



# **Combinación de factores explicativos de la disminución de la contaminación en países desarrollados**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE  
MAGÍSTER EN ANÁLISIS ECONÓMICO

**Alumna: Daniela Muñoz González**  
**Profesores Guía: Eugenio Figueroa Benavides,**  
**Roberto Pastén Carrasco**

Santiago, julio 2020

## *Agradecimientos*

Me gustaría agradecer en primer lugar a Dios, pues ha sido mi fortaleza, mi sustento y mi fiel compañero a lo largo de todo mi periodo como estudiante. Sin su ayuda y dirección, nada hubiese sido posible.

También quisiera agradecer a mi profesor guía, Eugenio Figueroa, por su gran ayuda y orientación a lo largo del proceso. Y, de igual forma, al profesor Roberto Pastén por todos los comentarios realizados.

Por último, mis palabras de agradecimiento son para mi hermosa familia, por su apoyo y amor incondicional. A mis padres, Rafael y Margarita, por su invaluable esfuerzo y dedicación, por impulsarme a seguir adelante hasta alcanzar mis objetivos y ser un gran ejemplo de trabajo y sacrificio. Finalmente, a mis hermanos Rafael y Anita, quienes fueron mi compañía en este camino, por siempre entregarme palabras de aliento y motivación.

*“Reconócelo en todos tus caminos,  
Y él enderezará tus veredas.”*

*Proverbios 3:6*

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>4</b>
<b>2. Revisión de Literatura</b>	<b>7</b>
2.1. Aproximación Empírica a la EKC . . . . .	7
2.2. Argumentos Teóricos que sustentan la EKC . . . . .	9
<b>3. Método y Medición</b>	<b>11</b>
3.1. Metodología de Investigación: <i>fuzzy-set</i> QCA (fsQCA) . . . . .	11
3.2. Hipótesis e Identificación del resultado y condiciones explicativas . . . . .	14
3.3. Datos . . . . .	16
3.4. Calibración del resultado y de las condiciones explicativas . . . . .	18
3.5. Modelo y Tabla de Verdad . . . . .	21
<b>4. Resultados</b>	<b>24</b>
4.1. Identificación Condiciones Necesarias . . . . .	24
4.2. Identificación Condiciones Suficientes e INUS . . . . .	25
<b>5. Robustez</b>	<b>29</b>
<b>6. Conclusiones</b>	<b>32</b>
<b>Apéndices</b>	<b>35</b>
<b>Referencias</b>	<b>39</b>

# 1. Introducción

La relación entre el crecimiento económico y la contaminación ambiental ha sido un tema muy estudiado en los últimos años en economía. Uno de los tópicos que ha cobrado mayor relevancia es la hipótesis de la Curva Ambiental de Kuznets (EKC, por sus siglas en inglés). Esta hipótesis plantea una relación empírica con forma de U-invertida entre la contaminación y el ingreso per cápita; es decir, los niveles de emisión de un contaminante, o sus niveles de concentración en el medio ambiente, primero aumentan a medida que el ingreso per cápita de un país crece en el tiempo y luego, después de alcanzar un máximo, disminuyen a medida que el ingreso per cápita continúa creciendo (Figueroa y Pastén, 2013).

Desde su descubrimiento por Grossman y Krueger (1991) hasta hoy, han existido una gran cantidad de trabajos empíricos que estimaron la curva utilizando diferentes muestras de países o ciudades y distintos tipos de contaminantes, dando como resultado evidencia mixta sobre su existencia. Sin embargo, simplemente la detección de la existencia de la EKC no es suficiente para entender cómo el crecimiento económico induce la contaminación ambiental. Por otra parte, de acuerdo con la hipótesis señalada, luego de alcanzar un determinado nivel de ingreso, el nivel de contaminación de cierto país o ciudad debiese comenzar a disminuir. Por lo tanto, países de alto ingreso o más desarrollados, tienen mayor probabilidad de estar a la derecha del punto de inflexión de la curva, es decir, sus niveles de contaminación debiesen estar disminuyendo en el tiempo.

No obstante, se puede observar que mientras los países avanzan en una dimensión de crecimiento sustentable, se quedan estancadas en otras. Por ejemplo, Dinamarca lidera en el desarrollo de innovaciones y tecnologías ambientales pero su población aún se encuentra expuesta a mayores niveles de contaminación ambiental que Noruega e Islandia (OECD, 2017a). Por lo tanto, es necesario

conocer y entender qué configuración de factores asociados al crecimiento económico conduce a la disminución de la contaminación.

De acuerdo con el informe *Green Growth Indicators* realizado por la OCDE (2017a), entre los años 2000 y 2015, el PIB per cápita ha aumentado en un 17 % en promedio en los países de la organización. Y se puede observar que, en este grupo, el sector de servicios genera el mayor valor agregado (73 %). Siendo Luxemburgo, Grecia, Reino Unido y Francia los países con la mayor participación de este sector. Por otra parte, el sector de agricultura contribuye relativamente poco valor agregado, cerca de un 2 % en promedio. Por lo tanto, se puede observar una cierta correlación entre el crecimiento económico y la estructura productiva del país.

Además, en el informe se señala que el número de invenciones en tecnologías para mitigar el cambio climático en los países de la OCDE se ha triplicado entre los años 2000 y 2015 (OECD, 2017a). Y al mismo tiempo, el incentivo general, es decir, el número de invenciones en todas las tecnologías, han aumentado solo en un 30 %. Lo que es un buen indicador de mejora ambiental, pues este tipo de innovación puede ayudar a alcanzar los objetivos ambientales más rápido y con un menor costo. También, la creación de incentivos es fundamental para generar estas innovaciones y/o cambiar la estructura productiva de un país. Actualmente, a pesar de que el número de innovaciones tecnológicas ambientales han incrementado los últimos años, el porcentaje del presupuesto destinado a investigación y desarrollo dirigido a objetivos ambientales ha permanecido estancado. También, se puede observar que las políticas de innovación no están coordinadas con el medio ambiente ni con otras políticas de uso eficiente de los recursos (OECD, 2017a). Por lo tanto, aún existe un camino por avanzar en materia de desarrollo de políticas que ayuden a lograr un mejor alineamiento de objetivos de crecimiento y mejora ambiental.

Por lo demás, en las últimas décadas no todos los países de la OCDE han experimentado una reducción en la emisión de contaminantes, sino por el contrario las han aumentado, a pesar de sostener un continuo crecimiento económico. Australia, Islandia y Turquía, por ejemplo, han incrementado sus niveles de emisión anual de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) en un 36,7 %, 123,1 % y 27,2 %, respectivamente, entre 1995 y 2017, mientras que han experimentado un sostenido crecimiento económico (OECD, 2019a). En consecuencia, la evidencia muestra que el crecimiento por sí mismo no es capaz de producir una disminución en las emisiones de contaminación.

En vista de lo anterior, el presente trabajo tiene como objetivo investigar sobre la combinación de factores explicativos de la disminución de los niveles de emisiones en países desarrollados, puesto que el crecimiento por sí solo no es capaz de asegurar que esto ocurra. Para lo cual, se realiza un análisis *fuzzy-set* QCA (fsQCA), que permite determinar cómo se combinan cuatro condiciones: crecimiento económico, disminución de la estructura industrial, aumento de la regulación ambiental y aumento del avance tecnológico para producir una disminución de las emisiones de SO<sub>2</sub> entre 1995 y 2012. Los análisis identifican al crecimiento económico como una condición necesaria pero no suficiente para lograr la disminución en la contaminación: solo tiene sentido cuando se combina con un aumento de la regulación ambiental y del avance tecnológico. Por lo que, el estudio contribuye generar evidencia empírica de las teorías económicas que sustentan la EKC, lo que es un aporte a la literatura. También, se espera que los resultados ayuden a la generación de políticas específicas dirigidas al aumento de la regulación ambiental y del avance tecnológico para lograr un crecimiento económico coordinado con el objetivo de reducir la contaminación.

El trabajo se estructura de la siguiente forma: en el Capítulo 2 se realiza una revisión de literatura acerca de la evidencia empírica y de los argumentos teóricos de la EKC; en el Capítulo 3 se explicará y detallará el método utilizado en la investigación y los datos; en el Capítulo 4 se presentarán los principales resultados; en el Capítulo 5 se llevará a cabo un análisis de robustez; finalmente, en el Capítulo 6 se presentarán las conclusiones y limitaciones del estudio.

## 2. Revisión de Literatura

### 2.1. Aproximación Empírica a la EKC

Los primeros en estudiar la relación entre crecimiento económico y contaminación ambiental fueron Grossman y Krueger (1991), estimando la EKC para los contaminantes de: dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), y material particulado (MP) suspendido (o respirable). Utilizaron una muestra de ciudades pertenecientes a 42 países, tanto desarrollados como en desarrollo, para los años 1977, 1982, 1988, descubriendo por primera vez una relación en forma de U-invertida entre el nivel de ingresos y la contaminación atmosférica. Posteriormente, se ha realizado un gran número de estudios empíricos sobre la EKC y su forma. La motivación principal de estos trabajos fue encontrar evidencia de que el crecimiento económico puede ser parte de la solución en vez la causa del problema medio ambiental (Dinda, 2004; Pasten y Figueroa, 2012).

Entre los primeros trabajos que mostraron evidencia de la curva se encuentran: Shafik y Bandopadhyay (1992), quienes estimaron la EKC para diez indicadores diferentes de degradación ambiental, utilizando una muestra de 149 países entre 1960 y 1990. Sus resultados fueron que solamente el SO<sub>2</sub> y el MP seguían la relación de U-invertida, mientras que el resto empeoraban o mejoraban constantemente con el aumento del ingreso. Panayotou (1993), estimó la curva para SO<sub>2</sub>, óxido de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), MP y la deforestación. Utilizó una muestra de 68 países para la deforestación y 55 países para los contaminantes ambientales. Encontró que todas las relaciones entre degradación ambiental e ingreso siguen la relación de U-invertida. Selden y Song (1994), estimaron la EKC para cuatro contaminantes: NO<sub>x</sub>, CO, SO<sub>2</sub> y MP. Utilizaron una muestra de 30 países incluyendo países

de ingresos altos, medios y bajos. Además, añadieron como variable de control, la densidad de la población como una medida de mayor presión para regular la contaminación, siendo esta significativa. Encontraron una relación de U-invertida entre estos contaminantes y el PIB per cápita.

Más tarde comenzaron a surgir críticas hacia la evidencia empírica, debido a que la mayoría de los estudios de la EKC eran económicamente débiles, poseían variables relevantes omitidas, y existía sensibilidad en los resultados al utilizar diferentes indicadores de calidad ambiental, métodos de estimación, características económicas y períodos cubiertos (Kaika y Zervas, 2013; Magnani, 2001; Stern, 2004, citados en Armeanu et al., 2018). Por otra parte, comenzaron a surgir trabajos con conclusiones inconsistentes para grupos de países diferentes. Galeotti, Lanza, y Pauli (2006), proporcionaron evidencia de la EKC solo para los países de la OCDE al estimar varias ecuaciones de regresión lineal y log-lineal entre variables, así como de forma cuadrática o cúbica. De igual forma, Figueroa y Pastén (2009), estimaron la EKC para SO<sub>2</sub> empleando el modelo de “Coeficientes Aleatorios”, lo que permite que la estructura difiera entre países, considerando una muestra de 73 países de alto y bajo nivel de ingreso entre 1960-1990. Los autores encuentran que la hipótesis de la EKC es sólida para la mayoría de los países desarrollados y de la OCDE.

También ha existido gran variedad de trabajos que estiman la curva para países específicos, pues las grandes sensibilidades a menudo observadas en las formas de la EKC con respecto a los períodos de tiempo, las muestras de países y las formas funcionales, produjeron dudas sobre su aplicación entre países para poder interpretar la relación entre contaminación e ingreso para un país individual (He y Wang, 2011). Existen muchos ejemplos, en Iwata, Okada, y Samreth (2012) se encuentra evidencia de la EKC para Finlandia, utilizando como contaminante las emisiones de CO<sub>2</sub> entre 1977 y 2003. Lee y Oh (2015) abordaron la relación entre el crecimiento económico y la calidad ambiental en China entre 2003-2010. Los resultados empíricos tienden a confirmar la relación en forma de U-invertida en las regiones este y central. Por último, Ali, Abdullah, y Azam (2017), investigaron la presencia de la EKC en el contexto de Malasia durante el período 1971-2012. La presencia de la curva es validada por los resultados para las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Los resultados empíricos de la EKC muestran que el crecimiento económico podría ser compatible con la mejora de la calidad ambiental. Pero la mayoría de los estudios de EKC sólo han descrito formas reducidas de la relación entre contaminación e ingresos. Las diferentes formas de EKC encontradas en el pasado sólo pueden capturar los efectos netos de los ingresos en el medio



ambiente, donde “*el crecimiento de los ingresos se utiliza como una variable general que representa una variedad de influencias subyacentes, cuyos efectos separados están ocultos*” (Panayotou, 1993). Además, debido a que la evidencia empírica se basa en regresiones de forma reducida de la calidad ambiental sobre el ingreso y otras covariables, la mayoría de los investigadores evitan interpretar esos resultados estructuralmente, dejando abierta la pregunta de por qué la contaminación sigue este patrón U-invertida. A continuación, se revisan los argumentos teóricos que sustentan la hipótesis de por qué la EKC sigue esta forma.

## **2.2. Argumentos Teóricos que sustentan la EKC**

A raíz de la extensa literatura empírica existente que muestra cómo algunos indicadores de degradación ambiental se comportan de acuerdo con la hipótesis de la EKC, han surgido múltiples explicaciones que buscan responder en qué condiciones se cumple la relación de U-invertida y determinar las relaciones causales entre crecimiento económico y calidad ambiental.

En Dinda (2004) y Zilio (2012), se dan a conocer distintas explicaciones para la EKC. En primer lugar, se destaca el rol de la elasticidad ingreso de la demanda por calidad ambiental; argumentando que los individuos demandarán una mejor calidad ambiental en la medida que sus necesidades básicas estén aseguradas, como salud, educación o alimentación. Por lo tanto, después de un determinado nivel de ingresos, la disposición a pagar por un ambiente limpio aumenta en una proporción mayor que los ingresos (Roca, 2003). Es por esto que en países más desarrollados, en los cuales se esperaría que gran parte de su población tuviera sus necesidades básicas satisfechas, la disposición a pagar por bienes y servicios ambientales aumenta en una mayor proporción que el ingreso, por lo que demandarán mayor calidad ambiental y mayor regulación ambiental.

En segundo lugar, se destacan tres efectos del crecimiento explicados en Grossman y Krueger (1991). El efecto escala (EE), el cual plantea que, todo lo demás constante, un mayor crecimiento económico trae consigo la generación de más residuos y mayor volumen de contaminantes y, por ende, mayor degradación ambiental. El efecto composición (EC), el cual hace referencia a que el crecimiento de la actividad económica produce cambios estructurales, es decir, la economía se desplaza hacia actividades menos contaminantes como lo son los servicios y se reducen las actividades que

generan más contaminación como las del sector industrial. Por último, se encuentra el efecto composición (EC), por el cual un mayor crecimiento económico aumenta la inversión en investigación y desarrollo (I+D) con el objetivo de aumentar el uso o la creación de tecnologías más limpias. También el mayor crecimiento permite aumentar la capacidad de sustitución de insumos contaminantes a otros menos contaminantes.

Por último, se destaca el efecto comercio o desplazamiento (ED) (Arrow et al., 1996; Dasgupta, Laplante, y Mamingi, 2001; Stern, 2004). Este se genera cuando en un país se reducen las emisiones producto de la disminución de actividades productivas contaminantes, pero no así disminuye el consumo generado por esas actividades, sino que este consumo es suplido a través de importaciones. Por lo tanto, una disminución de las emisiones en países a medida que aumenta su ingreso se produce por efecto desplazamiento, y no habría una reducción global sino solo a nivel local, pues la contaminación sería “desplazada” a otros países (Vázquez, 2007).

Conforme a lo anterior, buscar la combinación de factores suficiente para producir una disminución en las emisiones de contaminación proveería evidencia empírica de la teoría anteriormente expuesta; es decir, evidencia de que el crecimiento económico por sí solo no reduce la contaminación, sino que tiene efectos indirectos sobre otros factores, lo que finalmente permite que exista una disminución en las emisiones de contaminación.

## 3. Método y Medición

### 3.1. Metodología de Investigación: *fuzzy-set* QCA (fsQCA)

Para cumplir con el objetivo de esta investigación, se realiza un análisis configuracional utilizando el método Análisis Cualitativo Comparado (QCA, por sus siglas en inglés), cuyo enfoque se basa en identificar las diferentes interacciones entre condiciones explicativas para producir un resultado; es decir, en lugar de buscar la variable explicativa fundamental, el QCA busca identificar combinaciones de condiciones que conducen a un determinado resultado, que es justamente el propósito de este estudio, determinar qué combinación de factores generan la condición que propicia el resultado, la presencia empírica, de la EKC. Esta metodología del QCA fue desarrollada por Charles Ragin (1987), en su obra *The Comparative Method*, y desde entonces, las técnicas de QCA han sido aplicadas en diferentes disciplinas (Medina, Álamos-Concha, Castillo, y Rihoux, 2017), destacando las áreas de política comparada y, negocios y economía (Roig-Tierno, Gonzalez-Cruz, y Llopis-Martinez, 2017).

El QCA combina algunas de las ventajas de las técnicas cualitativas (orientadas a casos) y las técnicas cuantitativas (orientadas a variables). Es más adecuado para la comparación de un número intermedio de casos (entre 5 y 50 casos) que la mayoría de las técnicas cuantitativas o cualitativas (Basedau y Richter, 2014). Dentro de las ventajas de esta metodología que quedan omitidas en los análisis estadísticos se destacan, en primer lugar, la *equifinalidad*; es decir, la capacidad de identificar diferentes combinaciones de factores que pueden producir un mismo resultado. En segundo lugar, la *multifinalidad*; que implica que son combinaciones lógicas de condiciones explicativas y no variables independientes aisladas las que conducen a un resultado. Por último, la *asimetría causal*, según

la cual, la presencia de un resultado y su respectiva ausencia requieren de análisis y explicaciones separadas (Medina et al., 2017). Estas características se ajustan bien a las expectativas teóricas de esta investigación respecto de que el crecimiento económico puede o no conducir a la disminución de emisiones de contaminación dependiendo de su interacción con otras condiciones explicativas particulares.

Por lo tanto, el QCA es especialmente apropiado para probar teorías o hipótesis que involucren una multitud de factores que interactúan entre sí. Es decir, esta técnica permite abordar con eficacia las hipótesis teóricas que predicen que múltiples variables operarán en conjunto para producir el resultado de interés. Por ejemplo, los argumentos teóricos anteriores, señalan que un conjunto de eventos deberían interactuar junto con el crecimiento económico para producir una disminución de la contaminación. Por lo que, este tipo de análisis, permite probar de forma explícita y directa cada combinación posible de factores explicativos en niveles específicos con un resultado dado. Además, los resultados se pueden interpretar con mayor claridad, haciendo del QCA una estrategia analítica potencialmente más efectiva para procesos teóricos complejos como lo es la disminución de emisiones en países desarrollados (Longest y Vaisey, 2008).

De acuerdo con Medina et al. (2017), las relaciones causales en el QCA están basadas en las ideas de necesidad y suficiencia, del tipo “ $X$  es condición necesaria/suficiente para  $Y$ ”. Una condición es necesaria para un resultado si está siempre presente cuando el resultado ocurre, de forma que dicho resultado no puede producirse en ausencia de la condición. Por otra parte, una condición se considera suficiente para un resultado si el resultado siempre ocurre cuando la condición está presente, incluso aunque este resultado pueda producirse también debido al impacto de otros factores explicativos. Para identificar estas relaciones, el QCA hace uso del álgebra booleana que le permite analizar combinaciones de condiciones o configuraciones causales asociadas con un resultado de interés. Para eso, se comienza identificando el resultado que desea analizar, para luego evaluar las condiciones que podrían causar ese resultado. Posteriormente, se debe evaluar la presencia o ausencia de estas condiciones en cada uno de los casos en el análisis. El objetivo es identificar qué combinaciones de factores han ocurrido y cuáles de ellas han producido el resultado que se busca estudiar (Arvind y Stirton, 2010). Finalmente, a través de un proceso de minimización booleana se llega a una solución *compleja, parsimoniosa y/o intermedia*<sup>1</sup>, que mostrará la combinación o a las combinaciones de condiciones

---

<sup>1</sup>Cada una de estas soluciones es obtenida mediante el tipo de tratamiento que se realiza sobre los remanentes lógicos, que corresponden a configuraciones de condiciones que no cuentan con evidencia empírica (Medina et al., 2017).

explicativas suficientes para producir el resultado.

En este trabajo se realiza un análisis *fuzzy-set* QCA (fsQCA) que es una de las tres variantes<sup>2</sup> del QCA, y que permite establecer diferencias de grados de pertenencia en las condiciones explicativas y el resultado a un conjunto establecido. En el QCA estándar (*crisp-set* QCA), cada variable debe ser dicotomizada; es decir, se especifica en términos de [0] o [1], donde [0] representa la no pertenencia y [1] la pertenencia completa a un determinado conjunto. Considerando como resultado de interés la disminución de la contaminación en países desarrollados, este enfoque habría requerido realizar una evaluación de si un país disminuyó o no sus emisiones de contaminación durante el periodo que se desea analizar. Por el contrario, la lógica difusa insiste en la idea de que es preciso dar acomodo a países que por la naturaleza de los conjuntos quedan en una posición intermedia. Pues es bastante limitante dividir los países estudiados entre países que disminuyeron sus emisiones de aquellos que no lo hicieron, puesto que algunos países podrían presentar una disminución mucho mayor que otros o una disminución pudo haber sido casi insignificante, por lo que es necesario poder hacer una distinción entre los grados de reducción.

El análisis fsQCA busca respetar la singularidad de cada caso de la muestra, permitiendo clasificar los países según el grado de disminución o aumento en cada condición explicativa y en el resultado. Para efectuar esta distinción se debe definir un punto de corte (*cross-over point*), el cual especifica el punto concreto a partir del cual se puede decir que un caso pertenece o no a un determinado conjunto. Por lo tanto, el resultado y las condiciones explicativas admiten una gradación en la pertenencia, es decir, a diferencia de las condiciones *crisp*, en la que los casos solo pueden tener los valores [0] y [1], en las condiciones *fuzzy* o difusas, los casos oscilan entre [0] y [1], siendo [0.5] el valor intermedio que indica equidistancia perfecta entre la pertenencia y la exclusión en el conjunto. Esto se realiza a través un proceso de calibración de cada condición y del resultado, que permite transformar una variable no calibrada en una condición difusa que asigne grados de pertenencia a un conjunto determinado (Medina et al., 2017). Este proceso será detallado más adelante.

---

<sup>2</sup>El QCA posee tres variantes: *crisp-set* QCA, *fuzzy-set* QCA y *multi-values* QCA.

### 3.2. Hipótesis e Identificación del resultado y condiciones explicativas

Para aplicar la metodología anterior, se identifica, primeramente, el resultado de interés, que será la disminución de los niveles de contaminación en países desarrollados. De acuerdo con las expectativas teóricas, países de altos ingresos<sup>3</sup>, o desarrollados, deberían experimentar un resultado favorable, pero en la práctica esto no se observa, pues países como Australia, Islandia y Turquía exhibieron aumentos de las emisiones en el periodo analizado (ver Figura 1). Por lo que, resulta relevante estudiar qué otras condiciones, aparte del crecimiento económico, permiten observar una disminución en la contaminación en países desarrollados.

El siguiente paso es identificar los diversos factores que individualmente o en combinación con otros factores, podrían considerarse que influyeron en la disminución de emisiones de contaminación. Las condiciones explicativas incluidas en el análisis fueron derivadas de la teoría analizada y del modelo teórico propuesto en Yang et al. (2018), acerca de cómo los niveles de desarrollo económico afectan la emisión de contaminantes directa e indirectamente. A partir de esto, el análisis se limitó a cuatro factores explicativos: crecimiento económico, disminución de la estructura industrial, aumento de la regulación ambiental y aumento del avance tecnológico.

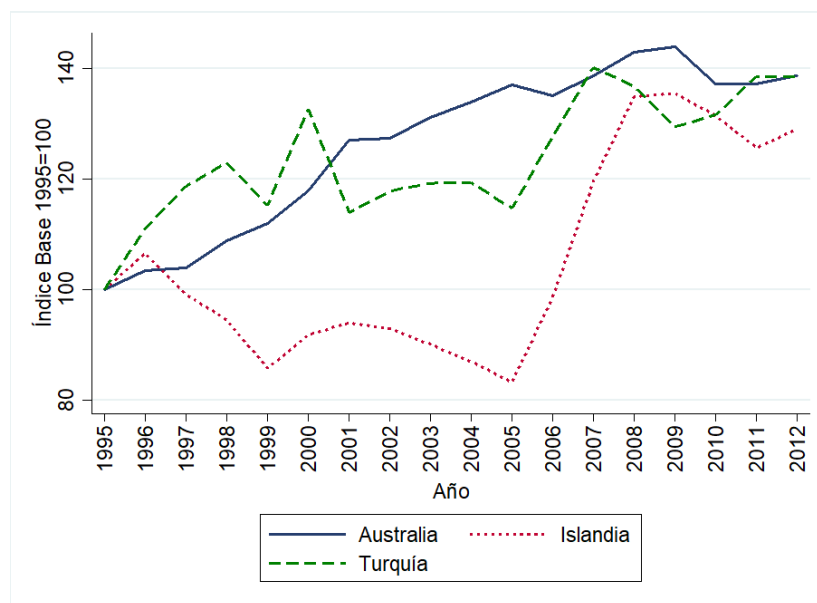
La primera condición que se espera genere un impacto en la contaminación es el crecimiento económico. El desarrollo de la economía tiene efectos directos e indirectos sobre las emisiones. El efecto directo es a través del ya mencionado efecto escala, que tiene efectos promotores sobre la contaminación, pero inhibidores a través de efectos indirectos como el efecto composición y el efecto tecnológico, además del efecto elasticidad de la demanda por calidad ambiental. La intuición teórica es que en países desarrollados los efectos inhibidores superen a los promotores de emisiones de contaminación. Por consiguiente, la hipótesis H1 a testear es que el crecimiento económico produce una reducción de emisiones contaminantes entre países de altos ingresos.

Una segunda condición que aquí se supone ayuda en la disminución de emisiones está relacionada con la disminución de la estructura industrial del país. Uno de los efectos indirectos del crecimiento se relaciona con su impacto en la estructura productiva de la economía. Esto, debido a que existe una progresión natural del desarrollo económico desde economías agrarias limpias hacia

---

<sup>3</sup>De acuerdo al Banco Mundial, las economías de altos ingresos son aquellas con un INB per cápita de 12.376 dólares o más (Banco Mundial, 2020)

FIGURA 1: Emisiones anuales de SO2 de Australia, Islandia y Turquía (1995-2012), 1995=100



Fuente: Elaboración propia basada en datos de la OCDE (2019a)

economías industriales contaminantes y luego a economías de servicio limpias (Arrow et al., 1996). Por lo tanto, la hipótesis H2 a testear aquí es que la reducción de la estructura industrial influye positivamente en la disminución de emisiones contaminantes.

El tercer factor explicativo que se incluye en este análisis es el aumento de la regulación ambiental. Como se ha mencionado, un mecanismo por el cual el crecimiento económico induce menor contaminación es a través del efecto elasticidad ingreso de la demanda ambiental. Además, cuando el ingreso es bajo, no existen controles a la contaminación, pero a medida que este aumenta, las normas de emisión y la regulación se vuelven cada vez más estrictas, lo que provoca que el nivel total de contaminación disminuya (Stokey, 1998). Por otro lado, una mayor regulación ambiental puede influir en el avance tecnológico y estructura industrial, pues la demanda por menos contaminación ejerce presión sobre el sector productivo y sobre el uso de tecnologías limpias. De este modo, la hipótesis H3 a testear, es que el aumento de la regulación ambiental tiene un impacto positivo en la disminución de contaminación. A raíz de esta última hipótesis, se derivaron dos adicionales que proponen un efecto positivo de la regulación ambiental sobre el avance tecnológico y uno negativo sobre la estructura industrial (H3.1 y H3.2, respectivamente).

Por último, también se considera como condición explicativa de la reducción de emisiones al aumento del avance tecnológico. Por ello, el tercer efecto indirecto del crecimiento que analizaremos es través del aumento del uso de tecnologías limpias. Cuando el ingreso es bajo, sólo se pueden utilizar tecnologías sucias, pues existen restricciones activas, pero a medida que el ingreso aumenta, estas restricciones se tornan no restrictivas y las tecnologías limpias pueden ser usadas (Stokey, 1998). Por consiguiente, la hipótesis H4 a testear aquí, plantea que el aumento del avance tecnológico trae consigo una disminución de las emisiones de contaminación.

Por lo tanto, se busca encontrar evidencia empírica acerca de estas hipótesis, que se resumen de la siguiente forma:

**Hipótesis H1:** El crecimiento económico produce una reducción de emisiones contaminantes.

**Hipótesis H2:** El crecimiento económico tiene efectos reductores sobre la estructura industrial, lo que produce una reducción de emisiones contaminantes.

**Hipótesis H3:** El crecimiento económico provoca un aumento de la regulación ambiental, lo que produce una reducción de emisiones contaminantes.

**Hipótesis H3.1:** Un incremento de la regulación ambiental ocasiona un aumento del avance tecnológico, lo que produce una reducción de emisiones contaminantes.

**Hipótesis H3.2:** Un incremento de la regulación ambiental ocasiona una disminución de la estructura industrial, lo que produce una reducción de emisiones contaminantes.

**Hipótesis H4:** El crecimiento económico tiene efectos positivos sobre el avance tecnológico, lo que produce una reducción de emisiones contaminantes.

### 3.3. Datos

En este trabajo se utilizó una muestra de 24 pertenecientes a la OCDE (ver Cuadro 1), del período 1995-2012. Este periodo fue seleccionado con el objetivo de optimizar la cantidad de datos disponibles y abarcar la mayor cantidad de países de la organización. Los datos fueron recolectados desde bases estadísticas del Banco Mundial, la OCDE y la Comisión Europea. Para la variable de



resultado y de cada condición explicativa se utilizó la variación porcentual entre 1995 y 2012 de los indicadores seleccionados, que son los siguientes:

(1) Indicador de Contaminación

El indicador de contaminación corresponde a las emisiones de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), por dos razones: se dispone de una mayor cantidad de datos y de mejor calidad de esta variable, y además, ha sido uno de los contaminantes más estudiados por la literatura empírica acerca de la EKC.

(2) Indicador de Crecimiento Económico

El crecimiento económico se mide a través del PIB per cápita por paridad del poder adquisitivo (PPA) en dólares internacionales corrientes.

(3) Indicador de la Estructura Industrial

Como indicador de la relevancia del sector industrial de cada país, se utilizó el valor agregado de la industria como porcentaje del PIB.

(4) Indicador de la Regulación Ambiental

Para medir la regulación ambiental se utilizó el Índice de Rigurosidad de la Política Medioambiental (EPS) de la OCDE. El cual es una medida de rigurosidad de la política medioambiental específica de cada país e internacionalmente comparable. La rigurosidad se define como el grado en que las políticas ambientales ponen un precio explícito o implícito a los comportamientos contaminantes o perjudiciales para el medio ambiente. El índice varía de 0 (no estricto) a 6 (mayor grado de rigurosidad). El índice se basa en el grado de rigurosidad de 14 instrumentos de política ambiental, principalmente relacionados con el clima y la contaminación del aire (Botta y Koźluk, 2014).

(5) Indicador del Avance Tecnológico

Se seleccionó el número de patentes sobre tecnologías medioambientales como medida del progreso tecnológico. Este indicador presenta varias ventajas, los datos están ampliamente disponibles, son comparables y están orientados a la producción. También pueden desglosarse, una ventaja importante al analizar tecnologías relacionadas con el medio ambiente. Pero, hay

que tener presente sus limitaciones al momento de analizar los resultados, pues no todas las innovaciones o inventos están patentados. Además, el número de patentes por sí solo no indica su importancia e impacto relativo (OECD, 2019b).

CUADRO 1: Muestra final

Países	
Alemania	Italia
Australia	Japón
Austria	Noruega
Bélgica	Países Bajos
Corea	Polonia
Dinamarca	Portugal
España	Reino Unido
Finlandia	República Checa
Francia	República Eslovaca
Grecia	Suecia
Hungría	Suiza
Irlanda	Turquía

Fuente: Elaboración propia

### 3.4. Calibración del resultado y de las condiciones explicativas

Para realizar el análisis fsQCA es necesario que los datos o la matriz de datos esté formada por valores *fuzzy*<sup>4</sup>; es decir, se encuentre calibrada. La calibración es el proceso de transformar una variable de ratio, sin aparentes límites, en una variable que oscile entre [0,1]. Para esto, se debe en primer lugar definir el modelo y luego el método de calibración. Lo primero, consiste en indicar en la variable original dónde se sitúa teóricamente la pertenencia total al conjunto que se debe definir previamente, dónde se encuentra el punto que marca la total exclusión del conjunto, y dónde se localiza la zona intermedia en la que no está clara la pertenencia o exclusión de dicho conjunto (Medina et al., 2017).

El modelo de calibración más sencillo y que se utiliza en este trabajo es el modelo “conjunto difuso de tres valores” (*three-value fuzzy set*), que establece tres puntos de referencia o anclaje: [1]

---

<sup>4</sup>Indican el grado en el que puede decirse que un caso pertenece a un conjunto determinado.

para cuando los datos están totalmente dentro del conjunto, [0.5] cuando se encuentran en un estado de completa borrosidad y [0] cuando se considera que están totalmente fuera del conjunto (Medina et al., 2017).

Debido a que el objetivo es diferenciar a países que tuvieron un aumento o disminución en sus variables explicativas o de resultado muy pequeño (no significativo), de países donde el aumento o disminución fue considerable (significativo), se estableció como conjunto al *aumento o disminución considerable*, según corresponda, de cada condición y del resultado. Se determinó como *aumento o disminución considerable*, a una variación del 50 % del factor entre 1995 y 2012. Es decir, un país que disminuyó en 50 % sus emisiones entre 1995 y 2012 se considera completamente en el conjunto de los países que disminuyeron considerablemente sus emisiones de SO<sub>2</sub>, representado por un puntaje de pertenencia de [1]. Por el contrario, un país que disminuyó en 0 % sus emisiones de SO<sub>2</sub> entre 1995 y 2012, se considera completamente fuera del conjunto, obteniendo un puntaje de pertenencia de [0]. En estos extremos de pertenencia completa y no, se consideró un punto intermedio de indeterminación, correspondiendo a una disminución del 5 % entre 1995 y 2012, la cual no es una disminución considerable pero aun así representa una reducción, por lo que no se puede excluir completamente. Se le asignó un puntaje difuso de [0.5].

Por otra parte, al igual que con la variable de resultado, las condiciones explicativas se graduaron siguiendo los tres puntos de anclaje, asignándoles grados de total pertenencia [1], punto de indiferencia [0.5] y total exclusión [0] cuando el aumento o disminución del factor entre 1995 y 2012 fue de 50 %, 5 % o 0 %, respectivamente. En el Cuadro 2 se puede observar los criterios de asignación de los puntos de referencia de cada condición explicativa y del resultado.

CUADRO 2: Criterios para evaluar el grado de pertenencia de las condiciones y del resultado

Valores Fuzzy	SO <sub>2</sub>	CE	EI	RA	AT
1	Disminución del 50 %	Aumento del 50 %	Disminución del 50 %	Aumento del 50 %	Aumento del 50 %
0.5	Disminución del 5 %	Aumento del 5 %	Disminución del 5 %	Aumento del 5 %	Aumento del 5 %
0	Disminución Nula	Aumento Nulo	Disminución Nula	Aumento Nulo	Aumento Nulo

Fuente: Elaboración propia.

Nota: SO<sub>2</sub> = Resultado: Disminución de las Emisiones de SO<sub>2</sub>; CE = Crecimiento Económico; EI = Disminución Estructural Industrial; RA = Aumento Regulación Ambiental; AT = Aumento Avance Tecnológico

Luego de definir el modelo de calibración, se continúa con el método de calibración, que permite transformar las variables originales en condiciones *fuzzy*. Se utilizó el método directo de calibración, el cual emplea una función logística para encuadrar los datos dentro de los tres anclajes establecidos entre [1], [0.5] y [0]<sup>5</sup>. El resultado final de esta operación genera una matriz de datos calibrados, donde sus valores representan grados de pertenencia en torno a localización inicial de los tres anclajes teóricos (Medina et al., 2017). Este proceso que fue realizado utilizando el software estadístico STATA 14.1.

El Cuadro 3 presenta los resultados de la calibración para los 24 países de la OCDE en relación con las cuatro condiciones y el resultado de interés. Y el Cuadro 4 proporciona estadísticas descriptivas de esta matriz de datos. Se puede observar que la variable de crecimiento económico posee escasa heterogeneidad entre países, la variable de aumento de la regulación ambiental y resultado presentan una mayor heterogeneidad y para los otros factores explicativos ya se observa bastante heterogeneidad. Por lo que, la matriz cumple con lo esperado, por un lado, se observa variación en el resultado, es decir, países que presentaron y no presentaron disminución de contaminación y, por otra parte, existe variación en los factores explicativos. Por lo tanto, es posible analizar por qué países con la presencia de crecimiento económico presentan o no una disminución de contaminación, es decir, poder examinar la presencia o ausencia de otros factores que, combinados con el crecimiento económico en los países seleccionados, han dado origen a la disminución de emisiones de SO<sub>2</sub> entre 1995 y 2012.

---

<sup>5</sup>Debido a la aplicación de la función logística, los anclajes se sitúan en 0.95, 0.5 y 0.05 (Medina et al., 2017)

CUADRO 3: Matriz de Datos Calibrados (Valores *fuzzy*)

Países	SO2	CE	EI	RA	AT
Alemania	0.99	1	0.54	0.98	0.98
Australia	0	1	0.08	1	0.05
Austria	0.95	1	0.6	0.96	0.74
Bélgica	0.99	1	0.77	1	0.94
Corea	0.96	1	0.27	1	1
Dinamarca	0.99	1	0.54	1	1
España	0.98	1	0.76	0.96	1
Finlandia	0.94	1	0.74	1	1
Francia	0.97	0.99	0.73	1	1
Grecia	0.8	0.98	0.81	0.77	0
Hungría	0.99	1	0.13	1	0
Irlanda	0.98	1	0.66	1	0.94
Italia	0.99	0.98	0.71	1	1
Japón	0.96	0.97	0.76	1	0.98
Noruega	0.64	1	0	1	0.99
Países Bajos	0.91	1	0.69	1	1
Polonia	0.97	1	0.6	1	1
Portugal	0.99	0.99	0.77	1	0.28
Reino Unido	0.99	1	0.83	1	1
República Checa	0.98	1	0.52	1	0.52
República Eslovaca	0.98	1	0.17	1	0
Suecia	0.97	1	0.64	1	0.87
Suiza	0.97	1	0.62	0.97	0.87
Turquía	0	1	0.68	1	0

Fuente: Elaboración propia

CUADRO 4: Estadística Descriptiva Matriz de Datos Calibrados

Variable	Obs.	Promedio	Desviación Estándar	Min.	Máx.
SO2	24	0.87	0.28	0	0.99
CE	24	1.00	0.01	0.97	1
EI	24	0.57	0.25	0	0.83
RA	24	0.99	0.05	0.77	1
AT	24	0.72	0.41	0	1

Fuente: Elaboración propia

### 3.5. Modelo y Tabla de Verdad

Utilizamos el siguiente modelo fsQCA para probar las condiciones necesarias y suficientes de la disminución de emisiones de SO2 entre 1995 y 2012:

$$SO2 = f(CE, EI, RA, AT) \tag{1}$$

Donde,  $SO_2$  = Disminución de emisiones de  $SO_2$  entre 1995 y 2012;  $CE$  = Crecimiento Económico entre 1995 y 2012;  $EI$  = Disminución de la Estructura Industrial entre 1995 y 2012;  $RA$  = Aumento de la Regulación Ambiental entre 1995 y 2012; y  $AT$  = Aumento del Avance Tecnológico entre 1995 y 2012.

El Cuadro 5 muestra la Tabla de Verdad basada en el Modelo (1) para la muestra de 24 países de la OCDE, la cual indica el número de casos existentes para cada configuración de condiciones presente en los datos, se deja fuera a los remanentes lógicos<sup>6</sup>. La columna de “Consistencia de  $SO_2=1$ ”, indica el porcentaje de países dentro de la configuración de condiciones que muestra el resultado de interés de entre el número total de países en dicha configuración. Esta consistencia es importante pues antes de realizar la minimización booleana se debe indicar cuáles configuraciones serán incluidas en la operación. En particular, se debe seleccionar el nivel de consistencia mínimo de cada configuración que se incluirá, Rihoux y Ragin (2008) proponen un valor de 0.85<sup>7</sup> para indicar una consistencia sustancial.

CUADRO 5: Tabla de Verdad:  $SO_2 = f(CE, EI, RA, AT)$

Fila	Casos	Nº de Casos	CE	EI	RA	AT	SO <sub>2</sub>	Consistencia de $SO_2 = 1$
1	Austria, Bélgica, República Checa, Dinamarca, Finlandia, Francia, Alemania, Irlanda, Italia, Japón, Países Bajos, Polonia, España, Suecia, Suiza y Reino Unido	16	1	1	1	1	1	1.00
2	Corea y Noruega	2	1	0	1	1	1	0.95
3	Grecia, Portugal y Turquía	3	1	1	1	0	0	0.80
4	Australia, Hungría y República Eslovaca	3	1	0	1	0	0	0.73

Fuente: Elaboración propia

En la muestra, solo la primera y segunda fila tienen una consistencia mayor a 0.85, por lo que estas configuraciones serán incluidas en el proceso de minimización ( $SO_2 = 1$ ), mientras que las configuraciones de la tercera y cuarta fila no serán incluidas ( $SO_2 = 0$ ). Por lo tanto, dos de las configuraciones posibles, que juntas representan a 18 países, han dado lugar a la disminución de emisiones de  $SO_2$  entre 1995 y 2012. La fila 1 muestra una configuración con 16 países (Austria, Bélgica, República Checa, Dinamarca, Finlandia, Francia, Alemania, Irlanda, Italia, Japón, Países Bajos, Polonia, España, Suecia, Suiza y Reino Unido). La segunda fila muestra otra configuración donde estuvo presente la disminución de la contaminación, con dos países (Corea y Noruega). Además, hay

<sup>6</sup>Configuraciones de condiciones que no cuentan con evidencia empírica.

<sup>7</sup>Entre mayor sea el nivel de consistencia, mayor es la robustez de los resultados.

dos configuraciones diferentes, que abarcan 6 países (Grecia, Portugal, Turquía, Australia, Hungría y República Eslovaca) que no pasaron la prueba de consistencia, es decir, no se consideran suficientes para producir una disminución considerable de las emisiones de SO<sub>2</sub> entre los años analizados.

## 4. Resultados

Para poder identificar la o las combinaciones de factores suficiente para producir la disminución de emisiones de SO<sub>2</sub> en los países de la muestra, se utilizó el software *fs/QCA 3.0*, desarrollado por Ragin y Davey (2016).

### 4.1. Identificación Condiciones Necesarias

Como se señaló, una condición se define como necesaria si debe estar presente para que ocurra un determinado resultado. En la lógica difusa, para considerar una condición como necesaria, el valor de pertenencia difusa de un país en la condición  $X$  deberá ser igual o superior a su valor de pertenencia difusa en el resultado  $Y$ ; es decir,  $X$  debe ser un superconjunto de  $Y$  y no uno de sus subconjuntos. Para el análisis se consideraron la presencia y ausencia de las cuatro condiciones explicativas. Como resultado se obtuvo que hay dos condiciones necesarias para la disminución de contaminación: CE y RA, como lo demuestran sus niveles de consistencia<sup>8</sup> mayores a 0.95 en el Cuadro 6. Casi todos los países (99 %) que disminuyeron sus emisiones de SO<sub>2</sub> entre 1995 y 2012, experimentaron crecimiento económico y/o aumentaron su regulación ambiental entre esos años. La cobertura<sup>9</sup> del crecimiento económico como condición necesaria es de 0.87, es decir, el 87 % de los países que exhiben crecimiento económico han bajado sus niveles de contaminación. Por otro lado, el nivel de cobertura del aumento de la regulación ambiental es de 0.88, por lo que el 88 % de los países que exhiben un aumento en su regulación ambiental vieron disminuidos sus emisiones de SO<sub>2</sub>.

---

<sup>8</sup>Indica la proporción de casos que tienen tanto la condición como el resultado de interés de entre el total de casos que muestran dicho resultado de interés. En *fsQCA*, el valor de referencia que acostumbra a considerarse es en torno a 0.95 (Medina et al., 2017).

<sup>9</sup>Indica la proporción de casos en los que aparecen tanto la condición como el resultado de interés de entre los casos que muestran dicha condición.



CUADRO 6: Análisis de Necesidad para  $SO_2 = 1$

Condiciones probadas	Consistencia	Cobertura
CE	0.99	0.87
$\sim$ CE	0.00	1.00
EI	0.62	0.94
$\sim$ EI	0.42	0.85
RA	0.99	0.88
$\sim$ RA	0.02	1.00
AT	0.79	0.96
$\sim$ AT	0.22	0.68

Fuente: Elaboración propia.

También, en el Apéndice 1 se pueden observar los gráficos *XY Plot* de las cuatro condiciones con el resultado. Este tipo de gráfico permite ver de forma intuitiva las relaciones entre conjuntos: cuando todos o casi todos los casos caen por encima de la diagonal esto indica una relación de suficiencia, mientras que si todos o casi todos los casos caen por debajo de la diagonal esto indica una relación de necesidad<sup>10</sup>. Por lo tanto, en las Figuras 2 y 3, se puede observar que la mayoría de los casos de CE y RA se encuentran por debajo de la diagonal, por lo que hay evidencia para argumentar que tanto el crecimiento económico como el aumento de la regulación ambiental son condiciones necesarias de la disminución de  $SO_2$ . Esto no se observa con las condiciones de disminución de la estructura industrial y aumento del avance tecnológico (Ver Figuras 4 y 5, respectivamente).

## 4.2. Identificación Condiciones Suficientes e INUS

Las pruebas de suficiencia intentan comprobar si una sola condición o un conjunto de ellas conducen a un mismo resultado (Basedau y Richter, 2014). Cuando esto último ocurre, se denominan

<sup>10</sup>Cuando los casos están por debajo de la diagonal (o dentro del triángulo inferior), implica que, asumiendo que los casos pertenecen a ambos conjuntos, la pertenencia al conjunto  $X$ , es mayor o igual a su pertenencia en el conjunto  $Y$ ; es decir,  $X$  es un superconjunto de  $Y$ . Si no ocurre esto, la pertenencia a  $X$  sería inferior a la pertenencia a  $Y$  haciendo que  $X$  se convierta en un subconjunto de  $Y$ .

condiciones INUS<sup>11</sup>. Estas condiciones son insuficientes en sí mismas, pero son partes necesarias de una condición que es innecesaria pero suficiente para que ocurra el resultado (Ragin, 2009).

Para obtener las condiciones explicativas suficientes para el resultado analizado se emplea la minimización booleana, que permite identificar aquellas condiciones cuya presencia o ausencia resulta no ser relevante para producir el resultado. En los Cuadros 7 y 8, se pueden observar la solución compleja<sup>12</sup> e intermedia,<sup>13</sup> respectivamente. Ambas soluciones resultaron idénticas, siguiendo la siguiente forma<sup>14</sup>:

$$CE * RA * AT \rightarrow SO2 \quad (2)$$

La solución (2) apunta a un solo camino que ha llevado a la disminución de emisiones de contaminación entre los países de la OCDE entre 1995 y 2012. Esta vía respalda sustancialmente la teoría económica de que el crecimiento por sí mismo no puede generar disminución de la contaminación; es decir, a pesar de ser una condición necesaria para la disminución de SO<sub>2</sub>, no es suficiente por sí sola, pero sus efectos sobre otras variables, terminan siendo suficientes para provocar esta reducción, aunque cada una de ellas es insuficiente para provocar el resultado por sí sola. También, podemos observar que los efectos que prevalecieron fueron el efecto tecnológico y el efecto de la elasticidad ingreso de la demanda por calidad ambiental, además de un posible efecto indirecto que ejerce una mayor regulación ambiental sobre el avance tecnológico. Es decir, los resultados muestran evidencia que respalda las hipótesis H1, H3, H3.1 y H4.

---

<sup>11</sup>*Insufficient but Necessary part of a condition which is itself Unnecessary but Sufficient for the result.* Mackie (1965) les dio este nombre, explicando que, cuando se quiere determinar la causa de un resultado, en ocasiones, se identifica una condición inicial como causa de dicho resultado, y se sabe, además, que esta condición es una parte insuficiente pero necesaria de otra condición que en sí misma es innecesaria pero suficiente para el resultado. La primera condición ocurrió, otras condiciones que estuvieron presentes juntamente con ella forman una condición suficiente y, además, ninguna otra condición suficiente para que el resultado se diera estuvo presente. A menudo cuando se habla de la causa de un evento particular, se tiene en mente una condición de este tipo. Mackie señala que, en vista de la importancia de las condiciones de este tipo en nuestro entendimiento y verbalización de la causalidad, resulta conveniente darles un nombre, y propone entonces, llamarlas condiciones INUS.

<sup>12</sup>La solución compleja excluye los remanentes lógicos, solo las configuraciones con evidencia empírica entran en el proceso de minimización, privilegiando así la verosimilitud de la solución

<sup>13</sup>La solución intermedia incluye las configuraciones no observadas pero verosímiles, favoreciendo la parsimonia de las soluciones.

<sup>14</sup>El signo de multiplicación, «\*», equivale al *Lógico Y* e indica conjunción entre condiciones para la ocurrencia del resultado (Vis, 2010, citado en Medina et al., 2017).

CUADRO 7: Solución Compleja para la disminución de SO2

Solución	CE*RA*AT
Nº de países	18
Países	Dinamarca, Finlandia, Corea, Países Bajos, Polonia, Reino Unido, Francia, Noruega, Alemania, Italia, Japón, España, Bélgica, Irlanda, Suecia, Suiza, Austria, República Checa.
Cobertura de la Solución	0.79
Consistencia de la Solución	0.96

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 8: Solución Intermedia para la disminución de SO2

Solución	CE*RA*AT
Nº de países	18
Países	Dinamarca, Finlandia, Corea, Países Bajos, Polonia, Reino Unido, Francia, Noruega, Alemania, Italia, Japón, España, Bélgica, Irlanda, Suecia, Suiza, Austria, República Checa.
Cobertura de la Solución	0.79
Consistencia de la Solución	0.96

Fuente: Elaboración propia.

El único camino implica que el crecimiento económico en conjunto con un aumento de la regulación ambiental y del avance tecnológico, son una explicación suficiente de la disminución de las emisiones de SO2 entre los países de la OCDE entre 1995 y 2012. Esta solución sugiere que los países que han experimentado crecimiento económico pero que además han aumentado su innovación en tecnología ambiental y han vuelto más estricta su política ambiental vieron reducidos sus niveles de emisión de contaminación. Por lo tanto, cabe destacar el efecto que tiene el crecimiento económico en estos factores, el cual ha permitido la implementación de buenas prácticas en temas ambientales en los países de la OCDE, como lo son la aplicación de políticas ambientales más estrictas y el aumento de las innovaciones en tecnologías medioambientales, produciendo, en conjunto, una disminución considerable de emisiones de SO2.

En la mayoría de los países de la OCDE se puede evidenciar un gran desarrollo de la regulación ambiental, a través de instrumentos de política como son los impuestos, subsidios, leyes, entre

otros. También, se observa que el desarrollo de las tecnologías ambientales ha estado presente y cómo esta ha sido potenciada por el marco regulatorio de los países. Ejemplo de esto, es Países Bajos, donde las estrictas regulaciones, combinadas con la introducción de un impuesto sobre la contaminación del agua, permitieron financiar grandes inversiones en la purificación del agua, provocaron un aumento de I+D e innovación, y crearon capital técnico y tecnológico en el área de la tecnología del agua (OECD, 2015). Por otro lado, se constata que el sistema de innovación alemán está caracterizado por una alta protección de los derechos de propiedad intelectual, por lo que se reitera la importancia regulatoria en esta materia (OECD, 2012). Además, desde el año 2000, en Suecia el presupuesto gubernamental destinado a investigación y desarrollo para el medio ambiente y energía ha crecido a más del doble. Lo cual ha permitido que Suecia desarrolle una ventaja comparativa en tecnologías relacionadas con la gestión ambiental y la reducción de emisiones y la eficiencia del combustible en el transporte (OECD, 2014).

Por otro lado, como valores de ajuste de la solución se presentan los niveles de consistencia y de cobertura de la solución. En primer lugar, se observa el nivel de cobertura de la solución de 0.79, lo que indica que el 79 % de los países que disminuyeron sus emisiones de SO<sub>2</sub> entre 1995 y 2012 están cubiertos por la solución, es decir, la solución explica alrededor de 4/5 de los casos. Por otra parte, la solución tiene una consistencia de 0.96, es decir, que el 96 % de los países que presentaron la solución, disminuyeron sus emisiones de SO<sub>2</sub> durante el periodo observado.

Por último, cabe señalar que al tomar por separado estas tres condiciones (CE, RA y AT), se consideran como partes necesarias de la solución que permite explicar el resultado, pero son insuficientes por sí solas, por lo que forman condiciones INUS como parte de la única explicación suficiente.

## 5. Robustez

Para fortalecer la confianza de los resultados, se replica el análisis fsQCA cambiando dos de los tres puntos de referencia para asignar los grados de pertenencia al conjunto: *aumento o disminución considerable*. Para la total pertenencia al conjunto del resultado y de los factores explicativos se fijó como punto de anclaje el promedio de la condición entre los países de la OCDE entre 1995 y 2012. Para el estado de completa borrosidad, se estableció el valor mínimo de la condición entre los países analizados. Por último, para la completa exclusión del conjunto, se mantuvo un cero por ciento de variación de la condición. Luego de definir los nuevos puntos de pertenencia al conjunto, se llevó a cabo el proceso de calibración, cuyo resultado se presenta en el Apéndice 2.

El mover los puntos de pertenencia, no desafía significativamente los hallazgos. En primer lugar, se observa en el Cuadro 9 que ahora ya no hay condiciones necesarias para la disminución de contaminación, pues ninguna supera el umbral de consistencia de 0.95. Por lo tanto, el crecimiento económico y la regulación ambiental dejan de ser condiciones necesarias, es decir, dejan de estar siempre presentes cuando el resultado se produce.

Por otra parte, se mantiene la solución encontrada, solo se modifican sus niveles de cobertura y consistencia de esta. También se sostiene el hecho de que la solución compleja sea igual a la intermedia. La ecuación (3) resume la solución encontrada:

$$CE * RA * AT \rightarrow SO2 \quad (3)$$

En el Cuadro 10 y 11 se observa la solución compleja e intermedia, respectivamente. El número de países explicados por la solución disminuye en uno, ahora se excluye a Japón. Por otra

CUADRO 9: Análisis de Necesidad para  $SO_2 = 1$

Condiciones probadas	Consistencia	Cobertura
CE	0.88	0.88
~CE	0.15	0.98
EI	0.89	0.91
~EI	0.12	0.7
RA	0.88	0.88
~RA	0.15	0.99
AT	0.74	0.97
~AT	0.28	0.72

Fuente: Elaboración propia.

parte, el nivel de cobertura de la solución disminuye de 0,79 a 0,65, lo que indica que el 65 % de los países que disminuyeron sus emisiones de SO<sub>2</sub> entre 1995 y 2012 están cubiertos por la solución. Además, la solución tiene una consistencia de 0.97 que es levemente mayor que la anterior (0.96), es decir, que el 97 % de los países que presentaron esta solución única, disminuyeron sus emisiones de SO<sub>2</sub> durante el periodo 1995-2012.

CUADRO 10: Solución Compleja para la disminución de SO<sub>2</sub>

Solución	CE*RA*AT
Nº de países	17
Países	Corea, Polonia, Finlandia, Países Bajos, Noruega, Reino Unido, Francia, Irlanda, Bélgica, Dinamarca, Suecia, Alemania, Suiza, Austria, España, Italia y República Checa
Cobertura de la Solución	0.65
Consistencia de la Solución	0.97

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, si bien el modificar los puntos de referencia para la asignación de los valores *fuzzy*, altera levemente los niveles de cobertura y consistencia de la solución, no cambia de manera sustancial el resultado. Por lo que, la solución para la disminución de emisiones de SO<sub>2</sub> entre los países de la OCDE durante los años 1995 y 2012 permanece estable cuando se utilizan otros puntos de anclaje, lo que permite validar los resultados inicialmente presentados.

CUADRO 11: Solución Intermedia para la disminución de SO2

Solución	CE*RA*AT
Nº de países	17
Países	Corea, Polonia, Finlandia, Países Bajos, Noruega, Reino Unido, Francia, Irlanda, Bélgica, Dinamarca, Suecia, Alemania, Suiza, Austria, España, Italia y República Checa
Cobertura de la Solución	0.65
Consistencia de la Solución	0.97

Fuente: Elaboración propia.

## 6. Conclusiones

Se ha argumentado que el crecimiento por sí solo no genera disminución en las emisiones de contaminación, sino que es su efecto indirecto sobre otras condiciones explicativas lo que produce este resultado. Por lo que el trabajo se centró, en primer lugar, en establecer evidencia que indicara que el crecimiento económico es una condición necesaria pero no suficiente para la reducción de la contaminación; y, en segundo lugar, en generar evidencia empírica sobre la combinación de factores explicativos de la disminución de la contaminación en países desarrollados, es decir, evidencia empírica acerca de las teorías económicas detrás de la EKC.

Se testearon cuatro hipótesis. La primera, que el crecimiento económico produce una reducción de emisiones contaminantes en países desarrollados (H1); la segunda, que el crecimiento económico tiene efectos negativos sobre la estructura industrial, lo que produce una reducción de emisiones (H2); la tercera, que la regulación ambiental es afectada positivamente por el desarrollo económico, lo que genera una reducción de emisiones (H3) y, a su vez, el aumento de la regulación ambiental ocasiona un incremento del avance tecnológico (H3.1) y una disminución de la estructura industrial (H3.2). La cuarta y última hipótesis testeada planteó que el crecimiento económico tiene efectos positivos sobre el avance tecnológico, ayudando a reducir la contaminación (H4). Para analizar la validez de estas hipótesis se utilizó *fsQCA*, una técnica comparativa que tiene como ventaja principal el trabajar con muestras de tamaño medio (entre 5 y 50 casos), lo cual es ideal para el número de países de la muestra (24) y permite obtener la combinación de factores suficientes para producir un resultado en vez de una única variable explicativa fundamental, que era justamente uno de los objetivos principales.



Los resultados fueron los esperados. En un primer lugar, revelan que existe un mecanismo único que explicó la disminución de emisiones de SO<sub>2</sub> entre 24 países de la OCDE entre 1995 y 2012, el cual no depende sólo del crecimiento económico, sino de una combinación de factores específicos asociados a él. Por lo que, se confirmó que si bien el crecimiento económico es una condición necesaria para la disminución de contaminación, no es suficiente por sí sola.

Por otra parte, se encuentra evidencia del efecto indirecto del crecimiento económico sobre el aumento de la regulación ambiental y del avance tecnológico. La solución identificada muestra que el crecimiento económico junto con un aumento de la regulación ambiental y del avance tecnológico son una condición INUS, que conjuntamente pueden explicar la disminución de emisiones de SO<sub>2</sub> en más del 75 % los países analizados de la OCDE. Por lo tanto, el desarrollo económico debe ir acompañado de una mayor rigurosidad de la política ambiental y mayores innovaciones tecnológicas en materia ambiental para lograr una disminución de la contaminación, tal como ha ocurrido en los países analizados como Alemania, Suecia o Países Bajos.

La evidencia anterior permite establecer qué factores, en los cuales el crecimiento tiene un efecto indirecto, permiten explicar la relación de U-invertida entre el crecimiento económico y las emisiones de contaminación en países desarrollados. Fortaleciendo el rol de la elasticidad ingreso de la demanda de calidad ambiental y del efecto tecnológico para explicar la EKC. Este hallazgo constituye una contribución clave a la literatura sobre la EKC pues permite establecer respaldo empírico sobre los argumentos teóricos que sustentan la curva. También se encuentra evidencia de un posible efecto de la regulación ambiental sobre el avance tecnológico, lo que refuerza aun más la importancia de esta en la disminución de emisiones.

En conclusión, los resultados confirman en gran medida las hipótesis iniciales y permanecen estables frente al análisis de robustez que modificó los puntos de referencia para la asignación de valores *fuzzy*. Por lo tanto, estos hallazgos apuntan a propiciar el desarrollo de políticas específicas dirigidas a un aumento de la regulación ambiental y del avance tecnológico, para lograr un crecimiento económico continuo y mejorar la calidad ambiental en países que busquen disminuir sus niveles de contaminación.

Por lo tanto, se sugiere a los países que deseen seguir el camino que lleva a la disminución de

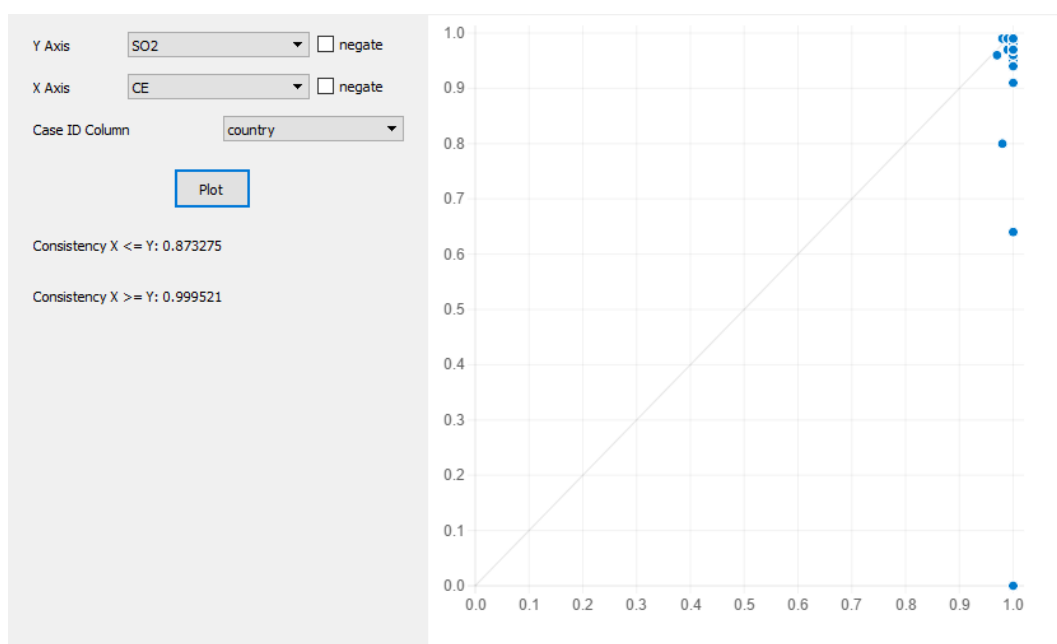
las emisiones de contaminación, el desarrollo de políticas específicas dirigidas al incentivo de la innovación en tecnologías ecológicas, tales como las implementadas por Alemania: reciclaje de residuos de embalaje (1991), responsabilidad extendida del productor (1996) y la prohibición del vertido de residuos no tratados (2005), así como programas destinados específicamente a promover el desarrollo tecnológico sustentable (OECD, 2012). Otro ejemplo es el de Austria, donde se promulgó una ley que proporciona asistencia financiera directa a las autoridades locales, industrias, agricultores y hogares para inversiones relacionadas principalmente con las energías renovables y la eficiencia energética, la gestión del agua, entre otros (OECD, 2013). Y a su vez, el desarrollo de políticas dirigidas al fortalecimiento de la regulación de la contaminación como en Suecia, donde se implementó un “cambio impositivo ecológico”, que implicó un aumento considerable de la tasa impositiva sobre el CO<sub>2</sub>, mientras que los impuestos sobre la renta se redujeron (OECD, 2014); o en Alemania, donde se introdujo una reforma fiscal ecológica de manera progresiva entre 1999 y 2003 (OECD, 2012).

Por último, los resultados obtenidos indican la conveniencia de realizar trabajos adicionales. Por ejemplo, extender el tipo de análisis realizado aquí a otros tipos de contaminantes como el CO<sub>2</sub>, el NO<sub>x</sub> o el MP. Además, parece pertinente, incluir otras condiciones al modelo, estudiadas por la teoría de la EKC, que por limitaciones de tiempo no fueron analizadas en este trabajo, tales como condiciones relacionadas con el nivel de importaciones de productos industriales que podrían establecer evidencia empírica de la existencia del llamado efecto desplazamiento.

# Apéndices

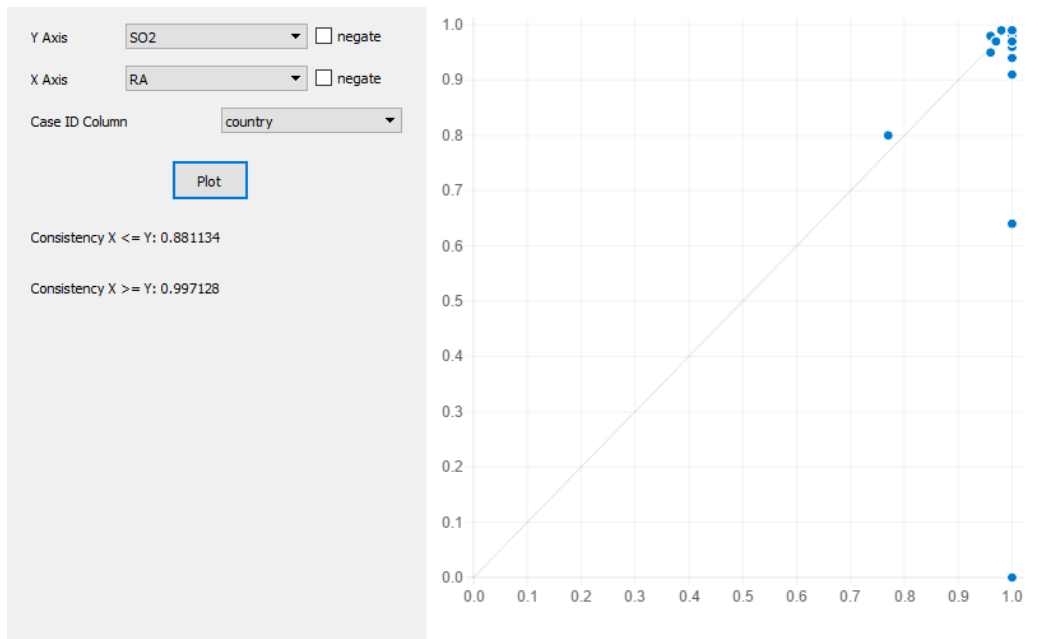
## Apéndice 1. Gráficos *XY Plot*

FIGURA 2: Disminución de emisiones de SO2 - Crecimiento Económico



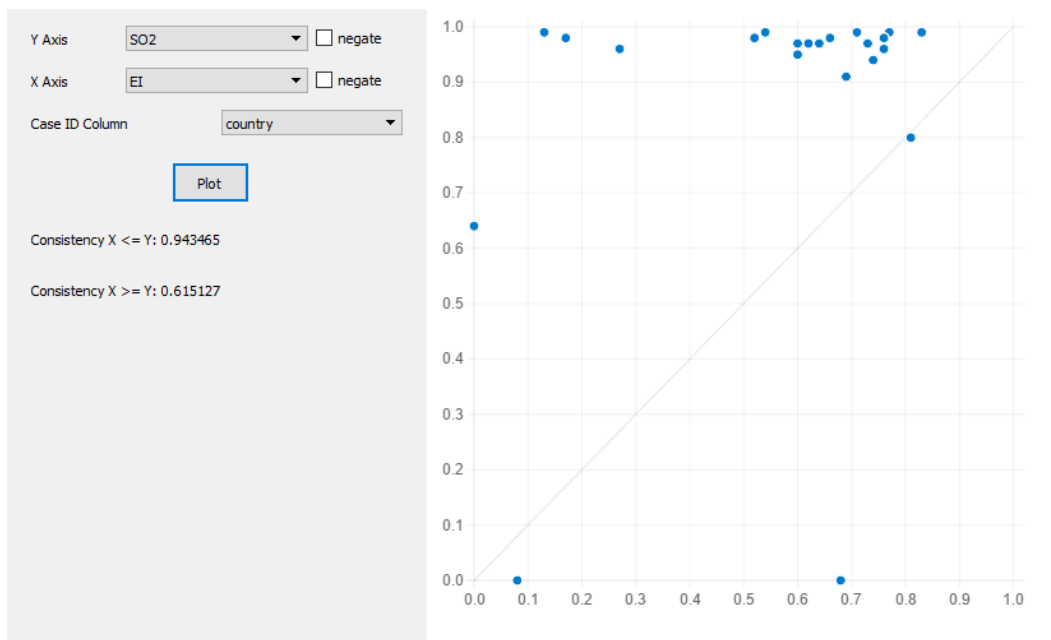
Fuente: Elaboración propia

FIGURA 3: Disminución de emisiones de SO2 - Aumento de la Regulación Ambiental



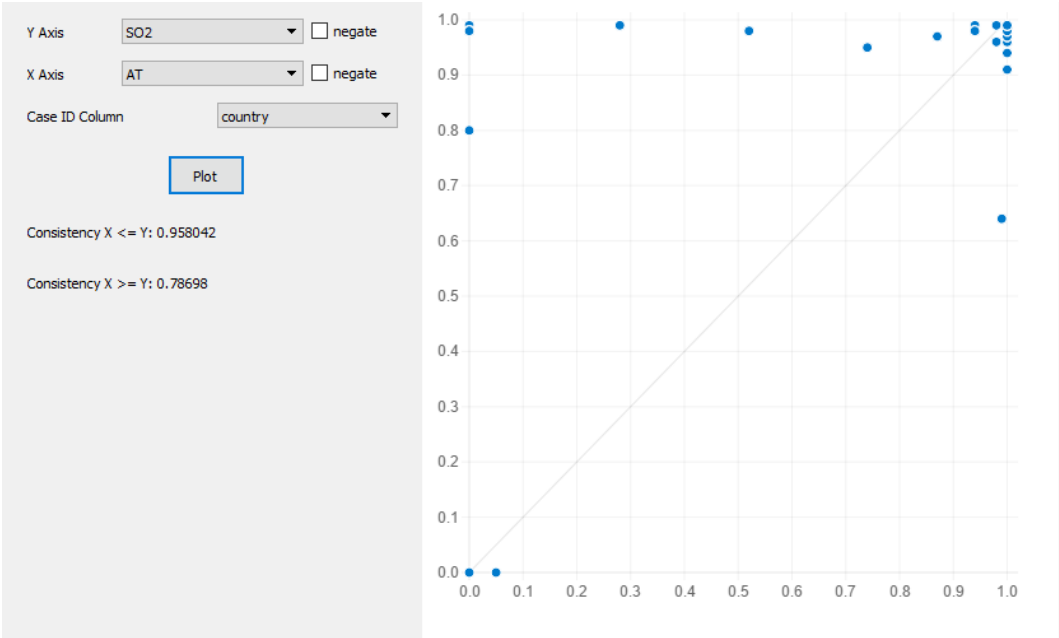
Fuente: Elaboración propia

FIGURA 4: Disminución de emisiones de SO2 - Disminución de la Estructura Industrial



Fuente: Elaboración propia

FIGURA 5: Disminución de emisiones de SO2 - Aumento del Avance Tecnológico



Fuente: Elaboración propia

## Apéndice 2. Matriz de datos calibrados Capítulo Robustez

CUADRO 12: Matriz de Datos Calibrados (Valores *fuzzy*) con nuevos puntos de pertenencia

Países	SO2	CE	EI	RA	AT
Alemania	0.99	0.81	0.83	0.65	0.84
Australia	0	0.93	0.4	1	0.05
Austria	0.94	0.89	0.93	0.62	0.62
Bélgica	0.99	0.84	1	0.96	0.76
Corea	0.97	0.99	0.64	0.99	1
Dinamarca	1	0.9	0.84	0.76	0.99
España	0.98	0.89	1	0.62	0.99
Finlandia	0.94	0.94	0.99	0.92	0.97
Francia	0.98	0.78	0.99	0.99	0.97
Grecia	0.74	0.57	1	0.5	0
Hungría	0.99	0.99	0.56	1	0
Irlanda	0.98	0.99	0.97	0.98	0.77
Italia	0.99	0.55	0.99	0.74	0.96
Japón	0.96	0.5	1	0.91	0.84
Noruega	0.51	1	0	0.96	0.87
Países Bajos	0.89	0.92	0.98	0.93	0.92
Polonia	0.98	1	0.93	0.94	1
Portugal	0.99	0.8	1	0.78	0.5
Reino Unido	0.99	0.81	1	0.99	0.93
República Eslovaca	0.98	1	0.58	0.99	0
República Checa	0.99	0.95	0.79	0.96	0.52
Suecia	0.97	0.89	0.96	0.95	0.7
Suiza	0.98	0.87	0.94	0.65	0.69
Turquía	0	1	0.98	0.98	0

Fuente: Elaboración propia.

# Referencias

- Ali, W., Abdullah, A., y Azam, M. (2017). Re-visiting the environmental Kuznets curve hypothesis for Malaysia: fresh evidence from ARDI bounds testing approach. *Renewable and sustainable energy reviews*, 77, 990–1000.
- Armeanu, D., Vintilă, G., Andrei, J. V., Gherghina, Ș. C., Drăgoi, M. C., y Teodor, C. (2018). Exploring the link between environmental pollution and economic growth in EU-28 countries: Is there an environmental Kuznets curve? *PloS one*, 13(5).
- Arrow, K., Bolin, B., Costanza, R., Dasgupta, P., Folke, C., Holling, C., ... Perrings, C. (1996). Economic growth, carrying capacity, and the environment. *Environment and Development Economics*, 1(1), 104–110.
- Arvind, T. T., y Stirton, L. (2010). Explaining the reception of the code napoleon in Germany: a fuzzy-set qualitative comparative analysis. *Legal Studies*, 30(1), 1–29.
- Banco Mundial. (2020). *World Bank Country and Lending Groups*. Descargado de <https://datahelpdesk.worldbank.org/knowledgebase/articles/906519-world-bank-country-and-lending-groups>
- Bank, W. (2019). *World Development Indicators Online database*. Descargado de <https://data.worldbank.org/data-catalog/world-development-indicators>
- Basedau, M., y Richter, T. (2014). Why do some oil exporters experience civil war but others do not?: investigating the conditional effects of oil. *European Political Science Review*, 6(4), 549–574.
- Botta, E., y Koźluk, T. (2014). Measuring environmental policy stringency in oecd countries.
- Dasgupta, S., Laplante, B., y Mamingi, N. (2001). Pollution and capital markets in developing countries. *Journal of Environmental Economics and management*, 42(3), 310–335.

- Dinda, S. (2004). Environmental Kuznets curve hypothesis: a survey. *Ecological economics*, 49(4), 431–455.
- European Commission, Joint Research Centre (JRC)/Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL). (2016). *Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR)*, release version 4.3.1. Descargado de <http://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=431>
- Figuerola, E., y Pastén, R. (2009). Country specific environmental Kuznets curves: A random coefficient approach applied to high-income countries. *Estudios de Economía*, 36(1), 5–32.
- Figuerola, E., y Pastén, R. (2013). A tale of two elasticities: a general theoretical framework for the environmental Kuznets curve analysis. *Economics Letters*, 119(1), 85–88.
- Galeotti, M., Lanza, A., y Pauli, F. (2006). Reassessing the environmental Kuznets curve for CO2 emissions: A robustness exercise. *Ecological economics*, 57(1), 152–163.
- Grossman, G. M., y Krueger, A. B. (1991). *Environmental impacts of a North American free trade agreement* (Inf. Téc.). National Bureau of Economic Research.
- He, J., y Wang, H. (2011). *Economic structure, development policy and environmental quality: An empirical analysis of environmental Kuznets curves with Chinese municipal data*. The World Bank.
- Horbach, J. (2008). Determinants of environmental innovation—New evidence from German panel data sources. *Research policy*, 37(1), 163–173.
- Horbach, J., Rammer, C., y Rennings, K. (2012). Determinants of eco-innovations by type of environmental impact—The role of regulatory push/pull, technology push and market pull. *Ecological economics*, 78, 112–122.
- Iwata, H., Okada, K., y Samreth, S. (2012). Empirical study on the determinants of CO2 emissions: evidence from OECD countries. *Applied Economics*, 44(27), 3513–3519.
- Kaika, D., y Zervas, E. (2013). The Environmental Kuznets Curve (EKC) theory—Part A: Concept, causes and the CO2 emissions case. *Energy Policy*, 62, 1392–1402.
- Lee, S., y Oh, D.-W. (2015). Economic growth and the environment in China: Empirical evidence using prefecture level data. *China Economic Review*, 36, 73–85.
- Longest, K. C., y Vaisey, S. (2008). fuzzy: A program for performing qualitative comparative analyses (qca) in stata. *The Stata Journal*, 8(1), 79–104.
- Mackie, J. L. (1965). Causes and Conditions. *American philosophical quarterly*, 2(4), 245–264.



- Magnani, E. (2001). The Environmental Kuznets Curve: development path or policy result? *Environmental Modelling & Software*, 16(2), 157–165.
- Medina, I., Álamos-Concha, P., Castillo, P. J., y Rihoux, B. (2017). *Análisis cualitativo comparado (QCA)* (Vol. 56). CIS-Centro de Investigaciones Sociológicas.
- OECD. (2012). *OECD Environmental Performance Reviews: Germany 2012*. Descargado de <https://www.oecd-ilibrary.org/content/publication/9789264169302-en> doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1787/9789264169302-en>
- OECD. (2013). *OECD Environmental Performance Reviews: Austria 2013*. Descargado de <https://www.oecd-ilibrary.org/content/publication/9789264202924-en> doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1787/9789264202924-en>
- OECD. (2014). *OECD Environmental Performance Reviews: Sweden 2014*. Descargado de <https://www.oecd-ilibrary.org/content/publication/9789264213715-en> doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1787/9789264213715-en>
- OECD. (2015). *OECD Environmental Performance Reviews: The Netherlands 2015*. Descargado de <https://www.oecd-ilibrary.org/content/publication/9789264240056-en> doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1787/9789264240056-en>
- OECD. (2017a). *Green Growth Indicators 2017*. Descargado de <https://www.oecd-ilibrary.org/content/publication/9789264268586-en> doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1787/9789264268586-en>
- OECD. (2017b). Technology indicators. Descargado de <https://www.oecd-ilibrary.org/content/data/e478bcd5-en> doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1787/e478bcd5-en>
- OECD. (2018). Environmental Policy Stringency index (Edition 2017). Descargado de <https://www.oecd-ilibrary.org/content/data/b4f0fdcc-en> doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1787/b4f0fdcc-en>
- OECD. (2019a). *Environment Database - Emissions of air pollutants*. Descargado de [https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=AIR\\_EMISSIONS](https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=AIR_EMISSIONS)
- OECD. (2019b). Patents on environment technologies. Descargado de <https://www.oecd-ilibrary.org/content/data/fff120f8-en> doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1787/fff120f8-en>
- Panayotou, T. (1993). *Empirical tests and policy analysis of environmental degradation at different stages of economic development* (Inf. Téc.). International Labour Organization.

- Pasten, R., y Figueroa, E. (2012). The environmental Kuznets curve: a survey of the theoretical literature. *International Review of Environmental and Resource Economics*, 6(3), 195–224.
- Ragin, C. C. (1987). The comparative method: Moving beyond qualitative and quantitative strategies. En *The comparative method: Moving beyond qualitative and quantitative strategies*. University of California Press.
- Ragin, C. C. (2009). *Redesigning social inquiry: Fuzzy sets and beyond*. University of Chicago Press.
- Ragin, C. C., y Davey, S. (2016). *Fuzzy-Set/Qualitative Comparative Analysis 3.0*. Irvine, California: Department of Sociology, University of California.
- Rihoux, B., y Ragin, C. C. (2008). *Configurational comparative methods: Qualitative comparative analysis (QCA) and related techniques* (Vol. 51). Sage Publications.
- Roca, J. (2003). Do individual preferences explain the Environmental Kuznets curve? *Ecological Economics*, 45(1), 3–10.
- Roig-Tierno, N., Gonzalez-Cruz, T. F., y Llopis-Martinez, J. (2017). An overview of qualitative comparative analysis: A bibliometric analysis. *Journal of Innovation & Knowledge*, 2(1), 15–23.
- Selden, T. M., y Song, D. (1994). Environmental quality and development: is there a Kuznets curve for air pollution emissions? *Journal of Environmental Economics and management*, 27(2), 147–162.
- Shafik, N., y Bandyopadhyay, S. (1992). Economic growth and environmental quality: time series and cross section evidence. *Policy research working paper N° WPS904*, World Bank.
- Stern, D. I. (2004). The rise and fall of the environmental Kuznets curve. *World development*, 32(8), 1419–1439.
- Stokey, N. L. (1998). Are there limits to growth? *International economic review*, 1–31.
- Vis, B. (2010). *Politics of risk-taking: welfare state reform in advanced democracies*. Amsterdam University Press.
- Vázquez, M. R. D. (2007). *Estudio empírico de las causas subyacentes en la hipótesis de la curva de Kuznets ambiental: influencia de factores exógenos y análisis de descomposición*. Universidad Santiago de Compostela.
- Yang, N., Zhang, Z., Xue, B., Ma, J., Chen, X., y Lu, C. (2018). Economic growth and pollution emission in China: Structural path analysis. *Sustainability*, 10(7), 2569.

Zilio, M. I. (2012). Curva de Kuznets ambiental: La validez de sus fundamentos en países en desarrollo. *Cuadernos de economía*, 35(97), 43–54.