

# ESTABILIDAD DE ACUERDOS COMERCIALES INTERNACIONALES EN UN ESCENARIO DE DAÑO AMBIENTAL: UN ENFOQUE DE TEORÍA DE JUEGOS\*

FLAVIO JÁCOME-LIÉVANO\*\*

## RESUMEN

En este artículo se analiza la estabilidad de acuerdos comerciales internacionales cuando los países introducen en su función de bienestar social una función de daño ambiental, generado por emisiones contaminantes causantes del calentamiento global. Mediante un modelo que considera un mundo de tres países, se utilizan herramientas de la Teoría de Juegos no Cooperativos para determinar la estabilidad de diferentes estructuras de acuerdos comerciales. Los resultados del modelo muestran que cuando los países consideran que el daño ambiental es bajo, solo es estable un acuerdo comercial global. Sin embargo, cuando los países consideran que el daño ambiental es alto, un acuerdo global ya no es estable; sólo es estable un acuerdo firmado entre dos países.

**Palabras clave autor:** acuerdos comerciales internacionales, función de daño ambiental, calentamiento global, cambio climático, estabilidad de acuerdos comerciales.

**Palabras clave descriptor:** tratados comerciales, teoría de juegos, calentamiento global.

**Clasificación JEL:** OTRO, C72 ,Q5.

Fecha de recepción: 14 de octubre de 2009  
Fecha de aceptación: 6 de noviembre de 2009

\* Artículo resultado de una de las líneas de investigación del grupo de Política Social del Departamento de Economía de la Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas de la Pontificia Universidad Javeriana. Originado en la necesidad de realizar un aporte al estudio de los acuerdos que buscan la reducción de emisiones, a partir de la escasa literatura aplicada al tema de estabilidad de estos acuerdos desde la óptica de la teoría de juegos.

\*\* Doctor en Economía de la Universidad del País Vasco. Magíster en Economía de la Pontificia Universidad Javeriana. Ingeniero Eléctrico de la Universidad de Los Andes. Profesor Asociado, Departamento de Economía, Facultad de Ciencias Económicas de la Pontificia Universidad Javeriana. Contacto: [fjacome@javeriana.edu.co](mailto:fjacome@javeriana.edu.co)

## **STABILITY OF INTERNATIONAL TRADE AGREEMENTS WITHIN AN ENVIRONMENTAL DAMAGE SCENARIO: A GAME THEORY APPROACH**

### **ABSTRACT**

This paper analyses the stability of International Trade Agreements when countries consider an environmental damage function within their social welfare function. Using a three country world model, Non cooperative Game Theory tools are used to determine the stability of different trade agreement structures. Model results show that if countries consider low environmental damages, only a global agreement is stable. However, when countries consider high environmental damages, a global agreement is no longer stable and only a two country agreement is stable.

**Key words author:** International Trade Agreements, Environmental Damage Function; Global Warming, Climate Change, Trade Agreements Stability, Non Cooperative Game Theory, Nash Equilibrium, Coalition Proof Nash Equilibrium, Strong Nash Equilibrium.

**Key word plus:** Commercial Treaties, Game Theory, Global Warming.

**JEL Classification:** OTHER, C72, Q5.

## **LA STABILITÉ DES ACCORDS COMMERCIAUX ET INTERNATIONAUX SUR PLAN DE DOMMAGES ENVIRONNEMENTAUX: UNE APPROCHE DE LA THÉORIE DES JEUX**

### **RÉSUMÉ**

Dans cet article, on analyse la stabilité d'accords commerciaux internationaux quand les pays introduiront dans leur fonction de bien-être social, une fonction de dommages environnementaux produits par des émissions polluantes responsables du réchauffement de la planète. Par un modèle qui considère un monde de trois pays, on utilise des outils de la Théorie des Jeux non Coopératifs pour déterminer, la stabilité de différentes structures d'accords commerciaux. Les résultats du modèle montrent que quand les pays considéreront que les dommages environnementaux sont bas, et seul un accord commercial global est stable. Toutefois, quand les pays considéreront que les dommages sont élevés, un accord global n'est plus stable; seul un accord signé entre deux pays stable.

**Mots clés auteur:** Accords commerciaux internationaux, fonction de dommages environnementaux, réchauffement de la planète, changement climatique, stabilité des accords commerciaux, théorie des jeux non coopératifs, équilibre de Nash, équilibre de Nash sous épreuve de coalitions, équilibre fort de Nash.

**Mots clés descripteur:** Traités commerciaux, théorie des jeux, réchauffement global.

**Classification JEL:** D'AUTRES, C72, Q5.

**Sumario:** Introducción. 1. Un modelo de comercio internacional con función de daño ambiental. 2. Análisis de estabilidad. Conclusiones. Bibliografía

## INTRODUCCIÓN

Durante los últimos quince años ha habido una creciente preocupación por las consecuencias del calentamiento global y el cambio climático generados por las emisiones contaminantes provenientes de la actividad industrial de los países. Sin embargo, hay una gran dificultad para la firma de acuerdos vinculantes que generen incentivos para la adhesión de más miembros y para su posterior cumplimiento, principalmente por parte de los países industrializados.

En 1997, en Kyoto (Japón), los países industrializados firmaron un acuerdo de compromiso que implicaba tomar acciones para disminuir las emisiones de gases contaminantes causantes del efecto invernadero. Tal acuerdo entró en vigencia en el año 2005 y tiene alcance hasta el 2012. El cumplimiento de los objetivos de reducción de emisiones establecidos en el acuerdo ha tenido grandes obstáculos: en primer lugar, el acuerdo entró en vigencia solamente después de su ratificación por parte de Rusia, es decir, ocho años después de haber sido firmado; en segundo lugar, Estados Unidos, país que produce la mayor cantidad de emisiones contaminantes en el mundo, nunca ratificó dicho acuerdo. Frente al fracaso de Kyoto, se ha planteado la necesidad de establecer un nuevo acuerdo que lo sustituya con un alcance hasta el año 2020.

La relevancia del logro de posibles acuerdos sobre reducción de emisiones radica en que la contaminación producida por un país no solo afecta a éste, sino que tiene un impacto global sobre todo los países del mundo. En este contexto, la alta actividad productiva de los países industrializados afecta negativamente, desde el punto de vista ambiental, el bienestar social de los países menos desarrollados.

Además de los ya anotados, varios pueden ser los obstáculos para el cumplimiento de los acuerdos alcanzados, entre ellos uno de los más notorios es que tales acuerdos generalmente van en contravía de las estrategias de crecimiento de los países, y aunque se lograran firmar tampoco hay certeza de que sean autosostenibles, a no ser que existan incentivos para que ello suceda.

En el contexto anterior, surgen interrogantes tales como: ¿Cuáles son los incentivos para que los países incluyan el daño ambiental como parte de las negociaciones para la firma de acuerdos comerciales? ¿Cuáles son los incentivos para que los países firmen acuerdos de reducción de emisiones en el marco de sus estrategias de crecimiento y

desarrollo? ¿Cuáles son los incentivos para que los acuerdos de reducción de emisiones, una vez firmados, sean autosostenibles?

Algunos trabajos han abordado el tema de la estabilidad de acuerdos ambientales internacionales para reducción de emisiones contaminantes, con el fin de determinar si existe alguna estructura de coalición que sea autosostenible (*selfenforcing*), de manera que un país o grupo de países no tenga incentivos para incumplir los acuerdos alcanzados. Tales trabajos han llevado a cabo el análisis de estabilidad de acuerdos ambientales principalmente desde dos ópticas: una de ellas se basa en herramientas analíticas de la teoría de juegos cooperativos y utiliza conceptos de estabilidad tales como el “núcleo”. En este enfoque se enmarcan trabajos como los de Chander y Tulkens (1992, 1995 y 1997), Kaitala, et al. (1995), Filar y Gaertner (1997) y Petrosjan y Zaccour (2003). En el otro enfoque se analiza la estabilidad de las coaliciones suponiendo que existe un grupo de jugadores que están dispuestos a firmar el acuerdo. Entonces se comprueba si existen incentivos para admitir a un nuevo miembro en el acuerdo o si existen incentivos para que un miembro perteneciente al acuerdo original desee abandonarlo. De este análisis surge el tamaño de una coalición estable. Los resultados de este enfoque sugieren que solo un pequeño grupo de países estaría dispuesto a firmar un acuerdo estable, independientemente de la cantidad de países considerados. En este contexto se enmarcan los trabajos de Barrett (1990, 1992, 1994), Carraro y Siniscalco (1993), Finus y Rundshagen (1998) y Breton, Fredj y Zaccour (2006). Este último, sin embargo, al igual que Tulkens (1998), intenta hacer una reconciliación entre los dos enfoques mencionados y caracteriza las condiciones para la existencia del núcleo en un modelo de cooperación internacional.

El presente artículo se centra particularmente en el análisis de la estabilidad de acuerdos comerciales cuando los países incluyen el daño ambiental dentro de su función de bienestar social, utilizando herramientas analíticas de la Teoría de Juegos no Cooperativos. El trabajo se desarrolla de la siguiente manera: en la Sección 1 se presenta un modelo de comercio internacional con función de daño ambiental y se hallan los niveles de bienestar de equilibrio para diferentes estructuras de coalición. En la Sección 2 se lleva a cabo el análisis de estabilidad de los posibles acuerdos comerciales, y en la última sección se presentan las conclusiones.

## **1. UN MODELO DE COMERCIO INTERNACIONAL CON FUNCIÓN DE DAÑO AMBIENTAL**

El análisis de estabilidad de los acuerdos de comercio internacional, cuando los países incluyen el daño ambiental dentro de su función de bienestar social, se lleva a cabo con base en la extensión de un modelo de comercio internacional propuesto por Macho Stadler, Pérez-Castrillo y Ponsati (1994), que considera tres países cuyas

industrias producen y comercian un bien homogéneo en el mercado mundial. La industria de cada país utiliza una tecnología de rendimientos constantes a escala y costo marginal de producción constante  $c$ .

Los países pueden imponer un arancel no negativo<sup>1</sup> a las importaciones desde los otros países, y se considera que no hay movilidad de factores productivos. En el país  $i$  hay una demanda agregada lineal de la forma:

$$P_i = 1 - Q_i, \quad i = 1, 2, 3$$

$$Q_i = Q_{ii} + Q_{ji} + Q_{ki}$$

donde:

$P_i$  es el precio del bien en el país  $i$ .

$Q_i$  es la cantidad total vendida en el país  $i$ .

$Q_{ii}$  es la cantidad que la industria del país  $i$  vende en el mismo país.

$Q_{ji}$  es la cantidad que la industria del país  $j$  vende en el país  $i$ .

$Q_{ki}$  es la cantidad que la industria del país  $k$  vende en el país  $i$ .

Se considerará en este modelo que las emisiones contaminantes (en adelante se denotarán como  $z$ ) son una función creciente de la cantidad producida:

$$z = f(q), \quad \text{con } \frac{dz}{dq} > 0$$

En particular, se supondrá que tales emisiones son una función lineal de la cantidad producida:  $z = q$ . En adelante, todas las cantidades se expresarán en términos de las emisiones que resulten del proceso de producción del bien comercializado en cada país. De esta manera, la demanda agregada del país  $i$  se puede expresar como:

$$P_i = 1 - Z_i, \quad i = 1, 2, 3$$

$$Z_i = Z_{ii} + Z_{ji} + Z_{ki}$$

donde:

$P_i$  es el precio del bien en el país  $i$ .

$Z_i$  son las emisiones generadas en el proceso de producción de la cantidad vendida en el país  $i$ .

$Z_{ii}$  son las emisiones generadas en el proceso de producción de la cantidad que la industria del país  $i$  vende en el mismo país.

$Z_{ji}$  son las emisiones generadas en el proceso de producción de la cantidad que la industria del país  $j$  vende en el país  $i$ .

$Z_{ki}$  son las emisiones generadas en el proceso de producción de la cantidad que la industria del país  $k$  vende en el país  $i$ .

<sup>1</sup> La condición de no negatividad de los aranceles se impone para evitar subsidios a las importaciones.

## 1.1. PLANTEAMIENTO DEL JUEGO

El análisis se efectúa mediante un juego en dos etapas: en la etapa 1 los países acuerdan formar coaliciones. Cuando en esta se forma una coalición, los países miembros determinan los aranceles que maximizan el bienestar social conjunto de la coalición.

En este modelo de tres países las coaliciones posibles son  $\{1, 2, 3, 12, 13, 23, 123\}$ . De esta manera, hay cinco posibles estructuras de coalición o estructuras de acuerdos internacionales ( $\{123\}$ ,  $\{12, 3\}$ ,  $\{1, 23\}$ ,  $\{2, 13\}$ ,  $\{123\}$ ), que deben ser consideradas. Por la simetría de los jugadores, las estructuras de coalición  $\{12, 3\}$ ,  $\{1, 23\}$  y  $\{2, 13\}$ , se analizarán de forma idéntica.

El pago para el país  $i$  es el bienestar social<sup>2</sup>  $W_i$  definido de la siguiente manera:

$$W_i = EC_i + \sum_{j=1}^n \pi_{ij} + \sum_{j=1}^n T_{ji} - D_i$$

donde:

$W_i$  es el bienestar social del país  $i$ .

$EC_i$  es el excedente de los consumidores del país  $i$ .

$\sum_{j=1}^n \pi_{ij}$  es el beneficio total de la empresa del país  $i$ .

$\sum_{j=1}^n T_{ji}$  son los ingresos por aranceles del país  $i$ .

$D_i$  es la función de daño ambiental<sup>3</sup> del país  $i$ , que depende de las emisiones totales generadas en el proceso de producción de los tres países. Se asumirá que la función de daño ambiental es creciente en el nivel de emisiones y tiene la forma  $D_i = d (Z_1 + Z_2 + Z_3)$ , donde  $d$  es una constante positiva que se asume igual para los tres países, debido al carácter global del daño ambiental generado por las emisiones.

En la etapa 2, una vez los acuerdos de comercio internacional han sido firmados, las empresas determinan la cantidad que deben producir (el nivel de emisiones), en un contexto de competencia a la Cournot<sup>4</sup>. En esta etapa se determinan los niveles de

2 El cálculo usual del bienestar social consiste en la suma de los excedentes de todos los agentes económicos involucrados. En este caso se suman los excedentes del consumidor ( $EC$ ), de las industrias ( $\pi$ ) y del gobierno ( $T$ ). Adicionalmente se incluye una función de daño ambiental ( $D$ ).

3 El daño ambiental podría modelarse utilizando varias formas funcionales diferentes a la lineal. Podría utilizarse, por ejemplo, una función cuadrática. La utilización de una función lineal no genera resultados cualitativamente diferentes a los encontrados utilizando otro tipo de función.

4 En el modelo de competencia "a la Cournot", las empresas compiten contra sus rivales en un mercado oligopolístico, eligiendo estratégicamente la cantidad que deben producir para maximizar sus beneficios.

emisión de equilibrio, los precios, los beneficios de las empresas y el excedente de los consumidores en cada país.

## 1.2. SOLUCIÓN DEL JUEGO

A continuación se presenta la solución del juego, utilizando el método usual de inducción hacia atrás.

### Etapa 2: Competencia “a la Cournot”

En esta etapa las industrias<sup>5</sup> de los tres países determinan las emisiones de equilibrio (cantidad producida) en un contexto de competencia “a la Cournot”. Se debe tener en cuenta que cuando el país  $i$  vende en el país  $j$ , el bien se vende al precio  $P_j$  y debido al pago del arancel, los ingresos de la industria  $i$  se verán disminuidos en una cantidad  $t_{ij}$  por unidad, lo que equivale a un incremento en el costo marginal de producción. En adelante se asumirá por simplicidad y sin pérdida de generalidad, que el costo marginal  $c = 0$  y también se asumirá  $i \neq j, j \neq k, i \neq k, e i, j, k = 1, 2, 3$ .

La industria del país  $i$  resuelve el siguiente problema:

$$\underset{Z_{ii}, Z_{ij}, Z_{ik}}{\text{Max}} \pi_i = \pi_{ii} + \pi_{ij} + \pi_{ik}$$

$$\pi_{ii} = P_i Z_{ii}$$

$$\pi_{ij} = (P_j - t_{ij}) Z_{ij}$$

$$\pi_{ik} = (P_k - t_{ik}) Z_{ik}$$

donde:

$\pi_i$  es el beneficio total de la industria  $i$ .

$\pi_{ii}, \pi_{ij}, \pi_{ik}$  son los beneficios obtenidos por la empresa  $i$  en los mercados  $i, j$  y  $k$ , respectivamente.

$Z_{ii}, Z_{ij}, Z_{ik}$  son las emisiones generadas en el proceso de producción de las cantidades que la empresa  $i$  vende en el país  $i$  (ventas domésticas), país  $j$  (exportaciones al país  $j$ ) y país  $k$  (exportaciones al país  $k$ ), respectivamente.

$P_i, P_j$  y  $P_k$  son los precios del bien en los países  $i, j$  y  $k$ , respectivamente, y  $P_i = 1 - Z_i$ ,  $P_j = 1 - Z_j$  y  $P_k = 1 - Z_k$ , son las demandas de los consumidores en los países  $i, j$  y  $k$ , respectivamente.

5 El modelo considera que cada país tiene una industria que está representada por una sola empresa, y cada una de estas empresas produce con igual tecnología (costo marginal igual y constante). En este sentido, los tres países considerados son simétricos.



$Z_i$ ,  $Z_j$ , y  $Z_k$  son las emisiones generadas en el proceso de producción de la cantidad vendida en los países  $i$ ,  $j$  y  $k$ , respectivamente.

$t_{ij}$  es el arancel que el país  $i$  tiene que pagar por unidad vendida en el país  $j$ .

De las condiciones de primer orden del problema de maximización de beneficios de las industrias, se obtienen las emisiones de equilibrio:

$$Z_{ii} = \frac{1+t_{ji}+t_{ki}}{4}$$

$$Z_{ij} = \frac{1-3t_{ij}+t_{kj}}{4}$$

Los beneficios totales obtenidos por la industria del país  $i$ , son:

$$\pi_i = \pi_{ii} + \pi_{ij} + \pi_{ik} = \left[ \frac{1+t_{ji}+t_{ki}}{4} \right]^2 + \left[ \frac{1-3t_{ij}+t_{kj}}{4} \right]^2 + \left[ \frac{1-3t_{ik}+t_{jk}}{4} \right]^2$$

En cada país el excedente de los consumidores es:

$$SC_i = \frac{1}{2} \left[ \frac{3-3t_{ji}-t_{ki}}{4} \right]^2$$

Los ingresos por aranceles en el país  $i$ , generados por las importaciones desde el país  $j$ , son:

$$T_{ji} = t_{ji} Z_{ji} = t_{ji} \left[ \frac{1-3t_{ij}+t_{kj}}{4} \right]$$

La función de daño ambiental del país  $i$  está dada por:

$$D_i = \frac{d}{4} \left[ 9 - t_{ji} - t_{ki} - t_{ij} - t_{ik} - t_{jk} - t_{kj} \right]$$

El bienestar social del país  $i$  está dado por:

$$W_i = SC_i + \pi_{ii} + \pi_{ij} + \pi_{ik} + T_{ji} + T_{ki} - D_i$$

Es decir:

$$W_i = \frac{1}{2} \left[ \frac{3-3t_{ji}-t_{ki}}{4} \right]^2 + \left[ \frac{1+t_{ji}+t_{ki}}{4} \right]^2 + \left[ \frac{1-3t_{ij}+t_{kj}}{4} \right]^2 + \left[ \frac{1-3t_{ik}+t_{jk}}{4} \right]^2$$

$$+ t_{ji} \left[ \frac{1-3t_{ij}+t_{kj}}{4} \right] + t_{ki} \left[ \frac{1-3t_{ik}+t_{jk}}{4} \right] - \frac{d}{4} \left[ 9 - t_{ji} - t_{ki} - t_{ij} - t_{ik} - t_{jk} - t_{kj} \right]$$

## Etapa 1: Formación de Acuerdos Comerciales

En esta etapa se determinan los aranceles óptimos<sup>6</sup> para cada estructura de coalición, maximizando el bienestar social conjunto de los países que hacen parte de un acuerdo.

### *Estructura de coalición {i, j, k}*

En esta estructura de coalición, en la que no se forma ningún acuerdo comercial, el país  $i$  resuelve el problema:

$$\text{Max}_{t_{ji}, t_{ki}} W_i$$

De las condiciones de primer orden se obtienen los aranceles de equilibrio:

$$t_{21} = t_{31} = t_{12} = t_{32} = t_{13} = t_{23} = \frac{3}{10} + \frac{2}{5}d$$

Cuando los países no desean firmar un acuerdo comercial, el arancel de equilibrio impuesto por cada uno de ellos es mayor, cuanto más grande sea el daño ambiental.

Las emisiones de equilibrio son:

$$z_{11} = z_{22} = z_{33} = \frac{2}{5} + \frac{1}{5}d$$

$$z_{12} = z_{13} = z_{21} = z_{23} = z_{31} = z_{32} = \frac{1}{10} - \frac{1}{5}d$$

La restricción de no negatividad de las cantidades producidas, es decir, de las emisiones contaminantes, solo se cumple para el intervalo  $0 \leq d \leq 0,5$ .

El bienestar social de equilibrio en el país  $i$ , es:

$$W_i = \frac{29}{50}d^2 - \frac{47}{25}d + \frac{21}{50}$$

### *Estructuras de coalición {ij, k}, {i, jk}, {j, ik}*

Por razones de simetría, las estructuras de coalición en las que se firman acuerdos comerciales entre dos países se analizan de forma idéntica. De esta manera, solo es necesario resolver el problema para una de ellas.

Por ejemplo, en la estructura  $\{ij, k\}$ , los países  $i$  y  $j$  resuelven el problema:

$$\text{Max}_{t_{ji}, t_{ki}, t_{ij}, t_{kj}} W_i + W_j$$

<sup>6</sup> En este modelo los impuestos sobre las importaciones (aranceles) se determinan de manera endógena.

El país  $k$  resuelve el problema<sup>7</sup>:

$$\text{Max } W_k$$

$$t_{jk}, t_{ik}$$

De las condiciones de primer orden se obtienen los aranceles de equilibrio:

$$t_{21} = 0$$

$$t_{12} = 0$$

$$t_{31} = \frac{8}{19}d + \frac{5}{19}$$

$$t_{32} = \frac{8}{19}d + \frac{5}{19}$$

$$t_{13} = \frac{2}{5}d + \frac{3}{10}$$

$$t_{23} = \frac{2}{5}d + \frac{3}{10}$$

Las emisiones de equilibrio son:

$$z_{11} = \frac{2}{19}d + \frac{6}{19}$$

$$z_{21} = \frac{2}{19}d + \frac{6}{19}$$

$$z_{31} = \frac{1}{19} - \frac{6}{19}d$$

$$z_{12} = \frac{2}{19}d + \frac{6}{19}$$

$$z_{22} = \frac{2}{19}d + \frac{6}{19}$$

$$z_{32} = \frac{1}{19} - \frac{6}{19}d$$

$$z_{13} = \frac{1}{10} - \frac{1}{5}d$$

$$z_{23} = \frac{1}{10} - \frac{1}{5}d$$

$$z_{33} = \frac{1}{5}d + \frac{2}{5}$$

La restricción de no negatividad de las cantidades producidas<sup>8</sup>, es decir, de las emisiones contaminantes, solo se cumple para el intervalo  $0 \leq d \leq \frac{1}{12}$ .

7 La solución implica resolver un problema de optimización con restricciones de desigualdad, que debe satisfacer las condiciones de Kuhn-Tucker.

8 Esta restricción se impone para resolver el modelo cuando las tres industrias están activas en el mercado.

El bienestar social de equilibrio de cada país, es:

$$W_1 = \frac{164}{475} d^2 - \frac{954}{475} d + \frac{869}{1900}$$

$$W_2 = \frac{164}{475} d^2 - \frac{954}{475} d + \frac{869}{1900}$$

$$W_3 = \frac{1841}{3610} d^2 - \frac{3673}{1805} d + \frac{732}{1805}$$

### ***Estructura de coalición {ijk}***

En esta estructura de coalición en la que se forma un gran bloque comercial, los tres países resuelven el problema:

$$\text{Max}_{t_{ji}, t_{ki}, t_{ij}, t_{kj}, t_{jk}, t_{ik}} W_i + W_j + W_k$$

De las condiciones de primer orden se obtienen los aranceles de equilibrio:

$$t_{21} = t_{31} = t_{12} = t_{32} = t_{13} = t_{23} = 0$$

Las emisiones de equilibrio son:

$$z_{11} = z_{22} = z_{33} = z_{21} = z_{31} = z_{12} = z_{32} = z_{13} = z_{23} = \frac{1}{4}$$

La restricción de no negatividad de las cantidades producidas, es decir, de las emisiones contaminantes, solo se cumple para el intervalo  $0 \leq d \leq \frac{1}{12}$ .

El bienestar social de equilibrio en el país  $i$ , es:

$$w_i = \frac{15}{32} - \frac{9}{4} d$$

A manera de ilustración, en las tablas N° 1, 2 y 3 (Anexo 1) se presentan los aranceles, los niveles de emisiones y el bienestar social de equilibrio para cada estructura de coalición considerada, para valores del parámetro de daño ambiental  $d = 0$ ,  $d = 0,03$  y  $d = 0,07$ , respectivamente.

Los datos de las mencionadas tablas indican que en todos los casos en los que un grupo de países firma un acuerdo comercial, se eliminan los aranceles entre ellos (se forma un área de libre comercio). Sin embargo, los países miembros de un acuerdo imponen un arancel positivo a los países que no hacen parte de él y este es menor al arancel que los países que no pertenecen al acuerdo imponen a los países que sí pertenecen. Los niveles de emisiones totales disminuyen a medida que crece el parámetro de daño

ambiental  $d$  en todas las estructuras de coalición, excepto en aquella que implica un acuerdo entre todos los países, para la cual dichos niveles se mantienen constantes<sup>9</sup>.

## 2. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

La teoría de juegos ha hecho importantes aportes metodológicos para el análisis de estabilidad de coaliciones. El concepto de estabilidad más conocido es el Equilibrio de Nash (NE)<sup>10</sup>, que analiza los incentivos que tiene un jugador para desviarse o permanecer en determinada estrategia, dadas las tácticas de sus rivales. Aunque este es un concepto fundamental en el análisis económico moderno, únicamente permite analizar desviaciones de un solo jugador, no de grupos de jugadores. Posteriormente han ido surgiendo conceptos como el Equilibrio de Nash a Prueba de Coaliciones (CPNE)<sup>11</sup> o el Equilibrio Fuerte de Nash<sup>12</sup> (SNE), que permiten analizar desviaciones de grupo desde la óptica de la Teoría de Juegos No Cooperativos. También es posible hacer análisis de estabilidad de coaliciones utilizando conceptos de la Teoría de Juegos Cooperativos tales como el Núcleo, el Nucleolo o el Valor de Shapley, entre otros. La dificultad en el uso de estos últimos radica en que, dependiendo del concepto que se utilice, el conjunto de soluciones puede ser vacío, puede haber una sola solución o infinitas soluciones. Adicionalmente, parece más apropiado llevar a cabo el análisis de estabilidad de acuerdos comerciales internacionales utilizando herramientas de la Teoría de Juegos No Cooperativos, debido a que la mayoría de los modelos que se plantean para el análisis de tales acuerdos no se ajustan completamente<sup>13</sup> a las condiciones exigidas para la aplicación de conceptos de solución propuestos por la Teoría de Juegos Cooperativos.

Es importante aclarar que todos los valores hallados en la sección 2.1., como resultado de la solución de las dos etapas del juego planteado, constituyen Equilibrios de Nash, y por tanto son robustos a desviaciones de un solo jugador. En esta sección se analizará la estabilidad de los posibles acuerdos comerciales frente a desviaciones de grupo con base en los conceptos de CPNE y SNE.

9 Si se considerara una función cuadrática para modelar el daño ambiental, posiblemente se obtendría en esta estructura de coalición una disminución de las emisiones a medida que crece el parámetro  $d$ . Sin embargo, este resultado no afecta los resultados generales sobre estabilidad que se obtienen en la siguiente sección.

10 Un conjunto de estrategias (una para cada jugador) constituye un Equilibrio de Nash (NE) si: “cuando un jugador cambia de estrategia, dado que los demás jugadores permanecen en sus estrategias de equilibrio, el jugador que se desvía no se beneficia de la desviación”.

11 Este concepto de estabilidad fue propuesto por Bernheim, Peleg y Whinston (1987).

12 El Equilibrio Fuerte de Nash (SNE) es un concepto de estabilidad propuesto por Robert Aumann (1959).

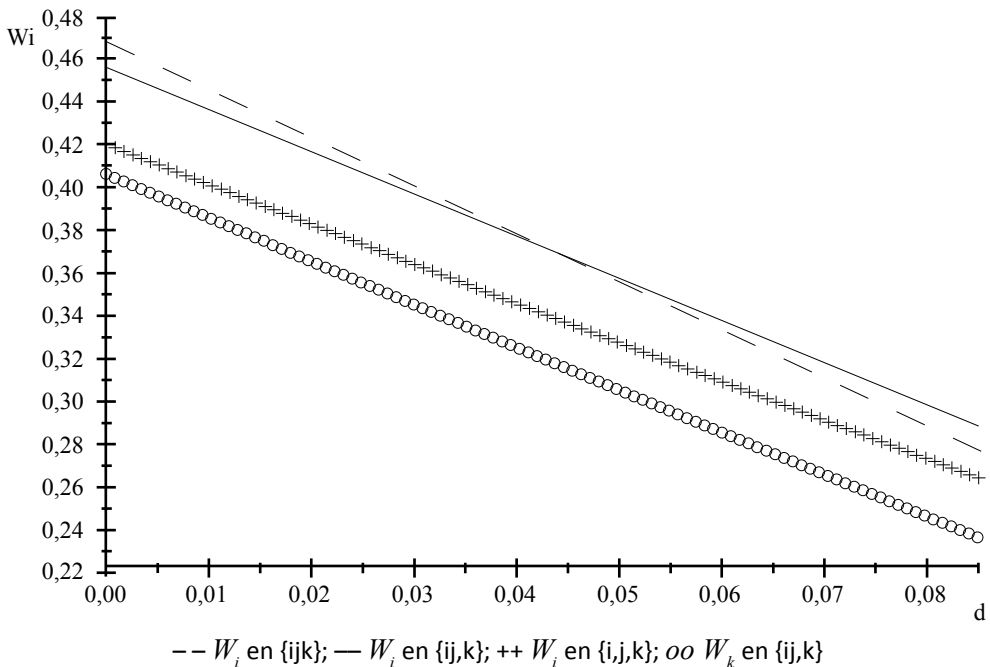
13 Las soluciones propuestas por la Teoría de Juegos Cooperativos exigen que cuando se forman coaliciones no se afectan los pagos de los jugadores que actúan de forma autónoma. Esta condición generalmente no se cumple en modelos que analizan acuerdos comerciales internacionales.

La noción de Equilibrio Fuerte de Nash (SNE) permite caracterizar acuerdos coalicionales estables. Desde este punto de vista, para que una estructura de coalición sea estable, solo se requiere que no exista ninguna desviación que pueda beneficiar a todos sus miembros. A diferencia del anterior, el concepto de Equilibrio de Nash a prueba de Coaliciones (CPNE) permite establecer si hay acuerdos autosostenibles cuando los jugadores pueden comunicarse previamente de forma no vinculante, y evalúa la estabilidad de una desviación con el mismo criterio que se utiliza para valorar la estabilidad de la estructura de coalición original. De esta forma, una estructura de coalición determinada es CPNE si no existe una desviación que sea CPNE. Esta noción de estabilidad es más robusta a desviaciones de grupo que el SNE.

Para entender el análisis de estabilidad en este modelo de tres países, en la Gráfica N° 1 se presentan, para cada estructura de coalición, los niveles de bienestar social de equilibrio de cada país, correspondientes a las ecuaciones halladas en la sección 2.1. Tales niveles de bienestar social se evalúan en el intervalo más restrictivo del parámetro de la función de daño ambiental  $d$  ( $0 \leq d \leq \frac{1}{12}$ ), para el cual se garantiza que las industrias de los tres países están activas en el mercado, independientemente de la estructura de coalición que tales países pudieran acordar.

### GRÁFICA N° 1

#### Bienestar Social en cada Estructura de Coalición



Fuente: elaboración propia con base en los resultados del modelo.

Se observa que a medida que el parámetro de daño ambiental  $d$  crece, el bienestar social de equilibrio en todos los países decrece, en todas las estructuras de coalición consideradas. Se observa también que los niveles de bienestar social, de menor a mayor, en el rango del parámetro de daño ambiental ( $0 \leq d \leq 0,043$ ) son: el del país que actúa solo cuando los otros dos países firman un acuerdo, el de cada país cuando no se firma ningún acuerdo, el del país que solo firma un acuerdo con otro país y el de cada país que participa de un acuerdo global, respectivamente. Sin embargo, en el rango del parámetro de daño ambiental ( $0.043 \leq d \leq \frac{1}{12}$ ) los niveles de bienestar social, en orden creciente, son: el del país que actúa solo cuando los otros dos países firman un acuerdo, el de cada país cuando no se firma ningún acuerdo, el de cada país que participa en un acuerdo global y el de cada uno de los países que firma un acuerdo solamente con otro país, respectivamente.

Con base en lo anterior, es conveniente llevar a cabo el análisis de estabilidad considerando dos diferentes escenarios: uno de “daño ambiental bajo” (cuando el parámetro  $d$  está en el intervalo  $0 \leq d \leq 0,044$ ), y otro de “daño ambiental alto” (cuando el parámetro  $d$  está en el intervalo  $0.044 \leq d \leq \frac{1}{12}$ ). El primer escenario podría interpretarse como uno en el que los países hacen negociaciones para firmar acuerdos comerciales en los cuales el daño ambiental no es relevante. Por el contrario, en el segundo escenario el daño ambiental tiene un papel importante en la negociación de un acuerdo comercial.

A continuación se presenta el análisis de estabilidad para cada uno de los escenarios mencionados utilizando las nociones de Equilibrio de Nash a Prueba de Coaliciones (CPNE) y Equilibrio Fuerte de Nash (SNE), con base en los niveles de bienestar de equilibrio de cada país en cada estructura de coalición, presentados en la Gráfica N° 1.

## 2.1. ESCENARIO DE DAÑO AMBIENTAL BAJO

### 2.1.1. ESTABILIDAD SEGÚN EL CONCEPTO DE EQUILIBRIO DE NASH A PRUEBA DE COALICIONES (CPNE)

#### *Estructura de coalición $\{i, j, k\}$*

Esta estructura de coalición no es CPNE frente a la desviación de cualquier grupo de dos países, dado que esta última es estable frente a desviaciones de alguno de los dos países que la componen. La estructura considerada tampoco es CPNE frente a la desviación de los tres países para formar un acuerdo global, dado que esta última es estable frente a cualquier desviación de los países que la componen. En conclusión, la estructura  $\{i, j, k\}$  no es CPNE.

### ***Estructura de coalición $\{ij, k\}$***

Esta estructura de coalición no es CPNE frente a la desviación de cualquiera de los dos países que han firmado un acuerdo, dado que esta última no beneficia a ninguno de sus miembros. Tampoco es CPNE frente a la desviación de los tres países para formar un acuerdo global, dado que esta última beneficia a todos sus miembros y es CPNE. En conclusión, la estructura  $\{ij, k\}$  no es CPNE.

### ***Estructura de coalición $\{ijk\}$***

Esta estructura de coalición es CPNE frente a la desviación de cualquier par de países, dado que esta última no es beneficiosa para ninguno de los países que se desvía. También es CPNE frente a la desviación de los tres países para actuar de forma autónoma, dado que en esta última ninguno de ellos se beneficia de la desviación. En conclusión, la estructura  $\{ijk\}$  sí es CPNE.

En resumen, en un escenario de daño ambiental bajo, solamente un acuerdo comercial que involucre a los tres países es estable frente a posibles desviaciones de cualquier tipo de coalición, de acuerdo con el concepto de CPNE.

## **2.1.2. ESTABILIDAD SEGÚN EL CONCEPTO DE EQUILIBRIO FUERTE DE NASH (SNE)**

### ***Estructura de coalición $\{i, j, k\}$***

Esta estructura de coalición no es SNE frente a la desviación de cualquier par de países, dado que esta última es más beneficiosa para los países que se desvían. Tampoco es SNE frente a la desviación de los tres países para formar un acuerdo global, debido a que esta última es más beneficiosa para los países que se desvían. En conclusión, la estructura  $\{i, j, k\}$  no es SNE.

### ***Estructura de coalición $\{ij, k\}$***

Esta estructura de coalición es SNE frente a la desviación de cualquiera de los dos países que han firmado un acuerdo, dado que el pago en esta última es inferior para el jugador que se desvía. Sin embargo, no es SNE frente a la desviación de los tres países para formar un acuerdo global, dado que en esta última cada jugador ganaría más. En conclusión, la estructura  $\{ij, k\}$  no es SNE.

### ***Estructura de coalición $\{ijk\}$***

Esta estructura de coalición es SNE frente a la desviación de cualquier par de países, dado que el pago en esta última es inferior para los jugadores que se desvían. También es SNE frente a la desviación de los tres países en la que cada uno actuaría



autónomamente, dado que en esta última cada jugador ganaría menos. En conclusión, la estructura  $\{ijk\}$  sí es SNE.

## 2.2. ESCENARIO DE DAÑO AMBIENTAL ALTO

### 2.2.1. ESTABILIDAD SEGÚN EL CONCEPTO DE EQUILIBRIO DE NASH A PRUEBA DE COALICIONES (CPNE)

#### *Estructura de coalición $\{i, j, k\}$*

Esta estructura de coalición es CPNE frente a la desviación de los tres países para formar un acuerdo global, dado que esta última no es estable frente a desviaciones (que son CPNE) de cualquier grupo de dos países. Sin embargo, la estructura en consideración no es CPNE frente a desviaciones de cualquier grupo de dos países, dado que estas últimas sí son CPNE. En conclusión, la estructura  $\{i, j, k\}$  no es CPNE.

#### *Estructura de coalición $\{ij, k\}$*

Esta estructura de coalición es CPNE frente a la desviación de cualquiera de los dos países que han firmado un acuerdo, dado que esta última no es beneficiosa para el país que se desvía. También es CPNE frente a la desviación de los tres países para formar un acuerdo global, dado que esta última no es beneficiosa para los países que formaban el acuerdo original. En conclusión, la estructura  $\{ij, k\}$  sí es CPNE.

#### *Estructura de coalición $\{ijk\}$*

Esta estructura de coalición no es CPNE frente a la desviación de cualquier grupo de dos países, dado que esta última beneficia a los países que se desvían y es CPNE. Sin embargo, sí es CPNE frente a la desviación de los tres países para actuar autónomamente, dado que ninguno de ellos se beneficia de la desviación. En conclusión, la estructura  $\{ijk\}$  no es CPNE.

En resumen, en el escenario de daño ambiental alto solamente un acuerdo comercial entre dos países es estable frente a posibles desviaciones de cualquier tipo de coalición, de acuerdo con el concepto de CPNE.

### 2.2.2. ESTABILIDAD SEGÚN EL CONCEPTO DE EQUILIBRIO FUERTE DE NASH (SNE)

#### *Estructura de coalición $\{i, j, k\}$*

Esta estructura de coalición no es SNE frente a la desviación de cualquier par de países, dado que esta última es más beneficiosa para los países que se desvían. Tampoco es

SNE frente a la desviación de los tres países para formar un acuerdo global, debido a que esta última es más beneficiosa para los países que se desvían. En conclusión, la estructura  $\{i, j, k\}$  no es SNE.

### ***Estructura de coalición $\{ij, k\}$***

Esta estructura de coalición es SNE frente a la desviación de cualquiera de los dos países que han firmado un acuerdo, dado que el pago en esta última es inferior para el jugador que se desvía. También es SNE frente a la desviación de los tres países para formar un acuerdo global, dado que en esta última cada jugador ganaría menos. En conclusión, la estructura  $\{ij, k\}$  sí es SNE.

### ***Estructura de coalición $\{ijk\}$***

Esta estructura de coalición no es SNE frente a la desviación de cualquier par de países, dado que el pago en esta última es superior para los jugadores que se desvían. Sin embargo, sí es SNE frente a la desviación de los tres países en la que cada uno actuaría autónomamente, dado que en esta última cada jugador ganaría menos. En conclusión, la estructura  $\{ijk\}$  no es SNE.

Como resultado del análisis de estabilidad utilizando los conceptos de Equilibrio de Nash a Prueba de Coaliciones (CPNE) y Equilibrio Fuerte de Nash (SNE), cuando se considera un escenario de daño ambiental bajo, únicamente es estable un acuerdo comercial que involucre a todos los países. Sin embargo, cuando se considera un escenario de daño ambiental alto, solo es estable un acuerdo comercial entre dos países. El resultado de estabilidad es el mismo cuando se utiliza cualquiera de los dos conceptos mencionados.

## **CONCLUSIONES**

El análisis del modelo presentado sugiere que cuando en la negociación de un acuerdo comercial los países consideran que el daño ambiental es bajo o nulo, el único acuerdo estable es aquel que involucra a todos los países. Sin embargo, cuando en tales negociaciones se considera relevante el daño ambiental, sólo es estable un acuerdo firmado entre dos países. Estos resultados difieren parcialmente de aquellos encontrados en los trabajos anteriores de autores como Carraro y Siniscalco (1993) y Breton, Fredj y Zaccour (2006), según los cuales no es posible firmar un acuerdo estable sobre reducción de emisiones que involucre a todos los países.

Los resultados de este trabajo pueden ser utilizados como un elemento adicional para el análisis de la negociación de acuerdos comerciales que involucran daño ambiental.

El análisis presentado constituye la primera etapa de una línea de investigación mucho más amplia sobre el tema. Por esta razón, sería interesante avanzar en el estudio de la estabilidad de estos acuerdos considerando países asimétricos en tecnología (diferentes costos de producción), en tamaño de mercado o en tamaño de la industria, entre otros. Igualmente valdría la pena efectuar el análisis de estabilidad en contextos diferentes al de competencia “a la Cournot”, tales como competencia “a la Bertrand” (las empresas compiten estratégicamente eligiendo precios) o competencia “a la Stackelberg” (una empresa “líder” y otra “seguidora” compiten estratégicamente eligiendo cantidades), con el fin de determinar si los resultados encontrados son sensibles a los cambios mencionados.

## BIBLIOGRAFÍA

- C, Carraro, & D, Siniscalco, *Strategies for the International Protection of the Environment*, 52 *Journal of Public Economics*, 309-328. (1993).
- F, Bloch, *Endogeneous Structures of Association in Oligopolies*, 26 *Rand Journal of Economics*, No. 3, 537-556. (1995).
- H, Tulkens, *Cooperation vs. Free-riding in International Environmental Affairs: Two Approaches*, In Cheltenham, Edward Elgar, *Game Theory and the Environment*, (N. Haley and H. Folmer (eds), 30-44, 1998).
- I, Horstman, & J, Markusen, *Endogeneous Market Structures in International Trade*, 32 *Journal of International Economics*, 109-139. (1992).
- I, Macho Stadler, D, Pérez-Castrillo, & C, Ponsati, *Stable Multilateral Trade Agreements*, Vol. 65, 161-17. (Economic Letters, 1994).
- J, Filar, & P. S, Gaertner, *A Regional Allocation of World CO2 Emission Reductions*, Vol. 43, 269-275 (Mathematics and Computers in Simulation, , 1997).
- L, Petrosjan, & G, Zaccour, *Time-Consistent Shapley Value of Pollution Cost Reduction*, 27 *Journal of Economic Dynamics and Control*, 381-398. (2003).
- M, Breton, K, Fredj, & G, Zaccour, *Characteristic Functions, Coalitions Stability and Free-riding in a Game of Pollution Control*, Vol 1, 129-138. (The 10th International Symposium on Dynamic Games and Applications, St Petersburg, Russia, St Petersburg State University, 2002).
- M, Breton, K, Fredj, & G, Zaccour, *International Cooperation, Coalitions Stability and Free Riding in a Game of Pollution Control*, Vol 74, 103-122. (The Manchester School, 2006).
- M, Finus, & B, Rundshagen, *Toward a Positive Theory of Coalition Formation and Endogenous Instrumental Choice in Global Pollution Control*, Vol. 96, 145-186. (Public Choice, 1998).

- P, Bernheim, & Whinston, *Coalition Proof Nash Equilibrium I. Concepts*, 42 *Journal of Economic Theory*, 1-12, (1987).
- P, Chander, & H, Tulkens, *A Core-Theoretic Solution for the Design of Cooperative Agreements on Transfrontier Pollution*, 2 *International Tax and Public Finance*, 279-293. (1995).
- P, Chander., & H, Tulkens., *The Core of an Economy with Multilateral Environmental Externalities*, 26 *International Journal of Game Theory*, 279-401. (1997).
- P, Chander, & H, Tulkens, *Theoretical Foundation of Negotiations and Cost Sharing in Transfrontier Pollution Problems*, 36 *European Economic Review*, 388-398. (1992).
- R, Aumann, *Acceptable Points in General Cooperative n-person Games*. (Contributions to the Theory of Games IV, Princeton University Press, Princeton N.J, 1959)
- S, Barrett, *International Environmental Agreement as Games*, In, *Conflict and Cooperation in Managing Environmental Resources*, 11-36. (R. Pethig (ed), Berlin, Springer, 1992).
- S, Barrett, *Self-enforcing International Environment Agreements*, Vol. 46, 878-894. (Oxford Economic Papers, 1994).
- S, Barrett, *The Problem of Global Environmental Protection*, Vol. 6, No. 1, 68-79. (Oxford Review of Economic Policy, 1990).
- S, Hart, & M, Kurz., *Endogeneous Formation of Coalitions*, 51 *Econometrica*, 1047-1064. (1983).

## ANEXO N° 1

TABLA N° 1

**Aranceles, Emisiones y Bienestar Social  
de Equilibrio,  $d = 0$**

Estructura de coalición	$t_{21}$	$t_{31}$	$t_{12}$	$t_{32}$	$t_{13}$	$t_{23}$	$\Sigma Z_i$	$W_1$	$W_2$	$W_3$
{1, 2, 3}	0,3000	0,3000	0,3000	0,3000	0,3000	0,3000	1,800	0,4200	0,4200	0,4200
{1, 23}	0,3000	0,3000	0,2632	0,0000	0,2632	0,0000	1,968	0,4055	0,4574	0,4574
{12, 3}	0,0000	0,2632	0,0000	0,2632	0,3000	0,3000	1,968	0,4574	0,4574	0,4055
{2, 13}	0,2632	0,0000	0,3000	0,3000	0,0000	0,2632	1,968	0,4574	0,4055	0,4574
{123}	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2,250	0,4688	0,4688	0,4688

Fuente: elaboración propia con base en los resultados del modelo.

TABLA N° 2

**Aranceles, Emisiones y Bienestar Social  
de Equilibrio,  $d = 0,03$**

Estructura de coalición	$t_{21}$	$t_{31}$	$t_{12}$	$t_{32}$	$t_{13}$	$t_{23}$	$\Sigma Z_i$	$W_1$	$W_2$	$W_3$
{1, 2, 3}	0,3120	0,3120	0,3120	0,3120	0,3120	0,3120	1,782	0,3640	0,3640	0,3640
{1, 23}	0,3120	0,3120	0,2760	0,0000	0,2760	0,0000	1,956	0,3450	0,3974	0,3974
{12, 3}	0,0000	0,2760	0,0000	0,2760	0,3120	0,3120	1,956	0,3974	0,3974	0,3450
{2, 13}	0,2760	0,0000	0,3120	0,3120	0,0000	0,2760	1,956	0,3974	0,3450	0,3974
{123}	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2,250	0,4012	0,4012	0,4012

Fuente: elaboración propia con base en los resultados del modelo.

TABLA N° 3

**Aranceles, Emisiones y Bienestar Social  
de Equilibrio,  $d = 0,07$**

Estructura de coalición	$t_{21}$	$t_{31}$	$t_{12}$	$t_{32}$	$t_{13}$	$t_{23}$	$\Sigma Z_i$	$W_1$	$W_2$	$W_3$
{1, 2, 3}	0,3280	0,3280	0,3280	0,3280	0,3280	0,3280	1,758	0,2912	0,2912	0,2912
{1, 23}	0,3280	0,3280	0,2920	0,0000	0,2920	0,0000	1,938	0,2656	0,3184	0,3184
{12, 3}	0,0000	0,2920	0,0000	0,2920	0,3280	0,3280	1,938	0,3184	0,3184	0,2656
{2, 13}	0,2920	0,0000	0,3280	0,3280	0,0000	0,2920	1,938	0,3184	0,2656	0,3184
{123}	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2,250	0,3110	0,3110	0,3110

Fuente: elaboración propia con base en los resultados del modelo.

