=1}^{p-1} \gamma_i \Delta PM_{10,t-i} + \sum_{j=0}^q \theta_{1,j} \Delta HRS_{t-j} + \sum_{k=0}^r \theta_{2,k} \Delta SICK_{t-k} \\
 &+ \sum_{l=0}^s \theta_{3,l} \Delta WAGE_{t-l} + \sum_{m=0}^u \theta_{4,m} \Delta IPI_{t-m} + \sum_{n=0}^v \theta_{5,n} \Delta GDP_{t-n} + \epsilon_t
 \end{aligned} \tag{6.3}$$

respectivamente, donde:

- $(\beta_0 PM_{10,t-i} - \theta_1 HRS_{t-1} - \theta_2 SICK_{t-1} - \theta_3 WAGE_{t-1} - \theta_4 IPI_{t-1} - \theta_5 GDP_{t-1})$  representa el término de largo plazo representativo del equilibrio entre variables en niveles,
- $\lambda$  es el coeficiente de corrección de error que representa la velocidad de ajuste al equilibrio tras una desviación, y
- $\Delta$  capturan los efectos a corto plazo.

El término de corrección de error viene dado por

$$\begin{aligned}
ECT_{t-1} &= PM_{10,t-1} - \left(\frac{\theta_1}{1-\beta_0}\right) HRS_{t-1} - \left(\frac{\theta_2}{1-\beta_0}\right) SICK_{t-1} \\
&= - \left(\frac{\theta_3}{1-\beta_0}\right) WAGE_{t-1} - \left(\frac{\theta_4}{1-\beta_0}\right) IPI_{t-1} - \left(\frac{\theta_5}{1-\beta_0}\right) GDP_{t-1}.
\end{aligned} \tag{6.4}$$

La determinación de si las variables establecen un comportamiento conjunto o equilibrio a largo plazo se lleva a cabo mediante la prueba de límites, que se orienta a determinar los coeficientes de largo plazo ( $\theta$ ) estadísticamente significativos.

La configuración óptima de retrasos para los MARDL se ha obtenido mediante la aplicación del Criterio de Información de Akaike (CIA), que es una medida utilizada para seleccionar el modelo estadístico que mejor se ajusta a los datos, equilibrando precisión y simplicidad. En el contexto de los MARDL, el CIA se utiliza para determinar la configuración óptima de retrasos, probando diversas combinaciones para identificar la que mejor ajuste proporciona. Introducido por Hirotugu Akaike en 1974, este criterio penaliza la complejidad del modelo para evitar el sobreajuste (Kripfganz & Schneider, 2023).

### 6.3. Resultados

Las variables elegidas, entre 2008 y 2021, se representaron gráficamente tal como se muestra en la Figura 6.3.

El análisis estadístico preliminar de las variables incluyó la evaluación de la distribución, asimetría y curtosis, así como la prueba PJB para comprobar que los datos siguen una función de distribución de probabilidad normal. Este análisis permitió identificar patrones, valores atípicos o desviaciones que podrían influir en la aplicabilidad de los modelos econométricos, como el MARDL, asegurando que los métodos empleados se ajusten a las características fundamentales de los datos.

Las estadísticas fundamentales de las variables, para el período completo, se muestran a continuación en la Tabla 6.2.

- HRS: La asimetría, de 0,122551, indica una ligera asimetría positiva (la cola de la distribución es más larga hacia la derecha). El valor de curtosis, 3,121818, ligeramente superior a 3,0, sugiere una distribución ligeramente más apuntada, lo cual podría indicar una leve concentración de valores cerca de la media. La PJB 0,162316 con una probabilidad de 0,922048, mayor que 0,05, indica que no hay evidencia significativa para rechazar la hipótesis de normalidad, lo que sugiere que la variable HRS es bastante cercana a la normalidad.

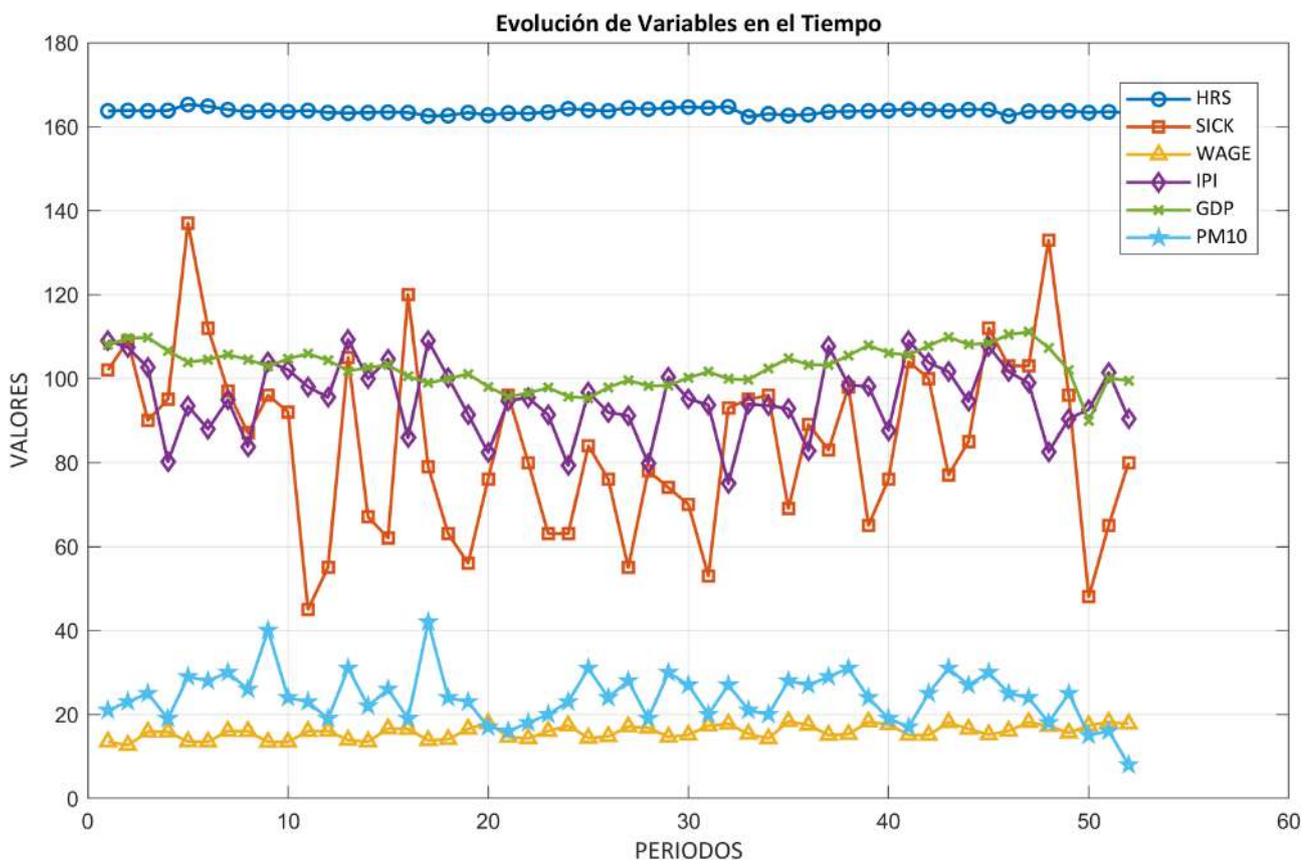


Figura 6.3: Series temporales representativas del sistema.

Tabla 6.2: Estadísticas fundamentales de las series de datos, para el período completo.

Parámetro	HRS	SICK	WAGE (€/h)	IPI (%)	GDP (%)	PM <sub>10</sub> (µg/cm <sup>3</sup> )
Media	163,6038	84,75000	15,75827	95,29219	102,8115	24,11538
Mediana	163,6500	84,50000	15,89000	95,00250	103,0500	24,00000
Máximo	165,2000	137,0000	18,32000	109,3190	111,1000	42,00000
Mínimo	162,3000	45,00000	12,64000	75,01300	89,90000	8,000000
$\sigma$	0,611319	20,83067	1,584357	8,711369	4,585555	6,044456
$S$	0,122551	0,234168	-0,067296	-0,280507	-0,267698	0,360676
$K$	3,121818	2,735323	1,884450	2,438109	2,767446	4,135754
valor PJB	0,162316	0,627016	2,735560	1,365990	0,738249	3,922287
Prob. PJB	0,922048	0,730878	0,254672	0,505102	0,691339	0,140697

- **SICK:** La asimetría, 0,234168, es ligeramente positiva, mientras el valor de curtosis (2,735323), cercano a 3,0, indica una distribución aproximadamente normal. La PJB 0,627016, con una probabilidad de 0,730878, confirma que no hay evidencia para rechazar la normalidad, de modo que la variable SICK presenta una función de densidad de probabilidad cercana a la normal.
- **WAGE:** La asimetría, -0,067296, es ligeramente negativa, mientras que la curtosis, 1,884450, menor que 3,0, sugiere una distribución más achatada que una distribución normal. La PJB 2,735560, con una probabilidad de 0,254672, mayor que 0,05, indica que no hay evidencia suficiente para rechazar la normalidad. Así, la función de densidad de probabilidad de WAGE también puede considerarse normal.
- **IPI:** La asimetría negativa, -0,280507, muestra que la cola de la distribución es más larga hacia la izquierda, y la curtosis: 2,438109, menor que 3,0, indica una distribución menos puntiaguda y con colas más ligeras que una distribución normal. La PJB 1,365990, con una probabilidad de 0,505102, al ser mayor que 0,05, permite asumir una función de densidad de probabilidad normal en la variable IPI.
- **GDP:** La asimetría, -0,267698, es ligeramente negativa, mientras que la curtosis, 2,767446, (cercana a 3,0) sugiere una distribución aproximadamente normal. La PJB 0,738249, con una probabilidad de 0,691339, sugiere no hay evidencia para rechazar la normalidad, de modo que la variable GDP presenta una distribución cercana a la normal.

- $PM_{10}$ : La asimetría, 0,360676, indica una ligera asimetría positiva (la cola de la distribución se extiende un poco más hacia la derecha). La curtosis, de 4,135754, ligeramente superior a 3,0, indica una distribución con un pico más pronunciado y colas algo más pesadas que una distribución normal, sugiriendo que, aunque la mayoría de los valores se concentran cerca de la media, hay algunas observaciones más alejadas que podrían considerarse valores atípicos. La PJB 3,922287 con una probabilidad de 0,140697, mayor que 0,05, indica que no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis de normalidad.

La estabilidad y menor variabilidad de todas las variables, a excepción de SICK, permiten la utilización de modelos econométricos tradicionales para su estudio, como la regresión lineal, que suelen requerir datos con distribuciones estables y cercanas a la normalidad para ofrecer resultados fiables.

Aunque los días de baja por enfermedad (SICK) muestran una distribución normal, tienen una variabilidad alta, lo que significa que hay periodos en los que los días de enfermedad aumentan mucho. Esto sugiere que el sistema de salud debería tener recursos adicionales o planes de respuesta rápida para hacer frente a estos picos de demanda. En este caso, los modelos econométricos deben ser capaces de capturar las fluctuaciones y variabilidad alta, utilizando métodos que ponderen estas subidas y bajadas.

Cabe destacar que este análisis preliminar también se llevó a cabo para el período anterior a la crisis sanitaria, y las estadísticas fundamentales no cambian sustancialmente, siendo incluidas en el Anexo B.

### **6.3.1. Independencia de las variables. Correlación y multicolinealidad**

La matriz de correlación proporciona información útil para detectar la presencia de correlación entre pares de variables, proporcionando información fundamental sobre la idoneidad de las variables seleccionadas para la elaboración del modelo. Cuando dos o más variables están correlacionadas en un modelo de regresión, se puede proporcionar información redundante, dificultando la determinación del efecto individual de cada variable en la variable dependiente (Wooldridge, 2016). Los valores a partir de entre 0,8 – 0,9 son indicativos de que las variables están fuertemente correlacionadas originando problemas potenciales, ya que sus efectos se confunden dificultando la interpretación del modelo (Kim, 2019).

En las Tablas 6.3 y 6.4 se muestran las matrices de correlación para ambos conjuntos de datos; el conjunto de datos anterior al COVID-19, y el período completo. Se puede comprobar que no existen valores de correlación entre variables superiores a 0,8, lo que sugiere que no hay problemas evidentes por este efecto.

Tabla 6.3: *Matriz de correlación para el período anterior al COVID-19.*

	<b>HRS</b>	<b>SICK</b>	<b>WAGE</b>	<b>IPI</b>	<b>GDP</b>	$PM_{10}$
<b>HRS</b>	1,000000	0,103390	0,129580	-0,203163	0,349160	0,094760
<b>SICK</b>	0,103390	1,000000	0,131134	-0,037642	-0,166520	0,054933
<b>WAGE</b>	0,129580	0,131134	1,000000	-0,395491	0,146493	0,315430
<b>IPI</b>	-0,203163	-0,037642	-0,395491	1,000000	-0,499661	0,106355
<b>GDP</b>	0,349160	-0,166520	0,146493	-0,499661	1,000000	0,380645
$PM_{10}$	0,094760	0,054933	0,315430	0,106355	0,380645	1,000000

Tabla 6.4: *Matriz de correlación para el período completo.*

	<b>HRS</b>	<b>SICK</b>	<b>WAGE</b>	<b>IPI</b>	<b>GDP</b>	$PM_{10}$
<b>HRS</b>	1,000000	0,149520	0,145373	-0,329562	0,344261	0,198738
<b>SICK</b>	0,149520	1,000000	0,134346	-0,071983	-0,147062	0,085669
<b>WAGE</b>	0,145373	0,134346	1,000000	-0,362676	0,054638	0,408691
<b>IPI</b>	-0,329562	-0,071983	-0,362676	1,000000	-0,480829	0,010010
<b>GDP</b>	0,344261	-0,147062	0,054638	-0,480829	1,000000	0,322938
$PM_{10}$	0,198738	0,085669	0,408691	0,010010	0,322938	1,000000

La multicolinealidad va más allá de la correlación entre pares de variables y se presenta cuando una variable en un modelo de regresión está altamente correlacionada con una combinación de otras variables independientes, en lugar de con una sola. Este fenómeno supone un problema, ya que implica que algunas variables aportan información redundante sobre la variable dependiente dificultando la distinción del efecto individual de cada variable sobre el resultado, reduciendo la precisión del modelo.

Para evaluar la multicolinealidad se emplea el Factor de Inflación de la Varianza (FIV) (Jou et al., 2014), el cual mide cuánto aumenta la varianza o incertidumbre del coeficiente de una variable cuando está correlacionada con otras variables.

Para garantizar la no existencia de multicolinealidad se calculó el FIV para ambos períodos (Tablas 6.5 y 6.6), teniendo en cuenta el criterio de que para valores de FIV superiores a 5 o 10 señala

la existencia de problemas de multicolinealidad (O'Brien, 2007). De los resultados del cálculo de FIV puede deducirse que no hay problemas de multicolinealidad entre las variables.

Tabla 6.5: *FIV para el período anterior al COVID-19.*

	<b>HRS</b>	<b>SICK</b>	<b>WAGE</b>	<b>IPI</b>	<b>GDP</b>
FIV	1,1298	1,5879	2,2519	2,4050	1,8591

Tabla 6.6: *FIV para el período completo.*

	<b>HRS</b>	<b>SICK</b>	<b>WAGE</b>	<b>IPI</b>	<b>GDP</b>
FIV	1,1176	1,6667	1,9829	1,9354	1,7070

### 6.3.2. Estabilidad de los datos iniciales

Una vez evaluada la independencia entre las variables mediante la correlación y el análisis de multicolinealidad, es fundamental asegurar que las propiedades estadísticas de estas variables sean estables a lo largo del tiempo, para garantizar la validez y consistencia en los modelos que se desarrollarán.

Una serie temporal de datos es estacionaria si sus propiedades estadísticas, por ejemplo, la media y la varianza, no cambian con el tiempo; es decir, si muestra un comportamiento estable y predecible. Esta propiedad es fundamental en técnicas de análisis como MARDL, que requiere que las series sean estacionarias o se conviertan en estacionarias mediante transformaciones, como la diferenciación, para obtener resultados válidos y consistentes. La falta de estacionariedad podría producir resultados espurios debido a tendencias temporales sin relación real entre las variables, invalidando las inferencias sobre relaciones de largo plazo. La no estacionariedad es frecuente en sistemas de tipo natural y socioeconómicos sujetos a tendencias o cambios estructurales, siendo necesario recurrir a las pruebas analíticas de presencia de raíz unitaria, para concluir su estacionariedad.

La estacionariedad de las series se verificó en base a las pruebas PADF, PPP y PKPSS, que evalúan la estacionariedad en series temporales desde diferentes perspectivas. Las PADF y PPP asumen que la serie es no estacionaria, por lo que una probabilidad menor a 0,05 indica que se rechaza esta hipótesis, sugiriendo que la serie es estacionaria. La PPP es más robusta frente a problemas de autocorrelación y heterocedasticidad en los errores. La PKPSS, por el contrario, parte de la hipótesis

de que la serie es estacionaria; se confirma esta hipótesis si el estadístico de prueba es inferior a los valores críticos al 1 %, 5 %, o 10 % y su probabilidad asociada es mayor a 0,05, lo cual refuerza la evidencia de estacionariedad. Utilizar las tres pruebas proporciona un análisis más completo, evaluando tanto la posibilidad de estacionariedad como de no estacionariedad en la serie.

Estas pruebas se ejecutaron mediante el software Eviews, proporcionando los resultados de la Tablas 6.7 y 6.8 para los períodos anterior al COVID-16 y el período completo. Como puede observarse, las variables HRS, SICK y  $PM_{10}$  son estacionarias en niveles, ya que cumplen con las tres pruebas de estacionariedad: PADF, PPP y PKPSS. Para las pruebas ADF y PP, los valores de probabilidad son inferiores a 0,05, lo que indica estacionariedad al nivel de significatividad del 5 %. Además, los valores de la prueba KPSS son superiores a 0,05 y no superan los valores críticos en los intervalos de confianza del 1 %, 5 % y 10 %, lo que refuerza que estas series son estacionarias y se integran en orden 0 ( $I(0)$ ). Esto significa que sus propiedades estadísticas, como la media y la varianza, permanecen constantes a lo largo del tiempo, y no es necesario reelaborar las series para convertirlas en estacionarias.

Tabla 6.7: Pruebas de raíz unitaria para el período anterior al COVID-19.

Variable	PADF t stat	PADF p-value	PPP t stat	PPP p-value	PKPSS	Nivel de integración
HRS	-3,5986	0,0095***	-3,5911	0,0097***	0,0816***	$I(0)$
SICK	-4,8293	0,0003***	-4,8486	0,0002***	0,2183***	$I(0)$
WAGE	-1,1870	0,6712	-5,7684	0,0000***	0,9754	
IPI	-2,3108	0,1739	-6,2030	0,0000***	0,2055***	$I(0)$
GDP	-0,6421	0,8498	-1,4068	0,5709	0,2390***	
$PM_{10}$	-6,3308	0,0000***	-6,3321	0,0000***	0,0665***	$I(0)$

Por otro lado, la variable IPI muestra resultados mixtos: es estacionaria según la PPP, pero no cumple con la PADF; sin embargo, la PKPSS confirma su estacionariedad en niveles, indicando que puede considerarse como  $I(0)$ . En contraste, WAGE y GDP no son estacionarias en niveles, lo que implica que presentan una raíz unitaria, siendo necesario aplicar una transformación, posiblemente diferenciando los datos, para evaluar su estacionariedad en un orden de integración superior, como  $I(1)$ , y así lograr un comportamiento estacionario (Box, G.E.P., Jenkins, G.M., 1970).

Tabla 6.8: Resultados de las pruebas de raíz unitaria en el período completo.

Variable	PADF t stat	PADF p-value	PPP t stat	PPP p-value	PKPSS	Nivel de integración
HRS	-3,7816	0,0055***	-3,7778	0,0056***	0,0857***	$I(0)$
SICK	-5,0240	0,0001***	-5,0240	0,0001***	0,1904***	$I(0)$
WAGE	-0,2779	0,9204	-5,6426	0,0000***	1,4249	
IPI	-2,7275	0,0770	-6,6257	0,0000***	0,1280***	$I(0)$
GDP	-2,4608	0,1309	-2,4288	0,1391	0,1605***	
$PM_{10}$	-5,3696	0,0000***	-5,4899	0,0000***	0,2925***	$I(0)$

## TRANSFORMACIÓN DE LOS DATOS

La transformación de las series de datos iniciales mediante diferenciación permite extraer la tendencia de cambio de los datos procesados, se realiza mediante la resta de dos valores sucesivos de la serie de datos, resultando en una nueva serie con un dato menos. Las series diferenciadas quedan tal cual se muestran en la Figura 6.4.

Sobre los datos diferenciados de las variables no estacionarias en niveles, se llevaron a cabo las pruebas de estacionariedad obteniendo los resultados recogidos en las Tablas 6.9 y 6.10.

Tabla 6.9: Resultados de las pruebas de raíz unitaria de las variables no estacionarias en niveles diferenciadas, en el período previo al COVID-19.

Variable	PADF t stat	PADF p-value	PPP t stat	PPP p-value	PKPSS	Nivel de integración
HRS						$I(0)$
SICK						$I(0)$
WAGE	-17,6836	0,0000***	-11,6608	0,0000***	0,1331***	$I(1)$
IPI						$I(0)$
GDP	-3,3532	0,0187**	-12,2892	0,0000***	0,1676***	$I(1)$
$PM_{10}$						$I(0)$

De los resultados mostrados en las Tablas 6.9 y 6.10, se comprueba que la diferenciación en orden 1, convierte las series WAGE, GDP y en estacionarias, siendo, por tanto, integradas en orden 1,  $I(1)$  en ambos períodos.

Por tanto, se obtiene que las series temporales tienen un orden de integración mixto:

- $I(0)$ : HRS, SICK, IPI y  $PM_{10}$ .

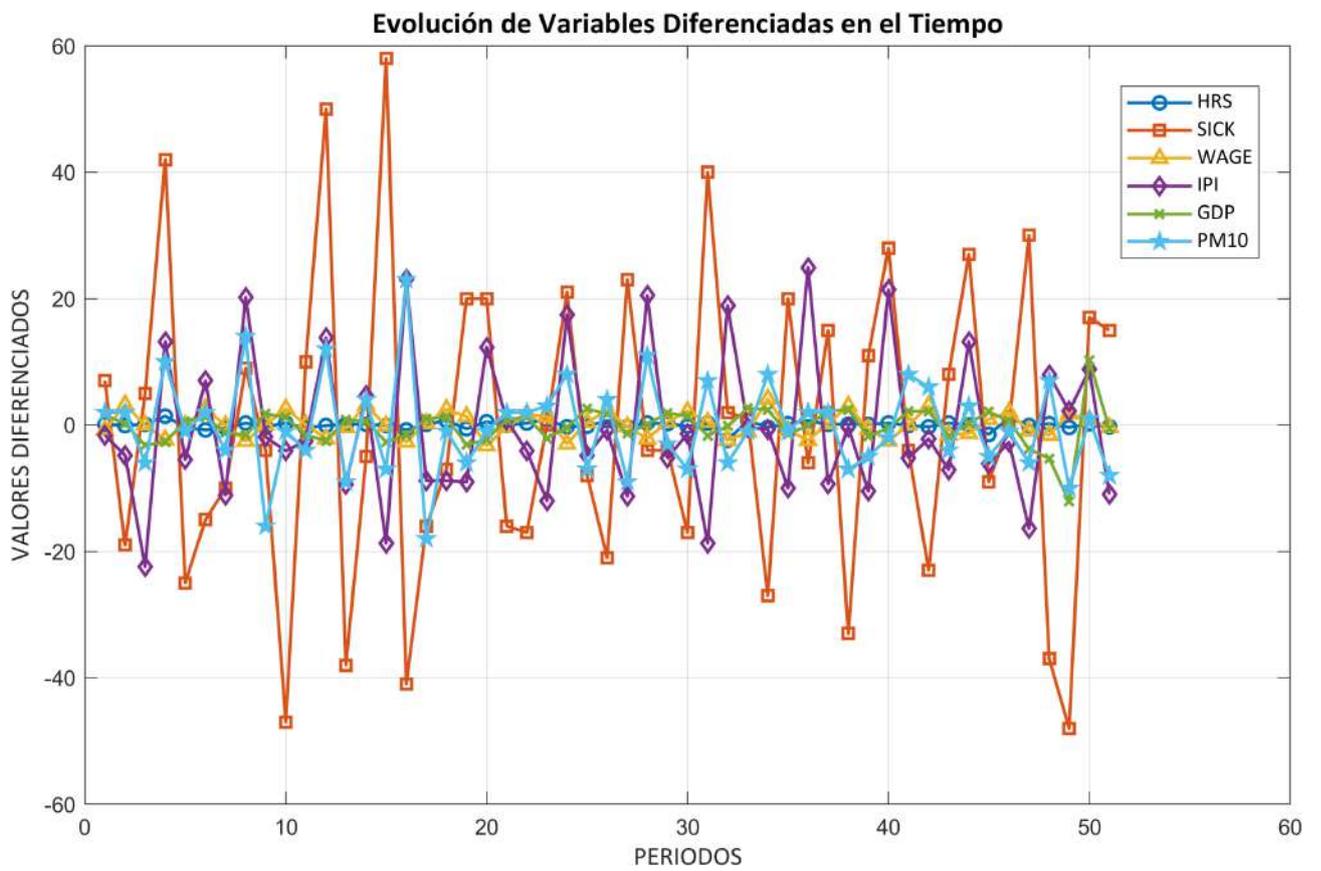


Figura 6.4: Series temporales diferenciadas.

Tabla 6.10: Resultados de las pruebas de raíz unitaria para las variables no estacionarias en niveles diferenciadas en el período completo.

Variable	PADF t stat	PADF p-value	PPP t stat	PPP p-value	PKPSS	Nivel de integración
HRS						
SICK						
WAGE	-17,8956	0,0000***	-19,1319	0,0001***	0,3372***	$I(1)$
IPI						
GDP	-7,4732	0,0000***	-7,8953	0,0000***	0,1821***	$I(1)$
$PM_{10}$						

- $I(1)$ : WAGE y GDP.

En estas condiciones de integración, de cara al estudio de las dinámicas del sistema, el MARDL es un método adecuado y flexible que permite el tratamiento de series temporales de datos integradas en orden 0,  $I(0)$  y orden 1,  $I(1)$ .

### 6.3.3. Determinación del número óptimo de retrasos y cointegración

La configuración óptima de retrasos para los MARDL se ha obtenido mediante la aplicación del criterio AIC, evaluado entre 12500 modelos para obtener la configuración óptima tal como se muestra en las Figuras 6.5 y 6.6.

Las configuraciones óptimas de retrasos (Anexo D) para  $PM_{10}$  HRS, SICK, WAGE, IPI y GDP, para cada uno de los períodos, son: 3, 1, 4, 4, 2, 4, para el período anterior al COVID-19 y 4, 3, 4, 4, 2, 4 para el período completo. Estos retrasos o períodos, de acuerdo con la frecuencia temporal de los datos empleados son trimestres y representan los períodos considerados para cada uno de los modelos en los cuales la concentración de  $PM_{10}$  presenta una relación óptima con las variables independientes y con sus propios valores pasados.

Previamente a la resolución de la expresión (6.2) para determinar los coeficientes a largo plazo, se confirmó la existencia de equilibrio mediante la realización de la prueba de límites, cuyos resultados, para los períodos anterior al COVID-19 y el período completo, se muestran a continuación en las Tablas 6.11 y 6.12.

La prueba de límites proporciona, para distintos tamaños de muestra, los valores críticos a partir de los cuales se acepta o rechaza la hipótesis nula de que no hay cointegración en caso de que los

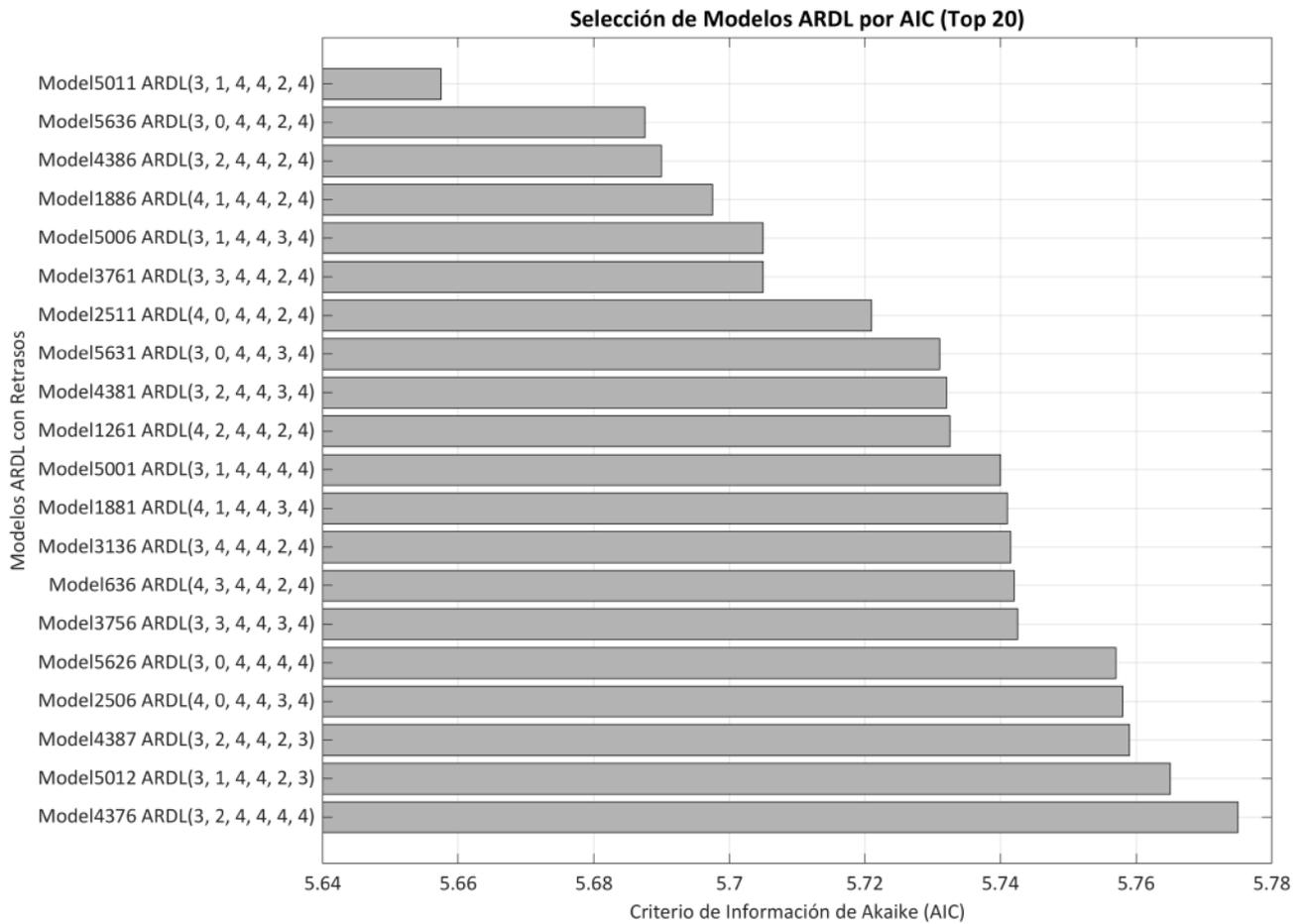


Figura 6.5: Selección del número óptimo de retrasos para el *MARDL* (período anterior al COVID-19).

valores obtenidos para el estadístico  $F$  sean inferiores o superiores. En ambos períodos, el resultado del estadístico  $F$  es superior a los correspondientes valores críticos,  $I(0)$  e  $I(1)$ , en los distintos tamaños de muestra evidenciando que los indicadores HRS, SICK, WAGE, IPI y GDP establecen relaciones de equilibrio o se mueven de forma conjunta, a largo plazo, con respecto al indicador representativo de concentración de  $PM_{10}$ .

El hallazgo de relaciones de equilibrio a largo plazo entre la concentración de  $PM_{10}$  y las variables industriales y económicas refleja que, pese a las fluctuaciones a corto plazo, el sistema tiende a moverse de forma conjunta en el largo plazo sugiriendo que el desarrollo económico, las condiciones laborales y la actividad industrial están intrínsecamente ligados a la estabilidad ambiental. Desde la perspectiva de los SES, este equilibrio refleja una interdependencia crítica: los cambios en un subsistema, como las condiciones económicas o laborales, tienen efectos prolongados sobre el medio ambiente. Este acople también tiene implicaciones estratégicas y en la formulación de políticas, ya

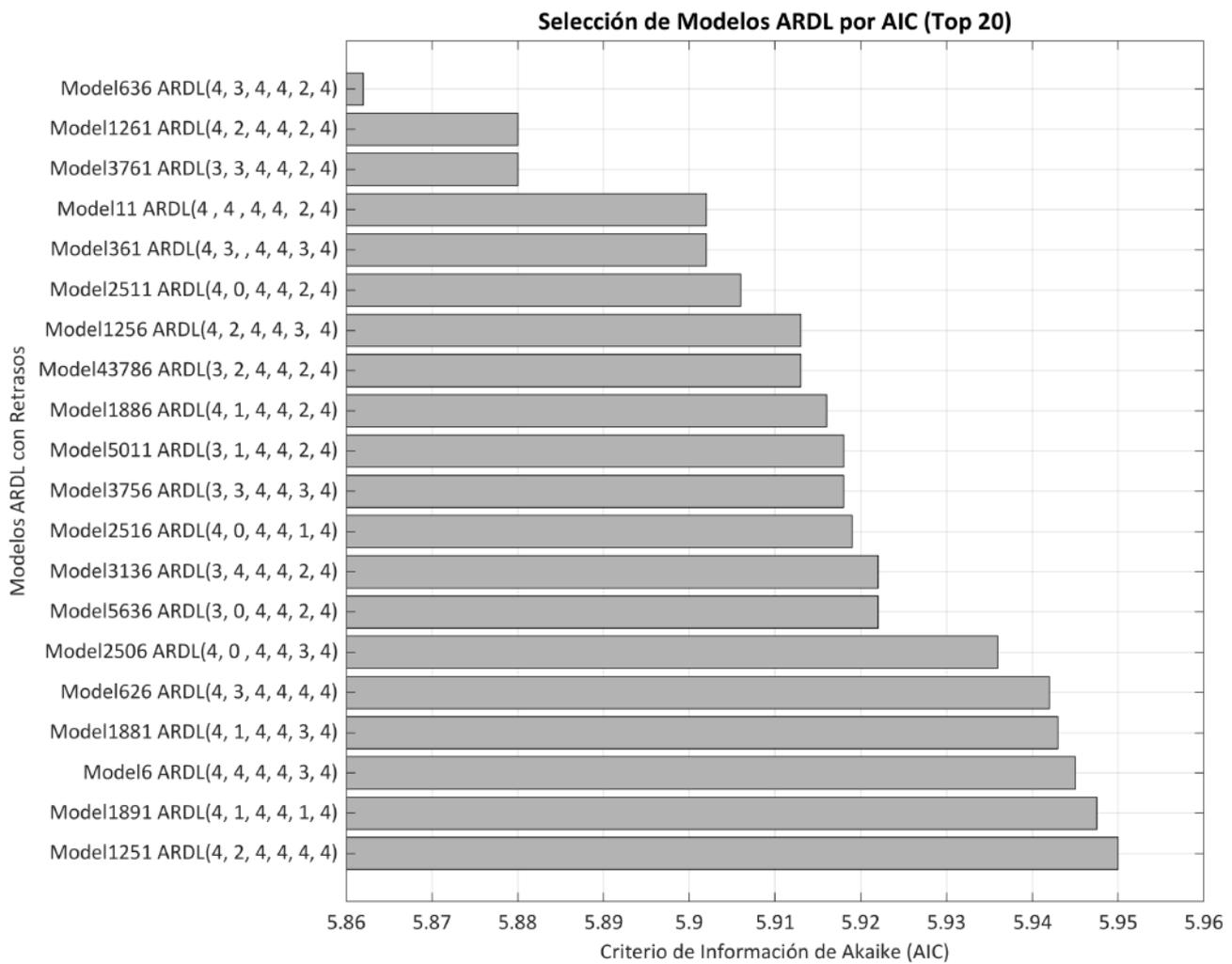


Figura 6.6: Selección del número óptimo de retrasos para el MARDL (período completo).

Tabla 6.11: Resultado de la prueba de límites para  $PM_{10}$  en el período completo.

Prueba de límites F		$H(0)$ : No existen relaciones en niveles				
Var	Estadísticas del test	Valor	Significancia	$I(0)$	$I(1)$	
$PM_{10}$	F-stat	8,610609	Asintótico $n = 1000$			
			10 %	2,8	3	
	k	5	5 %	2,39	3,38	
			2,5 %	2,7	3,73	
			1 %	3,06	4,15	
			Muestra $n = 50$			
	Tamaño real de la muestra	48	10 %	2,259	3,264	
			5 %	2,67	3,781	
			1 %	3,593	4,981	
	Muestra $n = 45$			10 %	2,276	3,297
				5 %	2,694	3,829
				1 %	3,674	5,019

Tabla 6.12: Prueba de cointegración para la concentración de  $PM_{10}$  para el modelo anterior al COVID-19.

Prueba de límites F		$H(0)$ : No existen relaciones en niveles				
Var	Estadísticas del test	Valor	Significancia	$I(0)$	$I(1)$	
$PM_{10}$	F-stat	10,58306	Asintótico $n = 1000$			
			10 %	2,08	3	
	k	5	5 %	2,39	3,38	
			2,5 %	2,7	3,73	
			1 %	3,06	4,15	
			Muestra $n = 50$			
	Tamaño real de la muestra	43	10 %	2,276	3,279	
			5 %	2,694	3,829	
			1 %	3,674	5,019	
	Muestra $n = 45$			10 %	2,306	3,353
				5 %	2,734	3,92
				1 %	3,657	5,256

que evidencia que la sostenibilidad ambiental requiere políticas integrales que consideren las dinámicas industriales y económicas de largo plazo para evitar desequilibrios sistémicos.

Además de la prueba de límites, el MARDL-LP-PL proporciona la relación de las variables independientes con respecto a la concentración de  $PM_{10}$  en el largo plazo, representadas por los coeficientes de las variables en sus niveles base ( $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_5$ ). Estos coeficientes se presentan en las Tablas 6.13 y 6.14. En las tablas, en color verde, se resaltan las influencias estadísticamente significativas en sentido contrario a la concentración de  $PM_{10}$  y, en color amarillo, las influencias estadísticamente significativas, en el mismo sentido que la concentración de  $PM_{10}$ .

Tabla 6.13: *Relaciones a largo plazo de HRS, SICK, WAGE, IPI y GDP, con respecto a la concentración de  $PM_{10}$  para el modelo anterior al COVID-19.*

Variable	Coefficiente	Error estándar	Estadístico t	Probabilidad
HRS47	0,729228	0,605680	1,203982	0,2434
SICK47	0,403766	0,088627	4,555812	0,0002
WAGE47	-3,101894	0,859256	-3,609978	0,0019
IPI47	0,662065	0,161378	4,102567	0,0006
GDP47	-1,152097	0,342563	-3,363167	0,0033
C	-24,57483	100,7850	-0,243834	0,8100

Tabla 6.14: *Relaciones a largo plazo de HRS, SICK, WAGE, IPI y GDP, con respecto a la concentración de  $PM_{10}$  para el modelo correspondiente al período completo.*

Variable	Coefficiente	Error estándar	Estadístico t	Probabilidad
HRS52	0,1539147	0,818011	1,881574	0,0738
SICK52	0,349758	0,096942	3,607908	0,0017
WAGE52	-1,422611	0,491606	-2,893806	0,0087
IPI52	0,579872	0,178336	3,251567	0,0038
GDP52	-1,044053	0,383727	-2,720825	0,0128
C	-182,0684	129,6703	-1,404087	0,1749

Las relaciones significativas a largo plazo, obtenidas en los MARDL-LP-PL para los períodos de 47 y 52 datos muestran, en ambos casos, que los indicadores de SICK, y el IPI muestran una relación positiva y estadísticamente significativa con el indicador de la concentración de  $PM_{10}$ , lo que sugiere que los costes ambientales asociados a la producción industrial también afectan a la a su nivel de actividad y al bienestar laboral, lo que puede actuar como un incentivo indirecto para que las empresas reduzcan su impacto ambiental a través de la adopción de prácticas más limpias. Estos dos aspectos muestran un acople entre los aspectos industriales y la contaminación por  $PM_{10}$ , reflejando

que un aumento en la actividad industrial contribuye significativamente a las emisiones contaminantes impactando en el bienestar laboral.

Sin embargo, los coeficientes negativos de WAGE y GDP evidencian un desacoplamiento entre el sector industrial y la contaminación por  $PM_{10}$ , lo cual puede deberse a una reorientación de la actividad industrial hacia sectores más limpios, así como por la adopción de innovaciones y mejoras en la senda de la reducción de impactos ambientales.

La comparación entre ambos períodos puede observarse en la Tabla 6.15, en la que puede observarse la reducción significativa de los coeficientes de los indicadores WAGE y GDP tras el COVID-19, lo que significa una reducción del desacoplamiento entre la actividad industrial y la concentración de  $PM_{10}$ , probablemente relacionadas con medidas orientadas a la reactivación de la actividad económica tras la pandemia, intensificada a costa de las regulaciones ambientales. Este efecto reactivador de la economía puede ser la causa de la significatividad marginal que cobra la variable HRS en el período postpandemia.

Tabla 6.15: *Comparativa del comportamiento a largo plazo en ambos períodos.*

Variable	47	52	Comentario
	observaciones (Coef./Sign.)	observaciones (Coef./Sign.)	
HRS	+0,7292 (No signif.)	+1,5391 (Marginal)	Impacto positivo mayor en el período más largo
SICK	+0,4038 (Signif.)	+0,3498 (Signif.)	Relación positiva consistente en ambos períodos.
WAGE	-3,1019 (Signif.)	-1,4226 (Signif.)	Impacto negativo más fuerte en el período más corto.
IPI	+0,6621 (Signif.)	+0,5799 (Signif.)	Relación positiva consistente.
GDP	-1,1521 (Signif.)	-1,0441 (Signif.)	Relación negativa consistente, pero menor en magnitud en el período más largo.

#### 6.3.4. Resiliencia y conexiones entre dominios y escalas temporales

La expresión MARDL-ECM, además de los términos a largo plazo, contiene los términos representativos del corto plazo representando distintos horizontes temporales. Los valores resultantes de la resolución de la expresión (A.14) se muestran en las Tablas 6.16 y 6.17.

Tabla 6.16: *MARDL-ECM para  $PM_{10}$  en el período anterior al COVID-19.*

Variable	Coefficiente	Error estándar	Estadístico t	Probabilidad
D( $PM_{10}47(-1)$ )	0,739373	0,145509	5,081285	0,0001
D( $PM_{10}47(-2)$ )	0,500296	0,114100	4,384709	0,0003
D(HRS47)	-0,199950	1,013050	-0,197374	0,8456
D(SICK47)	0,155202	0,038474	4,033954	0,0007
D(SICK47(-1))	-0,462368	0,073554	-6,286133	0,0000
D(SICK47(-2))	-0,215389	0,047840	-4,502295	0,0002
D(SICK47(-3))	-0,148310	0,037296	-3,976615	0,0008
D(WAGE47)	2,411877	1,302006	1,852431	0,0796
D(WAGE47(-1))	7,959691	1,921466	4,142509	0,0006
D(WAGE47(-2))	8,375846	1,702122	4,920824	0,0001
D(WAGE47(-3))	5,852233	1,342568	4,358985	0,0003
D(IPI47)	0,189552	0,133152	1,423577	0,1708
D(IPI47(-1))	-0,669318	0,155658	-4,299923	0,0004
D(GDP47)	1,430319	1,094700	1,306585	0,2069
D(GDP47(-1))	4,993803	1,143647	4,366559	0,0003
D(GDP47(-2))	3,102463	1,128391	2,749457	0,0127
D(GDP47(-3))	2,246115	0,946666	2,372658	0,0284
CointEq (-1)*	-1,992500	0,201814	-9,872971	0,0000
$R^2$	0,908164	Mean dependent var.		0,116279
Adjusted $R^2$	0,845716	S.D. dependent var.		7,813935
S.E. of regression	3,069237	Akaike info criterion		5,375620
Sum squared resid.	235,5054	Schwarz criterion		6,112867
Log likelihood	-97,57583	Hannan-Quinn criter.		5,647494
Durbin-Watson stat.	1,971001			

Los resultados de los MARDL-ECM en ambos períodos muestran una rápida velocidad de ajuste hacia el equilibrio a largo plazo, con coeficientes de corrección del error altamente significativos de  $-1,992500$  antes del COVID-19 y  $-1,980862$  en el período completo. Esto significa que, ante cualquier desviación del equilibrio, el sistema corrige aproximadamente el doble de dicha desviación cada trimestre.

Los coeficientes de los retrasos de  $PM_{10}$  en los primeros dos trimestres (D( $PM_{10}(-1)$ ) y D( $PM_{10}(-2)$ )) son positivos y estadísticamente significativos en ambos períodos, lo que indica un efecto acumulativo sobre la concentración de  $PM_{10}$ . Antes del COVID-19, un aumento de 1 unidad en la concentración de  $PM_{10}$  en un trimestre genera incrementos de aproximadamente 0,74 unidades en el siguiente trimestre y 0,50 unidades en el segundo trimestre posterior. En el período completo, estos

Tabla 6.17: Modelo ECM para el período completo.

Variable	Coefficiente	Error estándar	Estadístico t	Probabilidad
D( $PM_{10}52(-1)$ )	0,777995	0,175423	4,434959	0,0002
D( $PM_{10}52(-2)$ )	0,615322	0,136897	4,494761	0,0002
D( $PM_{10}52(-3)$ )	0,173949	0,120016	1,449386	0,1620
D(HRS52)	0,452531	1,119686	0,404159	0,6902
D(HRS52(-1))	-2,577124	1,223220	-2,106836	0,0473
D(HRS52(-2))	-1,498000	1,040595	-1,439561	0,1647
D(SICK52)	0,093207	0,038559	2,417262	0,0248
D(SICK52(-1))	-0,437438	0,079005	-5,536864	0,0000
D(SICK52(-2))	-0,249157	0,055860	-4,460414	0,0002
D(SICK52(-3))	-0,172722	0,039997	-4,318319	0,0003
D(WAGE52)	3,846271	1,364546	2,818719	0,0103
D(WAGE52(-1))	6,455582	1,661483	3,885434	0,0009
D(WAGE52(-2))	4,326577	1,636575	2,643677	0,0152
D(WAGE52(-3))	3,557381	1,412183	2,519066	0,0199
D(IPI52)	0,467816	0,131959	3,545167	0,0019
D(IPI52(-1))	-0,348279	0,142287	-2,447719	0,0233
D(GDP52)	0,176290	0,281358	0,626568	0,5377
D(GDP52(-1))	1,789169	0,330675	5,410652	0,0000
D(GDP52(-2))	2,126414	0,510437	4,165866	0,0004
D(GDP52(-3))	2,886128	0,989757	2,915995	0,0083
CointEq (-1)*	-1,980862	0,225017	-8,803152	0,0000
$R^2$	0,886019	Mean dependent var.		-0,229167
Adjusted $R^2$	0,801589	S.D. dependent var.		7,735631
S.E. of regression	3,445710	Akaike info criterion		5,611773
Sum squared resid.	320,5687	Schwarz criterion		6,430423
Log likelihood	-113,6825	Hannan-Quinn criter.		5,921142
Durbin-Watson stat.	1,960158			

efectos acumulativos son de 0,78 y 0,62 unidades, respectivamente, lo que muestra que la persistencia de la contaminación se mantiene en el tiempo, con un patrón similar antes y después del COVID-19.

Las horas trabajadas (HRS) no muestran un efecto significativo sobre  $PM_{10}$  en el modelo previo al COVID-19 ni en el período completo para el período contemporáneo. Sin embargo, el retraso de una unidad de HRS en el período completo tiene un efecto negativo y significativo (coeficiente de -2,577124), sugiriendo que un incremento en horas trabajadas en el trimestre anterior está asociado con una reducción de la contaminación en trimestres posteriores. Esto puede estar relacionado con una mayor eficiencia en el trabajo y un uso optimizado de los recursos postpandemia, favorecido por la introducción de nuevas tecnologías y cambios en las prácticas laborales (Lovric et al., 2021).

En relación con las bajas por enfermedad (SICK), los coeficientes antes del COVID-19, y en el período completo, presentan efectos negativos sobre  $PM_{10}$  en los trimestres previos, junto con un efecto positivo en el trimestre actual. Esta relación compleja entre la salud laboral y la concentración de  $PM_{10}$  podría reflejar una reducción en la concentración de  $PM_{10}$  debido a la reducción de la capacidad productiva fruto del incremento de las bajas por enfermedad laboral. Sin embargo, en el trimestre contemporáneo, este efecto se invierte, posiblemente, como consecuencia de un mecanismo de ajuste para compensar la pérdida de capacidad productiva y atender la demanda, incrementando temporalmente la concentración de  $PM_{10}$ .

En cuanto a los salarios (WAGE), antes del COVID-19, el impacto sobre  $PM_{10}$  es positivo en los primeros tres retrasos, sugiriendo un posible aumento en  $PM_{10}$  debido al crecimiento salarial en el corto plazo, lo cual podría reflejar una mayor actividad económica con mayor impacto ambiental. En el período completo WAGE pierde intensidad en sus retrasos, pero adquiere protagonismo en el período contemporáneo al mostrar una intensa relación directa con la concentración de  $PM_{10}$ . La reactivación industrial tras la parada provocada por la pandemia potencia el acoplamiento de los salarios con la concentración de  $PM_{10}$ , relación directa que se extiende hasta el período actual.

El IPI, antes del COVID-19, manifestaba una relación inversa respecto del  $PM_{10}$  con respecto al IPI del trimestre anterior, cuyo impacto era negativo y significativo, lo que sugiere que las prácticas de eficiencia o ajustes implementados después de aumentos en la producción contribuían a reducir las emisiones. Sin embargo, en el período completo, la relación se modifica, y, al igual que en el caso de WAGE, el IPI manifiesta un efecto positivo y significativo sobre  $PM_{10}$  en el mismo trimestre, reflejando que un aumento del IPI está asociado a un incremento directo en las emisiones de  $PM_{10}$ , lo que puede deberse a que el sector industrial ha intensificado su producción probablemente debido a presiones de recuperación económica y cambios en las dinámicas productivas. Aun así, el patrón de relación inversa en el trimestre posterior persiste, aunque en menor medida, indicando que ciertos mecanismos de mitigación siguen operando con un ligero desfase en los efectos ambientales (Dong et al., 2019).

En ambos períodos (antes del COVID-19 y en el período completo), el efecto acumulativo de los tres retrasos del GDP sugiere que un aumento del producto interior bruto en los tres trimestres anteriores influye positivamente en la concentración de  $PM_{10}$  del siguiente trimestre. Esto podría deberse a que una mayor actividad económica intensifica la producción y el consumo de recursos, lo cual a su vez genera un aumento en las emisiones de  $PM_{10}$  con el tiempo, mostrando el acoplamiento

efectivo de los cambios del producto interior bruto con la concentración de  $PM_{10}$ . Sin embargo, los coeficientes son menores en el período completo, lo que indica que, aunque el efecto persiste, su intensidad es menor que en el período anterior al COVID-19. Esta reducción podría explicarse por una tendencia de la industria a tornarse menos contaminante, impulsada por regulaciones ambientales más estrictas y la adopción de innovaciones tecnológicas y medidas sostenibles en el sector industrial (Yang et al., 2021).

Ambos modelos muestran un buen ajuste en términos de su capacidad para explicar la variación en la concentración de  $PM_{10}$ . El modelo del período pre-COVID tiene un  $R^2$  ajustado de 0,8400, lo que indica que el 84 % de la variación en la concentración de  $PM_{10}$  es explicada por las variables incluidas en el modelo. En el período completo, el  $R^2$  ajustado es de 0,8016, lo que significa que el 80,16 % de la variación en  $PM_{10}$  es explicado por el modelo que incluye los efectos de la pandemia. Aunque ambos modelos tienen una estructura similar y un alto porcentaje de varianza explicada, las diferencias en la magnitud y significatividad de algunas variables reflejan cambios en las dinámicas económicas y ambientales inducidos por la pandemia, sugiriendo que esta ha influido en la relación entre los salarios, las horas trabajadas, y el IPI con respecto a la concentración de  $PM_{10}$  (Paköz & Kaya, 2023).

Los resultados de los MARDL-ECM muestran una rápida velocidad de ajuste hacia el equilibrio, lo que indica que el sistema tiene una alta capacidad de resiliencia frente a perturbaciones de forma que las interacciones entre dominios o subsistemas en las distintas escalas temporales tienden a devolver al sistema al equilibrio tras una perturbación. La persistencia de efectos acumulativos en la contaminación sugiere que, aunque el sistema pueda ajustar rápidamente ciertas dinámicas, las estrategias de mitigación deben abordar los impactos de corto plazo para evitar que afecten la estabilidad de largo plazo.

Los efectos temporales a corto plazo se recogen a continuación en la Tabla 6.18 para una mejor visualización y comprensión del sentido y magnitud de la influencia de las variables sobre la concentración de  $PM_{10}$  en los distintos períodos, resaltando, en verde las influencias en distinto sentido y, en amarillo, las influencias en el mismo sentido.

### 6.3.5. Retroalimentación

Con el objetivo de determinar la causalidad o influencia temporal de una variable en la capacidad de predecir a otra, se llevó a cabo la prueba de causalidad de Granger. Esta prueba proporciona

Tabla 6.18: Resultados a corto plazo sobre  $PM_{10}$ , antes del COVID-19 y en el período completo.

ANTES COVID-19	T-4	T-3	T-2	T-1	T	
$PM_{10}$			0,500	0,739		$PM_{10}$
HRS						
SICK		-0,148	-0,215	-0,462	0,155	
WAGE		5,852	8,376	7,960		
IPI				-0,669		
GDP		2,246	3,102	4,994		
P. COMPLETO	T-4	T-3	T-2	T-1	T	
$PM_{10}$			0,615	0,778		$PM_{10}$
HRS				-2,58		
SICK		-0,173	-0,249	-0,437	0,093	
WAGE		3,557	4,327	6,456	3,846	
IPI				-0,348	0,468	
GDP		2,886	2,126	1,789		

información sobre la dirección de influencia temporal entre las variables identificando si los valores pasados de una variable contribuyen a predecir otra en el corto plazo.

La prueba de Granger se formula bajo la hipótesis nula de no causalidad, de modo que los valores de probabilidad menores que 0,05 rechazan esta hipótesis o, dicho de otro modo, aceptan la causalidad entre pares de variables en un intervalo de confianza del 95 %.

Los resultados para el período anterior al COVID-19 y el período completo se muestran, respectivamente, en las Tablas 6.19 y 6.20, en las cuales, en color verde, se resaltan las relaciones de causalidad estadísticamente significativas.

En el período anterior al COVID-19 se manifiestan 6 relaciones unidireccionales y 2 bidireccionales entre SICK e IPI con el GDP. En el período completo, el número de relaciones se reduce a 6 relaciones unidireccionales y solo una bidireccional, que se mantiene entre IPI y GDP. En el período completo se ha extinguido la causalidad de SICK con respecto a GDP (se mantiene la relación inversa, de GDP a SICK) y la de SICK con respecto a  $PM_{10}$ , manifestándose, en cambio, la causalidad de GDP con respecto a  $PM_{10}$ . Del mayor número de relaciones en el período anterior al COVID-19 se deduce una mayor conexión entre indicadores industriales y económicos con respecto a la concentración de  $PM_{10}$ .

Es destacable el papel de las enfermedades profesionales que, con anterioridad al COVID-19, causan GDP y  $PM_{10}$ , sin embargo, tras la pandemia, estas dos causalidades se extinguen y se crea la causalidad del GDP frente a  $PM_{10}$ .

Tabla 6.19: Resultados de la causalidad de Granger en el periodo anterior al COVID-19.

Pairwise Granger Causality Tests		
Sample: 1 47		
Lags: 4		
Observations: 43		
Hipótesis nula:	Estadístico F	Probabilidad
HRS47 does not Granger Cause $PM_{10}47$	0,89706	0,4765
$PM_{10}47$ does not Granger Cause HRS47	1,70801	0,1710
SICK47 does not Granger Cause $PM_{10}47$	4,28814	0,0065
$PM_{10}47$ does not Granger Cause SICK47	1,10545	0,3699
WAGE47 does not Granger Cause $PM_{10}47$	1,20998	0,3246
$PM_{10}47$ does not Granger Cause WAGE47	3,94129	0,0098
IPI47 does not Granger Cause $PM_{10}47$	0,75988	0,5587
$PM_{10}47$ does not Granger Cause IPI47	1,07160	0,3857
GDP47 does not Granger Cause $PM_{10}47$	1,43563	0,2435
$PM_{10}47$ does not Granger Cause GDP47	1,19341	0,3314
SICK47 does not Granger Cause HRS47	0,71521	0,5874
HRS47 does not Granger Cause SICK47	0,54275	0,7054
WAGE47 does not Granger Cause HRS47	0,44631	0,7743
HRS47 does not Granger Cause WAGE47	1,12761	0,3599
IPI47 does not Granger Cause HRS47	0,17495	0,9497
HRS47 does not Granger Cause IPI47	0,26560	0,8980
GDP47 does not Granger Cause HRS47	0,09183	0,9844
HRS47 does not Granger Cause GDP47	0,42505	0,7895
WAGE47 does not Granger Cause SICK47	4,01351	0,0090
SICK47 does not Granger Cause WAGE47	0,63969	0,6378
IPI47 does not Granger Cause SICK47	6,95426	0,0003
SICK47 does not Granger Cause IPI47	1,69441	0,1740
GDP47 does not Granger Cause SICK47	4,55924	0,0047
SICK47 does not Granger Cause GDP47	3,65519	0,0140
IPI47 does not Granger Cause WAGE47	0,33486	0,8525
WAGE47 does not Granger Cause IPI47	10,9739	$8 \cdot 10^{-6}$
GDP47 does not Granger Cause WAGE47	0,70142	0,5964
WAGE47 does not Granger Cause GDP47	17,6965	$6 \cdot 10^{-8}$
GDP47 does not Granger Cause IPI47	9,20273	$4 \cdot 10^{-5}$
IPI47 does not Granger Cause GDP47	12,0261	$3 \cdot 10^{-6}$

Sin embargo, la concentración de  $PM_{10}$  se desacopla con respecto a las enfermedades profesionales del sector industrial y el producto interior bruto se desacopla con respecto a las bajas por enfermedad profesional; ya que el GDP es agregado todas las actividades económicas, no solamente el sector industrial, parece que el acoplamiento del producto interior bruto y desacoplamiento de los factores industriales con respecto a la concentración de  $PM_{10}$  podría deberse a la intensificación de

Tabla 6.20: Resultados de la Causalidad de Granger para el período completo.

Pairwise Granger Causality Tests		
Sample: 1 52		
Lags: 4		
Observations: 48		
Hipótesis nula:	Estadístico F	Probabilidad
HRS52 does not Granger Cause $PM_{10}52$	0,76271	0,5559
$PM_{10}52$ does not Granger Cause HRS52	1,94908	0,1216
SICK52 does not Granger Cause $PM_{10}52$	1,55552	0,2054
$PM_{10}52$ does not Granger Cause SICK52	0,65513	0,6268
WAGE52 does not Granger Cause $PM_{10}52$	2,19710	0,0872
$PM_{10}52$ does not Granger Cause WAGE52	4,40778	0,0049
IPI52 does not Granger Cause $PM_{10}52$	1,18909	0,3308
$PM_{10}52$ does not Granger Cause IPI52	0,70725	0,5919
GDP52 does not Granger Cause $PM_{10}52$	2,87837	0,0351
$PM_{10}52$ does not Granger Cause GDP52	1,39187	0,2547
SICK52 does not Granger Cause HRS52	0,49813	0,7372
HRS52 does not Granger Cause SICK52	0,64165	0,6360
WAGE52 does not Granger Cause HRS52	0,53209	0,7129
HRS52 does not Granger Cause WAGE52	1,70223	0,1691
IPI52 does not Granger Cause HRS52	0,20284	0,9353
HRS52 does not Granger Cause IPI52	0,31204	0,8682
GDP52 does not Granger Cause HRS52	0,21380	0,9292
HRS52 does not Granger Cause GDP52	1,04799	0,3951
WAGE52 does not Granger Cause SICK52	3,92746	0,0090
SICK52 does not Granger Cause WAGE52	0,25112	0,9072
IPI52 does not Granger Cause SICK52	4,78497	0,0031
SICK52 does not Granger Cause IPI52	2,27662	0,0784
GDP52 does not Granger Cause SICK52	3,42325	0,0172
SICK52 does not Granger Cause GDP52	0,79599	0,5351
IPI52 does not Granger Cause WAGE52	0,33775	0,8508
WAGE52 does not Granger Cause IPI52	5,62148	0,0011
GDP52 does not Granger Cause WAGE52	0,38056	0,8211
WAGE52 does not Granger Cause GDP52	1,98713	0,1155
GDP52 does not Granger Cause IPI52	4,10605	0,0072
IPI52 does not Granger Cause GDP52	6,40757	0,0005

la actividad económica en sectores no industriales o al desacoplamiento de la actividad industrial con respecto a la concentración de  $PM_{10}$ .

La prueba de causalidad de Granger identifica relaciones temporales entre los subsistemas económicos, industrial y natural que interactúan y se retroalimentan en el marco del SES. Estos mecanismos de retroalimentación son importantes ya que identifican aspectos críticos sobre los que actuar de cara

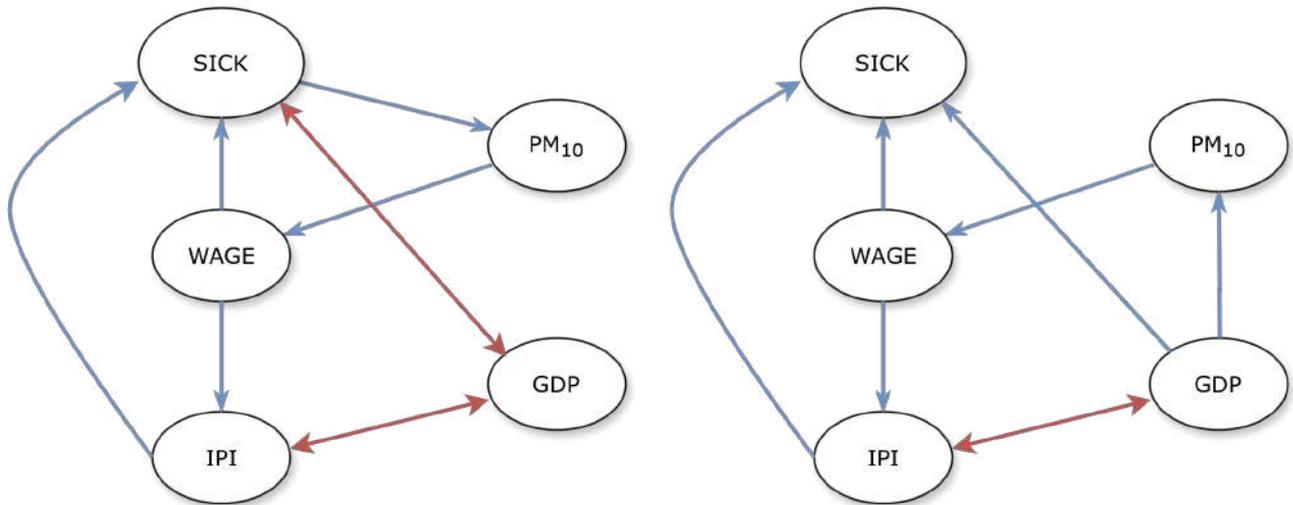


Figura 6.7: Causalidad de Granger antes del COVID-19 y en el período completo.

a actuar eficazmente en la capacidad de adaptación y resiliencia del sistema, dada su capacidad de amplificación de efectos.

La Figura 6.7 representa gráficamente las relaciones de causalidad encontradas mediante la prueba de Granger.

### 6.3.6. Vulnerabilidad

Con el objeto de garantizar la consistencia de los resultados de los modelos se ha verificado el cumplimiento de las siguientes premisas:

- La varianza de los errores es constante (Homocedasticidad), prueba de Breusch-Pagan-Godfrey.
- La no presencia de autocorrelación, prueba de Durbin-Watson.
- La distribución normal de los residuos, prueba de Jarque-Bera.
- La corrección de la especificación del modelo, es decir, que no haya relaciones no capturadas o variables omitidas; prueba de Ramsey-RESET.
- Estabilidad.

Los resultados de las correspondientes pruebas se muestran en la Tabla 6.21.

Los valores de probabilidad (superiores a 0,05) resultantes de la prueba Breusch-Pagan-Godfrey sugieren que no se rechaza la hipótesis nula de homocedasticidad. Esto significa que no hay evidencia

Tabla 6.21: *Pruebas de robustez.*

Test estadístico	Hipótesis nula	Valor	Valor P
Modelo-47 Breusch-Pagan-Godfrey	Homocedasticidad	0,991	0,511
Modelo-52 Breusch-Pagan-Godfrey	Homocedasticidad	0,678	0,809
Modelo-47 Durbin-Watson		2,005	
Modelo-52 Durbin-Watson		2,010	
Modelo-47 Jarque-Bera	Normalidad	0,415	0,812
Modelo-52 Jarque-Bera	Normalidad	0,936	0,626
Modelo-47 Ramsey RESET	Forma funcional	1,983	0,064
Modelo-52 Ramsey RESET	Forma funcional	1,224	0,313

significativa de heterocedasticidad en los residuos del modelo antes del COVID-19, indicando que la varianza de los errores es constante.

La prueba de autocorrelación de los residuos mediante la prueba de Durbin-Watson, con valores muy cercanos a 2 sugieren la no autocorrelación de los residuos y refuerzan la confianza en los resultados de los modelos.

En ambos periodos, los resultados de la prueba de Jarque-Bera indican que no hay una desviación significativa de la normalidad en los residuos. Esto es importante porque sugiere que los modelos están bien especificados en términos de la normalidad de los errores, lo cual es una suposición clave para muchos análisis estadísticos.

## ESPECIFICACIÓN DEL MODELO

Los resultados de la prueba de Ramsey-RESET con probabilidades superiores a 0,05 sugieren que no hay evidencia significativa para rechazar que el modelo está correctamente especificado.

De lo anterior se concluye que en los períodos anterior al COVID-19 y el período completo las técnicas empleadas satisfacen las pruebas de robustez, sugiriendo que las especificaciones son robustas y que los supuestos subyacentes a los modelos se mantienen.

## ESTABILIDAD

Las Figuras 6.8 y 6.9 muestran la suma acumulativa de los residuos recursivos (CUSUM) y de su cuadrado (CUSUMQ). Si esta línea se mantiene dentro de las bandas de significatividad, líneas punteadas de color rojo, indica que los coeficientes del modelo son estables a lo largo del tiempo.

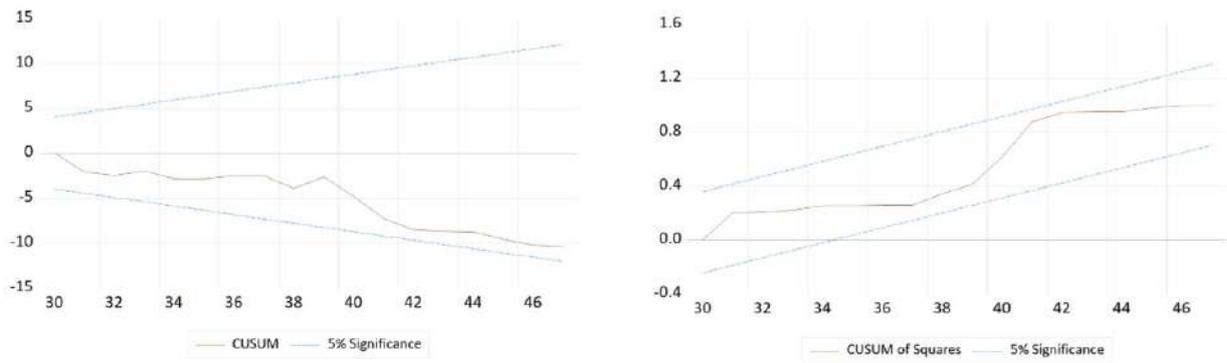


Figura 6.8: Resultados de las pruebas de la suma acumulativa de residuos recursivos y de sus cuadrados en el período anterior al COVID-19.

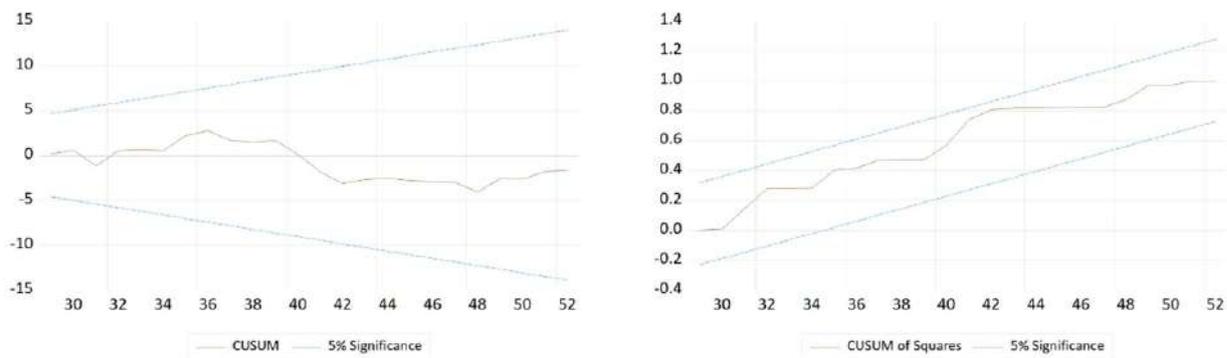


Figura 6.9: Resultados de las pruebas de la suma acumulativa de los residuos recursivos y de sus cuadrados en el período completo.

En los gráficos de la imagen, se muestran que la línea del CUSUM y CUSUMQ, ambas se mantienen dentro de las bandas de significatividad del 5 %, sugiriendo que no hay evidencia de inestabilidad estructural significativa en el modelo.

Las pruebas de robustez confirman que los modelos son consistentes y estadísticamente válidos, mientras que las pruebas de estabilidad estructural (CUSUM y CUSUMQ) indican que las relaciones modeladas se mantienen estables en el tiempo. Esto sugiere que el SES analizado presenta una baja vulnerabilidad estructural frente a los factores modelados, al menos en términos de sus dinámicas a largo plazo. Sin embargo, las fluctuaciones identificadas en las relaciones entre las variables, especialmente en los impactos de la actividad industrial y económica sobre el medio ambiente, reflejan potenciales sensibilidades ante perturbaciones externas. En el marco de los SES, estos resultados destacan que, aunque las relaciones del sistema parecen estables, su vulnerabilidad depende de la capacidad de los subsistemas para gestionar impactos desiguales y evitar desequilibrios prolongados.

## 6.4. Conclusiones

Los resultados significativos de los MARDL a largo plazo, los modelos de corrección de error y la causalidad de Granger para los períodos anterior al COVID-19 y el período completo se muestran a continuación en la Figura 6.10.

Los resultados obtenidos a partir de los MARDL a largo plazo, los modelos de corrección de error y la prueba de causalidad de Granger permiten evaluar propiedades clave del sistema socio-ecológico industrial, como el equilibrio, la resiliencia, la retroalimentación y la vulnerabilidad, antes y después del COVID-19. Estas propiedades revelan cómo el sistema responde a perturbaciones, mantiene su funcionalidad y evoluciona hacia nuevas dinámicas relacionales.

### EQUILIBRIO

Antes del COVID-19, la cointegración entre GDP, WAGE y  $PM_{10}$  reflejaba un proceso de desacoplamiento progresivo. Tras la pandemia, este desacoplamiento se debilitó, indicando una pérdida de estabilidad sistémica debido a presiones económicas. Esto subraya la necesidad de políticas estructurales sostenibles para mantener el equilibrio ambiental durante períodos de crisis.

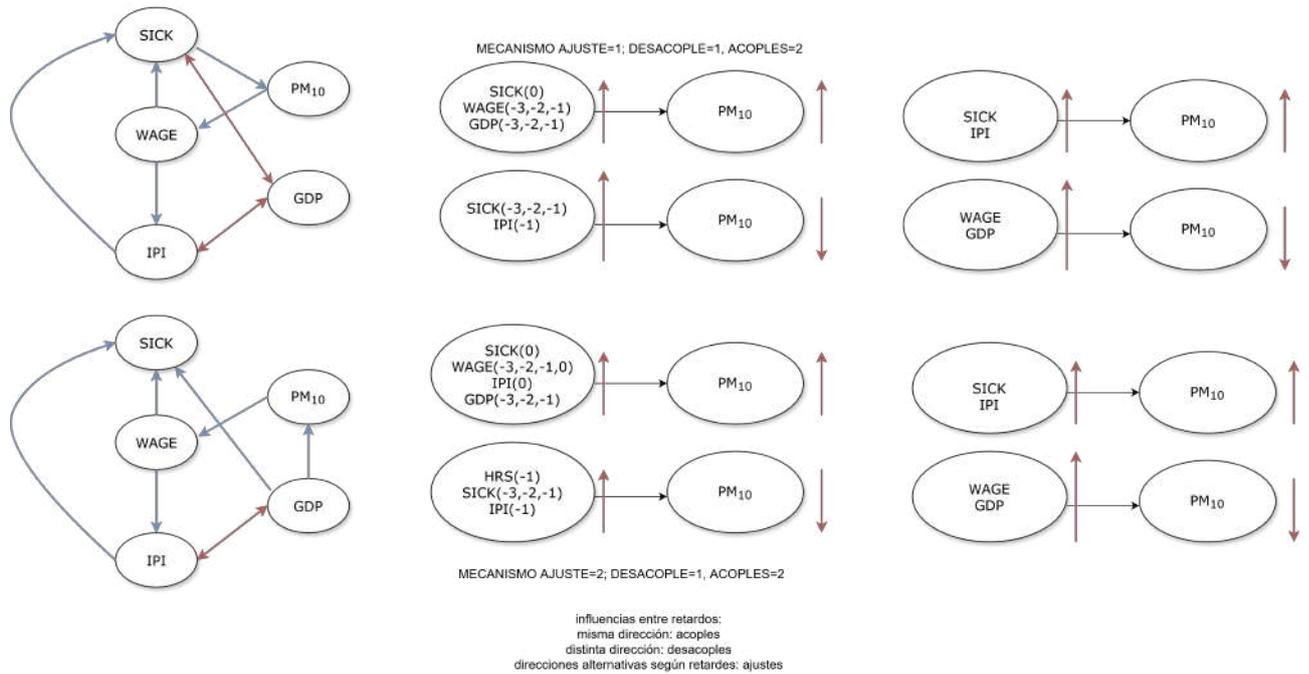


Figura 6.10: Interacciones entre dominios, en los distintos horizontes temporales.

Las variables SICK e IPI permanecen acopladas a la concentración de  $PM_{10}$  tanto antes como después del COVID-19, lo que resalta la interdependencia entre la actividad industrial, las condiciones laborales y la calidad del aire, y la necesidad de abordar estos factores conjuntamente.

## RESILIENCIA

El modelo de corrección de error evidencia la capacidad del sistema para recuperar su equilibrio tras perturbaciones, demostrando una resiliencia inherente en ambos períodos. Sin embargo, las relaciones entre WAGE y GDP invierten su sentido a corto plazo, causando un impacto negativo en  $PM_{10}$ , lo que refleja la necesidad de medidas inmediatas para mitigar estos efectos.

El impacto de SICK e IPI varía según el horizonte temporal, lo que podría indicar la existencia de mecanismos de ajuste propios del sistema.

## RETROALIMENTACIÓN

Antes del COVID-19, se identificaron bucles de retroalimentación entre IPI, SICK, GDP, y  $PM_{10}$ . Por ejemplo, la interacción entre SICK, WAGE y  $PM_{10}$  constituye un circuito cerrado que amplifica la complejidad y la sensibilidad del sistema.

Tras la pandemia, se observan cambios significativos en los patrones de retroalimentación, con la desaparición de ciertas relaciones causales y un mayor acoplamiento entre GDP y  $PM_{10}$ , lo que refleja un ajuste hacia dinámicas menos sostenibles y limitadas capacidades regulatorias.

## **VULNERABILIDAD**

Aunque el sistema mostró resistencia frente a perturbaciones externas, las pruebas estadísticas indican una posible vulnerabilidad en el equilibrio pre-COVID debido a la complejidad de las interrelaciones causales.

Tras el COVID-19, las transformaciones en las relaciones sistémicas resaltan la necesidad de reforzar mecanismos adaptativos y reguladores para afrontar futuras crisis de manera sostenible.

## **GENERALIZACIÓN DE LOS RESULTADOS**

La metodología empleada en este estudio puede extenderse y aplicarse a otros casos de estudio, siempre que se utilicen las mismas variables y se verifique la existencia de cointegración o equilibrio a largo plazo en el sistema analizado. La validez de esta generalización dependerá de las características del sistema en cuestión y de las interrelaciones específicas entre los indicadores considerados. Por ello, antes de extrapolar los resultados a otros contextos, es fundamental evaluar la estabilidad de las relaciones identificadas y su consistencia en distintos entornos económicos e industriales.

## EL SECTOR INDUSTRIAL CÁNTABRO Y LA SOSTENIBILIDAD EFECTIVA A LARGO PLAZO

El resultado obtenido para el sector industrial cántabro, dada la relación inversa evidenciada a largo plazo entre el crecimiento del PIB (GDP) y la reducción de  $PM_{10}$ , se enmarca en el nivel de sostenibilidad débil. Esto se debe a que la reducción de la contaminación no implica necesariamente una disminución en el uso de recursos o en la huella ecológica total. En este nivel, se asume que las mejoras tecnológicas y la eficiencia pueden compensar los impactos ambientales sin necesidad de cambios estructurales en el modelo productivo.

En este caso, el crecimiento del PIB ha ido acompañado de reducciones en la contaminación por  $PM_{10}$ , lo que sugiere que la industria ha adoptado tecnologías más limpias o procesos más eficientes. Sin embargo, esto no implica una transformación profunda del sistema económico, sino que responde a una estrategia de mitigación dentro de los límites del modelo actual.

Por otro lado, la sostenibilidad fuerte plantea que ciertos límites ecológicos no pueden ser superados y que deben imponerse restricciones estrictas al uso de recursos. Dado que la reducción de  $PM_{10}$  observada en Cantabria no ha estado acompañada de una disminución en el consumo de materiales, un cambio estructural en el modelo productivo o una regeneración ecológica significativa se corrobora que la estrategia industrial regional sigue alineada con la sostenibilidad débil.

La sostenibilidad superfuerte, en contraste, sostiene que el capital natural debe mantenerse intacto sin compensaciones. Como el sector industrial cántabro sigue operando y depende del crecimiento

económico, el sistema aún asume cierto nivel de degradación ambiental como aceptable, lo que lo aleja de este enfoque más radical.

Si bien la sostenibilidad débil ha permitido avances en la reducción de contaminantes específicos, como  $PM_{10}$ , esta estrategia presenta limitaciones importantes. Su principal debilidad es que depende del crecimiento económico y de la eficiencia tecnológica, sin cuestionar la escala del sistema productivo ni el consumo total de recursos. Diversos estudios han demostrado que mejoras en eficiencia no siempre se traducen en una menor presión ambiental. Esto se explica por la paradoja de Jevons, que postula que el aumento en la eficiencia energética puede llevar a un incremento neto en el uso de recursos en lugar de reducirlo (Alcott, 2005).

En este contexto, diversas investigaciones han reportado casos similares a los hallazgos de esta tesis, donde se observa un desacoplamiento entre el desarrollo económico y la reducción de emisiones contaminantes. A continuación, se citan algunos ejemplos:

- República Checa. Reducción de emisiones de  $PM_{10}$ ,  $NO_x$  y  $SO_2$  sin comprometer el crecimiento del PIB, debido a regulaciones ambientales más estrictas y mejoras tecnológicas (Sauer et al., 2018).
- China. Disminución de  $NO_2$  en ciertas regiones sin afectar la evolución del PIB, lo que indica una estrategia basada en control de emisiones más que en una transformación del modelo productivo (Li et al., 2021).
- Industria 4.0 y la sostenibilidad débil. Un estudio sobre la curva de Kuznets ambiental en economías emergentes sugiere que el desarrollo económico inicial conlleva un aumento de emisiones de  $CO_2$ , pero posteriormente se observa una reducción conforme se implementan mejoras tecnológicas y eficiencia energética. Sin embargo, este enfoque no implica una transformación profunda del modelo productivo, ya que sigue dependiendo del crecimiento económico y la inversión extranjera directa, lo que refuerza la idea de la sostenibilidad débil (Koilo, 2019).

Un caso que ejemplifica la sostenibilidad fuerte ocurrió durante la pandemia de COVID-19, cuando se produjo una reducción abrupta en los niveles de  $CO_2$  debido a la paralización de actividades económicas y cambios en los hábitos de consumo. Sin embargo, estas mejoras no fueron sostenibles, ya que los niveles de contaminación regresaron tras la reactivación económica (Lamprecht et al., 2021). Este ejemplo evidencia que una disminución de la huella ecológica solo es posible si hay una transformación estructural en los sistemas productivos y en los patrones de consumo.

Por tanto, la sostenibilidad débil no garantiza la regeneración de los ecosistemas ni la preservación del capital natural en su estado original, lo que mantiene en riesgo la estabilidad ecológica a largo plazo. En contraste, la sostenibilidad superfuerte establece que la única manera de evitar la degradación irreversible del planeta es imponer límites estrictos al uso de recursos y asegurar la conservación absoluta de los ecosistemas (Rockström et al., 2009).

En este sentido, confiar en el crecimiento económico como motor de mejora ambiental es insuficiente, ya que los límites planetarios siguen en riesgo, a pesar de la reducción de ciertos contaminantes. Para transitar hacia una sostenibilidad superfuerte, no solo es necesario avanzar en innovación tecnológica, sino también reconfigurar el modelo económico para que la preservación ecológica sea una prioridad sobre la expansión del PIB. Solo así se podrá garantizar que el progreso no dependa de un crecimiento material infinito y que la actividad industrial y económica sean compatibles con los límites del planeta.



## CONCLUSIONES DE LA TESIS

Esta Tesis estudia la sostenibilidad del sector industrial regional mediante el establecimiento de interrelaciones entre indicadores propios del sector con otros de tipo socioeconómico y medioambiental. Se emplean herramientas de análisis propias del estudio de sistemas complejos, series de datos temporales y econometría para determinar las interacciones clave y, posteriormente, modelar el sistema industrial regional en el contexto del paradigma de los SES. El modelo muestra la complejidad de estas interrelaciones, así como su estructura, a diversos niveles de escala temporal.

Se analizó el estado del conocimiento relativo a la evolución de las relaciones entre las organizaciones y su entorno, identificando una tendencia hacia la adopción de modelos organizativos cada vez más integrados en el entorno socioeconómico y medioambiental. También se identifican índices industriales e indicadores socioeconómicos y medioambientales más relevantes en cada caso, así como las relaciones que se establecen entre variables a la hora de modelar estas interacciones.

Se evaluó la sostenibilidad del sector industrial cántabro empleando los estadísticos de índices del sector industrial, indicadores del contexto socioeconómico regional, así como parámetros medioambientales. A tal efecto, se desarrolló un modelo que identifica las variables clave de los diferentes ámbitos y su relación, a efectos de la evaluación de la sostenibilidad, en diferentes escalas temporales. El modelo resultante es no lineal, dada la complejidad del SES regional y las relaciones entre las variables seleccionadas y las diferentes escalas temporales y enmarca la sostenibilidad del sector industrial cántabro en la sostenibilidad débil, que si bien, tiene efectos reductores del impacto del

desarrollo industrial en el medio ambiente, se ha hecho insuficiente para la sostenibilidad real efectiva del sistema regional a largo plazo.

El modelo desarrollado se empleó para evaluar el efecto de la crisis sanitaria por COVID-19 sobre la sostenibilidad del sector industrial cántabro. A corto plazo, el modelo muestra una rápida recuperación a los efectos del COVID-19 debido a la resiliencia del SES. A largo plazo, se identifica una reducción de la sostenibilidad del SES, y un menor efecto en la sensibilidad de las variaciones de los indicadores del sector industrial cántabro. Cabe señalar que las variaciones del producto interior bruto y de los costes salariales se reflejan en la capacidad de reducción de las emisiones de partículas y que se identifica una dependencia de la escala temporal considerada. De este efecto, capturado por el modelo desarrollado, se desprende la necesidad de implementar políticas horizontales, multiescalares y flexibles orientadas al cumplimiento de los objetivos de crecimiento sostenible.

Son conclusiones específicas de esta Tesis:

- El análisis de las interrelaciones entre indicadores clave de los sistemas industriales, su entorno socioeconómico y natural requieren de modelos específicos capaces de considerar la no estacionariedad de los indicadores, así como de capturar, con precisión suficiente, los comportamientos en distintos horizontes temporales.
- A largo plazo, el efecto de la crisis sanitaria en el modelo desarrollado es la reducción del número de retroalimentaciones, volviéndose el sistema menos complejo y sensible a ciertos indicadores, como es el caso de las bajas por enfermedad profesional y el coste salarial que reducen sus interacciones con el resto de los aspectos del sistema, aunque también más resistente (menos vulnerable) a los eventos externos como crisis sanitarias o económicas.
- Las interrelaciones entre bajas por enfermedad profesional (SICK), actividad productiva (IPI) y el producto interior bruto (GDP) se mantienen estables antes y después de la crisis sanitaria por COVID-19.
- La concentración de partículas contaminantes  $PM_{10}$  presenta una dependencia directa de las bajas por enfermedad profesional (SICK) y la actividad productiva (IPI) así como una dependencia inversa de los salarios (WAGE) y el producto interior bruto (GDP). Incrementos de un 1 % en las bajas por enfermedad profesional y en la actividad industrial tienden a incrementar la concentración de  $PM_{10}$  en un 0,4 % y un 0,66 % respectivamente, mientras que un incre-

mento de un 1 % del producto interior bruto (GDP) resulta en una reducción del 1,15 % en la concentración de  $PM_{10}$ .

- Un evento como la crisis sanitaria del COVID-19, capaz de alterar el equilibrio a largo plazo, disminuye el efecto reductor de los costes salariales sobre la concentración de  $PM_{10}$  que pasó de un 3,1 % a un 1,4 % por cada incremento de un 1 % en los costes salariales. De donde se desprende la necesidad de reducir costes salariales en beneficio de la sostenibilidad del sistema, así como de implantar medidas orientadas a mitigar desequilibrios en contextos de crisis.
- A corto plazo, la concentración de partículas contaminantes  $PM_{10}$  pasa a ser directamente dependiente del coste salarial y del producto interior bruto (GDP), lo que supone un cambio respecto a la dependencia a largo plazo. Así, el incremento acumulado del coste salarial y el producto interior bruto (GDP) de un 1 % en los tres trimestres anteriores a la crisis sanitaria, coincidente con un aumento de la concentración de  $PM_{10}$  de un 22 % y un 10 %, respectivamente. Tras la crisis sanitaria, estos efectos se reducen, y las reducciones en la concentración de  $PM_{10}$  pasan a ser de un 18 % y un 6,5 % respectivamente.
- Tras la crisis sanitaria, la actividad productiva y los costes salariales introducen impactos positivos sobre la concentración de  $PM_{10}$  en el mismo período; es decir, el sistema reacciona más rápido que con anterioridad a la crisis sanitaria, siendo el incremento de la concentración de  $PM_{10}$ , de un 3,8 % y un 0,5 % por cada incremento del 1 % de los costes salariales y la actividad productiva.
- Del modelo desarrollado se desprende una interacción entre los costes salariales y la concentración de partículas  $PM_{10}$ .
- Además, la salud ocupacional y la actividad productiva presentan una fuerte interdependencia, dependiente a su vez del producto interior bruto (GDP). Adicionalmente, dada la dependencia a corto plazo de la concentración de partículas  $PM_{10}$  del producto interior bruto, el modelo debe considerar estas retroalimentaciones, que refuerzan el comportamiento conjunto de los indicadores del sector industriales y su entorno socioeconómico.
- A falta de otras evidencias e indicadores específicos, la sostenibilidad del sistema se enmarca en el ámbito de la sostenibilidad débil, siendo necesaria la transformación del sistema industrial

y socioeconómico hacia el marco de la sostenibilidad superfuerte para lograr la sostenibilidad efectiva a largo plazo.

Como trabajos futuros derivados de esta Tesis se consideran, entre otros:

- Ampliar la resolución temporal del modelo desarrollado, lo que implicaría disponer de series temporales de datos también de mayor resolución, especialmente, después del shock originado por la crisis COVID-19.
- Validar los resultados obtenidos tras la crisis sanitaria incorporando series temporales más extensas para comprobar la profundidad de los cambios propiciados por la crisis COVID-19.
- Obtención de datos procedentes directamente de la escala industrial mediante métodos como la encuesta.
- Ampliar el alcance del modelo, incorporando otros indicadores de sostenibilidad fuerte y superfuerte, así como indicadores socioeconómicos. Por ejemplo, inversión en tecnología aplicada al sector industrial, tanto pública como privada; el bienestar de los trabajadores, incluyendo factores de bienestar psicosocial en el trabajo; la tasa de paro; indicadores relativos a la evolución de la huella de carbono o, el papel de otros contaminantes, como el ozono troposférico.
- Realizar simulaciones en escenarios de decrecimiento, fundamentales como estrategia plausible en el marco de la sostenibilidad superfuerte, para su futura implementación y el análisis de sus repercusiones e interacciones con el entorno.
- Incorporar al modelo técnicas de análisis basadas en redes neuronales o modelado mediante agentes, lo que permitiría un modelado más preciso de las retroalimentaciones del sistema y, por ende, de la complejidad subyacente del mismo.
- Incrementar el horizonte temporal a efectos de capacidad de predicción del modelo, ya que esa capacidad de predicción es totalmente dependiente del mantenimiento en el tiempo de las interrelaciones consideradas. Dotar al modelo de capacidad adaptativa ante cambios estructurales profundos permitiría ampliar el horizonte de predicción.

Esta tesis también presenta limitaciones como las siguientes:

- La disponibilidad de datos a nivel regional o sectorial es limitada, lo que ha obligado a utilizar variables macroeconómicas en lugar de datos a nivel de empresa o sector específico. Esto puede afectar la precisión de las inferencias realizadas sobre el comportamiento de las organizaciones individuales.
- La cantidad de datos post-COVID-19 podría limitar la robustez de algunas conclusiones, pero los cambios en los signos de las relaciones entre variables sugieren transformaciones estructurales en el sistema que resultaría necesario confirmar con series de datos más extensas y descriptivas del período post-COVID-19.
- Se ha empleado un enfoque econométrico con modelos ARDL, que requiere datos de series temporales de cierta longitud. La necesidad de contar con suficientes observaciones ha motivado el uso de datos cuatrimestrales en lugar de datos anuales o mensuales, lo que puede afectar la interpretación de los resultados en eventos de corto plazo.
- No se han explorado métodos alternativos como modelos de ecuaciones estructurales o técnicas de machine learning, que podrían aportar diferentes perspectivas en la modelización de la sostenibilidad en entornos industriales.



- Abbasi, K. R., Shahbaz, M., Zhang, J., Irfan, M., & Alvarado, R. (2022). Analyze the environmental sustainability factors of China: The role of fossil fuel energy and renewable energy. *Renewable Energy*, 187, 390-402. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.01.066>
- Abrar, A., Hazizi, I. F., & Elgharbawy, A. (2021). The Impact of COVID-19 on the Sustainability of The Tourism Industry. *Journal of Halal Industry & Services*, 4(1). <https://doi.org/10.36877/jhis.a0000241>
- Adebayo, T. S., Akinsola, G. D., Bekun, F. V., Osemeahon, O. S., & SARKODIE, S. A. (2021). Mitigating human-induced emissions in Argentina: role of renewables, income, globalization, and financial development. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(47), 67764-67778. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14830-5>
- Ahmad, M., Jiang, P., Murshed, M., Shehzad, K., Akram, R., Cui, L., & Khan, Z. (2021). Modelling the dynamic linkages between eco-innovation, urbanization, economic growth and ecological footprints for G7 countries: Does financial globalization matter? *Sustainable Cities and Society*, 70, 102881. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102881>
- Alcott, B. (2005). Jevons' paradox. *Ecological Economics*, 54(1), 9-21. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.03.020>

- Alola, A. (2019). The trilemma of trade, monetary and immigration policies in the United States: Accounting for environmental sustainability. *Science of the Total Environment*, 658, 260-267. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.212>
- Anderson, P. (2008). Complexity Theory and Organization Science. *Organization Science*, 10(3), 216-232.
- Apel, H., Fassing, W., & Meissner, W. (1978). System Dynamics Versus Econometrics - An Approach for Synthesis. En G. J. Klir (Ed.), *Applied General Systems Research* (pp. 347-359). Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-1-4757-0555-3\\_25](https://doi.org/10.1007/978-1-4757-0555-3_25)
- Argyris, C., & Schön, D. A. (1997). Organizational Learning: a Theory of Action Perspective. *REIS: Revista Española de Investigaciones Sociológicas*, (77-78), 345-348.
- Baloch, M. A., Ozturk, I., Bekun, F. V., & Khan, D. (2021). Modeling the dynamic linkage between financial development, energy innovation, and environmental quality: Does globalization matter? *Business Strategy and the Environment*, 30(1), 176-184. <https://doi.org/10.1002/bse.2615>
- Bansal, P. (2005). Evolving sustainably: a longitudinal study of corporate sustainable development. *Strategic Management Journal*, 26(3), 197-218. <https://doi.org/10.1002/smj.441>
- Barnard, C. I. (1968). *The functions of the executive*. Harvard University Press.
- Barney, J. (1991). Firm Resources and Sustained Competitive Advantage. *Journal of Management*, 17(1), 99-120. <https://doi.org/10.1177/014920639101700108>
- Baum, J. A., & Shipilov, A. V. (2006). The SAGE Handbook of Organization Studies. En S. R. Clegg, C. Hardy, T. B. Lawrence, W. R. Nord, J. A. Baum & A. V. Shipilov (Eds.), *The SAGE Handbook of Organization Studies* (pp. 55-110). SAGE Publications Ltd. <https://doi.org/10.4135/9781848608030.n3>
- Becht, G. (1974). Systems Theory, The Key to Holism and Reductionism. *BioScience*, 24(10), 569-579. <https://doi.org/10.2307/1296630>
- Begum, H., Alam, A. S. A. F., Leal Filho, W., Awang, A. H., & Ghani, A. B. A. (2021). The COVID-19 Pandemic: Are There Any Impacts on Sustainability? *Sustainability*, 13(21), 11956. <https://doi.org/10.3390/su132111956>
- Bekun, F. V., Alola, A. A., & Sarkodie, S. A. (2019). Toward a sustainable environment: Nexus between CO<sub>2</sub> emissions, resource rent, renewable and nonrenewable energy in 16-EU countries. *Science of The Total Environment*, 657, 1023-1029. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.104>

- Bennett, N., & Lemoine, G. J. (2014). What a difference a word makes: Understanding threats to performance in a VUCA world. *Business Horizons*, 57(3), 311-317. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2014.01.001>
- Bertalanffy, L. V. (1976). *Teoría general de los sistemas: fundamentos, desarrollo y aplicaciones*. Fondo de Cultura Económica.
- Besharov, M. L., & Smith, W. K. (2014). Multiple Institutional Logics in Organizations: Explaining Their Varied Nature and Implications. *Academy of Management Review*, 39(3), 364-381. <https://doi.org/10.5465/amr.2011.0431>
- Bohórquez Arévalo, L. E. (2013). La organización empresarial como sistema adaptativo complejo. *Estudios Gerenciales*, 29(127), 258-265. <https://doi.org/10.1016/j.estger.2013.05.014>
- Box, G. E. P., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (2016). *Time series analysis: forecasting and control* (Fifth edition). John Wiley & Sons, Inc.
- Box, G.E.P., Jenkins, G.M. (1970). Time Series Analysis, Forecasting and Control. *Holden-Day, San Francisco, CA.*, 131-164.
- Brown, R. L., Durbin, J., & Evans, J. M. (1975). Techniques for Testing the Constancy of Regression Relationships Over Time. *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology*, 37(2), 149-163. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1975.tb01532.x>
- Bruckmeier, K. (2016). Social-Ecological Systems and Ecosystem Services. En *Social-Ecological Transformation* (pp. 183-234). Palgrave Macmillan UK. [https://doi.org/10.1057/978-1-137-43828-7\\_5](https://doi.org/10.1057/978-1-137-43828-7_5)
- Brundtland, G. H. (1987). Our Common Future—Call for Action. *Environmental Conservation*, 14(4), 291-294. <https://doi.org/10.1017/S0376892900016805>
- Burns, L. R., & Wholey, D. R. (1993). Adoption and Abandonment of Matrix Management Programs: Effects of Organizational Characteristics and Interorganizational Networks. *Academy of Management Journal*, 36(1), 106-138. <https://doi.org/10.2307/256514>
- Caballero, G., & Arias, X. C. (Eds.). (2013). *Nuevo institucionalismo: gobernanza, economía y políticas públicas*. Centro de Investigaciones Sociológicas (CIS).
- Cantabria. (2024, diciembre). Consultado el 24 de febrero de 2025, desde <https://www.caixabankresearch.com/es/publicaciones/fichas-comunidades-autonomas/cantabria>
- Carro, F. D., & Caló, A. (2012). La administración científica de Frederick W. Taylor: una lectura contextualizada. *VII Jornadas de sociología de la Universidad Nacional de La Plata*, 1-18.

- Charmaz, K. (2014). *Constructing grounded theory* (2nd edition) [OCLC: ocn878133162]. Sage.
- Chen, B., & Kan, H. (2008). Air pollution and population health: a global challenge. *Environmental Health and Preventive Medicine*, 13(2), 94-101. <https://doi.org/10.1007/s12199-007-0018-5>
- Chertow, M. R. (2000). Industrial Symbiosis: Literature and Taxonomy. *Annual review of energy environment*. <https://doi.org/doi:10.1146/annurev.energy.25.1.313>
- Chiavenato, I. (2019). *Introducción a la teoría general de la administración*. McGraw-Hill Interamericana de España S.L.
- Cho, J. S., Greenwood-Nimmo, M., & Shin, Y. (2023). Recent developments of the autoregressive distributed lag modelling framework. *Journal of Economic Surveys*, 37(1), 7-32. <https://doi.org/10.1111/joes.12450>
- Coase, R. H. (1937). The Nature of the Firm. *Economica*, 4(16), 386-405. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0335.1937.tb00002.x>
- Colding, J., & Barthel, S. (2019). Exploring the social-ecological systems discourse 20 years later. *Ecology and Society*, 24(1), art2. <https://doi.org/10.5751/ES-10598-240102>
- Collewet, M., & Sauermann, J. (2017). Working hours and productivity. *Labour Economics*, 47, 96-106. <https://doi.org/10.1016/j.labeco.2017.03.006>
- Coronado, G. (1996). El mecanicismo como paradigma "exitoso". *Revista de Filosofía*, 34(84), 349-354.
- Correa López, M. I. (2010). *Perspectivas teóricas de la organización*. Universidad Autónoma Metropolitana de México.
- Coughlan, T. (2016). Structured for Success : How the Structure of Today 's Professional Organizations Are Changing by. 2(1), 1-18.
- Cyert, R. M., & March, J. G. (1992). *A behavioral theory of the firm* (2nd ed). Blackwell Business.
- Daly, H. E. (1977). *Steady-state economics: the economics of biophysical equilibrium and moral growth*. Freeman.
- de la Rosa Alburquerque, A. (2019). Teoría de la Organización y Nuevo Institucionalismo en el Análisis Organizacional. *Administración y Organizaciones*, 4(8), 13-44. <https://rayo.xoc.uam.mx/index.php/Rayo/article/view/313>
- del Águila Obra, A. R., & Meléndez Padilla, A. (2003). La evolución de las formas organizativas: de la estructura simple a la organización en red y virtual. *Investigaciones europeas de dirección y economía de la empresa*, 9(1994), 69-94.

- Delmas, M. A., & Pekovic, S. (2013). Environmental standards and labor productivity: Understanding the mechanisms that sustain sustainability. *Journal of Organizational Behavior*, 34(2), 230-252. <https://doi.org/10.1002/job.1827>
- Demirhan, H. (2020). dLagM: An R package for distributed lag models and ARDL bounds testing (D. Dragan, Ed.). *PLOS ONE*, 15(2), e0228812. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0228812>
- Dey, P. K., Malesios, C., Chowdhury, S., Saha, K., Budhwar, P., & De, D. (2022). Adoption of circular economy practices in small and medium-sized enterprises: Evidence from Europe. *International Journal of Production Economics*, 248, 108496. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108496>
- Di Tomaso, N. (1993). Weber's social history and Etzioni's structural theory of charisma in organizations: Implications for thinking about charismatic leadership. *The Leadership Quarterly*, 4(3&4), 257-275. [https://doi.org/10.1016/1048-9843\(93\)90034-q](https://doi.org/10.1016/1048-9843(93)90034-q)
- Dickey, D. A., & Fuller, W. A. (1979). Distribution of the Estimators for Autoregressive Time Series With a Unit Root. *Journal of the American Statistical Association*, 74(366), 427. <https://doi.org/10.2307/2286348>
- Dockery, D. W., Pope, C. A., Xu, X., Spengler, J. D., Ware, J. H., Fay, M. E., Ferris, B. G., & Speizer, F. E. (1993). An Association between Air Pollution and Mortality in Six U.S. Cities. *New England Journal of Medicine*, 329(24), 1753-1759. <https://doi.org/10.1056/NEJM199312093292401>
- Donaldson, T., & Preston, L. E. (1995). The Stakeholder Theory of the Corporation: Concepts, Evidence, and Implications. *The Academy of Management Review*, 20(1), 65. <https://doi.org/10.2307/258887>
- Dong, K., Hochman, G., Kong, X., Sun, R., & Wang, Z. (2019). Spatial econometric analysis of China's  $PM_{10}$  pollution and its influential factors: Evidence from the provincial level. *Ecological Indicators*, 96, 317-328. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.09.014>
- Eisenhardt, M., & Jeffrey A. Matin. (2000). Dynamic Capabilities: What Are They? *Strategic Management Journal*, 21(10/11), 1105-1121.
- Elkington, J. (1998). Partnerships from cannibals with forks: The triple bottom line of 21st-century business. *Environmental Quality Management*, 8(1), 37-51. <https://doi.org/10.1002/tqem.3310080106>

- Epstein, G., Morrison, T. H., Lien, A., Gurney, G. G., Cole, D. H., Delaroche, M., Villamayor Tomas, S., Ban, N., & Cox, M. (2020). Advances in understanding the evolution of institutions in complex social-ecological systems. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, *44*, 58-66. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2020.06.002>
- Estrada Gallego, F. (2007). Herbert A. Simon y la Economía Organizacional. *Cuadernos de Economía*, *26*(46), 169-199. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=s0121-47722007000100007&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=s0121-47722007000100007&script=sci_arttext)
- European Agency for Safety and Health at Work. (2023). *Occupational safety and health in Europe: state and trends 2023*. Publications Office. Consultado el 19 de marzo de 2024, desde <https://data.europa.eu/doi/10.2802/56459>
- Feng, Z. (2023). Recovery of the Industrial Economy after Covid-19. *Advances in Economics, Management and Political Sciences*, *44*(1), 35-39. <https://doi.org/10.54254/2754-1169/44/20232179>
- Fernández Ruvalcaba, M. M., & Buendía Espinosa, A. (2014). Instituciones y Desarrollo. En F. Novelo Urdanivia (Ed.). Universidad Autónoma Metropolitana de México.
- Fischer, J., Gardner, T. A., Bennett, E. M., Balvanera, P., Biggs, R., Carpenter, S., Daw, T., Folke, C., Hill, R., Hughes, T. P., Luthé, T., Maass, M., Meacham, M., Norström, A. V., Peterson, G., Queiroz, C., Seppelt, R., Spierenburg, M., & Tenhunen, J. (2015). Advancing sustainability through mainstreaming a social-ecological systems perspective. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, *14*, 144-149. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2015.06.002>
- Folke, C., Hahn, T., Olsson, P., & Norberg, J. (2005). Adaptive governance of social-ecological systems. *Annual Review of Environment and Resources*, *30*(1), 441-473. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.30.050504.144511>
- Freeman, R. E. (2010, marzo). *Strategic Management: A Stakeholder Approach* (1.<sup>a</sup> ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139192675>
- Frosch, R. A. (1992). Industrial ecology: a philosophical introduction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *89*(3), 800-803. <https://doi.org/10.1073/pnas.89.3.800>
- Gabor, A., & Mahoney, J. T. (2013, febrero). The Oxford Handbook of Management Theorists. En M. Witzel & M. Warner (Eds.). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199585762.013.0008>

- Gálvez, A., Tirado, F., & Martínez, M. J. (2020). Work-Life Balance, Organizations and Social Sustainability: Analyzing Female Telework in Spain. *Sustainability*, *12*(9), 3567. <https://doi.org/10.3390/su12093567>
- García-García, P., Carpintero, Ó., & Buendía, L. (2020). Just energy transitions to low carbon economies: A review of the concept and its effects on labour and income. *Energy Research & Social Science*, *70*, 101664. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101664>
- Geels, F. W., & Schot, J. (2007). Typology of sociotechnical transition pathways. *Research Policy*, *36*(3), 399-417. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2007.01.003>
- Geissdoerfer, M., Pieroni, M. P., Pigosso, D. C., & Soufani, K. (2020). Circular business models: A review. *Journal of Cleaner Production*, *277*, 123741. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123741>
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy - A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, *143*, 757-768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Gibson, C. B., & Birkinshaw, J. (2004). The antecedents, consequences, and mediating role of organizational ambidexterity. *Academy of Management Journal*, *47*(2), 209-226. <https://doi.org/10.2307/20159573>
- Gladwin, T. N., Kennelly, J. J., & Krause, T.-S. (1995). Shifting Paradigms for Sustainable Development: Implications for Management Theory and Research. *The Academy of Management Review*, *20*(4), 874. <https://doi.org/10.2307/258959>
- Gobierno de Cantabria. (2023). Plan de Acción de la Agenda 2030 en Cantabria. [https://dgte.cantabria.es/documents/16449/28286245/Plan+de+accio+%CC%81n+Cooperacio+%CC%81n\\_Agenda+2030+Cantabria.pdf/725c0c79-9157-a1fd-386c-a94a036f9b37?t=1676982812035](https://dgte.cantabria.es/documents/16449/28286245/Plan+de+accio+%CC%81n+Cooperacio+%CC%81n_Agenda+2030+Cantabria.pdf/725c0c79-9157-a1fd-386c-a94a036f9b37?t=1676982812035)
- Gobierno de Cantabria. (2024). Proyecto de presupuestos generales de la comunidad autónoma de cantabria nforme económico y financiero. <https://wap.cantabria.es/documents/16870/32661216/05.-%2BINFORME%2BECON%3%93MICO%2BFINANCIERO.pdf/0f6bc7ea-9e30-4ca4-504f-68b6197e2318?t=1698751168342>
- Goh, J., Pfeffer, J., & Zenios, S. A. (2016). The Relationship Between Workplace Stressors and Mortality and Health Costs in the United States. *Management Science*, *62*(2), 608-628. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2014.2115>

- Granger, C. W. J. (1969). Investigating Causal Relations by Econometric Models and Cross-spectral Methods. *Econometrica*, 37(3), 424. <https://doi.org/10.2307/1912791>
- Greenwood, R., Raynard, M., Kodeih, F., Micelotta, E. R., & Lounsbury, M. (2011). Institutional Complexity and Organizational Responses. *Academy of Management Annals*, 5(1), 317-371. <https://doi.org/10.5465/19416520.2011.590299>
- Gujarati, D. N., & Porter, D. C. (2009). *Basic econometrics* (5.<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill.
- Gunderson, L. H., & Holling, C. S. (Eds.). (2002). *Panarchy: understanding transformations in human and natural systems*. Island Press.
- Hahn, T., Pinkse, J., Preuss, L., & Figge, F. (2015). Tensions in Corporate Sustainability: Towards an Integrative Framework. *Journal of Business Ethics*, 127(2), 297-316. <https://doi.org/10.1007/s10551-014-2047-5>
- Hannan, M. T., & Freeman, J. (1984). Structural Inertia and Organizational Change. *American Sociological Review*, 49(2), 149. <https://doi.org/10.2307/2095567>
- Hao, C., Chen, B., Sánchez De La Campa, A. M., & De La Rosa, J. D. (2020). Increased industry contribution and atmospheric heavy metals from economic recovery in Spain. *Journal of Cleaner Production*, 246, 119024. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119024>
- Harris, R. I. D., Sollis, R., & Harris, R. (2005). *Applied time series modelling and forecasting* (Reprinted). Wiley.
- Hart, S. L. (1995). A Natural-Resource-Based View of the Firm. *The Academy of Management Review*, 20(4), 986. <https://doi.org/10.2307/258963>
- Hassan, S., Danish, Khan, S., Xia, E., & Fatima, H. (2020). Role of institutions in correcting environmental pollution: An empirical investigation. *SUSTAINABLE CITIES AND SOCIETY*, 53. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101901>
- Hassard, J., Teoh, K. R. H., Visockaite, G., Dewe, P., & Cox, T. (2018). The cost of work-related stress to society: A systematic review. *Journal of Occupational Health Psychology*, 23(1), 1-17. <https://doi.org/10.1037/ocp0000069>
- Hayden, A., & Shandra, J. M. (2009). Hours of work and the ecological footprint of nations: an exploratory analysis. *Local Environment*, 14(6), 575-600. <https://doi.org/10.1080/13549830902904185>
- Holland, J. H. (2006). Studying complex adaptive systems. *Journal of Systems Science and Complexity*, 19(November 2005), 1-8. <https://doi.org/10.1007/s11424-006-0001-z>

- Hoskisson, R. E., Eden, L., Lau, C. M., Wright, M., & Hoskisson, R. E. (2010). Strategy in Emerging Economies. *The Academy of Management Journal*, 43(3), 249-267. <https://doi.org/https://doi.org/10.2307/1556394>
- Huerta Riveros, P., Almodóvar Martínez, P., & Navas López, J. E. (2004). La Diversificación desde la Teoría de Recursos y Capacidades. *Cuadernos de estudios empresariales*, (14), 87-104.
- Ibarra, J. T., Caviedes, J., Monterrubio-Solís, C., Barreau, A., & Marchant, C. (2024). Social-ecological resilience: Knowledge of agrobiodiversity by campesinos and migrants in the face of global changes. *Journal of Environmental Management*, 370, 122461. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122461>
- Ibarra Mirón, S., & Suárez Hernández, J. (2002). La teoría de los recursos y las capacidades: un enfoque actual en la estrategia empresarial. *Anales de estudios económicos y empresariales*, (15), 63-89. <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/19783>
- Jackson, T. (2009, noviembre). *Prosperity without Growth*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781849774338>
- Jackson, T., & Victor, P. (2011). Productivity and work in the 'green economy'. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 1(1), 101-108. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2011.04.005>
- Jan, N., & Ludo, V. E. (2010). Software survey : VOSviewer , a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84, 523-538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- Jay, J. (2013). Navigating Paradox as a Mechanism of Change and Innovation in Hybrid Organizations. *Academy of Management Journal*, 56(1), 137-159. <https://doi.org/10.5465/amj.2010.0772>
- John W. Meyer & Brian Rowan. (1977). Institutionalized Organizations: Formal Structure as Myth and Ceremony. *American Journal of Sociology*, 83(2), 340-363.
- Johnson, J. V., & Lipscomb, J. (2006). Long working hours, occupational health and the changing nature of work organization. *American Journal of Industrial Medicine*, 49(11), 921-929. <https://doi.org/10.1002/ajim.20383>
- Jordan, S., & Philips, A. Q. (2018). Cointegration Testing and Dynamic Simulations of Autoregressive Distributed Lag Models. *The Stata Journal: Promoting communications on statistics and Stata*, 18(4), 902-923. <https://doi.org/10.1177/1536867X1801800409>

- Jou, Y.-J., Huang, C.-C. L., & Cho, H.-J. (2014). A VIF-based optimization model to alleviate collinearity problems in multiple linear regression. *Computational Statistics*, 29(6), 1515-1541. <https://doi.org/10.1007/s00180-014-0504-3>
- Kallis, G. (2017). *In Defense of Degrowth: Opinions and Manifestos* (A. Vansintjan, Ed.; Reprinted ; first published March, 2017). Uneven Earth Press.
- Karr, A. F., Sanil, A. P., & Banks, D. L. (2006). Data quality: A statistical perspective. *Statistical Methodology*, 3(2), 137-173. <https://doi.org/10.1016/j.stamet.2005.08.005>
- Kauffman, S. (1995). *At Home in the Universe: The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity*. <https://doi.org/10.1017/S0016672300033772>
- Kim, J. H. (2019). Multicollinearity and misleading statistical results. *Korean Journal of Anesthesiology*, 72(6), 558-569. <https://doi.org/10.4097/kja.19087>
- Koilo, V. (2019). Evidence of the Environmental Kuznets Curve: Unleashing the Opportunity of Industry 4.0 in Emerging Economies. *Journal of Risk and Financial Management*, 12(3), 122. <https://doi.org/10.3390/jrfm12030122>
- Koontz, H. (2000). Revisión de la jungla de la teoría administrativa. *Contaduría y Administración*, (199), 55-74.
- Koontz, H., Weihrich, H., & Cannice, M. (2014). *Administración : una perspectiva global y empresarial* (14.<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill Interamericana.
- Kripfganz, S., & Schneider, D. C. (2023). ardl: Estimating autoregressive distributed lag and equilibrium correction models. *The Stata Journal: Promoting communications on statistics and Stata*, 23(4), 983-1019. <https://doi.org/10.1177/1536867X231212434>
- Kwiatkowski, D., Phillips, P. C., Schmidt, P., & Shin, Y. (1992). Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root. *Journal of Econometrics*, 54(1-3), 159-178. [https://doi.org/10.1016/0304-4076\(92\)90104-Y](https://doi.org/10.1016/0304-4076(92)90104-Y)
- Laloux, F., & Vidal, M. (2017). *Reinventar las organizaciones*. Arpa.
- Lamprecht, C., Graus, M., Striednig, M., Sticher, M., & Karl, T. (2021). Decoupling of urban CO<sub>2</sub> and air pollutant emission reductions during the European SARS-CoV-2 lockdown. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(4), 3091-3102. <https://doi.org/10.5194/acp-21-3091-2021>
- Landrigan, P. J., Fuller, R., Acosta, N. J. R., Adeyi, O., Arnold, R., Basu, N. (, Baldé, A. B., Bertollini, R., Bose-O'Reilly, S., Boufford, J. I., Breysse, P. N., Chiles, T., Mahidol, C., Coll-Seck, A. M.,

- Cropper, M. L., Fobil, J., Fuster, V., Greenstone, M., Haines, A., ... Zhong, M. (2018). The Lancet Commission on pollution and health. *The Lancet*, 391(10119), 462-512. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)32345-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)32345-0)
- Latouche, S. (2009). *Farewell to growth*. Polity.
- Lee, Y. W. (Ed.). (2010). *Journey to data quality*. MIT Press.
- Leydesdorff, L., & Welbers, K. (2011). The semantic mapping of words and co-words in contexts. *Journal of Informetrics*, 5(3), 469-475. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2011.01.008>
- Li, J., Hou, L., Wang, L., & Tang, L. (2021). Decoupling Analysis between Economic Growth and Air Pollution in Key Regions of Air Pollution Control in China. *Sustainability*, 13(12), 6600. <https://doi.org/10.3390/su13126600>
- Lovric, M., Pavlovic, K., Vukovic, M., Grange, S. K., Haberl, M., & Kern, R. (2021). Understanding the true effects of the COVID-19 lockdown on air pollution by means of machine learning. *Environmental Pollution*, 274, 115900. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115900>
- Luhmann, N. (1989). *Ecological communication*. University of Chicago Press.
- Lyle, J. T. (1994). *Regenerative design for sustainable development*. Wiley.
- March, J. G. (1991). Exploration and Exploitation in Organizational Learning. *Organization Science*, 2(1), 71-87. <https://doi.org/10.1287/orsc.2.1.71>
- Margolis, J. D., & Walsh, J. P. (2003). Misery Loves Companies: Rethinking Social Initiatives by Business. *Administrative Science Quarterly*, 48(2), 268-305. <https://doi.org/10.2307/3556659>
- Martinez-Alier, J. (2002, agosto). *The Environmentalism of the Poor: A Study of Ecological Conflicts and Valuation*. Edward Elgar Publishing. <https://doi.org/10.4337/9781843765486>
- Medina Macias, A., & Avila Vidal, A. (2002). Evolución de la teoría administrativa. Una vision desde la psicología organizacional. *Revista Cubana de Psicología*, (3), 262-272.
- Mele, C., Pels, J., & Polese, F. (2010). A Brief Review of Systems Theories and Their Managerial Applications. *Service Science*, 2(1/2), 126-135.
- Miles, M. B., & Huberman, A. M. (1994). *Qualitative data analysis: an expanded sourcebook* (2nd ed). Sage Publications.
- Mintzberg, H. (1989). The Structuring of Organizations. En D. Asch & C. Bowman (Eds.), *Readings in Strategic Management* (pp. 322-352). Macmillan Education UK. [https://doi.org/10.1007/978-1-349-20317-8\\_23](https://doi.org/10.1007/978-1-349-20317-8_23)

- Mitchell, R. K., Agle, B. R., & Wood, D. J. (1997). Toward a Theory of Stakeholder Identification and Salience: Defining the Principle of Who and What Really Counts. *The Academy of Management Review*, 22(4), 853. <https://doi.org/10.2307/259247>
- Mujtaba, A., Jena, P., Bekun, F., & Sahu, P. (2022). Symmetric and asymmetric impact of economic growth, capital formation, renewable and non-renewable energy consumption on environment in OECD countries. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 160. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112300>
- Times Cited in Web of Science Core Collection: 159 Total Times Cited: 159.
- Mujtaba, B. G., & Cavico, F. J. (2013). Corporate Wellness Programs: Implementation Challenges in the Modern American Workplace. *International Journal of Health Policy and Management*, 1(3), 193-199. <https://doi.org/10.15171/ijhpm.2013.36>
- Mulej, M. (2007). Systems theory: a worldview and/or a methodology aimed at requisite holism/realism of humans' thinking, decisions and action. *Systems Research and Behavioral Science*, 24(3), 347-357. <https://doi.org/10.1002/sres.810>
- Munck, L., & Tomiotto, M. F. (2019). Sustainability in organizational context: Reflections on the meanings attributed to the decision-making process and its strategic implications at Itaipu. *Revista de Gestão*, 26(1), 22-38. <https://doi.org/10.1108/REGE-03-2018-0040>
- Murthy, V. N., & Okunade, A. A. (2016). Determinants of U.S. health expenditure: Evidence from autoregressive distributed lag (ARDL) approach to cointegration. *Economic Modelling*, 59, 67-73. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2016.07.001>
- Natsiopoulou, K., & Tzeremes, N. G. (2022). ARDL: An R package for the analysis of level relationships. *Journal of Open Source Software*, 7(79), 3496. <https://doi.org/10.21105/joss.03496>
- Nelson, R. R., & Winter, S. G. (2004). *An evolutionary theory of economic change* (digitally reprinted). The Belknap Press of Harvard Univ. Press.
- O'Brien, R. M. (2007). A Caution Regarding Rules of Thumb for Variance Inflation Factors. *Quality & Quantity*, 41(5), 673-690. <https://doi.org/10.1007/s11135-006-9018-6>
- Olsson, P., Folke, C., & Berkes, F. (2004). Adaptive Comanagement for Building Resilience in Social/Ecological Systems. *Environmental Management*, 34(1). <https://doi.org/10.1007/s00267-003-0101-7>
- Ostrom, E. (1990, noviembre). *Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action* (1.ª ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511807763>

- Ostrom, E. (2009). A General Framework for Analyzing Sustainability of Social-Ecological Systems. *Science*, 325(5939), 419-422. <https://doi.org/10.1126/science.1172133>
- Paköz, M. Z., & Kaya, N. (2023). Personal Adaptations to Remote Working in the Post-Pandemic City and Its Potential Impact on Residential Relocations: The Case of Istanbul. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 03611981231174239. <https://doi.org/10.1177/03611981231174239>
- Pandey, R. (2015). Commonly used t-tests in medical research. *Journal of the Practice of Cardiovascular Sciences*, 1(2), 185. <https://doi.org/10.4103/2395-5414.166321>
- Pardo-Ramos, O. (2010). Taylor y Fayol: Vigencia de los principios, 67-76.
- Parker, L. D., & Ritson, P. A. (2005). Revisiting Fayol: Anticipating Contemporary Management. *British Journal of Management*, 16(3), 175-194. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8551.2005.00453.x>
- Parmar, B. L., Freeman, R. E., Harrison, J. S., Wicks, A. C., Purnell, L., & de Colle, S. (2010). Stakeholder Theory: *The State of the Art*. *Academy of Management Annals*, 4(1), 403-445. <https://doi.org/10.5465/19416520.2010.495581>
- Paul J. Di Maggio & Walter W. Powell. (1983). The Iron Cage Revisited: Institutional Isomorphism and Collective Rationality in Organizational Fields. *American Sociological Review*, 48(2), 147-160.
- Pearce, D. W., & Atkinson, G. D. (1993). Capital theory and the measurement of sustainable development: an indicator of "weak" sustainability. *Ecological Economics*, 8(2), 103-108. [https://doi.org/10.1016/0921-8009\(93\)90039-9](https://doi.org/10.1016/0921-8009(93)90039-9)
- Pesaran, M. H., & Shin, Y. (1999). An Autoregressive Distributed-Lag Modelling Approach to Cointegration Analysis. En S. Strom (Ed.), *Econometrics and Economic Theory in the 20th Century* (pp. 371-413). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CCOL521633230.011>
- Pesaran, M. H., Shin, Y., & Smith, R. J. (2001). Bounds testing approaches to the analysis of level relationships. *Journal of Applied Econometrics*, 16(3), 289-326. <https://doi.org/10.1002/jae.616>
- Petrella, C., & Joyanes Aguilar, L. (2007). Análisis de la teoría burocrática.
- Phillips, P. C. B., & Perron, P. (1988). Testing for a unit root in time series regression. *Biometrika*, 75(2), 335-346. <https://doi.org/10.1093/biomet/75.2.335>

- Pieroni, M. P., McAloone, T. C., & Pigosso, D. C. (2019). Business model innovation for circular economy and sustainability: A review of approaches. *Journal of Cleaner Production*, 215, 198-216. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.036>
- Pope, C. A., & Dockery, D. W. (2006). Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(6), 709-742. <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485>
- Porter, S., & Hawkins, P. (2019). Achieving Sustainability Through Sustainable Organizational Evaluation Systems. *New Directions for Evaluation*, 2019(162), 87-101. <https://doi.org/10.1002/ev.20360>
- Powell, W. W., & Maggio, P. J. D. (1999). *El nuevo institucionalismo en el análisis organizacional*. Fondo de Cultura Económica.
- Prigogine, I., & Stengers, I. (1988). *Order out of chaos: man's new dialogue with nature* (5. [print.]). Bantam Books.
- Qayyum, M., Ali, M., Nizamani, M. M., Li, S., Yu, Y., & Jahanger, A. (2021). Nexus between Financial Development, Renewable Energy Consumption, Technological Innovations and CO<sub>2</sub> Emissions: The Case of India. *Energies*, 14(15), 4505. <https://doi.org/10.3390/en14154505>
- Rahman, M., Abd Wahab, S., & Abdul Latiff, A. S. (2023). The Underlying Theories of Organizational Sustainability: The Motivation Perspective. *Journal of Business and Management Studies*, 5(1), 181-193. <https://doi.org/10.32996/jbms.2023.5.1.18>
- Rai, S. M., Brown, B. D., & Ruwanpura, K. N. (2019). SDG 8: Decent work and economic growth - A gendered analysis. *World Development*, 113, 368-380. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2018.09.006>
- Reyes-García, V., García-del-Amo, D., Álvarez-Fernández, S., Benyei, P., Calvet-Mir, L., Junqueira, A. B., Labeyrie, V., Li, X., Miñarro, S., Porcher, V., Porcuna-Ferrer, A., Schlingmann, A., Schunko, C., Soleymani, R., Tofighi-Niaki, A., Abazeri, M., Attoh, E. M. N. A. N., Ayanlade, A., Ávila, J. V. D. C., ... Zakari, I. S. (2024). Indigenous Peoples and local communities report ongoing and widespread climate change impacts on local social-ecological systems. *Communications Earth & Environment*, 5(1), 29. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01164-y>
- Rivas Tovar, L. A. (2002). Nuevas formas de organización. *Estudios Gerenciales*, 13-45.

- Rivas Tovar, L. A. (2009). Evolución de la teoría de la organización. *Universidad & Empresa*, 17, 11-32.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, A., Chapin, F. S., Lambin, E. F., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., De Wit, C. A., Hughes, T., Van Der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., ... Foley, J. A. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461(7263), 472-475. <https://doi.org/10.1038/461472a>
- Ruiz Ballesteros, E., & Solana Ruiz, J. L. (2013). *Complejidad y Ciencias Sociales*. Universidad Internacional de Andalucía.
- Salgado, E. (2003). Teoría de costos de transacción: una breve reseña. *Cuadernos de Administración*, 16(26), 61-78.
- Sarkodie, S., Adams, S., Owusu, P., Leirvik, T., & Ozturk, I. (2020). Mitigating degradation and emissions in China: The role of environmental sustainability, human capital and renewable energy. *Science of the Total Environment*, 719. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137530>
- Sarkodie, S., Strezov, V., Weldekidan, H., Asamoah, E., Owusu, P., & Doyi, I. (2019). Environmental sustainability assessment using dynamic Autoregressive-Distributed Lag simulations-Nexus between greenhouse gas emissions, biomass energy, food and economic growth. *Science of the Total Environment*, 668, 318-332. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.432>
- Sauer, P., Hadrabova, A., & Kreuz, J. (2018). Decoupling of GDP and air pollution in the Czech Republic: trend analysis and policy story behind. *International Journal of Environmental Technology and Management*, 21(5/6), 253. <https://doi.org/10.1504/IJETM.2018.100586>
- Senge, P. (2011). *La quinta disciplina* (2.<sup>a</sup> ed.). Ediciones Granica. <http://cinto.invenmar.org.co/share/proxy/alfresco/api/node/content/workspace/SpacesStore/3bef9ef0-14c7-4954-af1e-50bb9092578d/LaQuintaDisciplina.pdf>
- Seuring, S., & Müller, M. (2008). From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, 16(15), 1699-1710. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.04.020>
- Shepard, E., & Clifton, T. (2000). Are longer hours reducing productivity in manufacturing? *International Journal of Manpower*, 21(7), 540-553. <https://doi.org/10.1108/01437720010378999>

- Shona L. Brown & Kathleen M. Eisenhardt. (1997). The Art of Continuous Change: Linking Complexity Theory and Time-Paced Evolution in Relentlessly Shifting Organizations. *Administrative Science Quarterly*, 42(1), 1-34.
- Shumway, R. H. (2017). *Time series analysis and its applications: with r examples*. Springer Science+Business Media.
- Singh, J. V., & Lumsden, C. J. (1990). Theory and Research in Organizational Ecology. *Annual Review of Sociology*, 16, 161-195.
- Skyttner, L. (2001). *General systems theory: ideas & applications*. World Scientific.
- Smith, W. K., & Lewis, M. W. (2011). Toward a Theory of Paradox: A Dynamic equilibrium Model of Organizing. *Academy of Management Review*, 36(2), 381-403. <https://doi.org/10.5465/amr.2009.0223>
- Sommer, M. (1984). The econometric challenge to system dynamics and vice versa: Some future perspectives. *Technological Forecasting and Social Change*, 25(3), 263-280. [https://doi.org/10.1016/0040-1625\(84\)90005-2](https://doi.org/10.1016/0040-1625(84)90005-2)
- Stahel, W. R. (2016). The circular economy. *Nature*, 531(7595), 435-438. <https://doi.org/10.1038/531435a>
- Sterman, J. D. (2009). *Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*. Irwin/McGraw-Hill.
- Suchman, M. C. (1995). Managing Legitimacy: Strategic and Institutional Approaches. *The Academy of Management Review*, 20(3), 571. <https://doi.org/10.2307/258788>
- Syddall, V., Thrush, S., & Fisher, K. (2021). Transdisciplinary analysis of Pacific tuna fisheries: A research framework for understanding and governing oceans as social-ecological systems. *Marine Policy*, 134, 104783. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104783>
- Tabarés, R. & Arrizabalaga, E. (2020). Territorial Responsible Research and Innovation and Smart Specialization (TETRRISS). Case of study Cantabria.
- Tardin, M. G., Perin, M. G., Simões, C., & Braga, L. D. (2024). Organizational Sustainability Orientation: A Review. *Organization & Environment*, 37(2), 298-324. <https://doi.org/10.1177/10860266231226144>
- Taylor, F. W. (2016). *The Principles of Scientific Management*. Cosimo Classics.

- Teece, D. J. (2007). Explicating dynamic capabilities: the nature and microfoundations of (sustainable) enterprise performance. *Strategic Management Journal*, 28(13), 1319-1350. <https://doi.org/10.1002/smj.640>
- Teece, D. J., Pisano, G., & Shuen, A. (1997). Dynamic Capabilities and Strategic Management. *Strategic Management Journal*, 18(March), 509-533.
- Vargas Hernández, J. G. (2008). Teoría institucional y neoinstitucional en la administración internacional de las organizaciones. *Revista Visión de Futuro*, 10(2), 1-21.
- Virtanen, M., Heikkila, K., Jokela, M., Ferrie, J. E., Batty, G. D., Vahtera, J., & Kivimaki, M. (2012). Long Working Hours and Coronary Heart Disease: A Systematic Review and Meta-Analysis. *American Journal of Epidemiology*, 176(7), 586-596. <https://doi.org/10.1093/aje/kws139>
- Waltman, L., van Eck, N. J., & Noyons, E. C. (2010). A unified approach to mapping and clustering of bibliometric networks. *Journal of Informetrics*, 4(4), 629-635. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2010.07.002>
- Wang, R. Y., & Strong, D. M. (1996). Beyond Accuracy: What Data Quality Means to Data Consumers. *Journal of Management Information Systems*, 12(4), 5-33. <https://doi.org/10.1080/07421222.1996.11518099>
- Watts, N., Adger, W. N., Agnolucci, P., Blackstock, J., Byass, P., Cai, W., Chaytor, S., Colbourn, T., Collins, M., Cooper, A., Cox, P. M., Depledge, J., Drummond, P., Ekins, P., Galaz, V., Grace, D., Graham, H., Grubb, M., Haines, A., ... Costello, A. (2015). Health and climate change: policy responses to protect public health. *The Lancet*, 386(10006), 1861-1914. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(15\)60854-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(15)60854-6)
- Wei, X., Li, L., & Zhang, F. (2021, abril). The Impact of the COVID-19 Pandemic on Social Economy and Sustainability. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-340758/v1>
- Weick, K. E. (1995). *Sensemaking in organizations*. Sage Publications.
- Weizsacker, E. U. (2013, octubre). *Factor Four*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315070919>
- Wernerfelt, B. (2007). A Resource-Based View of the Firm. *Strategic Management Journal*, 5(2), 171-180.
- White, H. D., & Griffith, B. C. (1981). Author cocitation: A literature measure of intellectual structure. *Journal of the American Society for Information Science*, 32(3), 163-171. <https://doi.org/10.1002/asi.4630320302>

- Wooldridge, J. M. (2016). *Introductory econometrics: a modern approach* (6.<sup>a</sup> ed.). Cengage Learning.
- Wu, Z., & Pagell, M. (2011). Balancing priorities: Decision-making in sustainable supply chain management. *Journal of Operations Management*, 29(6), 577-590. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2010.10.001>
- Yang, C., Li, T., & Albitar, K. (2021). Does Energy Efficiency Affect Ambient  $PM_{2,5}$ ? The Moderating Role of Energy Investment. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 707751. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.707751>
- Yin, R. K. (2013). *Case study research: design and methods* (5.<sup>a</sup> ed.). Sage Publications.
- Zeng, X. (2023). The Impact of Covid-19 On the Sustainability of the Airline Industry. *BCP Business & Management*, 42, 46-52. <https://doi.org/10.54691/bcpbm.v42i.4560>
- Zhang, L., Godil, D., Bibi, M., Khan, M., Sarwat, S., & Anser, M. (2021). Caring for the environment: How human capital, natural resources, and economic growth interact with environmental degradation in Pakistan? A dynamic ARDL approach. *Science of the Total Environment*, 774. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145553>

## **A.1. Estabilidad de los datos en el tiempo. Estacionariedad**

Una de las premisas fundamentales para garantizar la robustez del análisis a posteriori es la estacionariedad.

La estacionariedad es una propiedad de las series temporales que implica que sus propiedades estadísticas, como la media y la varianza, son constantes a lo largo del tiempo. La característica de estacionariedad es fundamental en el análisis de datos y en modelos elaborados sobre de series temporales porque permiten hacer inferencias y predicciones robustas.

Una serie temporal es estacionaria si sus propiedades estadísticas no cambian con el tiempo, por ejemplo, el ruido blanco, en el cual, sus valores fluctúan alrededor de una media constante con una varianza constante. Gráficamente, podría representarse en una gráfica como la mostrada a la izquierda en la Figura A.1. Por otro lado, una serie no estacionaria es aquella en que sus propiedades estadísticas cambian con el tiempo y puede estar sujeta a tendencias de modo que su media y su varianza varíen con el tiempo. Ello se muestra en la Figura A.1, a la derecha.

Gran parte de los sistemas naturales y socioeconómicos que nos encontramos en el mundo real están representados por variables que varían en el tiempo de modo no estacionario, lo que conlleva la dificultad a la hora de realizar modelos e inferencias robustas.

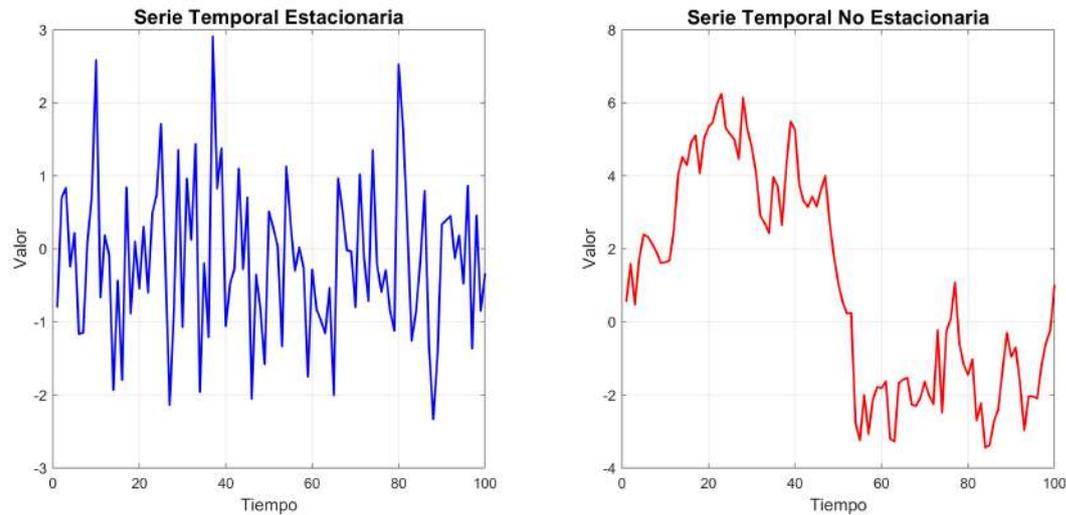


Figura A.1: Estacionariedad en series temporales. A la izqda. una serie temporal estacionaria; a la dcha. una no estacionaria.

### **PRUEBAS DE RAÍZ UNITARIA. PRUEBAS DE DICKEY-FULLER AUMENTADA (ADF), PRUEBA DE PHILLIPS-PERRON (PP) Y PRUEBA DE KWIATKOWSKI-PHILLIPS-SCHMIDT-SHIN (KPSS)**

Las pruebas de raíz unitaria, como la prueba de Dickey-Fuller Aumentada (ADF), la prueba de Phillips-Perron (PP) o la prueba de Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin (KPSS) son fundamentales en la evaluación de la estacionariedad de las series temporales.

La presencia de raíz unitaria en una serie temporal significa que la serie tiene una tendencia a moverse de manera persistente no volviendo a un nivel estable tras un cambio (Figura A.2, a la derecha en color rojo, la serie temporal tiene raíz unitaria). Esto significa que los valores futuros de la serie no solo dependen de una tendencia fija, sino que también están influenciados por un componente aleatorio que hace que los valores sean impredecibles. En otras palabras, hay una parte de la serie que se mueve al azar y no puede ser predicha con exactitud.

La raíz unitaria representa el hecho de que cualquier cambio o evento de la serie no desaparece en el tiempo, sino que se acumula (por causa de algún evento externo, por ejemplo, una innovación tecnológica, un proceso natural o socioeconómico que implique un cambio de tendencia) significando que los efectos son permanentes y no se disipan en el tiempo.

En el análisis de series temporales, detectar raíces unitarias es fundamental ya que, si una serie temporal tiene una raíz unitaria, las regresiones (análisis de relaciones entre variables) pueden mostrar

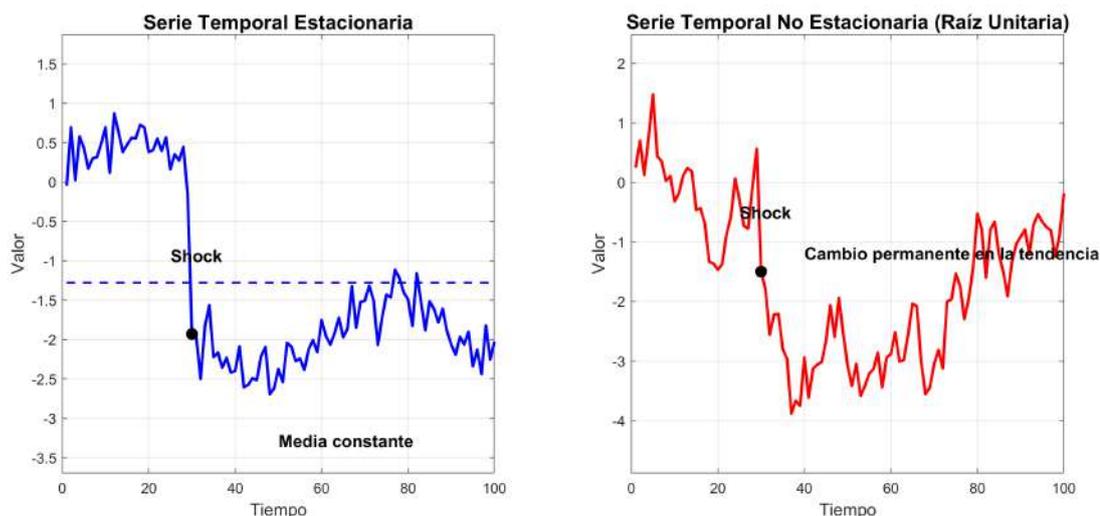


Figura A.2: Concepto de raíz unitaria.

resultados engañosos, sugiriendo relaciones fuertes entre variables que no existen realmente al asumir que las propiedades de la serie son constantes cuando no lo son.

La prueba de Dickey-Fuller Aumentada (ADF) (Dickey & Fuller, 1979) es una extensión de la prueba de Dickey-Fuller estándar, diseñada para manejar series temporales más complejas. Se utiliza para determinar si una serie temporal tiene una raíz unitaria, lo que implicaría que la serie no es estacionaria. La prueba ADF introduce retrasos adicionales de la variable dependiente para corregir la posible autocorrelación en los residuos del modelo.

$$\Delta Y_t = \alpha + \beta t + \gamma Y_{t-1} + \delta_1 \Delta X_{t-1} + \delta_2 \Delta X_{t-2} + \dots + \delta_p \Delta X_{t-p} + \epsilon_t \quad (\text{A.1})$$

donde:

- $\Delta Y_t$  es la diferencia de  $Y_t$  con respecto al período anterior,
- $\alpha$  es una constante,
- $\beta t$  es una tendencia determinista,
- $\gamma$  es el coeficiente evaluado para verificar la presencia de raíz unitaria,
- $\delta_i$  son los coeficientes de los retrasos de  $\Delta X_{t-i}$ , y
- $\epsilon_t$  es el término de error.

La hipótesis nula ( $H(0)$ ) de la prueba ADF es que existe una raíz unitaria ( $\gamma = 0$ ), lo que indica que la serie no es estacionaria. Si se rechaza la hipótesis nula, se concluye que la serie es estacionaria.

La prueba de Phillips-Perron (PP) (Phillips & Perron, 1988) también sirve para determinar si una serie temporal es estacionaria o no. Sin embargo, la prueba PP ofrece ciertas ventajas en la presencia de heterocedasticidad (los errores o residuos de un modelo de regresión varían con el tiempo, pudiendo proporcionar resultados engañosos en la prueba de raíz unitaria que asume que los errores son constantes) y autocorrelación (los errores en el modelo de regresión no son independientes entre sí, y la prueba de raíz unitaria puede sobreestimar o subestimar su presencia).

La aceptación o rechazo de  $H(0)$  se lleva a cabo igualmente que en el caso de ADF.

Por otro lado, en el caso de la prueba de raíz unitaria de KPSS (Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin) (Kwiatkowski et al., 1992) se invierten las hipótesis nula y alternativa. Mientras que ADF y PP evalúan si una serie temporal tiene una raíz unitaria (lo que indicaría que no es estacionaria), la prueba de KPSS evalúa si una serie es estacionaria bajo la hipótesis nula. KPSS, por tanto, es especialmente útil cuando ADF y PP no rechazan la hipótesis nula, proporcionando una forma de verificar si las series es realmente estacionaria.

## PRUEBA DE CONTRASTE

La comprobación de la estacionariedad o cointegración (prueba de límites) se lleva a cabo mediante una prueba de contraste.

Una prueba de contraste es un procedimiento estadístico utilizado para tomar decisiones o hacer inferencias sobre una población a partir de una muestra de datos. La prueba de contraste se utiliza para evaluar la validez de una hipótesis nula ( $H(0)$ ), frente a una hipótesis alternativa ( $H(1)$ ).

La prueba de contraste consta de los siguientes elementos:

- $H(0)$  es una afirmación que se presume cierta hasta que se demuestre lo contrario,
- $H(1)$  es la afirmación opuesta a la hipótesis nula,
- Nivel de Significatividad ( $\alpha$ ), es la probabilidad de rechazar la hipótesis nula cuando es verdadera. Comúnmente se usan los valores: 0,01 (1 %), 0,05 (5 %) y 0,1 (10 %).
- Estadístico de Prueba (t-statistic): Es una medida calculada a partir de los datos de la muestra que se utiliza para decidir si se rechaza la hipótesis nula.

- **Región Crítica:** Es el conjunto de valores del estadístico de prueba para los cuales se rechaza la hipótesis nula. Depende del nivel de significatividad y del tipo de prueba (unilateral o bilateral).
- **$p$ -value:** Es la probabilidad de obtener un valor del estadístico de prueba tan extremo como el observado, suponiendo que la hipótesis nula es verdadera. Se utiliza para tomar la decisión final sobre la hipótesis nula.

La aceptación o rechazo de la hipótesis nula se fundamenta en el cálculo del estadístico  $t$  o el valor de  $p$ . Si el estadístico  $t$  es menor (más negativo) que un valor crítico que depende del tamaño de la muestra y el nivel de significatividad, entonces se rechaza  $H(0)$ . El valor de  $p$  representa la probabilidad de obtener un resultado tan extremo como el observado, bajo la hipótesis nula para un determinado nivel de significatividad. Si la probabilidad es menor que ese nivel de significatividad, entonces se rechaza  $H(0)$ ; en caso contrario, se acepta.

## ESTADÍSTICO $T$ Y $P$ -VALUE

El estadístico  $t$  (Pandey, 2015) se utiliza para evaluar si la media de una muestra es significativamente diferente de un valor específico y se expresa de la siguiente forma:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}}, \quad (\text{A.2})$$

siendo:

- $\bar{x}$  la media de la muestra,
- $\mu_0$  el hipotético valor de la media (media bajo la hipótesis nula),
- $\sigma$  la desviación estándar de la muestra, y
- $n$  el tamaño de la muestra .

El valor de  $t$  se compara contra el valor crítico obtenido para la distribución  $t$ -Student para un nivel de significatividad y un tamaño de muestra dados.

Si el valor de  $t$  es inferior o igual al valor crítico, se rechaza  $H(0)$ ; si es mayor, no se rechaza  $H(0)$ . El  $p$ -value se calcula a partir del valor del estadístico  $t$  y el número de grados de libertad de la muestra. Para un nivel de significatividad dado ( $\alpha$ )  $p \leq \alpha$ , se rechaza  $H(0)$ ; si  $p > \alpha$ , no se rechaza  $H(0)$ .

## A.2. Relaciones estables a largo plazo. Cointegración

La cointegración es una propiedad relevante en el análisis de series temporales, ya que significa que un conjunto de series temporales, aun no siendo estacionarias, de forma que se mueven por separado independientemente unas de otras, alcanzan, de alguna forma, un equilibrio a largo plazo en el cual discurren juntas.

Se dice que dos o más series temporales no estacionarias  $I(1)$  están cointegradas si existe una combinación lineal de ellas que es estacionaria ( $I(0)$ ).

La cointegración conlleva el hecho de que las series no sean estacionarias, pero que lo sean tras una primera diferenciación ( $I(1)$ ), de modo, que, previamente al análisis de cointegración hay que realizar la prueba de raíz unitaria.

Una vez comprobada la condición anterior, se puede llevar a cabo la prueba de cointegración que, en el marco de los MARDL, se lleva a cabo mediante la prueba de límites.

## A.3. Efectos a corto y largo plazo. MARDL y MARDL-ECM

El MARDL se utiliza para modelar los valores actuales de una variable dependiente  $Y_t$ , influenciados por sus propios valores pasados y por los valores actuales y pasados de una o más variables independientes  $X_t$ . Este modelo captura las relaciones de corto plazo entre una variable dependiente  $Y$  y una o más variables independientes  $X$ . La expresión general del modelo ARDL es

$$Y_t = \alpha + \sum_{i=1}^p \beta_i Y_{t-i} + \sum_{j=0}^q \theta_j X_{t-j} + \epsilon_t \quad (\text{A.3})$$

donde:

- $Y_t$  es la variable dependiente en el período  $t$ ,
- $\alpha$  es la constante,
- $\beta_i$  son los coeficientes de los términos regresivos o retardados de  $Y$ ,
- $Y_{t-i}$  son los valores retardados de la variable dependiente,
- $\theta_j$  son los coeficientes de los términos de retrasos distribuidos (retrasos de  $X$ ),
- $X_{t-j}$  representa los valores actuales y retardados de la variable independiente, y

- $\epsilon_t$  es el término de error.

A partir de la expresión (A.3), la ecuación (A.4) introduce una reformulación mediante diferencias para separar, explícitamente, los efectos a corto plazo y preparando el modelo para analizar la cointegración.

$$\Delta Y_t = \alpha + (\beta_0 - 1)Y_{t-1} + \delta_0 X_t + \sum_{i=1}^{p-1} \gamma_i \Delta Y_{t-i} + \sum_{j=1}^q \theta_j \Delta X_{t-j} + \epsilon_t \quad (\text{A.4})$$

En (A.4), el término  $\Delta Y_t$  denota el cambio en  $Y$  de un período al siguiente.  $\beta_0 - 1$  representa el impacto de largo plazo de  $Y_{t-1}$  y  $\delta_0$  el efecto contemporáneo de  $X_t$ , mientras que los términos de sumatorio  $\gamma_i$  y  $\theta_j$  capturan los efectos a corto plazo de los retardos en  $Y$  e  $X$ . Esta reformulación permite analizar cómo las variables regresan al equilibrio tras una desviación.

La ecuación (A.5) representa el modelo de corrección de error (ECM) derivado del ARDL; MARDL-ECM.

$$\Delta Y_t = \alpha + \lambda \text{ECT}_{t-1} + \sum_{i=1}^{p-1} \gamma_i \Delta Y_{t-i} + \sum_{j=1}^q \theta_j \Delta X_{t-j} + \epsilon_t \quad (\text{A.5})$$

Aquí aparece el término de corrección de error ( $\text{ECT}_{t-1}$ ), que mide la desviación del equilibrio de largo plazo entre  $Y$  e  $X$ . El coeficiente  $\lambda$  es esencial e indica la velocidad de ajuste al equilibrio: cuanto más negativo sea  $\lambda$ , más rápido regresan las variables al equilibrio tras un choque.  $\sum_{i=1}^{p-1} \gamma_i \Delta Y_{t-i}$  y  $\sum_{j=1}^q \theta_j \Delta X_{t-j}$  representan los efectos a corto plazo de los cambios pasados de  $Y$  y  $X$ .

El  $\text{ECT}_{t-1}$  está definido en (A.6)

$$\text{ECT}_{t-1} = Y_{t-1} - \left( \frac{\delta_0}{1 - \beta_0} \right) X_{t-1} \quad (\text{A.6})$$

donde se expresa como la desviación entre el valor pasado de  $Y$ , y el nivel de equilibrio esperado basado en  $X$ . Este nivel de equilibrio está determinado por la relación de largo plazo  $\frac{\delta_0}{1 - \beta_0}$ .

## PRUEBA DE LÍMITES

A partir del modelo ARDL-ECM, se formula la hipótesis:

- Hipótesis nula ( $H(0)$ ): No hay cointegración ( $\lambda = 0$ ).

- Hipótesis alternativa ( $H(1)$ ): Existe cointegración ( $\lambda \neq 0$ ).

Y se calcula el estadístico  $F$ , para evaluar la significatividad conjunta de los coeficientes del término de corrección de errores ( $\lambda$ ). El estadístico  $F$  viene dado por la siguiente expresión

$$F = \frac{\frac{SSR_{\text{restricted}} - SSR_{\text{unrestricted}}}{q}}{\frac{SSR_{\text{unrestricted}}}{n-k}}, \quad (\text{A.7})$$

donde

- $SSR_{\text{restricted}}$  es la suma de los cuadrados del modelo restringido (sin ECT),
- $SSR_{\text{unrestricted}}$  es la suma de los cuadrados del modelo no restringido (con ECT),
- $q$  es el número de restricciones,
- $n$  es el número de observaciones, y
- $k$  es el número de parámetros estimados en el modelo no restringido.

Se comparan los valores del estadístico  $F$  con valores críticos tabulados derivados de su distribución (Pesaran et al., 2001). Estos valores se presentan en dos conjuntos:

- Un límite inferior  $I(0)$ , supone que todas las variables son integradas de orden  $I(0)$ , es decir, son estacionarias en niveles.
- Un límite superior  $I(1)$ , supone que todas las variables son integradas de orden  $I(1)$ , es decir, son estacionarias tras ser diferenciadas una vez.

Los valores críticos se presentan para ciertos tamaños de muestra, y se escogen los valores críticos para el tamaño de muestra más cercano al sistema de estudio. Estos valores se presentan para distintos niveles de significatividad, típicamente, 10 %, 5 % y 1 %.

Si el estadístico  $F$  está por debajo del límite inferior no se rechaza la hipótesis nula de no cointegración. Si el estadístico  $F$  está por encima del límite superior se rechaza la hipótesis nula, indicando que hay cointegración. Si el estadístico  $F$  está entre los límites inferior y superior la prueba es inconclusa y se necesitan pruebas adicionales.

Si no se rechaza la hipótesis nula de no cointegración, se puede modelar el comportamiento a corto plazo mediante modelos vectorial autorregresivos (VAR). Si se rechaza la hipótesis nula,

determinando la existencia de cointegración, entonces se puede estimar el MARDL-ECM completo, incluyendo el término de corrección de error (ECT) para capturar las desviaciones de corto plazo de la relación a largo plazo.

## A.4. Relación predictiva entre variables a lo largo del tiempo. Causalidad de Granger

La causalidad de Granger es una herramienta estadística que se usa para determinar si un conjunto de datos puede ayudar a predecir otro (Granger, 1969). Supongamos dos series temporales,  $X_t$  e  $Y_t$ . Se hace una regresión de  $Y_t$  sobre sus propios valores pasados  $Y_{t-1}, Y_{t-2}, \dots$ ; posteriormente se hace la regresión de  $Y_t$  sobre sus valores pasados y los valores pasados de  $X_t$ .

Posteriormente se hace la prueba estadística  $F$  para comparar si la inclusión de los valores pasado de  $X_t$  mejora la predicción de  $Y_t$  sobre sus propios valores pasados, en cuyo caso se concluye que  $X$  causa a  $Y$ . Es posible que haya causalidad recíproca o bidireccional entre ambas series de tiempo, que haya causalidad en un único sentido (causalidad unidireccional) o que no haya causalidad.

Conviene distinguir el concepto de causalidad de correlación. El concepto de causalidad requiere, además de la asociación entre variables, la ordenación temporal de los cambios de la variable causa que han de anteceder a los cambios de la variable efecto. En el caso de la correlación, mide la asociación entre dos variables, pero no considera el orden temporal.

## A.5. Consistencia

### A.5.1. Validación de la estabilidad del modelo

Las pruebas de diagnóstico en modelos econométricos son esenciales para asegurarse de que los resultados obtenidos son válidos y fiables. Para ello los residuos (diferencias entre los valores observados y redichos) han de cumplir las siguientes condiciones:

- Independencia (No autocorrelación). Los residuos han de ser independientes entre sí (no debe haber autocorrelación) indicando que se ha representado toda la información en el modelo. Para ello se realiza la prueba de Durbin-Watson.

- Varianza constante (homocedasticidad). La dispersión de los residuos debe ser uniforme, indicando que la volatilidad de la serie es constante. Para ello se realiza la prueba de Breusch-Pagan-Godfrey.
- Normalidad. Los residuos han de seguir una distribución normal, premisa fundamental para la validez de muchas pruebas de significatividad y la construcción de intervalos de confianza. Prueba de Jarque-Bera.

Las distintas pruebas de validación de los MARDL son mostradas en la Figura A.3

### PRUEBA DE AUTOCORRELACIÓN DE LOS RESIDUOS. DURBIN-WATSON

Evalúa la presencia de autocorrelación en los residuos de un modelo. Valores cercanos a 2 indican que no hay autocorrelación, mientras que valores cercanos a 0 o 4 sugieren autocorrelación positiva o negativa, respectivamente. El valor se calcula mediante la siguiente expresión

$$d = \frac{\sum_{t=2}^n (e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^n e_t^2}, \quad (\text{A.8})$$

donde

- $e_t$  son los residuos del modelo en el tiempo  $t$ ,
- $n$  es el número de observaciones.

### PRUEBA DE HETEROCEDASTICIDAD DE LOS RESIDUOS. PRUEBA DE BREUSCH-PAGAN-GODFREY

Esta prueba evalúa si la varianza de los residuos depende de las variables explicativas del modelo. Si es así, esto indica la presencia de heterocedasticidad. Se calcula a través de

$$e_t^2 = \alpha + \beta_1 X_{1t} + \beta_2 X_{2t} + \dots + \beta_k X_{kt} + u_t, \quad (\text{A.9})$$

siendo  $X_{it}$  las variables independientes; se calcula la estadística  $LM$  contra una distribución  $\chi^2$  con  $k$  grados de libertad, donde  $k$  es el número de variables independientes del modelo original. Si el valor de la estadística  $LM$  es mayor que el valor crítico de la distribución  $\chi^2$  con  $k$  grados de libertad, se rechaza la hipótesis nula, indicando la presencia de heterocedasticidad.

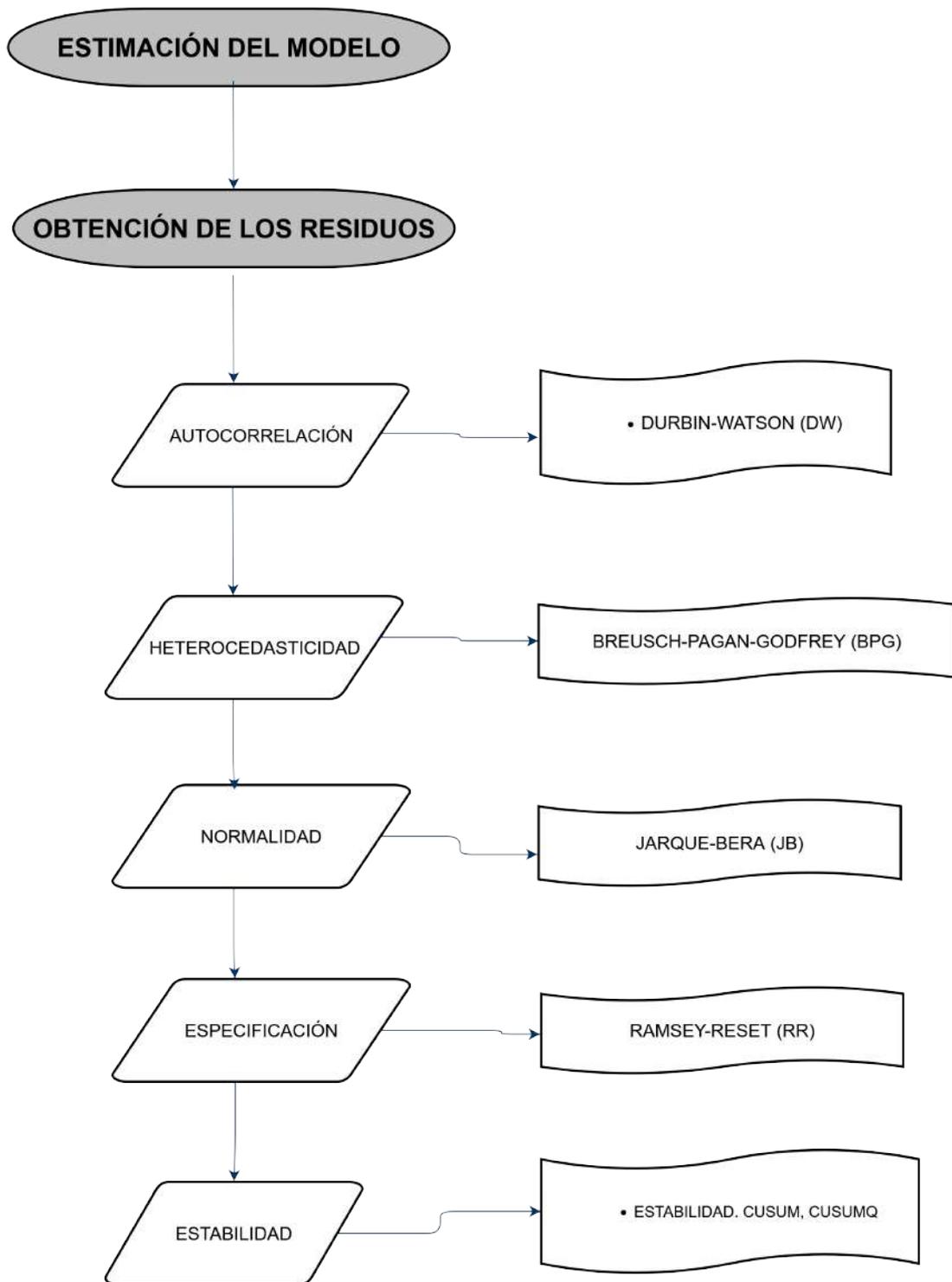


Figura A.3: Esquema general de las pruebas de robustez para modelos econométricos.

## PRUEBA DE NORMALIDAD. JARQUE-BERA

La prueba de Jarque-Bera es una prueba estadística utilizada para determinar si los residuos de un modelo de regresión siguen una distribución normal. Esta prueba se basa en el análisis de la asimetría ( $S$ ) y la curtosis ( $K$ ) (altura y anchura) de la distribución de los residuos comparando estos resultados con los de la distribución normal, mediante

$$S = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left( \frac{e_t - \bar{e}}{\sigma} \right)^3, \quad (\text{A.10})$$

$$K = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left( \frac{e_t - \bar{e}}{\sigma} \right)^4, \quad (\text{A.11})$$

siendo  $\bar{e}$  la media de los residuos y  $\sigma$  la desviación estándar. Entonces,

$$JB = \frac{n}{6} \left( S^2 + \frac{(K - 3)^2}{4} \right), \quad (\text{A.12})$$

siendo  $n$  el número de datos.

La estadística Jarque-Bera sigue una distribución  $\chi^2$  de 2 grados de libertad. Si el valor de la estadística Jarque-Bera es mayor que el valor crítico de la distribución  $\chi^2$  con 2 grados de libertad, se rechaza la hipótesis nula, indicando que los residuos no siguen una distribución normal.

### A.5.2. Comprobación de la estabilidad de los resultados

La estabilidad de los coeficientes es importante para la validez de las inferencias y predicciones. Los métodos CUSUM (Cumulative Sum) y CUSUMQ (CUSUM of Squares) se utilizan en el análisis de MARDL para probar la estabilidad de los coeficientes del modelo a lo largo del tiempo, permitiendo detectar cambios estructurales en el modelo (Brown et al., 1975).

#### CUSUM

A partir del modelo ARDL y de sus residuos estandarizados  $e_t$ , se calcula la suma acumulada de residuos hasta un instante de tiempo  $t$ :

$$W_t = \sum_{i=1}^t e_i, \quad (\text{A.13})$$

El resultado de (A.13) se representa gráficamente y si se mantienen dentro de los límites críticos (generalmente  $\pm 1,96\sigma$ ). Si la suma acumulada de los residuos se mantiene dentro de los límites críticos, no se rechaza la hipótesis nula de estabilidad de los coeficientes. Si se sale de los límites críticos, se rechaza la hipótesis nula y se concluye que hay inestabilidad en los coeficientes.

## CUSUMQ

La prueba CUSUMQ es una extensión de la prueba CUSUM y se basa en el análisis de la suma acumulada de los cuadrados de los residuos estandarizados. Es más sensible a cambios en la varianza de los residuos. El procedimiento, al igual que en la prueba CUSUM, se basa en estimar el MARDL, y posteriormente calcular la suma de los cuadrados de los residuos de la forma:

$$S_t = \sum_{i=1}^t e_i^2, \quad (\text{A.14})$$

Se representa  $S_t$  y, al igual que en la prueba CUSUM, si la suma acumulada de los residuos se mantiene dentro de los límites críticos, no se rechaza la hipótesis nula de estabilidad de los coeficientes. Si se sale de los límites críticos, se rechaza la hipótesis nula y se concluye que hay inestabilidad en los coeficientes.

### A.5.3. Especificación del modelo

Puede ocurrir que, por omisión de variables relevantes para el modelo, o por inclusión de variables irrelevantes, el modelo esté mal especificado, produciendo modelos sesgados o ineficientes.

Si la forma funcional del modelo no refleja adecuadamente la relación entre las variables (por ejemplo, se usa una relación lineal cuando la verdadera relación es cuadrática o logarítmica), las estimaciones serán inexactas. Por ejemplo, usar una relación lineal para modelar el producto interior bruto cuando la relación real es logarítmica puede llevar a estimaciones incorrectas del impacto de las políticas económicas.

La prueba de Ramsey RESET se fundamenta en la idea de que, si el modelo está correctamente especificado, los términos polinómicos de las variables ajustadas (predichas) no deben ser significativos lo que se traduce en que no debería haber patrones no capturados por el modelo original.



## ESTADÍSTICAS FUNDAMENTALES PARA EL PERÍODO ANTERIOR AL COVID-19

Tabla B.1: *Estadísticas fundamentales para el período anterior al COVID-19.*

<b>Parámetro</b>	<b>HRS</b>	<b>SICK</b>	<b>WAGE</b> (€/h)	<b>IPI (%)</b>	<b>GDP (%)</b>	$PM_{10}$ ( $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ )
Media	163,6213	84,78723	15,60468	95,70170	103,1362	24,93617
Mediana	163,7000	85,00000	15,83000	95,36400	103,2000	24,00000
Máximo	165,2000	137,0000	18,32000	109,3190	111,1000	42,00000
Mínimo	162,3000	45,00000	12,64000	75,01300	95,30000	16,00000
$\sigma$	0,638591	19,73293	1,565164	8,853413	4,327889	5,486760
$S$	0,044568	0,138968	0,058810	-0,369106	-0,006940	0,837078
$K$	2,898550	2,686791	1,946222	2,487802	2,046229	4,160816
valor $JB$	0,035715	0,343392	2,201719	1,580969	1,781834	8,127658
Prob. $JB$	0,982301	0,842235	0,332585	0,453625	0,410279	0,017183



Tabla C.1: *Datos empleados en el estudio.*

<b>Año</b>	<b>Trimestre</b>	<b>HRS</b>	<b>SICK</b>	<b>WAGE</b> (€/h)	<b>IPI</b> (%)	<b>GDP</b> (%)	<b>PM<sub>10</sub></b> (µg/cm <sup>3</sup> )
2008	2	155,9	102	11,46	120,4	108,00	21
2008	3	155,8	109	11,86	133,6	109,60	23
2008	4	156	90	12,95	125,6	109,80	25
2009	1	155,6	95	13,70	126,5	106,60	19
2009	2	155,3	137	11,60	100,6	103,90	29
2009	3	155,3	112	12,67	95,2	104,50	28
2009	4	155,1	97	13,32	104,1	105,70	30
2010	1	153,7	87	14,33	116,7	104,50	26
2010	2	152,9	96	11,88	98,8	102,90	40
2010	3	153,1	92	12,95	109,8	104,70	24
2010	4	154,4	45	13,14	110,9	105,90	23
2011	1	152,7	55	14,50	119,2	104,30	19
2011	2	153,2	105	11,97	106,6	101,80	31
2011	3	152,7	67	12,94	113,9	102,60	22
2011	4	153,9	62	13,82	106,9	103,20	26
2012	1	151,9	120	14,78	113,0	100,50	19
2012	2	150,7	79	11,79	103,2	98,90	42
2012	3	150,7	63	12,89	106,6	99,90	24
2012	4	153,2	56	13,73	106,2	101,10	23

Tabla C.2: Datos empleados en el estudio (continuación).

<b>Año</b>	<b>Trimestre</b>	<b>HRS</b>	<b>SICK</b>	<b>WAGE</b> (€/h)	<b>IPI</b> (%)	<b>GDP</b> (%)	<b>PM<sub>10</sub></b> (µg/cm <sup>3</sup> )
2013	1	151,2	76	14,05	109,5	98,00	17
2013	2	149,6	96	12,23	105,2	95,70	16
2013	3	149,8	80	12,67	114,7	96,50	18
2013	4	151,3	63	13,29	99,9	97,80	20
2014	1	149,3	63	14,54	109,8	95,70	23
2014	2	149	84	12,12	100,3	95,30	31
2014	3	149,3	76	13,28	104,3	97,90	24
2014	4	150,8	55	13,73	100,6	99,60	28
2015	1	150	78	14,46	107,7	98,20	19
2015	2	149,2	74	11,95	96,5	98,30	30
2015	3	149,2	70	13,23	103,9	100,20	27
2015	4	151,3	53	13,54	103,2	101,60	20
2016	1	150	93	14,96	104,9	99,90	27
2016	2	150,7	95	13,00	91,7	99,70	21
2016	3	151,3	96	13,11	109,3	102,40	20
2016	4	152,3	69	13,98	95,6	104,80	28
2017	1	151,8	89	14,99	100,6	103,30	27
2017	2	150,7	83	12,47	101,4	103,20	29
2017	3	150,8	98	13,50	104,0	105,50	31
2017	4	153,4	65	14,02	102,0	107,90	24
2018	1	151,1	76	15,13	112,9	106,10	19
2018	2	150,6	104	12,86	117,4	105,60	17
2018	3	150	100	13,82	116,2	107,80	25
2018	4	152,7	77	14,48	113,5	109,90	31
2019	1	151	85	15,31	122,1	108,10	27
2019	2	150,5	112	12,72	117,2	108,40	30
2019	3	149,6	103	14,96	115,9	110,50	25
2019	4	152,2	103	14,60	112,5	111,10	24
2020	1	150,7	133	15,94	121,6	107,30	18
2020	2	150,9	96	13,29	111,1	102,00	25
2020	3	151,1	48	16,11	74,1	89,90	15
2020	4	152,7	65	14,81	104,9	100,10	16
2021	1	151,4	80	16,50	114,8	99,50	8

Apéndice

**D**

## **DETERMINACIÓN DEL NÚMERO ÓPTIMO DE RETRASOS**

Los MARDL obtenidos con las configuraciones óptimas de retrasos se representan para el caso anterior y posterior a la crisis sanitaria COVID-19 en las Figuras D.1 y D.2.

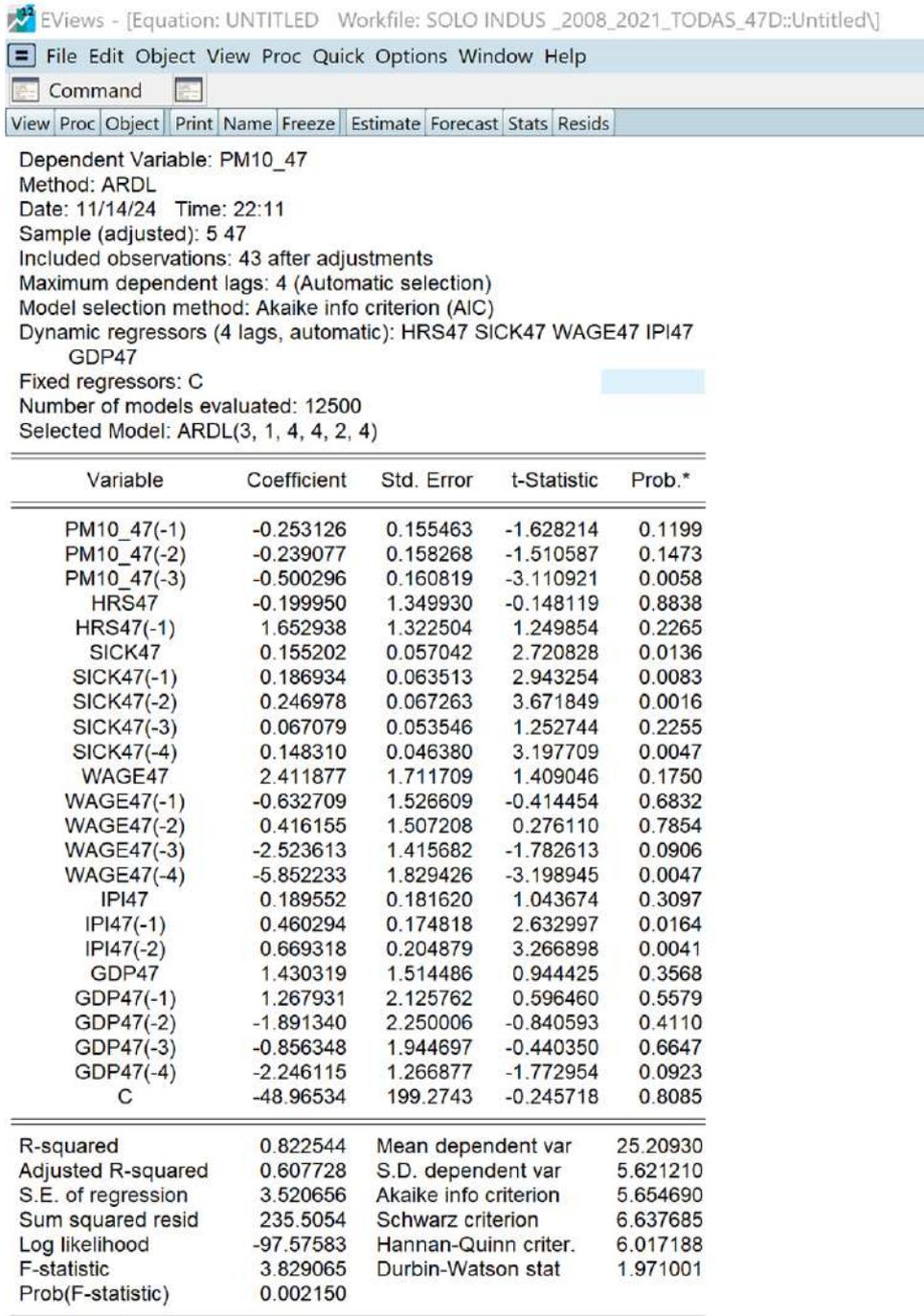


Figura D.1: *MARDL para el período anterior al COVID-19.*

EViews - [Equation: ECM52 Workfile: SOLO INDUS\_2008\_2021\_TODAS\_52D::Untitled]

File Edit Object View Proc Quick Options Window Help

Command

View Proc Object Print Name Freeze Estimate Forecast Stats Resids

Dependent Variable: PM10\_52  
Method: ARDL  
Date: 11/15/24 Time: 12:35  
Sample (adjusted): 5 52  
Included observations: 48 after adjustments  
Maximum dependent lags: 4 (Automatic selection)  
Model selection method: Akaike info criterion (AIC)  
Dynamic regressors (4 lags, automatic): HRS52 SICK52 WAGE52 IPI52  
GDP52  
Fixed regressors: C  
Number of models evaluated: 12500  
Selected Model: ARDL(4, 3, 4, 4, 2, 4)

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.*
PM10_52(-1)	-0.202867	0.153832	-1.318759	0.2015
PM10_52(-2)	-0.162673	0.161749	-1.005713	0.3260
PM10_52(-3)	-0.441373	0.182328	-2.420760	0.0246
PM10_52(-4)	-0.173949	0.152663	-1.139432	0.2674
HRS52	0.452531	1.425098	0.317544	0.7540
HRS52(-1)	0.019184	1.669484	0.011491	0.9909
HRS52(-2)	1.079125	1.628735	0.662554	0.5148
HRS52(-3)	1.498000	1.315738	1.138524	0.2677
SICK52	0.093207	0.057985	1.607447	0.1229
SICK52(-1)	0.162178	0.065402	2.479710	0.0217
SICK52(-2)	0.188281	0.065846	2.859397	0.0094
SICK52(-3)	0.076436	0.061647	1.239898	0.2287
SICK52(-4)	0.172722	0.050697	3.406911	0.0027
WAGE52	3.846271	1.724836	2.229934	0.0368
WAGE52(-1)	-0.208686	1.082526	-0.192777	0.8490
WAGE52(-2)	-2.129004	1.507844	-1.411953	0.1726
WAGE52(-3)	-0.769196	1.096066	-0.701779	0.4905
WAGE52(-4)	-3.557381	1.867116	-1.905281	0.0705
IPI52	0.467816	0.171372	2.729820	0.0126
IPI52(-1)	0.332552	0.168718	1.971049	0.0620
IPI52(-2)	0.348279	0.183549	1.897466	0.0716
GDP52	0.176290	0.377262	0.467288	0.6451
GDP52(-1)	-0.455246	0.393302	-1.157495	0.2601
GDP52(-2)	0.337245	0.780295	0.432202	0.6700
GDP52(-3)	0.759714	1.879502	0.404210	0.6901
GDP52(-4)	-2.886128	1.399654	-2.062029	0.0518
C	-360.6524	246.6395	-1.462265	0.1585
R-squared	0.824242	Mean dependent var	24.29167	
Adjusted R-squared	0.606636	S.D. dependent var	6.229505	
S.E. of regression	3.907068	Akaike info criterion	5.861773	
Sum squared resid	320.5687	Schwarz criterion	6.914323	
Log likelihood	-113.6825	Hannan-Quinn criter.	6.259533	
F-statistic	3.787776	Durbin-Watson stat	1.960158	
Prob(F-statistic)	0.001387			

\*Note: p-values and any subsequent tests do not account for model selection.

Figura D.2: *MARDL para el período completo.*



Apéndice

**E**

**PUBLICACIONES**





**Fernando Pigazo-López** and María del Carmen Ruiz-Puente. Organizational Theoretical Approaches to Sustainability in a Complex Environment, *DYNA Management*, vol. 12, no. 1, 2024, pp. 1-11. ISSN: 2340-6585. DOI: <https://doi.org/10.6036/MN11035>.

## RESUMEN

La complejidad y el DS constituyen un marco que desafía la evolución de los sistemas socio-económicos actuales y, por ende, de las organizaciones, las cuales deben adaptarse gradualmente a los cambios, transformarse y formar parte de ellos. Esta realidad debe estar respaldada por un marco teórico adecuado que sea capaz de apoyar y responder a las necesidades organizativas, investigando nuevas formas de organización y nuevas formas de interacción con el entorno.

Se ha llevado a cabo un análisis bibliométrico para esclarecer las raíces teóricas y los documentos más relevantes que sustentan el marco teórico organizativo actual entre 1990 y 2022, utilizando la base de datos Web of Science. Los resultados revelan fundamentos teóricos enfocados en los grupos de interés (*Stakeholders*), la paradoja, los recursos y capacidades organizativas, la complejidad y las instituciones.

Por otro lado, y estrechamente relacionado con estos enfoques teóricos, los temas de interés se han centrado en la responsabilidad social corporativa, la sostenibilidad empresarial, el emprendimiento, los sistemas adaptativos complejos, la emergencia, la resiliencia y la autoorganización.





**Fernando Pigazo-López** and María del Carmen Ruiz-Puente. Analysis of the Dynamic Relationships Between Industrial and Environmental Factors and Unemployment Rate. An Econometric Approach, *DYNA Energía*, vol. 13, no. 1, 2024, pp. 1-13. ISSN: 2254-2833. DOI: <https://doi.org/10.52152/DES11290>.

## RESUMEN

La sostenibilidad de los sistemas socioeconómicos e industriales es una preocupación clave, particularmente dentro del marco de la Agenda 2030. Es fundamental comprender de manera holística el funcionamiento y las relaciones de estos sistemas si queremos implementar acciones prácticas para lograr la sostenibilidad.

Este estudio utiliza técnicas econométricas, como el modelo autorregresivo de retrasos distribuidos (ARDL), para explorar las interacciones entre los factores industriales, ambientales y la tasa de desempleo. Las variables analizadas incluyen horas trabajadas, costos salariales y concentración de ozono troposférico ( $O_3$ ), en dos períodos: 2008-2020 (período reducido) y 2008-2024 (período ampliado).

Entre ambos períodos se han encontrado diferencias sustanciales en las variables que influyen significativamente en la tasa de desempleo. La relevancia de las horas trabajadas y la concentración de ozono ( $O_3$ ), que determinan la tasa de desempleo en el período reducido, es reemplazada por los costos salariales, que determina la tasa de desempleo en el período ampliado. Los resultados muestran que un aumento inicial en las horas trabajadas reduce el desempleo, mientras que el aumento de salarios y altos niveles de  $O_3$  tienden a incrementarlo. El análisis de causalidad de Granger sugiere relaciones bidireccionales entre el desempleo, los costos salariales y la concentración de  $O_3$ , lo que destaca la conexión entre estos aspectos y los efectos colaterales de retroalimentación.

El estudio subraya la necesidad de políticas socioeconómicas equilibradas que promuevan tanto el producto interior bruto como la sostenibilidad ambiental, así como el fomento de innovaciones tecnológicas. Se destaca la importancia de políticas que mitiguen los efectos adversos del aumento salarial sobre el empleo y que favorezcan un modelo de DS capaz de desacoplar el bienestar económico del consumo intensivo de recursos.

