



Universidad de
San Andrés

Universidad de San Andrés

Departamento de Economía

Licenciatura en Economía

Crecimiento Económico y Emisión de CO₂:

¿Existe una Curva de Kuznets Ambiental?

Estimación para países del G20

Autor: Santiago de Zavalía

Legajo: 25097

Mentor: Gabriel V. Montes-Rojas

Victoria, 7 de febrero de 2017

Crecimiento Económico y Emisión de CO2:
¿Existe una Curva de Kuznets Ambiental?
Estimación para países del G20

Índice

| | |
|--|----|
| Abstract | 2 |
| 1- Introducción | 2 |
| 2- Estado del arte | 4 |
| 3- Metodología | 8 |
| 4- Resultados | 12 |
| 4.1- Tests de Dickey-Fuller | 12 |
| 4.2- Selección de los rezagos óptimos | 13 |
| 4.3- Cointegración | 15 |
| 4.4- Correlación serial | 16 |
| 4.5- Resultados a corto y largo plazo | 17 |
| 4.5.1- Modelo ARDL: resultados a largo plazo | 17 |
| 4.5.2- Comparación de los resultados a largo plazo | 20 |
| 4.5.3- Modelo ARDL: estimación del modelo de corrección de errores | 21 |
| 4.6- Tests de heterocedasticidad | 23 |
| 4.7- Estabilidad del modelo | 24 |
| 5- Conclusiones | 25 |
| 6- Bibliografía | 27 |

ABSTRACT

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar la relación a largo plazo entre el desarrollo económico y la emisión de CO₂ para los países integrantes del G20. Utilizando datos desde 1960 a 2013, se busca aportar nuevos resultados para el estudio de la Curva de Kuznets Ambiental, que sostiene una relación de U invertida entre el nivel de contaminación ambiental y el crecimiento económico. Se plantea un modelo ARDL para testear la cointegración de las variables debido a que tiene diversas ventajas sobre otros métodos de cointegración y nos permite estudiar los resultados de largo plazo. Además, se deriva un modelo de corrección de errores para estudiar la relación a corto plazo entre las variables. Los resultados indican que existe evidencia de una Curva de Kuznets Ambiental para 6 de los 18 países estudiados. Por último, se realizan tests de heterocedasticidad y de estabilidad del modelo con el objetivo de otorgarle mayor robustez a los resultados.

1- Introducción

La problemática del cambio climático y del calentamiento global ha tomado gran relevancia a nivel mundial en los últimos años, especialmente desde la década del '90 en adelante. De hecho, es un tema que se ha introducido en las agendas de todos los líderes mundiales de la actualidad. Las discusiones llevadas a cabo en la Organización de las Naciones Unidas y en diversas reuniones internacionales son un punto clave para tratar de lograr un acuerdo conjunto entre países en pos de reducir la contaminación ambiental y comenzar a utilizar los recursos naturales de manera más eficiente. Es fundamental, y a la vez muy complejo, que los países tomen conciencia de la situación ambiental y logren generar políticas de desarrollo sustentable.

Es un hecho estilizado en economía que el Producto Interno Bruto per cápita de los países crece a largo plazo. Debido a esto, sería lógico suponer que a medida que aumenta la riqueza de las personas, y a su vez la cantidad de personas, también se incrementan el consumo de recursos naturales no renovables y la contaminación. Si esto fuese cierto, el destino de la humanidad estaría condenado desde sus inicios. Llegaría un punto en el cual ciertos recursos básicos para la vida humana terminarían por ser consumidos.

A la vez, también es un hecho estilizado que a medida que aumenta la riqueza de las personas, estas tienden a valorar más la calidad del medio ambiente en donde viven y se pueden generar industrias que sean más eficientes en relación a la contaminación que generan. Por estas razones, también se puede suponer que llegará un punto en el que la relación entre el

crecimiento económico y la contaminación se revierta, de manera tal que a medida que aumente el PBI, la contaminación disminuirá. Además, las inversiones en investigación y desarrollo de nuevas tecnologías juegan un rol fundamental en la reducción del costo de producción, el consumo de recursos y el nivel de contaminación.

Debido a estas razones, resulta de gran importancia estudiar la relación a largo plazo entre el nivel de contaminación y el crecimiento económico. Una hipótesis esperanzadora es la Curva de Kuznets Ambiental (CKA), que sostiene que llegará un punto en el cual a medida que el PBI per cápita sigue aumentando, la contaminación per cápita disminuye. El estudio de esta hipótesis debería ser de extrema importancia ya que aporta información clave al momento de estudiar el nivel de contaminación ambiental y podrá detectar en qué punto de la curva se encuentran las distintas regiones. En base a los resultados de dichos estudios, podrían ser aplicadas diversas políticas, ya sea a nivel regional o mundial, que permitan reducir significativamente el grado de polución.

El objetivo del presente artículo es testear la evidencia empírica de la CKA para la mayoría de los países integrantes del G20. La CKA sostiene que existe una relación de U invertida entre el nivel de contaminación y el desarrollo de un país. Si utilizamos el PBI per cápita como indicador de desarrollo, la teoría nos indica que a medida que el PBI per cápita aumenta también lo hace la contaminación per cápita; pero llega un punto en el que esa relación se revierte, por lo que a medida que el PBI per cápita continúa aumentando, la contaminación per cápita disminuye.

Para estudiar la hipótesis de la CKA, se utilizarán datos desde 1960 a 2013 de las emisiones de dióxido de carbono y del PBI, y se estimarán modelos ARDL y modelos de Corrección de Errores (ECM) para la mayoría de los países integrantes del G20. Esto diferencia a este estudio de la mayoría de estudios previos que, ante la disponibilidad de datos para diversos países, llevan a cabo estimaciones de datos en panel.

El resto del presente texto se estructura de la siguiente manera: la sección 2 realiza un repaso por la literatura previa de la CKA, la sección 3 describe los datos y los modelos econométricos a estimar, la sección 4 presenta los resultados de las estimaciones y compara los resultados de los diferentes países y la sección 5 expone las principales conclusiones.

2- Estado del arte

Desde comienzos de la década del '90 se popularizaron diversos temas relacionados con el calentamiento global y la contaminación ambiental. Surgieron estudios de diferentes índoles que abarcaron gran parte de las ramas de la ciencia relacionados con la problemática global y los efectos de largo plazo que la contaminación podría causar en el planeta.

Por su parte, en economía comenzó a desarrollarse una rama que se especializó fuertemente en el estudio del medio ambiente. Es así cómo surge una de las hipótesis más estudiadas por los economistas ambientales: la Curva de Kuznets Ambiental. La Curva de Kuznets, originalmente introducida en el año 1955, establece una relación de U invertida entre el ingreso per cápita y la desigualdad de las sociedades. Los resultados indican que a medida que aumenta el ingreso per cápita también lo hace la desigualdad económica, pero llega un punto en donde esa relación se revierte, por lo que a medida que el ingreso per cápita continúa aumentando, la desigualdad económica es cada vez menor (Kuznets 1955). A partir de la hipótesis formulada por Kuznets, en los '90 comienza a estudiarse lo que los teóricos llamarían Curva De Kuznets Ambiental, que establece, al igual que la hipótesis original de Kuznets, una relación de U invertida entre las variables estudiadas. La hipótesis de la CKA sostiene que existe una relación de U invertida entre el crecimiento económico y la contaminación ambiental a largo plazo. La mayoría de estos estudios ha utilizado alguna variante del siguiente modelo:

$$Cont_t = \beta_0 + \beta_1 \cdot PBI_t + \beta_2 \cdot PBI_t^2 + \beta_3 \cdot PBI_t^3 + \beta_4 \cdot Var_t + u_t \quad (1)$$

En donde el término *Cont* es el indicador del nivel de contaminación, los términos *PBI* y *PBI*² representan el producto per cápita y el producto per cápita elevado al cuadrado, respectivamente. La variable *PBI*³ a veces es introducida en algunos análisis con el fin de observar si existen casos en donde se cumpla la CKA, pero llegue un punto en el cual la contaminación vuelva a aumentar. Por último, la variable *Var* representa alguna variable de control que se agrega al modelo, β_0 es la constante y u_t representa el término de error.

En base a este modelo podemos obtener diversos resultados para la relación entre el nivel de contaminación y el PBI per cápita:

- Caso 1: $\beta_1 > 0$ y $\beta_2 = \beta_3 = 0$: existe una relación positiva entre las variables a largo plazo, por lo que a medida que aumenta el PBI per cápita también lo hace la contaminación.
- Caso2: $\beta_1 < 0$ y $\beta_2 = \beta_3 = 0$: existe una relación negativa entre las variables. A medida que aumenta el PBI per cápita, el nivel de contaminación disminuye.

- Caso 3: $\beta_1 > 0$, $\beta_2 < 0$ y $\beta_3 = 0$: existe una relación cuadrática entre las variables. Este caso cumple con la hipótesis de la CKA.
- Caso 4: $\beta_1 > 0$, $\beta_2 < 0$ y $\beta_3 < 0$: existe una relación cúbica entre las variables. En este caso, la relación a largo plazo entre las variables tiene forma de N.

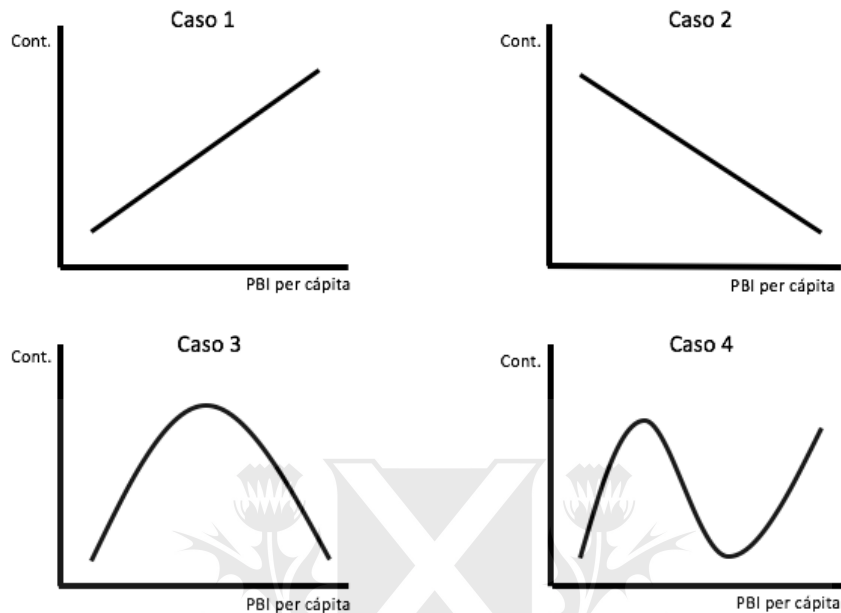


Fig. 1: posibles relaciones entre el nivel de contaminación y el PBI per cápita.

En relación con las variables utilizadas, la contaminación puede ser medida en el aire, que involucra casos de polución local y global, en el agua, o como el desgaste de los recursos naturales tales como la deforestación. Los datos de PBI per cápita suelen estar ajustados por PPP, y las variables de control más utilizadas son la densidad poblacional y los términos de comercio internacional.

A partir de esto, la evidencia empírica ha encontrado que la CKA se cumple para ciertos indicadores de contaminación (Dinda, 2004 y Lieb, 2003):

- Para indicadores del aire podemos realizar dos distinciones. Para indicadores locales que afectan a una región específica, tales como dióxido de azufre (SO₂), óxido de nitrógeno (NO_x) y monóxido de carbono (CO), existe evidencia a favor de la CKA. Una posible explicación de esto podría ser que resulta más simple controlar la contaminación a nivel local cuando tiene efectos específicos sobre determinada población. En relación con los indicadores globales, tal como la emisión de dióxido de carbono (CO₂), la evidencia de la CKA es mixta.
- Para los indicadores de contaminación del agua, la evidencia de la CKA es muy escasa.
- Para otros tipos de indicadores ambientales la CKA no ha encontrado evidencia alguna.

Entre los diversos autores que estudian la hipótesis de la CKA, podemos destacar que DeBruyn et. al. (1998) y Heil y Selden (2001), utilizando datos de panel, encuentran evidencia de una U invertida entre el PBI per cápita y las emisiones de CO₂. A la vez, otros autores como Martínez-Zarsoso y Bengochea-Morancho (2004), Vollembert y Kemfert (2005), Cole (2005), Galleoti et. al. (2006) y Jalil y Mahmud (2009), encontraron resultados que evidencian la existencia de una CKA en relación con la emisión de CO₂ para distintos países en particular.

Por otro lado, autores tales como Dinda (2001), Robers y Grimes (1997), Lim (1997), Borghesi (2000), Perrings y Ansuategi (2000) y Bengochea-Morancho et. al. (2001) no encontraron evidencia significativa de la CKA para la emisión de CO₂, sino que hallaron que la relación entre las variables es creciente.

Por último, otro grupo de autores encontró evidencia de que la relación entre el PBI per cápita y el nivel de contaminación tiene una forma de N, es decir que al principio se cumple la CKA, pero llega un punto en el cual la contaminación vuelve a aumentar. En el modelo tradicional planteado, esto ocurre cuando el coeficiente β_3 es positivo y estadísticamente significativo. Estos autores son Pezzey (1989), Opschoor (1990), DeBruyn y Opschoor (1997), Sengupta (1997) y Moonmaw y Unruh (1997).

Si bien la mayoría de los estudios que se han llevado a cabo utilizan técnicas de datos en panel, agrupando los países según alguna característica particular (que suele ser países desarrollados en contraste con países emergentes), estos podrían no ser del todo correctos. Según Mahmud y Jalil (2009), Dinda (2004) y Lieb (2003), estos estudios no son adecuados debido a que no existe un punto en común para todos los países en donde se revierta la tendencia entre el crecimiento económico y la contaminación debido a que influyen otros factores internos propios de cada país, por lo que recomiendan enfocarse particularmente en un solo país y estudiar la relación entre el crecimiento económico y la contaminación ambiental mediante análisis de series temporales.

Debido a estos resultados, resulta interesante analizar la hipótesis de la CKA para la emisión de CO₂ en distintos países, ya que la evidencia existente es mixta sobre la relación de esta variable con el crecimiento económico. Además, la emisión de CO₂ es el indicador más popular para este tipo de estudios, probablemente debido a que es lo que más afecta al planeta en su conjunto y que genera, principalmente, el actual calentamiento global. De esta forma, al ser la emisión de CO₂ el indicador más relevante en la actualidad, y el indicador de contaminación sobre el cual más se discute, es de vital importancia tener evidencia actualizada del comportamiento de esta variable en relación con el crecimiento económico.

La presente investigación pretende contribuir al estudio de la CKA, proporcionando evidencia actualizada para los países del G20, lo que resulta interesante debido a que abarca las principales potencias mundiales y a diversos países emergentes con gran potencial de crecimiento, tales como Brasil, India, China y Sudáfrica.



Universidad de
San Andrés

3- Metodología

Con el objetivo de estudiar la relación a largo plazo entre los niveles de contaminación y el desarrollo económico, se introduce un modelo utilizado por Mahmud y Jalil (2009) con el que buscan estudiar el nexo entre el crecimiento económico y la contaminación ambiental, y entre el consumo de energía y la contaminación ambiental. Dichos autores utilizan un modelo introducido por Pesaran y Pesaran (1997), Pesaran y Smith (1998), Pesaran y Shin (1999) y Pesaran et. al. (2001) conocido como modelo ARDL (“autoregressive distributed lag model”).

Previo a introducir tal modelo, es importante destacar que, al trabajar con series de tiempo, se deben tener ciertas precauciones previas al realizar las estimaciones econométricas debido a que puede surgir el problema de regresiones espurias, en donde se puede creer que dos variables tienen una correlación debido al hecho de que tienen una similar tendencia en el tiempo, pero en realidad no dependen una de la otra. De esta forma, para que exista una relación a largo plazo entre dos variables deben cumplirse dos condiciones: 1- que ambas variables tengan el mismo orden de integración $I(d)$, que indica cuántas veces debe ser diferenciada para que sea estacionaria; y 2- debe existir una combinación lineal entre ambas variables que sea estacionaria, es decir, integrada de orden cero $I(0)$. Cuando ambas condiciones se cumplen se dice que las variables están cointegradas, por lo que existe una relación a largo plazo que puede ser estimada.

Si bien existen diversos métodos para estimar la relación entre dos variables a largo plazo, en este estudio utilizaremos el modelo ARDL debido a que tiene diferentes ventajas en relación con otras técnicas de cointegración. En primer lugar, el modelo puede ser aplicado independientemente si las variables son $I(0)$ o $I(1)$. En segundo lugar, el modelo permite ser aplicado cuando las variables explicativas son endógenas. Y, en tercer lugar, se puede derivar un modelo de corrección de errores mediante una transformación lineal para estimar los resultados a corto plazo sin alterar los de largo plazo.

De esta forma, podemos plantear nuestro modelo similar al de la ecuación 1:

$$\logco2_t = \beta_0 + \beta_1 \cdot \loggdp_t + \beta_2 \cdot \loggdp_t^2 + \beta_4 \cdot \logtrade_t + u_t \quad (2)$$

En donde la variable dependiente $\logco2$ representa la emisión de dióxido de carbono per cápita medida en toneladas métricas, y las variables independientes \loggdp y \loggdp^2 representan el PBI per cápita y el PBI per cápita al cuadrado ajustados por PPP, respectivamente. La variable \logtrade se introduce para evitar un sesgo por variables omitidas y representa los términos de comercio internacional, que se calculan como la sumatoria de las exportaciones e

importaciones como porcentaje del PBI. El argumento para introducir esta variable se basa en que los países más desarrollados tenderán a implementar sistemas de producción más eficientes, por lo que según Grossman y Krueger (1995), importarán desde otros países aquellos productos cuya producción sea más ineficiente en términos de la contaminación que generan. Debido a esto, se espera que el coeficiente β_4 sea negativo para los países industriales y positivo para los países emergentes. Las variables α y u_i representan la constante y el término de error. Además, cabe aclarar que las variables están expresadas en su forma logarítmica, y los datos fueron extraídos de World Economics y de la base de datos del Banco Mundial.

De la ecuación 2 podemos derivar nuestro modelo ARDL, que, a diferencia del planteado por Mahmud y Jalil (2009), solo busca testear el nexo entre la emisión de CO2 y el crecimiento económico, por lo que no incluye la variable que representa al consumo de energía:

$$\begin{aligned} \Delta \log co2_t = & \beta_0 + \sum_{i=1}^p d_1 \cdot \Delta \log co2_{t-i} + \sum_{i=0}^p d_2 \cdot \Delta \log gdp_{t-i} + \sum_{i=0}^p d_3 \cdot \Delta \log gdp_{t-i}^2 + \\ & \sum_{i=0}^p d_4 \cdot \Delta \log trade_{t-i} + \lambda_1 \cdot \log co2_{t-1} + \lambda_2 \cdot \log gdp_{t-1} + \lambda_3 \cdot \log gdp_{t-1}^2 + \\ & \lambda_4 \cdot \log trade_{t-1} + u_t \end{aligned} \quad (3)$$

En donde los términos con sumatoria representan los términos de corto plazo de corrección de errores, mientras que los términos que incluyen λ representan la relación a largo plazo entre las variables. Además, los coeficientes β_0 y u_t representan la constante y el término de error, respectivamente. Por último, p indica los respectivos rezagos que se introducen en el modelo.

Así pues, para poder estimar el modelo de la ecuación 3, debemos llevar a cabo ciertos pasos previos:

- En primer lugar, una de las ventajas del modelo ARDL es que puede ser aplicado independientemente si las variables son I(0) o I(1), por lo que debemos realizar los tests de Dickey-Fuller de raíz unitaria para comprobar que ninguna variable sea I(2).
- En segundo lugar, debemos seleccionar la cantidad de rezagos a utilizar a través de dos posibles criterios: AIC o SBC. El primero de ellos selecciona una mayor cantidad de rezagos. Utilizaremos el criterio AIC, puesto que según Pesaran (2001) es conveniente elegir la mayor cantidad de rezagos de manera tal de incluir todas las combinaciones posibles de modelos.
- En tercer lugar, debemos estimar la ecuación 3 con el objetivo de llevar a cabo los tests F (“bound tests”) que introduce Pesaran (2001) para establecer si las variables están cointegradas, es decir, si existe o no una relación a largo plazo. Este test toma como

hipótesis nula que las variables no están cointegradas $H_0: \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = 0$ y como hipótesis alternativa que existe una relación a largo plazo entre las variables $H_A: \lambda_1 \neq \lambda_2 \neq \lambda_3 \neq \lambda_4 \neq 0$. Rechazamos H_0 cuando el valor F estimado para el modelo supera a los valores críticos introducidos por Pesaran (2001), según si las variables utilizadas son I(0) o I(1). No rechazamos H_0 cuando el valor F se encuentra por debajo del valor crítico I(0) y decimos que el test es inconcluso cuando el valor F se sitúa entre los valores críticos para I(0) e I(1).

- En cuarto lugar, debemos llevar a cabo pruebas de correlación serial debido a que el modelo ARDL requiere que los residuos sean independientes entre sí.

Luego de realizados dichos procedimientos, estamos en condiciones de estimar la ecuación 3 para los casos en los que exista cointegración en las variables y, posteriormente, plantear un modelo de corrección de errores (ECM) para las relaciones a corto plazo, el cual podemos representar mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta \log co2_t = \beta_0 + \sum_{i=1}^p d_1 \cdot \Delta \log co2_{t-i} + \sum_{i=0}^p d_2 \cdot \Delta \log gdp_{t-i} + \sum_{i=0}^p d_3 \cdot \Delta \log gdp_{t-i}^2 + \sum_{i=0}^p d_4 \cdot \Delta \log trade_{t-i} + \alpha ECM_{t-1} + u_t \quad (4)$$

En donde α es el parámetro de la velocidad de ajuste y ECM_{t-1} son los residuos obtenidos del modelo de cointegración planteado en la ecuación 3.

Por último, con el fin de otorgar robustez a los resultados, se llevan a cabo tests de heterocedasticidad y, siguiendo lo sugerido por Pesaran y Pesaran (1997), se realizan tests de estabilidad del modelo introducidos por Brown et. al. (1975) conocidos como CUSUM y CUSUMSQ.

De esta forma, podemos resumir los pasos a seguir para las estimaciones econométricas de la siguiente manera:

- 1- Tests de Dickey-Fuller para comprobar que ninguna variable sea I(2).
- 2- Selección de los rezagos a incluir mediante el criterio AIC.
- 3- Estimación de la ecuación 3 para realizar los tests F de cointegración requeridos por Pesaran (2001).
- 4- Tests de correlación serial para corroborar que los errores sean independientes entre sí.

5- Estimaciones de los resultados a corto y largo plazo. Esto implica estimar las ecuaciones 3 y 4.

6- Tests de heterocedasticidad.

7- Tests de estabilidad del modelo CUSUM y CUSUMSQ.



Universidad de
San Andrés

4- Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de las estimaciones introducidas en el apartado 3. Se llevan a cabo en diferentes subsecciones cada uno de los siete pasos enumerados previamente del análisis econométrico, con el objetivo de estudiar si existe o no una relación a largo plazo entre el desarrollo económico y los niveles de contaminación ambiental.

Para estudiar la hipótesis de la CKA, se toman datos anuales desde 1960 a 2013 para los países integrantes del G20. Esos países son Arabia Saudita, Argentina, Australia, Brasil, Canadá, China, Corea del Sur, Estados Unidos, Francia, India, Indonesia, Italia, Japón, México, Reino Unido, Sudáfrica, Suiza y Turquía. Cabe destacar que Alemania y Rusia no contaban con datos suficientes para llevar a cabo un análisis de series temporales, por lo que fueron excluidos de las estimaciones.

En las siguientes subsecciones se lleva a cabo la estimación de los resultados. Es importante señalar que a medida que se avanza con las estimaciones, puede ocurrir que haya países que no cumplan los requisitos necesarios para avanzar al siguiente nivel. Esto puede suceder si alguna de las variables es integrada de orden dos o mayor, si los modelos planteados no superan los valores críticos de los tests F de Pesaran (2001), es decir, si las variables no están cointegradas, o si alguno de los modelos presenta problemas de correlación serial.

4.1 Tests de Dickey-Fuller

El primer paso para poder estimar nuestro modelo ARDL es verificar que las variables utilizadas para cada uno de los países sean $I(0)$ o $I(1)$. Según Ouattara (2004), los tests F computados por Pesaran et. al. (2001) no son válidos para la presencia de variables $I(2)$, por lo que debemos realizar los tests de Dickey-Fuller para comprobar el orden de integración de las variables.

Para realizar los diversos tests de raíz unitaria, se incluyó tanto la tendencia como un componente de *drift* para aquellas variables que contaban con tendencia mientras que, para variables sin tendencia, se realizaron las pruebas incluyendo solamente el componente de *drift*.

La tabla 1 muestra los resultados de los tests de raíz unitaria. Los resultados nos indican que todas las variables son $I(0)$ o $I(1)$, por lo que estamos en condiciones de seguir adelante con nuestras estimaciones.

Tabla 1: resultados tests ADF.

| País | | ADF | | ADF |
|----------------|----------|-----------|-------------------|-----------|
| Arabia Saudita | logco2 | -1,323 | Δ logco2 | -5.298*** |
| | loggdp | -2.024 | Δ loggdp | -3.604** |
| | loggdp2 | -2.028 | Δ loggdp2 | -3.602** |
| | logtrade | -2,735*** | Δ logtrade | |
| Argentina | logco2 | -2.257 | Δ logco2 | -6.277*** |
| | loggdp | -1.025 | Δ loggdp | -5.342*** |
| | loggdp2 | -0.947 | Δ loggdp2 | -5.331*** |
| | logtrade | -3,329* | Δ logtrade | |
| Australia | logco2 | -1.366 | Δ logco2 | -8.549*** |
| | loggdp | -3.113 | Δ loggdp | -6.102*** |
| | loggdp2 | -2.844 | Δ loggdp2 | -6.071*** |
| | logtrade | -3.156* | Δ logtrade | |
| Brasil | logco2 | -1.650 | Δ logco2 | -5.398*** |
| | loggdp | -1.979 | Δ loggdp | -5.309*** |
| | loggdp2 | -1.885 | Δ loggdp2 | -5.310*** |
| | logtrade | -4,335*** | Δ logtrade | |
| Canadá | logco2 | -1.461 | Δ logco2 | -6.846*** |
| | loggdp | -1.657 | Δ loggdp | -5.710*** |
| | loggdp2 | -1.624 | Δ loggdp2 | -5.671*** |
| | logtrade | -1.049 | Δ logtrade | -5.272*** |
| China | logco2 | -4.715*** | Δ logco2 | |
| | loggdp | -3.681** | Δ loggdp | |
| | loggdp2 | -2.629 | Δ loggdp2 | -6.815*** |
| | logtrade | -2.131 | Δ logtrade | -5.081*** |
| Corea del Sur | logco2 | -1.588 | Δ logco2 | -8.068*** |
| | loggdp | 0.559 | Δ loggdp | -6.225*** |
| | loggdp2 | -0,358 | Δ loggdp2 | -6.209*** |
| | logtrade | -2.645 | Δ logtrade | -6.469*** |
| Estados Unidos | logco2 | -1.502 | Δ logco2 | -4.853*** |
| | loggdp | -1.163 | Δ loggdp | -5.841*** |
| | loggdp2 | -1.153 | Δ loggdp2 | -5.793*** |
| | logtrade | -2.078 | Δ logtrade | -7.030*** |
| Francia | logco2 | -2.731 | Δ logco2 | -7.725*** |
| | loggdp | -1.726 | Δ loggdp | -5.510*** |
| | loggdp2 | -1.443 | Δ loggdp2 | -5.560*** |
| | logtrade | -2.236 | Δ logtrade | -8.001*** |
| India | logco2 | -1.558 | Δ logco2 | -7.450*** |
| | loggdp | -0.055 | Δ loggdp | -7.359*** |
| | loggdp2 | 0,365 | Δ loggdp2 | -7.220*** |
| | logtrade | -2.516 | Δ logtrade | -6.370*** |
| Indonesia | logco2 | -2.626 | Δ logco2 | -6.750*** |
| | loggdp | -2.437 | Δ loggdp | -5.178*** |
| | loggdp2 | -2.591 | Δ loggdp2 | -5.205*** |
| | logtrade | -3.868** | Δ logtrade | |
| Italia | logco2 | -3.017 | Δ logco2 | -5.374*** |
| | loggdp | -0.109 | Δ loggdp | -6.832*** |
| | loggdp2 | 0.191 | Δ loggdp2 | -6.761*** |
| | logtrade | -2.303 | Δ logtrade | -7.905*** |
| Japón | logco2 | -3.773** | Δ logco2 | |
| | loggdp | -2.833 | Δ loggdp | -5.912*** |
| | loggdp2 | -2.327 | Δ loggdp2 | -6.043*** |
| | logtrade | -1,737 | Δ logtrade | -6.689*** |
| México | logco2 | -0.962 | Δ logco2 | -8.234*** |
| | loggdp | -1.919 | Δ loggdp | -6.091*** |
| | loggdp2 | -1.906 | Δ loggdp2 | -6.108*** |
| | logtrade | -3.457** | Δ logtrade | |
| Reino Unido | logco2 | -2.352 | Δ logco2 | -9.831*** |
| | loggdp | -1.293 | Δ loggdp | -5.455*** |
| | loggdp2 | -1.353 | Δ loggdp2 | -5.358*** |
| | logtrade | -2.342 | Δ logtrade | -7.284*** |
| Sudáfrica | logco2 | -1.419 | Δ logco2 | -6.828*** |
| | loggdp | -1.766 | Δ loggdp | -4.154*** |
| | loggdp2 | -1.708 | Δ loggdp2 | -4.178*** |
| | logtrade | -1.921 | Δ logtrade | -6.595*** |
| Suiza | logco2 | -3.400** | Δ logco2 | |
| | loggdp | -3.089 | Δ loggdp | -5.240*** |
| | loggdp2 | -3.047 | Δ loggdp2 | -5.238*** |
| | logtrade | -2.198 | Δ logtrade | -5.477*** |
| Turquía | logco2 | -2.444 | Δ logco2 | -7.942*** |
| | loggdp | -3.024 | Δ loggdp | -7.572*** |
| | loggdp2 | -3.029 | Δ loggdp2 | -7.563*** |
| | logtrade | -3.135* | Δ logtrade | |

Nota: *,** y *** representan un nivel de significatividad del 10%, 5% y 1% respectivamente.

4.2 Selección de los rezagos óptimos

Tras haber comprobado que ninguna de las variables es $I(2)$, nuestro siguiente paso es seleccionar los rezagos a incluir en cada uno de los países para llevar a cabo los tests de cointegración de Pesaran. Como el objetivo es seleccionar los rezagos óptimos del modelo, tomaremos los resultados del criterio AIC, que selecciona la mayor cantidad de rezagos y estima la mayor cantidad de modelos posibles, por lo que no se asume el riesgo de que un modelo con el número de rezagos óptimos no sea estimado. Ante esto, es importante destacar que en este caso estamos seleccionando el coeficiente p de la ecuación 3, que es el mismo para todos los

términos con sumatoria de cada modelo. A continuación, en la tabla 2, se presentan los rezagos óptimos seleccionados para cada país.

Tabla 2: selección de los rezagos óptimos.

| País | LAG | LL | LR | AIC | SBC | País | LAG | LL | LR | AIC | SBC |
|----------------|-----|---------|---------|-----------|-----------|-------------|-----|---------|----------|-----------|-----------|
| Arabia Saudita | 0 | 319.557 | | -15.7778 | -15.6089 | India | 0 | 280.942 | | -11.0777 | -10.9247 |
| | 1 | 421.636 | 204.16 | -20.0818 | -19.2374* | | 1 | 606.835 | 651.79 | -23.4734 | -22.7086* |
| | 2 | 440.113 | 36.954 | -20.2057* | -18.6857 | | 2 | 624.885 | 36.099 | -23.5554 | -22.1787 |
| | 3 | 451.737 | 23.247 | -19.9868 | -17.7913 | | 3 | 641.725 | 33.68* | -23.589* | -21.6005 |
| | 4 | 465.906 | 28.339* | -19.8953 | -17.0242 | | 4 | 650.263 | 17.077 | -23.2905 | -20.6902 |
| Argentina | 0 | 374.29 | | -14.8116 | -14.6586 | Indonesia | 0 | 220.589 | | -8.66357 | -8.51061 |
| | 1 | 571.736 | 394.89 | -22.0695* | -21.3046* | | 1 | 495.65 | 550.12 | -19.026 | -18.2612* |
| | 2 | 580.024 | 16.574 | -21.7609 | -20.3843 | | 2 | 504.261 | 17.223 | -18.7305 | -17.3538 |
| | 3 | 599.16 | 38.273 | -21.8864 | -19.8979 | | 3 | 533.807 | 59.091 | -19.2723 | -17.2838 |
| | 4 | 617.71 | 37.1* | -21.9884 | -19.388 | | 4 | 553.291 | 38.969* | -19.4116* | -16.8113 |
| Australia | 0 | 432.816 | | -17.1526 | -16.9997 | Italia | 0 | 351.812 | | -13.9125 | -13.7595 |
| | 1 | 727.487 | 589.34* | -28.2995* | -27.5347* | | 1 | 681.993 | 660.36 | -26.5127* | -25.7149* |
| | 2 | 734.9 | 14.825 | -27.956 | -26.5793 | | 2 | 694.721 | 25.456 | -26.4797 | -24.9722 |
| | 3 | 744.213 | 18.627 | -27.6885 | -25.7 | | 3 | 714.818 | 40.194 | -26.3488 | -24.5242 |
| | 4 | 751.537 | 14.647 | -27.3415 | -24.7411 | | 4 | 730.786 | 31.936* | -26.5114 | -23.9111 |
| Brasil | 0 | 321.486 | | -12.6994 | -12.5465 | Japón | 0 | 276.187 | | -10.8875 | -10.7345 |
| | 1 | 592.642 | 542.31 | -22.9057 | -22.1409* | | 1 | 611.737 | 671.1 | -23.6695* | -22.9047* |
| | 2 | 606.751 | 28.218 | -22.8301 | -21.4534 | | 2 | 622.128 | 20.783 | -23.4451 | -22.0685 |
| | 3 | 628.559 | 43.614* | -23.0623* | -21.0738 | | 3 | 637.426 | 30.595* | -23.417 | -21.4285 |
| | 4 | 641.086 | 25.055 | -22.9234 | -20.3231 | | 4 | 645.513 | 16.175 | -23.1005 | -20.5002 |
| Canadá | 0 | 380.65 | | -15.066 | -14.913 | México | 0 | 385.814 | | -15.2726 | -15.1196 |
| | 1 | 723.659 | 686.02 | -28.1464* | -27.3816* | | 1 | 615.948 | 460.27 | -23.8379 | -23.0731* |
| | 2 | 735.326 | 23.332 | -27.973 | -26.5964 | | 2 | 627.273 | 22.652 | -23.6509 | -22.2743 |
| | 3 | 745.878 | 21.106 | -27.7551 | -25.7666 | | 3 | 643.12 | 31.693 | -24.0334* | -21.6563 |
| | 4 | 763.646 | 35.536* | -27.8259 | -25.2255 | | 4 | 668.836 | 51.432* | -23.6448 | -21.4331 |
| China | 0 | 107.128 | | -4.12511 | -3.97214 | Reino Unido | 0 | 383.543 | | -15.1817 | -15.0288 |
| | 1 | 497.977 | 781.7 | -19.1191 | -18.3543 | | 1 | 661.264 | 555.44 | -25.6506 | -24.8858* |
| | 2 | 534.548 | 73.142 | -19.9419 | -18.5653* | | 2 | 678.558 | 34.588 | -25.7023 | -24.3257 |
| | 3 | 552.696 | 36.296* | -20.0278* | -18.0393 | | 3 | 696.294 | 35.473 | -25.7718* | -23.7833 |
| | 4 | 565.66 | 25.927 | -19.9064 | -17.306 | | 4 | 710.526 | 28.462* | -25.701 | -23.1007 |
| Corea del Sur | 0 | 174.671 | | -6.82684 | -6.67388 | Sudáfrica | 0 | 500.182 | | -19.8473 | -19.6943 |
| | 1 | 539.001 | 728.66 | -20.7601* | -19.9952* | | 1 | 714.398 | 428.43 | -27.7759* | -27.0111* |
| | 2 | 547.035 | 16.066 | -20.4414 | -19.0647 | | 2 | 727.035 | 25.273 | -27.6414 | -26.2647 |
| | 3 | 564.356 | 34.642 | -20.4942 | -18.5057 | | 3 | 741.465 | 28.861* | -27.5786 | -25.5901 |
| | 4 | 578.661 | 28.611* | -20.4264 | -17.8261 | | 4 | 751.061 | 19.191 | -27.3224 | -24.7221 |
| Estados Unidos | 0 | 378.78 | | -14.9912 | -14.8383 | Suiza | 0 | 355.623 | | -19.5346 | -19.3587 |
| | 1 | 711.522 | 665.48 | -27.6704* | -26.8961* | | 1 | 548.681 | 3.86E+02 | -29.3711 | -28.4914* |
| | 2 | 727.76 | 32.477 | -27.6609 | -26.2937 | | 2 | 563.327 | 2.93E+01 | -29.2959 | -27.7124 |
| | 3 | 742.72 | 29.919* | -27.6288 | -25.6403 | | 3 | 580.697 | 3.47E+01 | -29.372 | -27.0847 |
| | 4 | 752.961 | 20.484 | -27.3985 | -24.7981 | | 4 | 597.71 | 34.026* | -29.4283* | -26.4372 |
| Francia | 0 | 373.429 | | -14.7772 | -14.6242 | Turquía | 0 | 334.93 | | -13.2372 | -13.0842 |
| | 1 | 711.915 | 676.97* | -27.6766* | -26.9118* | | 1 | 563.499 | 457.14 | -21.74* | -20.9752* |
| | 2 | 723.779 | 23.727 | -27.5112 | -26.1345 | | 2 | 569.228 | 11.458 | -21.3291 | -19.9525 |
| | 3 | 732.981 | 18.404 | -27.2392 | -25.2507 | | 3 | 576.889 | 15.321 | -20.9956 | -19.0071 |
| | 4 | 740.722 | 15.482 | -26.9089 | -24.3085 | | 4 | 592.703 | 31.629* | -20.9881 | -18.3878 |

Nota: * refiere a los lags seleccionados según cada criterio

LAG = número de rezagos

LL = log likelihood

LR = log likelihood ratio

AIC = akaike information criterion

SBC = Schwarz-Bayesian criterion

De esta forma, podemos observar que los rezagos óptimos para cada país en base al criterio AIC se encuentran entre 1 y 4 según cada caso, y son los que utilizaremos en nuestro siguiente paso para llevar a cabo los tests F de Pesaran.

4.3 Cointegración

Luego de haber establecido que ninguna de las variables es $I(2)$ y los respectivos rezagos a incluir para cada uno de los países, estamos en condiciones de estimar la ecuación 3 para evaluar los estadísticos F de Pesaran con el objetivo de definir si las variables están o no cointegradas. En su artículo, Pesaran introduce ciertos valores críticos para los tests F que son necesarios para comprobar si existe o no relación a largo plazo entre las variables (2001). El autor introduce cinco posibles casos para los que reporta diferentes valores críticos del test. En esta ocasión, siguiendo a Mahmud Y Jalil (2009), realizaremos el test para el caso III, que establece un intercepto irrestricto y sin tendencia. A continuación, la tabla 3 muestra los valores críticos para el caso III:

Tabla 3: Pesaran ARDL bound test. Valores críticos para el caso III: con constante y sin tendencia

| K=3 | 10% | | 5% | | 2.5% | | 1% | |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | I(0) | I(1) | I(0) | I(1) | I(0) | I(1) | I(0) | I(1) |
| Valores críticos F | 2.72 | 3.77 | 3.23 | 4.35 | 3.69 | 4.89 | 4.29 | 5.61 |

En donde $k = 3$ es la cantidad de variables independientes utilizadas en nuestro modelo. Los respectivos valores de F indicados en la tabla corresponden a diferentes niveles de significatividad de las pruebas de cointegración, según si las variables utilizadas son $I(0)$ o $I(1)$.

Si volvemos sobre los resultados de los tests ADF expresados en la tabla 1, podemos observar que la totalidad de los países poseen variables $I(1)$, por lo que utilizaremos los valores expresados en la tabla 3 que se corresponden con dicho orden. En la tabla 4 se muestran los resultados de los tests de cointegración de Pesaran para los diferentes países.

Tabla 4: resultados tests de cointegración.

| PAIS | Test F | PAIS | Test F |
|----------------|-----------|-------------|------------|
| Arabia Saudita | 1.410 | India | 1.309 |
| Argentina | 5.037*** | Indonesia | 4.815** |
| Australia | 4.964*** | Italia | 12.385**** |
| Brasil | 1.271 | Japón | 2.379 |
| Canadá | 2.288 | México | 4.900*** |
| China | 1.739 | Reino Unido | 0.734 |
| Corea del Sur | 8.573**** | Sudáfrica | 1.235 |
| Estados Unidos | 6.881**** | Suiza | 5.762**** |
| Francia | 2.719 | Turquía | 8.371**** |

Nota: *, **, *** y **** representan un nivel de significatividad del 10%, 5%, 2,5% y 1% respectivamente.

Los resultados de las pruebas de cointegración indican que existe una relación a largo plazo entre las variables para 9 de los 18 países. Esto sugiere que, para la mitad de los casos, las variables no están cointegradas, por lo que no podemos estimar una relación a largo plazo entre el crecimiento económico y los niveles de contaminación ambiental. De esta forma, los países que no superan los valores establecidos por Pesaran no podrán avanzar a la próxima instancia de las estimaciones.

Por el contrario, Argentina, Australia, Corea del Sur, Estados Unidos, Indonesia, Italia, México, Suiza y Turquía presentan una relación a largo plazo entre las variables y podrán avanzar a la siguiente instancia, que consiste en estudiar una posible presencia de correlación serial en los errores

4.4 Correlación serial

Uno de los requisitos necesarios para poder estimar el modelo ARDL es la no correlación serial entre los errores. Para verificar que los errores son totalmente independientes entre sí, llevamos a cabo la prueba de correlación serial LM de Breusch-Godfrey. Dicho test toma como hipótesis nula que los residuos no presentan autocorrelación y como hipótesis alternativa la presencia de correlación serial. La tabla 5 muestra los resultados de la prueba.

Tabla 5: tests de correlación serial.

| | Test F | Prob F |
|----------------|--------|--------|
| Argentina | 0.6719 | 0.6151 |
| Australia | 0.3360 | 0.8522 |
| Corea del Sur | 1.4103 | 0.2463 |
| Estados Unidos | 1.8001 | 0.1468 |
| Indonesia | 3.0496 | 0.0287 |
| Italia | 1.3248 | 0.2761 |
| México | 1.5864 | 0.1947 |
| Suiza | 0.6760 | 0.5160 |
| Turquía | 0.1693 | 0.9529 |

Nota: se utilizaron 4 rezagos en cada caso

Rechazamos la hipótesis nula cuando los p-valores estimados son menores a 0,05. Los resultados nos indican que, excepto el caso de Indonesia, los países no presentan problemas de autocorrelación. A partir de esto, en la siguiente sección se estiman los resultados a corto y largo plazo para Argentina, Australia, Corea del Sur, Estados Unidos, Italia, México, Suiza y Turquía.

4.5 Resultados a corto y largo plazo

Aquí se presentan los resultados de las estimaciones de los modelos ARDL y ECM, que se derivan de estimar las ecuaciones 3 y 4.

Para estimar dichas ecuaciones, se decidió utilizar el criterio SBC para seleccionar los respectivos rezagos para cada una de las variables debido a que selecciona la menor cantidad de rezagos posibles y es un criterio parsimonioso. Esto significa que se estiman las ecuaciones 3 y 4 con una pequeña modificación. En este caso, el coeficiente p , que antes era igual para los términos con sumatoria, ahora puede ser diferente para cada uno de los términos, de manera tal de seleccionar el modelo que mejor se adapte a los datos. Los modelos seleccionados en cada caso se encuentran especificados en la zona inferior de los resultados de cada país en las tablas 6 y 7.

Tanto los resultados de corto y largo plazo serán estimados para Argentina, Australia, Corea del Sur, Estados Unidos, Italia, México, Suiza y Turquía, que son los países que cumplen los requisitos necesarios para ser estimados mediante el modelo ARDL, es decir, en donde las variables están cointegradas y no hay presencia de correlación serial entre los errores. En las siguientes subsecciones se presentan los resultados de largo plazo, una comparación entre dichos resultados y los resultados de corto plazo.

4.5.1 Modelo ARDL: resultados a largo plazo

Para que se cumpla la CKA, es necesario que los coeficientes $\log gdp$ y $\log gdp^2$ sean mayor a cero el primero de ellos y negativo el segundo. La tabla 6 presenta los resultados de las estimaciones a largo plazo.

Los resultados indican que existe evidencia de la CKA para seis de los ocho países:

- Argentina: los coeficientes $\log gdp$ y $\log gdp^2$ resultaron ser de 24,9590 y -3,0360, respectivamente. Ambos poseen un nivel de significatividad del 1%. Por otro lado, el coeficiente $\log trade$ no arrojó resultados significativos.
- Australia: también muestra coeficientes con un nivel de significatividad del 1%, cuyos valores son 18,2890 y -2,0179 para las variables $\log gdp$ y $\log gdp^2$, respectivamente. El coeficiente que acompaña a los términos de comercio resultó ser no significativo.
- Corea del Sur: los coeficientes que representan el PBI y PBI al cuadrado resultaron ser de 3,7006 y -0,3693 con un nivel de significatividad del 1%. El coeficiente $\log trade$ no es estadísticamente significativo.

- Estados Unidos: los coeficientes estimados son de 20,0309 y -2,0658 para las variables $\log gdp$ y $\log gdp^2$ y tienen un nivel de significatividad del 1%. A su vez, el coeficiente $\log trade$ tiene signo negativo y es significativo al 10%. Esto es acorde a lo establecido por Grossman y Krueger (1995), que sostienen que los países desarrollados tenderán a importar desde otros países aquellos productos cuya producción sea intensiva en contaminación.
- Suiza: el coeficiente estimado para la variable que representa al PBI es de 54,6649 y el que representa al PBI al cuadrado es de -5,9368, ambos con un nivel de significatividad del 1%. El coeficiente que representa a los términos de comercio no es estadísticamente significativo.
- Turquía: en este caso, los tres coeficientes estimados tienen un nivel de significatividad del 1%. El coeficiente que acompaña a la variable $\log gdp$ es de 13,0991, el que acompaña a la variable $\log gdp^2$ es de -1,4836 y el que representa a los términos de comercio es de 0,0652, que al ser positivo también es acorde a lo establecido por Grossman y Krueger (1995).

Por otro lado, existen dos países para los cuales los coeficientes que representan el logaritmo del producto al cuadrado no resultaron ser significativos, pero tienen el signo negativo deseado para que se cumpla la CKA:

- México: el coeficiente que representa a la variable $\log gdp^2$ no es estadísticamente significativo, pero tiene el signo negativo esperado, mientras que el coeficiente que acompaña a la variable $\log gdp$ es positivo y significativo al 10%. Esto indica que la relación entre las variables es creciente.
- Italia: ninguno de los coeficientes estimados es significativo, pero poseen los signos esperados para que se cumpla la CKA.

Si bien los resultados estimados para México e Italia poseen coeficientes que no son estadísticamente significativos, en la siguiente sección podemos calcular, de todos modos, utilizando los valores de los coeficientes estimados, el valor del PBI en el cual la tendencia se revierte.

Tabla 6: estimaciones de largo plazo

| ARGENTINA | | AUSTRALIA | | COREA DEL SUR | |
|--|------------------------|--|------------------------|--|------------------------|
| Modelo ARDL: estimaciones de largo plazo | | Modelo ARDL: estimaciones de largo plazo | | Modelo ARDL: estimaciones de largo plazo | |
| Variable dependiente: logco2 | | Variable dependiente: logco2 | | Variable dependiente: logco2 | |
| Variable | Coefficiente | Variable | Coefficiente | Variable | Coefficiente |
| loggdp | 24.9590*** (7.0677) | loggdp | 18.2890*** (2.3438) | loggdp | 3.7006*** (0.5101) |
| loggdp2 | -3.0360*** (0.8834) | loggdp2 | -2.0179*** (0.2683) | loggdp2 | -0.3693*** (0.0636) |
| logtrade | 0.0412 (0.0552) | logtrade | 0.2220 (0.1503) | logtrade | 0.0841 (0.0916) |
| Nota: ARDL (1,0,1,0) | | Nota: ARDL (1,0,0,0) | | Nota: ARDL (1,0,0,0) | |
| ESTADOS UNIDOS | | ITALIA | | MEXICO | |
| Modelo ARDL: estimaciones de largo plazo | | Modelo ARDL: estimaciones de largo plazo | | Modelo ARDL: estimaciones de largo plazo | |
| Variable dependiente: logco2 | | Variable dependiente: logco2 | | Variable dependiente: logco2 | |
| Variable | Coefficiente | Variable | Coefficiente | Variable | Coefficiente |
| loggdp | 20.0309** (7.6401) | loggdp | 117.1358 (141.1189) | loggdp | 15.2865* (9.3402) |
| loggdp2 | -2.0658** (0.8076) | loggdp2 | -13.3610 (16.1960) | loggdp2 | -1.7239 (1.1755) |
| logtrade | -1.4409* (0.7761) | logtrade | 3.2388 (4.8658) | logtrade | -0.1673 (0.1371) |
| Nota: ARDL (1,0,1,1) | | Nota: ARDL (1,0,1,0) | | Nota: ARDL (1,0,0,0) | |
| SUIZA | | TURQUIA | | | |
| Modelo ARDL: estimaciones de largo plazo | | Modelo ARDL: estimaciones de largo plazo | | | |
| Variable dependiente: logco2 | | Variable dependiente: logco2 | | | |
| Variable | Coefficiente | Variable | Coefficiente | | |
| loggdp | 54.6649*** (4.9770) | loggdp | 13.0991*** (0.8269) | | |
| loggdp2 | -5.9368*** (0.5450) | loggdp2 | -1.4836*** (0.1026) | | |
| logtrade | -0.1423 (0.0912) | logtrade | 0.0652*** (0.2237) | | |
| Nota: ARDL (1,0,3,0) | | Nota: ARDL (1,0,0,0) | | | |

Nota: error estandar entre paréntesis.

Nota: *, ** y *** representan un nivel de significatividad del 10%, 5% y 1% respectivamente.

4.5.2 Comparación de los resultados a largo plazo

El objetivo de este apartado es presentar los respectivos valores del PBI a los cuales la tendencia se revierte para los diferentes países, es decir, aquellos valores en donde la CKA estimada llega a un máximo.

De las ecuaciones estimadas para cada uno de los países, podemos establecer el siguiente modelo:

$$\log co2 = \lambda_1 \cdot \log gdp + \lambda_2 \cdot \log gdp^2 + \lambda_3 \cdot \log trade$$

En el cual los coeficientes hallados para cada país pueden ser reemplazados en λ_1 , λ_2 y λ_3 . Y de dicho modelo, para poder obtener el punto máximo de la Curva de Kuznets Ambiental es necesario encontrar el efecto marginal del $\log gdp$ sobre la contaminación ambiental:

$$\frac{\partial \log co2}{\partial \log gdp} = \lambda_1 + 2 \cdot \lambda_2 \cdot \log gdp$$

E igualamos la derivada a cero para encontrar el valor del $\log gdp$ en el cual la pendiente de la curva es nula, es decir, en donde tiene su máximo:

$$\lambda_1 + 2 \cdot \lambda_2 \cdot \log gdp = 0$$

$$\log gdp = \frac{\lambda_1}{-2 \cdot \lambda_2} = X$$

Y, por último, para calcular el valor de PBI a partir del cual se revierte la tendencia es necesario transformar el valor del $\log gdp$ al valor de PBI, recordando que debemos hacer uso de una de las propiedades de la función logarítmica:

$$\log gdp = X$$

$$gdp = 10^X$$

La tabla 7 muestra los valores del PBI para los cuales la tendencia entre el crecimiento económico y la contaminación ambiental se revierte.

Tabla 7: puntos de inflexión del GDP

| | Loggdp | Gdp |
|----------------|--------|--------|
| Argentina | 4.1105 | 12897 |
| Australia | 4.5317 | 34016 |
| Corea del Sur | 5.0103 | 102397 |
| Estados Unidos | 4.8482 | 70504 |
| Italia | 4.3835 | 24182 |
| México | 4.4337 | 27145 |
| Suiza | 4.6039 | 40170 |
| Turquía | 4.4146 | 25979 |

La tabla 7 nos permite extraer dos conclusiones relevantes sobre los puntos de inflexión en donde la tendencia entre el crecimiento económico y la contaminación ambiental se revierte. La primera es que se corrobora lo establecido por Jalil y Mahmud (2009), Dinda (2004) y Lieb (2003), que sostienen que los estudios que emplean datos en panel pueden no ser del todo adecuados debido a que existe una gran diferencia en los valores para los cuales la tendencia se revierte en diferentes países. La segunda conclusión importante es que para Corea del Sur, Estados Unidos y Turquía se estima que existe una curva de CKA, pero todavía no se han alcanzado los valores respectivos de desarrollo económico a partir de los cuales la relación entre las variables se vuelve negativa, lo que sugiere que todavía se encuentran en la parte creciente de la curva. Por otro lado, para Argentina, Australia y Suiza existe evidencia suficiente para argumentar que se encuentran en la parte decreciente de la curva, ya que superaron los valores estimados del PBI en los cuales la tendencia se revierte. Para el caso de Italia se observa que ya se superó el valor crítico de PBI en el cual se revierte la tendencia, mientras que México todavía se encuentra en el tramo creciente de la curva. De todos modos, estos dos últimos resultados deben tomarse con la debida precaución debido a las significatividades de los coeficientes.

4.5.3 Modelo ARDL: estimación del modelo de corrección de errores

Los resultados de las estimaciones a corto plazo se presentan en la tabla 8. Los resultados no permiten extraer conclusiones demasiado relevantes para nuestro análisis. Los coeficientes estimados de corto plazo son, en la mayoría de los casos, no significativos. Lo importante de los presentes resultados es destacar que el coeficiente que representa al término de corrección de errores es estadísticamente significativo para todos los países. Además, a excepción de los casos de Suiza e Italia, todos tienen el signo negativo esperado. La interpretación de dicho coeficiente establece qué porcentaje del desequilibrio del shock de la emisión de CO₂ del año previo se ajusta a los resultados de largo plazo del año corriente. De esta forma, para Argentina ese valor es del 33%, para Australia es del 42%, para Corea del Sur del 26%, para Estados Unidos es del 8%, para México del 20% y, por último, para Turquía es del 57%.

Tabla 8: estimaciones de corto plazo

ARGENTINA

Modelo ARDL: modelo de corrección de errores

Variable dependiente: $\Delta \log co2$

| Variable | Coefficiente |
|---------------------|-------------------------|
| $\Delta \log gdp$ | -0.0134 (0.0362) |
| $\Delta \log gdp^2$ | 0.0723*** (0.0126) |
| $\Delta \log trade$ | -0.0030 (0.0150) |
| C | -16.8508*** (4.1126) |
| ECM(-1) | -0.3333*** 0.0805 |

$$ECM(-1) = \log co2 - (24.9589 * \log gdp - 3.0360 * \log gdp^2 + 0.0412 * \log trade)$$

Nota: ARDL (1,0,1,0)

AUSTRALIA

Modelo ARDL: modelo de corrección de errores

Variable dependiente: $\Delta \log co2$

| Variable | Coefficiente |
|---------------------|-------------------------|
| $\Delta \log gdp$ | -0.3822 (1.0138) |
| $\Delta \log gdp^2$ | 0.0383 (0.1160) |
| $\Delta \log trade$ | 0.0409 (0.0632) |
| C | -16.1641*** (4.5700) |
| ECM(-1) | -0.4202*** 0.1058 |

$$ECM(-1) = \log co2 - (18.2890 * \log gdp - 2.0179 * \log gdp^2 + 0.2220 * \log trade)$$

Nota: ARDL (1,0,0,0)

COREA DEL SUR

Modelo ARDL: modelo de corrección de errores

Variable dependiente: $\Delta \log co2$

| Variable | Coefficiente |
|---------------------|-----------------------|
| $\Delta \log gdp$ | 0.0458 (0.2034) |
| $\Delta \log gdp^2$ | -0.0076 (0.0253) |
| $\Delta \log trade$ | -0.0048 (0.0373) |
| C | -2.2644** (0.9749) |
| ECM(-1) | -0.2686** (0.1007) |

$$ECM(-1) = \log co2 - (3.7006 * \log gdp - 0.3693 * \log gdp^2 + 0.0841 * \log trade)$$

Nota: ARDL (1,0,0,0)

ESTADOS UNIDOS

Modelo ARDL: modelo de corrección de errores

Variable dependiente: $\Delta \log co2$

| Variable | Coefficiente |
|---------------------|------------------------|
| $\Delta \log gdp$ | -0.0029 (0.0080) |
| $\Delta \log gdp^2$ | 0.0793*** (0.0138) |
| $\Delta \log trade$ | 0.0292 (0.0386) |
| C | -3.8511*** (0.7496) |
| ECM(-1) | -0.0853*** (0.0163) |

$$ECM(-1) = \log co2 - (20.0310 * \log gdp - 2.0658 * \log gdp^2 - 1.4409 * \log trade)$$

Nota: ARDL (1,0,1,1)

ITALIA

Modelo ARDL: modelo de corrección de errores

Variable dependiente: $\Delta \log co2$

| Variable | Coefficiente |
|---------------------|-----------------------|
| $\Delta \log gdp$ | 0.0120 (0.0188) |
| $\Delta \log gdp^2$ | 0.1222*** (0.0155) |
| $\Delta \log trade$ | -0.0317 (0.0303) |
| C | 5.9949*** (1.3184) |
| ECM(-1) | 0.0230*** (0.0052) |

$$ECM(-1) = \log co2 - (117.1358 * \log gdp - 13.3610 * \log gdp^2 + 3.2388 * \log trade)$$

Nota: ARDL (1,0,1,0)

MEXICO

Modelo ARDL: modelo de corrección de errores

Variable dependiente: $\Delta \log co2$

| Variable | Coefficiente |
|---------------------|-----------------------|
| $\Delta \log gdp$ | -1.1942 (2.5918) |
| $\Delta \log gdp^2$ | 0.1514 (0.3258) |
| $\Delta \log trade$ | -0.0298 (0.0366) |
| C | -4.2818 (5.5910) |
| ECM(-1) | -0.2031** (0.0764) |

$$ECM(-1) = \log co2 - (15.2865 * \log gdp - 1.7239 * \log gdp^2 - 0.1673 * \log trade)$$

Nota: ARDL (1,0,0,0)

Continuación tabla 8

SUIZA

Modelo ARDL: modelo de corrección de errores

Variable dependiente: $\Delta \log co2$

| Variable | Coefficiente |
|---------------------|--------------|
| $\Delta \log gdp$ | NA NA |
| $\Delta \log gdp^2$ | NA NA |
| $\Delta \log trade$ | NA NA |
| C | NA NA |
| ECM(-1) | NA NA |

$$ECM(-1) = \log co2 - (54.6649 * \log gdp - 5.9368 * \log gdp^2 - 0.1423 * \log trade)$$

Nota: ARDL (1,0,3,0)

Nota: error estandar entre paréntesis

Nota: *,** y *** representan un nivel de significatividad del 10%, 5% y 1% respectivamente

TURQUIA

Modelo ARDL: modelo de corrección de errores

Variable dependiente: $\Delta \log co2$

| Variable | Coefficiente |
|---------------------|------------------------|
| $\Delta \log gdp$ | -0.8797 (0.952) |
| $\Delta \log gdp^2$ | 0.1021 (0.1183) |
| $\Delta \log trade$ | 0.0194 (0.0258) |
| C | -14.3768** (6.4641) |
| ECM(-1) | -0.5727*** (0.2041) |

$$ECM(-1) = \log co2 - (13.0991 * \log gdp - 1.4836 * \log gdp^2 + 0.0652 * \log trade)$$

Nota: ARDL (1,0,0,0)

4.6 Tests de heterocedasticidad

Con el objetivo de darle mayor robustez a los resultados que surgen de las estimaciones, se llevan a cabo las correspondientes pruebas de heterocedasticidad de Breusch-Pagan-Godfrey. La hipótesis nula establece que hay homocedasticidad en los residuos, mientras que la hipótesis alternativa sugiere la presencia de heterocedasticidad. En la tabla 9 se presentan los resultados.

Tabla 9: heterocedasticidad

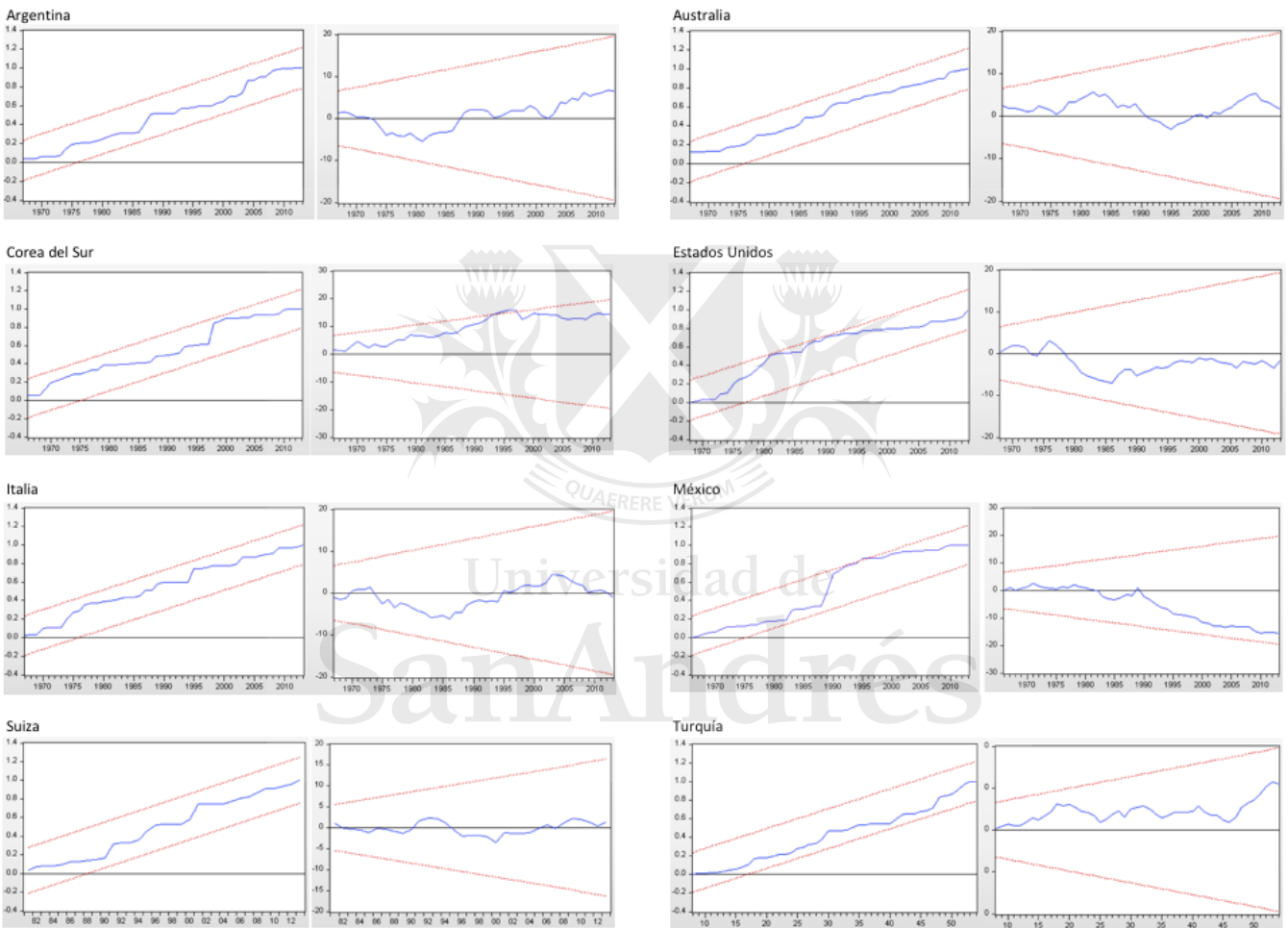
| | Test F | Prob F |
|----------------|--------|--------|
| Argentina | 1.1851 | 0.3308 |
| Australia | 1.5290 | 0.2088 |
| Corea del Sur | 0.4007 | 0.8072 |
| Estados Unidos | 1.0236 | 0.4221 |
| Italia | 0.4608 | 0.8033 |
| México | 2.9150 | 0.0308 |
| Suiza | 0.6488 | 0.7157 |
| Turquía | 3.6081 | 0.0119 |

Se observa que, a excepción de México y Turquía, ninguno de los países presenta problemas de heterocedasticidad, lo que significa que la varianza de los residuos es constante para estos países. Para el caso de México y Turquía, si bien presentan heterocedasticidad, los coeficientes estimados continúan siendo insesgados, pero tienen una mayor varianza.

4.7 Estabilidad del modelo

El último paso de nuestra estimación es realizar las respectivas pruebas de estabilidad del modelo CUSUM y CUSUMSQ introducidos por Brown et. al. (1975), que son sugeridos por Pesaran y Pesaran (1997). Los resultados de las pruebas se presentan a continuación, y sugieren que los coeficientes estimados en los modelos son dinámicamente estables, ya que se encuentran entre los valores críticos, que tienen un nivel de significatividad del 5%.

Gráfico 1: pruebas de estabilidad



5- Conclusiones

Con el objetivo de tener evidencia actualizada del comportamiento de la contaminación ambiental, el presente trabajo testeó por primera vez la hipótesis de la Curva de Kuznets Ambiental para la mayoría de los países del G20 en un período de tiempo comprendido entre 1960 y 2013. Para ello, se utilizaron los niveles de emisión de CO₂ per cápita como medida de contaminación y el PBI per cápita ajustado por PPP como medida del crecimiento económico. Se utilizó un modelo ARDL para estimar las relaciones a largo plazo entre el crecimiento económico y los niveles de contaminación ambiental. La elección de dicho modelo se debió a que posee ciertas ventajas específicas sobre las diferentes técnicas de cointegración existentes, entre las cuales nos permite estimar independientemente de si las variables son I(0) o I(1) y nos permite derivar un modelo de corrección de errores para la relación a corto plazo.

Para poder estimar dichos modelos, la metodología empírica fue subdividida en siete pasos imprescindibles para obtener resultados robustos. Cada uno de estos tenía un rol fundamental en el análisis de las relaciones entre las variables, que consistían en requisitos necesarios para poder seguir adelante con las estimaciones y tests para otorgarle la robustez necesaria a los resultados.

Los resultados nos indican que existe evidencia de una relación a largo plazo entre las variables (cointegración) para nueve de los dieciocho países analizados. Luego, al estimar los modelos ARDL y ECM para dichos países, los resultados muestran que existe evidencia significativa de una Curva de Kuznets Ambiental para Argentina, Australia, Corea del Sur, Estados Unidos, Suiza y Turquía. Por otro lado, los coeficientes estimados para Italia resultaron no ser significativos, pero poseen los signos esperados que concuerdan con la CKA. Además, el caso de México parece evidenciar una relación creciente entre las variables, ya que el coeficiente que representa el producto al cuadrado es negativo, pero no significativo.

Más aún, posteriormente se estimó el valor del PBI para el cual la tendencia entre el desarrollo económico y los niveles de emisión de CO₂ se revierte y se encuentra que los niveles varían mucho entre los países, lo que sugiere que los estudios en panel no son adecuados para el análisis de la CKA.

Además, también se observa que solo los casos de Argentina, Australia y Suiza ya superaron el nivel de PBI para los cuales la tendencia se revierte, mientras que para los casos de Corea del Sur, Estados Unidos y Turquía todavía no se alcanzaron dichos valores, lo que sugiere que se encuentran en el tramo creciente de la curva. Con los coeficientes estimados, para México se

observa que todavía se encuentra en la parte creciente de la curva, mientras que Italia pareciera encontrarse en la zona decreciente. La particularidad de estos dos últimos casos es que los coeficientes no resultaron ser significativos, por lo que los resultados deben ser tomados con extrema precaución. Por último, el coeficiente que representa a los términos de comercio resultó ser no significativo en la mayoría de los casos, a excepción de Estados Unidos y Turquía, en donde tiene el signo esperado.

Las estimaciones a corto plazo (ECM) no nos aportan conclusiones significativas para nuestro análisis. La mayoría de los coeficientes estimados resultaron no ser significativos, a excepción de los coeficientes que representan al término de corrección de errores, los cuales resultaron ser significativos y poseen el signo negativo esperado.

Por último, con el objetivo de otorgarle mayor robustez a los resultados se realizaron tests de heterocedasticidad y de estabilidad del modelo CUSUM y CUSUMSQ. Los resultados muestran, en su mayoría, que no hay presencia de heterocedasticidad y que los coeficientes estimados son dinámicamente estables.

De esta forma, podemos concluir que los resultados obtenidos no son muy esperanzadores en relación a la problemática de la contaminación ambiental que afecta al planeta en su conjunto. Esto se debe a que no parece haber evidencia contundente sobre el comportamiento de la emisión de CO₂, por lo que es fundamental que las diferentes ciencias que estudian el efecto del calentamiento global puedan encontrar soluciones eficientes a la problemática. Además, el rol de los líderes mundiales es de extrema importancia para lograr acuerdos que fomenten la reducción de la emisión de gases contaminantes, tales como un control estricto a la deforestación, incentivos para generar industrias sustentables y la concientización de las diferentes poblaciones sobre las posibles consecuencias del calentamiento global. Por último, es fundamental remarcar el rol del avance tecnológico, ya que debería priorizar el uso eficiente de los recursos utilizados para la producción de los bienes que se consumen.

Para concluir, en relación a futuras investigaciones, podemos remarcar que es necesario tener evidencia actualizada del comportamiento de la contaminación ambiental, al menos para los principales países desarrollados y emergentes. Esto sugiere extender el presente estudio para diferentes indicadores de contaminación y para aquellos países que no fueron incluidos en el presente análisis. Otra posible extensión se basa en introducir otro tipo de variables de control que representen el avance tecnológico o las políticas introducidas por los gobiernos en relación a la problemática, a pesar de que su medición a lo largo del tiempo sea de extrema dificultad.

6- Bibliografia

- Bengochea-Morancho, A., Higón-tamarit, F., Martínez-Zarzoso, I., (2001). Economic Growth and CO2 emissions in the European Union. *Environmental and Resource Economics*, 19, 165-172.
- Borghesi, S., (2000). Income Inequality and the Environmental Kuznets Curve. *Foundazione ENI Enrico Mattei*, Milan, Italy, Nota di lavoro 83. 2000.
- Brown, R.L., Durbin, J., Evans, J.M., (1975). Techniques for testing the constancy of regression relations over time. *Journal of the Royal Statistical Society*, 37, 149-163.
- Cole, M.A., (2005). Re-examining the pollution-income relationship: a random coefficients approach. *Economics Bulletin*, 14, 1-7.
- de Bryun, S.M., Opschoor, J.B., (1997). Developments in the throughput-income relationship: theoretical and empirical observations. *Ecological Economics*, 20, 255-268.
- de Bruyn, S.M., van den Verg, J.C.J.M., Opschoor, J.B., (1998). Economic growth and emissions: reconsidering the empirical basis of Environmental Kuznets Curves. *Ecological Economics*, 25, 161-175.
- Dinda, S. (2004). Environmental Kuznets curve hypothesis: A Survey. *Ecological Economics*, 49, 431-455.
- Dinda, S., (2001). A note on the global EKC in case of CO2 emission. *Economic Research Unit, Indian Statistical Institute, Kolkata*. Mimeo.
- Galeotti, M., Lanza, A., Pauli, F., (2006). Reassessing the environmental Kuznets curve for CO2 emissions: a robustness exercise. *Ecological Economics*, 57, 152-163.
- Grosman, G., Krueger, A., (1995). Economic environment and the economic growth. *Quarterly Journal of Economics* 110, 353-377.
- Halicioglu, F., (2009). An econometric study of CO2 emissions, energy consumption, income and foreign trade in Turkey. *Energy Policy* 37 (3), 1156-1164.
- Heil, M.T., Selden, T.M., (2001). Carbon emissions and economic development: future trajectories based on historical experience. *Environment and Development Economics*, 6, 63-83.
- Jalil, A., Mahmud, S.F., (2009). Environment Kuznets curve for CO2 emissions: A cointegration analysis for China. *Energy Policy*, 37, Pages 5167-5172.
- Kuznets, S., (1955). Economic growth and income inequality. *The American Economic Review*, 45, 1-28.
- Lieb, C. M., (2003). The environmental Kuznets curve: a survey of the empirical evidence and of possible causes. *Discussion Paper No. 391, University of Heidelberg, Department of Economics, working paper*.
- Lim, J., (1997). The effects of economic growth on environmental quality: some empirical investigation for the case of South Korea. *Seoul Journal of Economics*, 10 (3), 273-292.
- Martinez-Zarzoso, I., Bengochea-Morancho A., (2004). Pooled mean group estimation of an environmental Kuznets curve for Co2. *Economic Letters*, 82, 121-126.
- Moomaw, W.R., Unruh, G.C., (1997). Are environmental Kuznets curve misleading us? The case of CO2 emissions. *Environment and Development Economics*, 2, 451-463.
- Opschoor, J.B., (1990). Ecologische duurzame economische ontwikkeling: Een theoretisch idee en een weerbarstige praktijk. In: Nijkamp, P., Verbuggen, H., (Eds.), *Het Nederlands Milieu in the Europese Ruimte: Preadviezen van de Koninklijke Vereniging voor Staathuishoudkunde*. Stenfert Kroese, Leiden, pp. 77-126.
- Ottara, B., (2004). *Foreign Aid and Fiscal Policy in Senegal*. Mimeo University of Manchester.
- Pesaran, M.H., Pesaran, B., (1997). *Working With Microfit 4.0: Interactive Econometric Analysis*. Oxford University Press, Oxford.
- Pesaran, M.H., Shin, Y., (1999). An autoregressive distributed lag modelling approach to cointegration analysis. In: Strom, S. (Ed.), *Econometrics and Economic Theory in 20th Century: the Ragnar Frisch Centennial Symposium*. Cambridge University Press, Cambridge Chapter 11.
- Pesaran, M.H., Smith R.P., (1998). Structural analysis of cointegration VARs. *Journal of Economics Survey*, 12, 471-505.
- Pesaran, M.H., Shin, Y., Smith, R.J., (2001). Bounds testing approaches to the analysis of level relationships. *Journal of Applied Econometrics*, 16, 289-326.
- Perrings, C., Ansuategi, A., (2000). Sustainability, growth and development. *Journal of Economics Studies*, 27 (1/2), 19-54.
- Pezzey, J.C.V., (1989). *Economic analysis of sustainable growth and sustainable development*. Environment Department working paper, 15. World Bank.
- Roberts, J.T., Grimes, P.K., (1997). Carbon intensity and economic development 1962-1991: a brief exploration of the Environmental Kuznets Curve. *World Development*, 25 (2), 191-198.
- Sengupta, R.P., (1997). CO2 emission-income relationship: policy approach for climate control. *Pacific Asia Journal of Energy*, 7 (2), 207-229.
- Volleberg, H., Kempfert, C., (2005). The role of technological change for a sustainable development. *Ecological Economics*, 133-147.