



Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales
Universidad de León

Grado en Economía
Curso 2022/2023

**TEORÍA DE JUEGOS,
BIENES PÚBLICOS GLOBALES Y EL PROTOCOLO DE KYOTO**

**(GAME THEORY,
GLOBAL PUBLIC GOODS AND THE KYOTO PROTOCOL)**

Realizado por David Vidal Bouza
Tutelado por los profesores D. Julio Abad González y Dña. Ana Pardo Fanjul

León, 11 de julio de 2023

MODALIDAD DE DEFENSA PÚBLICA: Tribunal

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	2
2. METODOLOGÍA.....	4
3. TEORÍA DE JUEGOS.....	5
3.1 Introducción de la Teoría de Juegos	5
3.2 Componentes y terminología de un juego	6
3.3 Juegos cooperativos	9
3.4 Juegos no cooperativos	14
3.5 Juegos estáticos con información completa.....	15
3.5.1 Soluciones de un juego mediante argumentos de dominación.....	16
3.5.2 Soluciones de un juego mediante argumentos de equilibrio	18
3.5.3 Estrategias mixtas.....	19
3.5.4 La optimalidad de Pareto	20
3.5.5 Juegos bipersonales de suma cero.....	23
3.5.6 Estrategias maximin y minimax	24
3.6 Juegos dinámicos con información completa	26
3.6.1 Juegos dinámicos con información completa y perfecta.....	26
3.6.2 Juegos dinámicos con información completa e imperfecta.....	29
3.7 Juegos estáticos con información incompleta.....	31
3.8 Juegos dinámicos con información incompleta.....	35
3.9 Juegos repetidos.....	39
4. TEORÍA ECONÓMICA DEL MEDIO AMBIENTE	44
4.1 Introducción a la teoría económica del medio ambiente	44
4.2 Teoría de los bienes públicos.....	44
4.3 La provisión eficiente de los bienes públicos puros	46
4.3.1 Bienes públicos generales	46
4.3.2 Bienes públicos globales	52
4.4 Externalidades.....	54
4.5 Tragedia de los comunes (sin supervisión).....	56

5. APLICACIÓN EMPÍRICA: EL PROTOCOLO DE KYOTO.....	59
5.1 Modelo de emisiones globales.....	60
5.2 Juegos de colaboración por etapas.....	64
5.3 Juegos repetidos.....	65
5.4 Resultados de Kyoto: valoración del éxito del acuerdo y grado de cumplimiento	71
6. CONCLUSIONES	75
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
8. ANEXOS	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Juego representado de forma normal.....	8
Tabla 3.2 Tabla de excesos de juego cooperativo (a).....	13
Tabla 3.3 Tabla de excesos de juego cooperativo (b).....	14
Tabla 3.4 Juego representado de forma normal con un solo jugador con estrategia dominante	17
Tabla 3.5 Juego representado de forma normal con ningún jugador con estrategia dominante	17
Tabla 3.6 Juego del dilema del prisionero	19
Tabla 3.7 Juego de las monedas	20
Tabla 3.8 Juego de la batalla de gustos	21
Tabla 3.9 Juego de la inversión	24
Tabla 3.10 Juego con estrategias maximin y minimax.....	25
Tabla 3.11 Representación normal del juego de la disuasión.....	27
Tabla 3.12 Juego de la disuasión con información completa e imperfecta	29
Tabla 3.13 Dilema del prisionero con información incompleta y Equilibrio Bayesiano de Nash en representación estratégica	35
Tabla 3.14 Representación normal de juego repetido	40
Tabla 3.15 Representación normal de la primera etapa del dilema del prisionero como juego repetido	41
Tabla 3.16 Juego repetido con dos EN	42
Tabla 5.1 Tasas de variación de gases de efecto invernadero de algunos países	72
Tabla A.1 Volumen de emisiones de gases de efecto invernadero medidas en kilotoneladas equivalentes de CO ₂ de algunos países	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Juego representado de forma extensiva.....	8
Figura 3.2 Conjunto de imputaciones de juego cooperativo	11
Figura 3.3 Conjunto de imputaciones de juego cooperativo con restricciones	12
Figura 3.4 Representación extensiva del juego de la disuasión	27
Figura 3.5 Representación extensiva de juegos reducidos a partir de dos EN en el juego de la disuasión	30
Figura 3.6 Representación extensiva del juego de la disuasión aplicando el método de inducción hacia atrás generalizado	31
Figura 3.7 Dilema del prisionero con información incompleta.....	32
Figura 3.8 Dilema del prisionero tras sustituir un nodo de decisión por azar	32
Figura 3.9 Dilema del prisionero con información incompleto y Equilibrio bayesiano de Nash en representación extensiva	34
Figura 3.10 Juego dinámico con información incompleta	36
Figura 3.11 Juego de señales de la querella.....	38
Figura 3.12 Representación extensiva de juego repetido	41
Figura 4.1 Curva de posibilidades de producción entre bienes públicos y bienes privados.....	48
Figura 4.2 Curvas de utilidad y restricciones presupuestarias de un consumidor individual	50
Figura 4.3 Agregación vertical de curvas de demanda individuales	51

RESUMEN

El presente trabajo aborda el estudio de los acuerdos internacionales en materia de bienes públicos globales, concretamente el Protocolo de Kyoto. Para ello, se emplea la Teoría de Juegos en consonancia con la teoría económica sobre bienes públicos y externalidades. Dentro del aparato teórico se da especial importancia y atención a los juegos no-cooperativos con repetición, los bienes públicos globales y la figura del free-rider.

Por tanto, el trabajo se estructura en tres partes: la primera aborda el marco teórico de la Teoría de Juegos; la segunda parte está dedicada a la teoría de los bienes públicos; y en la tercera parte se realiza una aplicación empírica de las dos teorías anteriores al caso concreto: el Protocolo de Kyoto.

Palabras clave: Teoría de Juegos, juegos no-cooperativos con repetición, bienes públicos globales, free-riders, Protocolo de Kyoto.

ABSTRACT

This paper deals with the study of international agreements on global public goods, specifically the Kyoto Protocol. For this purpose, the Game Theory is used in line with the economic theory about public goods and externalities. Within the theoretical framework, non-cooperative games with repetition, global public goods and the figure of the free-rider receive especial attention.

Therefore, this paper is structured in three main parts: the first addresses the theoretical framework of Game Theory; the second part comprises the theory of public goods; and the third part focuses on the empirical application of the previous parts on a specific international agreement: the Kyoto Protocol.

Keywords: Game Theory, non-cooperative games with repetition, global public goods, Free-riders, Kyoto Protocol.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Este trabajo de fin de grado tiene por objeto el estudio de la colaboración internacional en materia de bienes públicos globales, haciendo uso para ello de las herramientas que proporciona la Teoría de Juegos.

La conexión con las asignaturas estudiadas en el grado es clara: el interés por la materia nace durante el segundo año de la carrera, con la asignatura de Sector Público Español. En dicha asignatura se trató, entre otros temas, la teoría de los fallos del mercado, dentro de los cuales se encuentran las externalidades y los bienes públicos (incluidos los bienes públicos globales). Este es un tema de actualidad y gran relevancia, puesto que el futuro de nuestra especie depende de cómo se aborden estos retos, especialmente desde un punto de vista económico. El problema reside en la ausencia de un sector público global que pueda intentar corregir el fallo del mercado que es la provisión insuficiente de bienes públicos globales. Esto causa que sea un tema de gran interés, puesto que se puede relacionar con los juegos no-cooperativos de Teoría de Juegos, ya que la resolución del problema depende de la colaboración internacional de forma voluntaria.

Respecto a la Teoría de Juegos, que es la otra inspiración principal para hacer el trabajo, es un tema que se incluye en el temario durante el tercer año de carrera en la asignatura Microeconomía III. Se constituye como una herramienta novedosa en la carrera que no se asemeja a otros instrumentos utilizados y que puede tener una gran utilidad para explicar fenómenos empíricos comunes. La Teoría de Juegos no solo se puede aplicar al ámbito más estricto de la economía, sino que, teniendo en cuenta el origen de la herramienta, se puede llegar a intuir su aplicación en el ámbito militar, pero también en el social, en el político y desde luego en el ámbito ambiental y climático. Estamos ante una herramienta de gran poder analítico que tiene mucho que ofrecer para la resolución de ciertos problemas que la teoría más ortodoxa no ha sido capaz de superar. Un ejemplo en este sentido es el del cambio climático y las emisiones contaminantes, contando con el Protocolo de Kyoto como ejemplo de acuerdo. Dicha situación se asemeja al juego del dilema del prisionero, dado que la solución ideal solo se logra si todos los países colaboran, todos los países son perjudicados si no lo hacen y los costes de colaborar los soportan individualmente los países (Fernández Fernández et al., 2009). Además, al incluir expectativas, amenazas y tener una gran conexión con la figura de los free-rider su utilización está justificada al tratarse de un trabajo sobre bienes públicos globales.

Se ha elegido el Protocolo de Kyoto al ser un caso cuyos datos y resultados están bien registrados y que, al haberse desarrollado durante varias décadas, puede estudiarse su impacto con mayor seguridad. Además, podría decirse que es el acuerdo internacional voluntario en materia de bienes públicos globales con mayor recorrido y mayor participación a nivel global, así como el más conocido y con mayor importancia. Por tanto, se constituye como el elemento de estudio empírico ideal para el objeto del trabajo, cuyos tres objetivos fundamentales se plantean a continuación:

- El objetivo de la primera parte del documento es el de presentar de forma sencilla la Teoría de Juegos para su posterior aplicación en la parte empírica. Se busca un desarrollo más divulgativo que matemático, para facilitar la comprensión y utilización de la herramienta.
- El objetivo de la segunda parte es el de exponer de forma concisa y clara algunas de las partes más relevantes de la teoría económica relacionadas con el medio ambiente, explicando los conceptos de bienes públicos, bienes públicos globales, externalidades y tragedia de los comunes para su vinculación directa con la aplicación que se desarrolla en la tercera parte.
- El último objetivo, ligado a la aplicación empírica del trabajo de fin de grado, es doble: por un lado, evaluar la utilidad de la Teoría de Juegos para explicar el comportamiento de los miembros (países) de un acuerdo internacional voluntario (aplicable a cualquier ámbito, pero especialmente al de los bienes públicos globales), así como las condiciones necesarias para que un acuerdo de este tipo sea estable y moderadamente exitoso; por otro lado, analizar y valorar el grado de éxito del Protocolo de Kyoto, sobre todo en la faceta de acuerdo internacional, es decir, no tanto el cumplimiento de objetivos colectivos, sino el comportamiento individual de los países firmantes y los no firmantes, con el fin de detectar distintas conductas de free-rider en los países responsables de la contaminación.

Finalmente, si se logran alcanzar todos los objetivos anteriores, se podrá determinar que el marco teórico de la Teoría de Juegos resulta una herramienta de gran utilidad para su posterior aplicación a otros acuerdos internacionales voluntarios.

2. METODOLOGÍA

Aunque el presente trabajo consta de tres partes diferenciadas, para su elaboración se ha empleado una metodología similar.

Como las dos primeras partes se corresponden con una investigación descriptiva, el método aplicado ha sido la investigación y revisión bibliográfica de documentos académicos y de divulgación científica. Dicho método es transversal en el documento y también se aplica a la tercera parte del trabajo, que trata un problema relacional. Sin embargo, en esta última sección del trabajo, la investigación y revisión bibliográfica de documentos se ha complementado con la obtención de información de bases de datos. Gracias a ello, ha sido posible relacionar un modelo económico con los resultados empíricos del caso real (el Protocolo de Kioto).

3. TEORÍA DE JUEGOS

3.1 INTRODUCCIÓN DE LA TEORÍA DE JUEGOS

La Teoría de Juegos es una rama dentro de las matemáticas que se ocupa del análisis de problemas cuyos resultados dependen de las acciones de los participantes involucrados. Dicha teoría encuentra un gran ámbito de aplicación en las Ciencias Económicas y Empresariales y, como suele ser habitual, para poder expresar las posibilidades que ofrece la Teoría de Juegos es necesario aplicarla a través de modelos para estudiar situaciones de la vida cotidiana (Tenorio Villalón y Martín Caraballo, 2015)

Los orígenes de la Teoría de Juegos están en el diseño de estrategias para alcanzar la victoria en juegos de azar. Como su propio nombre indica, esta herramienta se basa en la modelización de juegos que suelen representar situaciones de la vida real. Dichos juegos pueden ser de dos clases: cooperativos y no-cooperativos (conflictivos) (Myerson, 1991). La diferencia entre unos juegos y otros es el tipo de relación entre los jugadores, dado que, en los juegos cooperativos, los participantes pueden establecer alianzas vinculantes y en los no-cooperativos no.

Dado el planteamiento de los juegos, lo habitual es que el resultado del experimento dependa de las acciones conjuntas de todos los jugadores, por lo que un jugador individual no deberá tener en cuenta sólo sus propias decisiones, sino también las de los demás participantes individuales (Tenorio Villalón y Martín Caraballo, 2015). Analizando el comportamiento de los jugadores, observando los resultados, es cómo la Teoría de Juego ofrece respuestas.

La particularidad de la Teoría de Juegos es que posibilita la modelización y simulación de gran cantidad de situaciones con complejas interacciones entre individuos que aparentemente solo podrían estudiarse ex post, y que, sin embargo, a través de los juegos, se puede determinar por qué los agentes toman las decisiones que toman, basándose en la optimización de sus resultados individuales (que en algunos casos puede llegar a depender de la confianza o las consecuencias posteriores del juego).

Pero, la Teoría de Juegos no busca la solución óptima para los problemas planteados, sino que busca la lógica detrás del conflicto, de las estrategias adoptadas por los participantes, poniendo el foco en lo que sucede en cada caso particular para alcanzar una generalización de actuaciones que permitan encontrar un procedimiento ante problemas similares. Por tanto, la Teoría de Juegos no es solo una rama de las matemáticas, es también una subdisciplina de la teoría de la decisión (Martínez Rey y Martínez Rey, 2011).

La Teoría de Juegos nace en el año 1944 de la mano del matemático norteamericano John Von Neumann y del economista alemán Oskar Morgenstern con la publicación de su libro “Theory of Games and Economic Behavior”, influidos por diversos juegos, herramientas y trabajos de la época como el “Kriegspiel” (un juego educativo prusiano pensado para las academias militares, con el fin de simular guerras) (tal y como se explica en (Martínez Rey y Martínez Rey, 2011)).

Las aportaciones de Von Neumann y Morgenstern, sumadas a las de otros matemáticos y economistas como Cournot, se vieron reforzadas o completadas por la adición del equilibrio de Nash en 1950 por el matemático y economista norteamericano John Forbes Nash, de quién recibe nombre. El equilibrio de Nash permite hallar una solución de equilibrio en los juegos no cooperativos. Considera que, en un juego concreto cuyos jugadores se comportan de forma racional, sólo existe un único resultado, dado que todos los jugadores buscarán optimizar sus resultados (Vanegas de Medina y Pascal Pinillo, 2014).

Posteriormente, diversos autores siguieron realizando contribuciones a la Teoría de Juegos, complementando el equilibrio de Nash e indagando en situaciones cada vez más complejas, como es el caso de John Harsanyi. con los juegos de información incompleta o Reinhard Selten. perfeccionando el equilibrio de Nash al definir el concepto de Equilibrio de Nash perfecto en los subjuegos (en juegos de información completa) entre otros autores (como se cita en Mendoza Huacchillo, (2019)).

En las sucesivas páginas de este apartado se abordará en profundidad el marco teórico de la Teoría de Juegos, explicando sus componentes, terminología y los distintos tipos de juegos que pueden darse.

3.2 COMPONENTES Y TERMINOLOGÍA DE UN JUEGO

Para que sea posible la aplicación de la Teoría de un Juegos a una situación, primero es necesaria la modelización de dicha situación en forma de juego. A continuación, se van a enumerar y explicar los elementos básicos de un juego: participantes o jugadores, estrategias y pagos o resultados (Mendoza Huacchillo, 2019). Pero antes, se ha de definir concretamente qué es un juego.

- Un **juego**, según Pindyck (2009) es una situación en la que los jugadores (los participantes) toman decisiones estratégicas, es decir, decisiones que tienen en cuenta las acciones y las respuestas de los demás.

- Los **jugadores** son los participantes en el juego, son quienes toman decisiones con el fin de maximizar su utilidad. Han de ser un mínimo de dos, sin máximo.
- Las **acciones** o jugadas de cada jugador son las decisiones que puede tomar cada jugador en cada momento en que le toque jugar. El conjunto de dichas acciones puede ser finito o infinito, según como se plantee el juego. Por ejemplo, en el clásico caso del dilema del prisionero sólo existen dos acciones posibles entre las que cada jugador puede optar.
- Los **resultados** del juego son las formas en que puede solucionarse un juego. Cada resultado del juego tiene asociados unos pagos para todos los jugadores.
- Los **pagos** son lo que recibe cada jugador cuando el juego se resuelve, esto es, cuando alcanzamos un resultado. Dichos pagos se perciben en términos de la utilidad subjetiva de cada individuo. Habitualmente, los pagos están definidos ex ante y los jugadores los conocen, siendo el detonante de las acciones de cada jugador.
- Las **estrategias** son planes de actuación concretos que definen las acciones que un determinado jugador va a realizar teniendo en cuenta las acciones de los demás posibles jugadores. Recurriendo al ejemplo del dilema del prisionero, la estrategia consistirá en determinar qué acción jugará el primer participante en el caso de que el segundo jugador decida delatar, y qué acción llevará a cabo en el caso de que el segundo jugador decida no delatar. Es decir, la forma en qué se va a comportar un individuo a lo largo del juego en función de los pagos, con el objetivo en mente de optimizarlos. Las estrategias pueden clasificarse dentro de dos categorías:
 - Estrategias **puras**: todas las acciones posibles de los jugadores son ciertas y concretas, no existe aleatoriedad en la toma de decisiones. En el dilema del prisionero las opciones son confesar o callar, se jugará una u otra.
 - Estrategias **mixtas**: existe un componente de aleatoriedad, aparecen cuando las estrategias puras no son óptimas y, por tanto, los jugadores eligen las acciones basándose en probabilidad. Un ejemplo cotidiano sería el del juego de piedra, papel o tijera (Pindyck y Rubinfeld, 2009).
- La **solución** de un juego es un conjunto de perfiles de estrategias que es razonable pensar que los jugadores adoptarán, es decir, el conjunto de acciones que los participantes pueden realizar de acuerdo a un comportamiento optimizador.

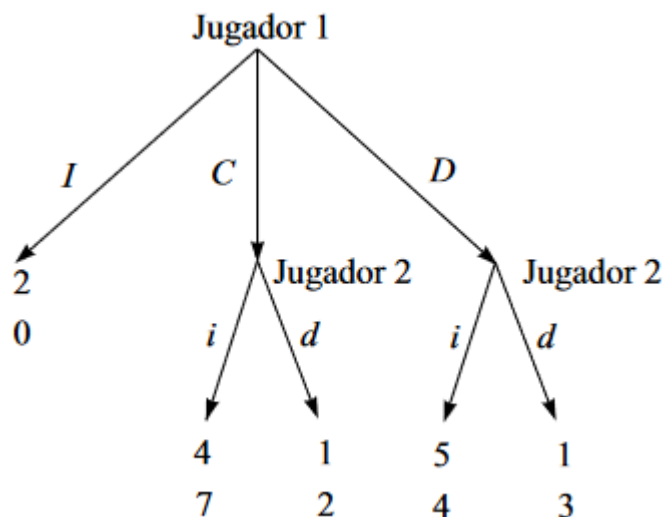
• Un **concepto de solución** de un juego es el procedimiento que permite lograr una solución, esto es, el método seguido para determinar los perfiles de estrategias lógicas y posibles de los jugadores por los que podrían optar (Cerdá et al., 2004). Existen dos modos de representar los juegos, de forma **estratégica** y forma **extensiva**. Por un lado, la forma estratégica o normal muestra el juego en forma de tabla, indicando el carácter simultáneo del juego, lo que implica que ambos participantes pueden tomar a la vez las decisiones. Por otro lado, la forma extensiva describe el juego de forma ramificada, secuencial o sucesiva (forma de árbol). De las dos formas se concretan jugadores, acciones posibles y los pagos asociados a cada acción. A continuación, se ofrece un ejemplo de juego representado de forma estratégica y de forma extensiva en la Tabla 3.1 y la Figura 3.1 respectivamente.

Tabla 3.1 Juego representado de forma normal

Juego de las monedas		Jugador 2	
		Cara	Cruz
Jugador 1	Cara	5, -5	-5, 5
	Cruz	-5, 5	5, -5

Fuente: Elaboración propia a partir de Cerdá Et al. (2004)

Figura 3.1 Juego representado de forma extensiva



Fuente: Cerdá Et al. (2004)

Dentro de la Teoría de Juegos se pueden encontrar una gran cantidad de modelizaciones que se pueden enmarcar dentro de distintas categorías o tipos de juegos. La primera clasificación es la que divide los juegos cooperativos de los juegos no cooperativos. Posteriormente, dentro de los juegos no-cooperativos, se pueden encontrar los juegos

dinámicos (secuenciales) y los estáticos (simultáneos), los juegos de suma cero y de no suma cero y los con repetición y sin repetición, y, a su vez, los distintos juegos enumerados pueden ser de información perfecta o imperfecta. En los sucesivos apartados se llevará a cabo una explicación de las distintas categorías de juegos antes citadas.

3.3 JUEGOS COOPERATIVOS

Los juegos cooperativos son aquellos en los que se estudia cómo participan grupos de jugadores sin prestar atención a las acciones individuales. En estos juegos, los participantes pueden organizarse en alianzas o coaliciones, coordinándose para obtener ganancias, de ahí que se denominen juegos cooperativos. El objeto de estudio es la posterior distribución de ganancias entre los miembros del equipo.

Es relevante destacar el hecho de que los acuerdos que adopten los participantes son vinculantes, es decir, quedan obligados a cumplirlos (a diferencia del problema de la inestabilidad del cártel). Por tanto, la atención no se centra en la propia coalición ni en el comportamiento individual de los miembros, sino en cómo se comportan de forma colectiva y que ganancias pueden lograr si colaboran.

De la colaboración entre las coaliciones se pueden desprender distintos resultados. Si al crecer el número de miembros de una coalición el pago que obtiene el grupo no disminuye, estamos ante un juego cooperativo monótono. Si al crecer el número de miembros, por ejemplo, por la unión de dos coaliciones, la ganancia es mayor o igual que la suma de las ganancias previas de cada coalición, entonces es un juego cooperativo superaditivo. Si, en caso contrario, la ganancia conjunta disminuye, entonces se trata de un juego subaditivo (Cerdá et al., 2004).

En el libro *Teoría de Juegos* (2004, p. 458) podemos encontrar diversos ejemplos ilustrativos de juegos cooperativos entre los que destaca el siguiente, obra de Eichberger. El ejemplo describe la siguiente situación: Hay tres comunidades cercanas a una gran ciudad que consideran la posibilidad de organizar su propio sistema de tratamiento de aguas residuales. En el momento presente, envían sus aguas residuales a una planta en la ciudad que les cobra una tarifa mensual por dicho servicio. A través de un análisis coste-beneficio se ha estimado el valor actualizado de los pagos que deberían aportar las familias de las comunidades para costear el servicio que presta el centro de tratamiento de residuos (CTR) de la ciudad, concluyendo que serían 100 u.m. por familia. Del mismo

modo, se ha calculado el coste actualizado de implantar un CTR propio en función del número de familias (NF) de cada comunidad, dando los siguientes resultados:

$$\begin{aligned} & \text{Coste de 500.000, si } 0 \leq NF \leq 5.000 \\ & \text{Coste de 600.000, si } 5.000 \leq NF \leq 10.000 \\ & \text{Coste de 700.000, si } 10.000 \leq NF \leq 15.000 \end{aligned}$$

La primera de las comunidades sirve de media a 5.000 familias durante el periodo, la segunda comunidad a 3.000 y la tercera a 4.000 familias. La forma coalicional de representarlo sería $J = \{1, 2, 3\}$ asignando números a cada comunidad de forma respectiva. Atendiendo a la primera comunidad, que aloja a 5.000 familias, se determina que están pagando al CTR 500.000 unidades monetarias (u.m.). Sería el mismo coste que implantar su propio CTR, por lo que no existen incentivos. El valor de la coalición formada por la primera comunidad es igual a 0. Ahora, la comunidad 2 necesitaría los mismos 500.000 para construir la planta, mientras que el coste que actualmente sufraga es de 300.000, por tanto, le resulta más conveniente seguir como está. El caso de la tercera comunidad es el mismo. Por tanto, el valor individual de cada coalición es igual a 0. Cuando se cumple esta característica el juego cumple la condición de 0-Normalidad.

$$v(\{1\}) = v(\{2\}) = v(\{3\}) = 0$$

Sin embargo, dada la proximidad entre las comunidades, la primera y la segunda deciden colaborar, por tanto, son 8.000 las familias implicadas que actualmente sufragar un coste de 800.000 para pagar al CTR. Si construyen una planta propia, el coste actualizado sería de 600.000 dólares, por tanto, lograrían un ahorro de 200.000, es una ganancia de 2 (en cientos de miles de u.m., a partir de ahora). Podemos hacer el mismo razonamiento para las demás comunidades:

$$v(\{1, 2\}) = 2, v(\{1, 3\}) = 3, v(\{2, 3\}) = 1$$

Y, de hecho, podrían organizarse las tres comunidades a la vez, aglomerando a 12.000 familias que pagan tarifas por valor de 1.200.000 u.m. al CTR de la ciudad, pero que si cooperan para construir su propia planta solo habrían de invertir 700.000 u.m., obteniendo una ganancia de 5 (un ahorro de 500.000 u.m.).

$$v(\{1, 2, 3\}) = 5$$

En este caso, se trata de un juego cooperativo de carácter aditivo o superaditivo, dado que de no cooperar a cooperar en pareja (y la comunidad restante de forma individual) hay un incremento del valor, y de la cooperación por parejas a la cooperación total entre las comunidades también se da un incremento del valor respecto a la situación anterior.

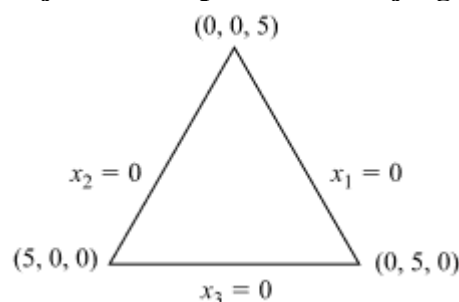
Tras todo este desarrollo, las comunidades llegan a la conclusión de que trabajar las tres juntas es mejor que trabajar individualmente o por parejas. El hecho de cooperar reporta unas importantes ganancias en forma de ahorro por valor de 500.000 u.m. En este punto surge la pregunta de cómo repartir ese ahorro entre las comunidades (o entre los miembros de cualquier coalición en cualquier juego cooperativo). Hay que tener en cuenta que, según el reparto de las ganancias, es posible que algunos participantes decidan abandonar la coalición porque individualmente o por parejas reciban mejores pagos que trabajando en conjunto.

Según el principio de eficiencia, el sumatorio de los pagos que reciban los jugadores (en este caso las tres comunidades) ha de ser igual al pago que recibe la coalición (el ahorro de 500.000 u.m. en el ejemplo). Además, como es evidente, para evitar situaciones como la descrita anteriormente (a causa de una mala distribución de ganancias) ningún jugador recibirá un pago inferior al que lograría de no cooperar (0, para las comunidades).

Surge entonces el concepto de Core o Núcleo del juego Cooperativo. El Core de un juego es un conjunto de combinaciones de pagos, de formas de repartir las ganancias entre los miembros. Es decir, distribuciones las ganancias de 5 u.m. entre las tres comunidades que no incentiven a actuar individualmente o por parejas (Curiel, 1980).

En la Figura 3.2 se ilustra cómo se representan habitualmente los juegos cooperativos para tres jugadores. El triángulo representa un área acotada del plano donde se hallan todas las combinaciones posibles de pagos de la coalición entre las tres comunidades. Para hallar el core, se acota todavía más el área del triángulo con las restricciones impuestas por las ganancias individuales. En el ejemplo actual no existen restricciones, dado que es 0-normalizado. Sin embargo, si alguno de los jugadores obtuviese ganancias individualmente, se tendría que situar entonces una recta paralela al lado correspondiente a $x_i = k$ que implicase vectores de pagos mínimos de k en los vértices o extremos de ese mismo lado (Cerdá et al., 2004).

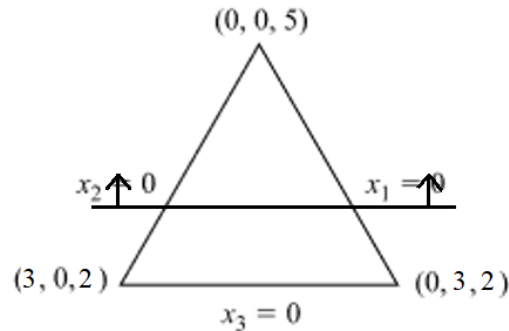
Figura 3.2 Conjunto de imputaciones de juego cooperativo



Fuente: Cerdá Et al. (2004)

En la Figura 3.3, se supone una restricción imaginaria por la cual $x_3 = 2$. Por tanto, se trazaría una recta horizontal al lado que ejerce de base, donde $x_3 = 0$, desplazándose hacia arriba. El resultado sería que las imputaciones de pagos de los vértices inferiores izquierdo y derecho serían, respectivamente, $(3, 0, 2)$ y $(0, 3, 2)$, mostrando así que la comunidad 3 ha de percibir, como mínimo, un pago de 2.

Figura 3.3 Conjunto de imputaciones de juego cooperativo con restricciones



Fuente: Elaboración propia a partir de Cerdá Et al. (2004)

Sin embargo, con este ejemplo queda claro que el core tiene un problema: su conjunto de imputaciones (combinaciones de pagos) puede resultar demasiado amplio. Cada comunidad debe percibir, como mínimo, un pago de 0. Por tanto, no hay muchas respuestas acerca de cómo repartir las ganancias. Entra en juego el nucleolus, que es un conjunto de imputaciones, como el core, pero no vacío y único. Se trata de un subconjunto dentro del subconjunto que representa el core, una distribución eficiente de los pagos entre los jugadores que cooperan.

Para hallar el nucleolus es necesario medir el grado de satisfacción de una coalición respecto a la distribución de las ganancias. Se define el exceso o queja de una coalición como la diferencia entre el valor de la coalición (el pago que logran en conjunto) y lo que recibe la coalición en el reparto. Así pues, con nuestro ejemplo, la coalición formada por $(1, 2)$ que logra pagos de 2, en caso de percibir un pago de 4 en el reparto, tendría una queja de -2. El valor de la coalición menos el valor del reparto.

Se suponen tres vectores de pagos: $x = (3, 2, 0)$, $y = (0, 1, 4)$, $z = (2, 2, 1)$

Tabla 3.2 Tabla de excesos de juego cooperativo (a)

	Valor de la coalición	Valor de x	Valor de y	Valor de z	Exceso de x	Exceso de y	Exceso de z
(1)	0	3	0	2	-3	0	-2
(2)	0	2	1	2	-2	-1	-2
(3)	0	0	4	1	0	-4	-1
(1, 2)	2	5	1	4	-3	+1	-2
(1, 3)	3	3	4	3	0	-1	0
(2, 3)	1	2	5	3	-1	-4	-2
(1, 2, 3)	5	5	5	5	0	0	0

Fuente: Elaboración propia a partir de Cerdá Et al. (2004)

A partir de la tabla, se han de armar vectores de excesos, ordenando los excesos de mayor a menor de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\Theta(x) &= (0, 0, 0, -1, -2, -3, -3) \\ \Theta(y) &= (1, 0, 0, -1, -1, -4, -4) \\ \Theta(z) &= (0, 0, -1, -2, -2, -2, -2)\end{aligned}$$

A continuación, han de ordenarse dichos vectores, comparando los primeros componentes, que de ser iguales se comparan los segundos y así sucesivamente hasta hallar una desigualdad. Se considera que un vector es menor que otro cuando el primer componente no idéntico de un vector es menor que el del otro vector.

En nuestro ejemplo: $\Theta(z) < \Theta(x) < \Theta(y)$

Entre todos los posibles vectores de pagos, el nucleolus es el que contiene las distribuciones de pagos para las que se minimiza el mayor de los grados de insatisfacción. Para poder hallar dicho nucleolus, es necesario definir previamente lo que son los jugadores simétricos y lo que es un jugador pasivo. Dos jugadores son simétricos si ambos realizan aportaciones equivalentes para cada coalición. Un jugador es pasivo si no aporta beneficio adicional al resto de jugadores.

Entonces, si todos los jugadores son pasivos, los pagos del nucleolus se corresponden con las ganancias que logran individualmente. Si todos los jugadores son simétricos, los pagos de todos los jugadores han de ser iguales (Cerdá et al., 2004).

Continuando con el ejemplo, se ha de investigar si las comunidades son jugadores pasivos, simétricos, ambos o ninguno.

En primer lugar, comprobamos si la comunidad 1 es un jugador pasivo:

$$\begin{aligned}
 v(\{1\}) &= v(\emptyset) + v(\{1\}) = 0 + 0 = 0 \\
 v(\{1,2\}) &\neq v(\{1\}) + v(\{2\}); 2 \neq 0 \\
 v(\{1,3\}) &\neq v(\{1\}) + v(\{3\}); 3 \neq 0 \\
 v(\{1,2,3\}) &\neq v(\{1\}) + v(\{2\}) + v(\{3\}); 5 \neq 0
 \end{aligned}$$

Ninguno de los jugadores es un jugador pasivo, por tanto, el pago del nucleolus no se corresponderá con el valor individual de cada jugador, que es 0. En cambio, todos los jugadores son jugadores simétricos. Por tanto, los pagos correspondientes al nucleolus deben ser idénticos para todos los jugadores.

La ganancia de la coalición (1, 2, 3) es de 5, y son tres jugadores, por tanto, la ganancia de cada jugador será de $5/3 = 1,67$. Podemos comprobar el resultado empleando la tabla

Tabla 3.3 Tabla de excesos de juego cooperativo (b)

	Valor de la coalición	Valor del vector de pagos (nucleolus)	Exceso del vector de pagos (nucleolus)
(1)	0	5/3	-5/3
(2)	0	5/3	-5/3
(3)	0	5/3	-5/3
(1, 2)	2	10/3	-4/3
(1, 3)	3	10/3	-1/3
(2, 3)	1	10/3	-7/3
(1, 2, 3)	5	5	0

Fuente: Elaboración propia a partir de Cerdá Et al. (2004)

Por tanto, el vector sería $\Theta(\text{nucleolus}) = (0, -1/3, -4/3, -5/3, -5/3, -5/3, -7/3)$ que es estrictamente menor a los vectores de pagos que se calcularon previamente, y, además, es el menor vector de pagos posible, de tal forma que sería el vector que minimizaría la insatisfacción en el reparto de las ganancias de la coalición.

La conclusión resulta sorprendente y a la vez obvia. En la mayoría de casos, el reparto de los pagos se hará de acuerdo a la aportación de los miembros a la coalición. Si en el juego todos aportan lo mismo, todos recibirán lo mismo. Si en un ejemplo, cada jugador aporta una parte distinta a los demás, y el valor de la coalición es proporcional, cada jugador percibirá un pago proporcional a lo aportado. Cabe destacar que en los juegos no tienen por qué ser todos los jugadores pasivos o simétricos, pueden existir combinaciones de los mismos, y el cálculo y la lógica permitirá alcanzar la solución a través del nucleolus.

3.4 JUEGOS NO COOPERATIVOS

Los juegos no cooperativos centran su estudio en las decisiones individuales de los participantes, a diferencia de los juegos cooperativos. En este tipo de modelos resulta imposible imponer un contrato vinculante, aunque es cierto que, en determinados juegos

(juegos repetidos), puede llegar a existir una débil colaboración, y esta suele ser inestable y totalmente voluntaria (véanse las “estrategias de gatillo” o las de “ojo por ojo” que se abordará en el apartado de juegos repetidos) (Pindyck y Rubinfeld, 2009).

Lo habitual en los juegos no cooperativos es la rivalidad entre los intereses de los jugadores, que actúan teniendo en cuenta o intentando anticipar la actuación de los demás jugadores, siempre bajo la máxima de la optimización de las ganancias. Es en este tipo de juegos en los que el Equilibrio de Nash demuestra su mayor utilidad. Y es en estos juegos en los que es necesario hablar de estrategias dominantes y otros conceptos que se desarrollarán a continuación.

A su vez, es necesario hacer una distinción dentro de los juegos no cooperativos entre juegos estáticos y juegos dinámicos, así como juegos con o sin información completa (Cerdá et al., 2004).

Por último, no hay que olvidar que el objetivo de plantear y resolver juegos no es otro que tratar de predecir a través de estos modelos cuál será el comportamiento real de los jugadores, y en este tipo de juegos se lleva a cabo a través de la determinación del ya mencionado Equilibrio de Nash (Fudenberg y Tirole, 1991, pt. 1)

En los siguientes apartados se van a tratar las diferentes categorías de los juegos no cooperativos. En primer lugar, los juegos estáticos y dinámicos con información completa, en segundo lugar, los juegos estáticos y dinámicos con información incompleta y, por último, los juegos repetidos.

3.5 JUEGOS ESTÁTICOS CON INFORMACIÓN COMPLETA

Se trata de los juegos más sencillos, representados habitualmente en forma estratégica o normal, ya que las acciones de los jugadores se desarrollan de forma simultánea. Decir que las decisiones se toman de forma simultánea es lo mismo que decir que se toman las decisiones a ciegas, sin conocer cuál ha sido la acción de los demás jugadores. A su vez, como hablamos de “información completa”, implica que todos los jugadores conocen la estructura completa del juego (combinaciones de pagos, acciones posibles de todos los jugadores, etc.) o lo que es lo mismo, que el conocimiento del juego es de dominio público. Esta última expresión es relevante, dado que no es lo mismo que los jugadores tengan conocimiento de las acciones posibles y los pagos asociados, a que los jugadores tengan conocimiento de que los demás jugadores también tienen conocimiento de ello (Cerdá et al., 2004).

Si bien no existe límite de jugadores, lo habitual (al menos a nivel didáctico) es la existencia de solo dos jugadores (como el clásico dilema del prisionero).

En cuanto a la solución de estos juegos, si bien un participante individual puede conocer cuál es la acción óptima de acuerdo a sus intereses egoístas, la consecución del pago deseado no depende solo de su actuación, sino también de lo que haga el rival. Además, lo habitual es que exista conflicto entre los deseos de los jugadores, siendo raros los casos en los que lo óptimo para los participantes coincide.

3.5.1 Soluciones de un juego mediante argumentos de dominación

Dentro de las acciones posibles de un jugador, puede existir una cuya elección siempre sea la más positiva ante cualquier acción tomada por los demás jugadores. Dicha estrategia se llama dominante, dado que los pagos recibidos por ellos son igual de buenos o mejores que los vinculados a las demás acciones ante cualquier combinación de acciones de los rivales. Por extensión, aquellas acciones que jamás serán igual de buenas que las dominantes, se denotan como estrategias dominadas.

Si consideramos la racionalidad de los agentes (supuesto básico de la Teoría de Juegos), un jugador siempre decidirá llevar a cabo estrategias dominantes, y jamás llevará a cabo estrategias dominadas, teniendo en cuenta que busca la maximización de las ganancias o la minimización de las pérdidas. Así mismo, hay que tener en cuenta que un jugador puede disponer de varias estrategias dominantes. Por tanto, es relevante destacar que, cuando existe una estrategia dominante, el jugador siempre actuará de la misma manera independientemente de lo que hagan los demás jugadores. No obstante, no en todos los juegos tiene por qué existir una estrategia dominante para todos los jugadores. Por tanto, es posible que no se pueda alcanzar la solución del juego de esta forma. Esto nos lleva a la “Eliminación Iterativa Estricta”. Supongamos un juego con dos jugadores en el que sólo uno de ellos posee una estrategia dominante. Aunque el otro no disponga de una estrategia dominante que jugar, aún se puede alcanzar una solución por argumentos de dominación. Como estamos ante juegos de información completa, y el primer jugador dispone de una estrategia dominante y el segundo no, suponiendo que ambos son racionales, el segundo jugador sabe que el primer jugador siempre va a llevar a cabo la estrategia dominante, por tanto, esto acota la actuación del segundo jugador. Tomando la Tabla 3.4 como ejemplo de juego representado en forma normal, concluimos que el jugador 1 solo llevará a cabo la acción denotada como B (*abajo*), dado que es su estrategia

dominante. El jugador 2, sin embargo, no dispone de estrategia dominante, pero sí conoce de la racionalidad del primer jugador y que jugará *B*, por tanto, esto acota la actuación del segundo jugador a optar siempre por jugar la acción *I* (*izquierda*) (Cerdá et al., 2004). De forma simétrica, teniendo que ambos jugadores son racionales, el jugador 2 sabe que el jugador 1 jamás jugará *A* siguiendo el proceso de eliminación de Dominación Iterada, de modo que el segundo adaptará su forma de jugar a la existencia de una estrategia dominante para el jugador 1 (Fudenberg y Tirole, 1991).

Tabla 3.4 Juego representado de forma normal con un solo jugador con estrategia dominante

Juego de posiciones		Jugador 2	
		Izquierda (I)	Derecha (D)
Jugador 1	Arriba (A)	0, 2	4, 100
	Abajo (B)	20, 40	8, 0

Fuente: Elaboración propia a partir de Cerdá Et al. (2004)

Existe un tercer caso muy habitual en el que la solución alcanzable es más compleja, y es aquella en la que ningún jugador dispone de una estrategia dominante.

Tabla 3.5 Juego representado de forma normal con ningún jugador con estrategia dominante

Juego de posiciones ampliado		Jugador 2		
		Izquierda (I)	Centro (C)	Derecha (D)
Jugador 1	Arriba (A)	3, 1	4, 2	1, 2
	Medio (M)	2, 4	3, 5	4, 0
	Abajo (B)	1, 0	2, 1	0, 3

Fuente: Elaboración propia a partir de Cerdá Et al. (2004)

En este caso, se emplea un concepto de solución denominado “Eliminación Iterativa Débil” (EID) o “Eliminación Iterativa de Estrategias Débilmente Dominadas”. Las estrategias débilmente dominadas son aquellas que pueden ser la mejor opción para alguna de las actuaciones del otro jugador, pero que no son siempre la estrategia óptima. El proceso de EID se basa en la eliminación sucesiva de estrategias:

En primer lugar, deben eliminarse, simultáneamente, las estrategias débilmente dominadas de cada jugador. Al eliminarlas, se llega a un “juego reducido”.

En segundo lugar, se eliminan las estrategias débilmente dominadas de cada jugador en el juego reducido, alcanzando un nuevo juego reducido.

El proceso finaliza cuando no quedan estrategias que eliminar para ningún jugador. Las estrategias supervivientes pasan a denominarse “estrategias iterativamente no dominadas” (Cerdá et al., 2004).

Tomando de ejemplo la Tabla 3.5, en un primer paso, se elimina la acción *B* del jugador 1, dado que no resulta óptima para ninguna acción del jugador 2 comparada con las acciones *A* y *M*. De igual forma, se elimina la acción *I* del jugador 2 por el mismo motivo. En un segundo paso, analizando el juego reducido, se eliminaría la acción *D* del jugador 2, y, por último, en un tercer paso, la opción *M* del jugador 1. La solución final a través de este proceso sería (*A*, *C*) con un pago asociado (4, 2).

3.5.2 Soluciones de un juego mediante argumentos de equilibrio

Como se adelantó en la introducción, la noción de equilibrio en Teoría de Juegos fue introducida por John Nash (1950), de ahí que se conozca como “equilibrio de Nash” (EN). Dicho equilibrio, se fundamenta en los conceptos de solución basados en la eliminación iterativa de estrategias dominadas. Hasta ahora, se han alcanzado soluciones aplicando la lógica de la eliminación, descartando aquellas estrategias que, dada la racionalidad de los jugadores, jamás emplearían. Con el equilibrio de Nash se pretende descubrir qué es lo que realmente harían los jugadores, y no solo qué no harían.

En (Cerdá et al., 2004, p. 90) se define un equilibrio de Nash de la siguiente manera:

“Es un perfil de estrategias del que ningún jugador desearía desviarse unilateralmente, es decir, ninguno se arrepiente de la decisión tomada, dadas las estrategias decididas por el resto de los jugadores. Un EN está formado por estrategias que son óptimas para cada jugador dadas las estrategias del resto de jugadores.”

De este modo, en un EN cada jugador no está logrando la máxima ganancia posible, sino la máxima ganancia posible condicionada a la actuación del otro jugador, pudiendo existir varios EN en un juego de estrategias puras.

Otra definición más acotada sería la siguiente: un EN es un perfil de estrategias tal que cada estrategia de un jugador es la respuesta óptima a las respuestas del otro jugador. En este punto nos encontramos por fin con el dilema del prisionero (Fudenberg y Tirole, 1991). Adicionalmente, dado que pueden existir varios EN, existe un EN estricto si cada

jugador tiene una única respuesta óptima para cada una de las estrategias de los otros jugadores (como Fudenberg y Tirole, 1991 cita a Harsanyi).

Tabla 3.6 Juego del dilema del prisionero

Dilema del prisionero		Jugador 2 (preso 2)	
		Callar	Confesar
Jugador 1 (preso 1)	Callar	4, 4	0, 5
	Confesar	5, 0	1, 1

Fuente: Elaboración propia a partir de Cerdá Et al. (2004)

Para ambos jugadores (presos) la estrategia dominante es confesar independientemente de lo que haga el otro jugador. Ninguno de los dos jugadores está motivado a callar de forma unilateral. Se puede hallar el EN a través de un proceso simple, basado en subrayar el máximo pago alcanzable para cada estrategia de cada jugador considerando cada estrategia del rival. De este modo, son EN aquellos cuadros en los que ambos pagos sean subrayados. En este caso, el EN es (*Confesar, Confesar*) con el pago asociado (1, 1). (Suponemos que el juego es simultáneo y no se repite).

Este proceso se puede denominar “correspondencia de respuesta óptima”, y en él se busca, para cada combinación de estrategias de los demás jugadores, el conjunto de estrategias que más conviene al jugador para optimizar sus ganancias. Posteriormente, los EN se hallan cuando se observan intersecciones entre las correspondencias de respuesta óptima de todos los jugadores (Cerdá et al., 2004).

Por tanto, cada jugador elige la acción óptima ante lo que espera que jueguen el resto de las participantes, y dicha conjetura sobre lo que jueguen los demás jugadores ha de ser razonable, es decir, ha de ser compartida por el resto de jugadores.

En el dilema del prisionero de la Tabla 3.6 se observa como la intersección de las correspondencias de respuesta óptima de los dos jugadores se encuentra en (*Confesar, Confesar*).

3.5.3 Estrategias mixtas

El EN tal y como se ha descrito en el anterior apartado presenta un problema: su existencia no está asegurada, ya que puede no darse ningún punto de intersección entre los perfiles óptimos de los jugadores en un juego. Es más, puede no existir ningún perfil óptimo. Un ejemplo claro es el del juego de las monedas. Dicho modelo se compone de dos jugadores,

quienes lanzan una moneda cada uno. Si ambas coinciden, gana el jugador 1. Por el contrario, si no coinciden, gana el jugador 2 (Pindyck y Rubinfeld, 2009).

Tabla 3.7 Juego de las monedas

Juego de las monedas (otra versión)		Jugador 2	
		Cara	Cruz
Jugador 1	Cara	1, -1	-1, 1
	Cruz	-1, 1	1, -1

Fuente: Elaboración propia a partir de Cerdá Et al. (2004)

Es evidente que no existe un EN en este juego. Si el jugador 1 quisiera jugar *cara*, el jugador 2 siempre querrá jugar *cruz*, en cuyo caso el jugador 1 querría jugar *cruz*, lo que obligaría al jugador 2 a cambiar su elección a *cara*. Si se intenta jugar con estrategias puras se acaba llegando a una paradoja. En este punto, aparecen las estrategias mixtas, que son aquellas en las que entra en juego la aleatoriedad: los jugadores eligen aleatoriamente entre dos o más opciones posibles, basándose en un conjunto de probabilidades elegidas (Pindyck y Rubinfeld, 2009).

Lo más sencillo en este caso sería elegir con una probabilidad de $\frac{1}{2}$ *cara*, y con una probabilidad de $\frac{1}{2}$ *cruz*. Es una estrategia posible para ambos jugadores, y en caso de tomarla, encontraríamos un EN. Además, si añadimos cierta repetición al juego esta idea se refuerza, y podemos incluir otro ejemplo tal vez más ilustrativo, como es el de *pedra, papel o tijera*. Si el jugador 1 decidiera llevar a cabo una estrategia pura jugando siempre *pedra*, el jugador 2 al cabo de algunas repeticiones se daría cuenta del patrón y siempre jugaría *papel*, ganando al jugador 1 en cada repetición del juego. La única forma de optimizar las ganancias en un juego aleatorio como el de las monedas o el *pedra, papel o tijera* es jugar una estrategia mixta, es decir, aleatoria.

3.5.4 La optimalidad de Pareto

Como se ha comentado, algunos juegos pueden tener más de un EN (es decir, no existe un EN estricto). Cuando esto sucede, debe existir algún mecanismo que lleve a pensar a los jugadores en el mismo EN. Un juego comúnmente conocido en el que existen varios EN es el de la batalla de sexos (aunque su nombre podría ser perfectamente batalla de gustos), que modeliza una posible situación cotidiana en cualquier pareja (sentimental o no) con distintos gustos respecto al tiempo de ocio.

Tabla 3.8 Juego de la batalla de gustos

Batalla de gustos		Jugador 1	
		Salir de casa	Quedarse en casa
Jugador 1	Salir de casa	1, 2	0, 0
	Quedarse en casa	0, 0	2, 1

Fuente: Elaboración propia a partir de Pindyck y Rubinfeld (2009)

La situación descrita en la Tabla 3.8 indica que el Jugador 1 prefiere *quedarse en casa*, y el Jugador 2 prefiere *salir de casa*, sin embargo, dado que toman la decisión en pareja y disfrutan de la compañía mutua, ambos prefieren hacer cualquiera de las actividades juntos, es decir, (*Salir de casa, Salir de casa*) o (*Quedarse en casa, Quedarse en casa*). Ambos son EN en estrategias puras.

Este asunto se aborda después de las estrategias mixtas, dado que también existe un EN de estrategias mixtas. Los jugadores no son totalmente indiferentes entre ambos EN. El Jugador 1 prefiere *quedarse en casa*, y el Jugador 2 prefiere *salir de casa*, por eso, en vez de decidir jugar una u otra opción con un 50% de probabilidades, se decantarán a jugar en mayor proporción su actividad favorita. En nuestro ejemplo, el jugador 1 juega *quedarse en casa* 2/3 de las veces, mientras que optará por *salir de casa* 1/3 de las ocasiones. Y, al contrario, el Jugador 2 optará por *salir de casa* el 67% de las veces, y *quedarse en casa* el tercio restante.

Tal y como está planteado el juego, si dos participantes juegan por primera vez, será difícil predecir el resultado, dado que sin coordinación podrían acabar en combinaciones que ni siquiera sean un EN. Por ejemplo, uno de los jugadores puede elegir *quedarse en casa* y el otro *salir de casa*. No obstante, esto es un modelo, y en la vida real existen otras variables (especialmente si hablamos de una pareja sentimental o de amigos). Es decir, en la vida real sí que pueden llegar a coordinarse de algún modo, o pueden estar influenciados por sus experiencias pasadas o su cultura (Fudenberg y Tirole, 1991).

Esto está relacionado con la “teoría de los puntos focales” de Schelling (1960). Según el autor, para estudiar los juegos de negociación (como este), hay que evitar que las matemáticas sean la herramienta principal. Además, se debe evitar la abstracción excesiva. Es decir, no hay que olvidar que el modelo, el juego, busca explicar un fenómeno que se da en la realidad. Por tanto, existen situaciones en las que incluir un cierto contexto puede facilitar la solución del juego (Schelling, 1960).

Una definición de dichos puntos focales sería aquellos EN que resultan especialmente convincentes por cuestiones psicológicas. Algunos ejemplos, siguiendo esta definición, serían juegos como el que consiste en rodear un número de una serie dada, y si coincide con el rodeado por el otro jugador, ambos ganan. Siguiendo la lógica, ambos rodearán el más alto. Otro ejemplo: Si alguien debe encontrarse con otra persona en la ciudad de Nueva York, ¿dónde sería? A todo el mundo le vendría a la cabeza el Empire State Building (Rasmusen, 1999).

Destaca un ejemplo más, se trata de un estudio de Economía del Comportamiento realizado en Italia, en el que se realizaba un experimento que consistía en un tipo de dilema del prisionero. En dicho experimento se realizaba el juego en una cárcel con delincuentes comunes, en una cárcel con delincuentes que eran miembros de la camorra (similar a la mafia y, por tanto, con códigos de conducta y castigos) y en una universidad con estudiantes. La conclusión del estudio es que existían diferencias notables en los resultados de los experimentos según las características de los participantes, demostrando que existía mayor tendencia a la cooperación para alcanzar EN más beneficiosos en el caso de los presidiarios miembros de la camorra, incluso sin comunicación previa al juego (Nese et al., 2018).

A fin de cuentas, los juegos no dejan de ser modelos que buscan simplificar la realidad, y a veces no es posible o no es útil incluir información contextual, pero en algunos casos puede llegar a ser esencial. Igualmente, puede incluirse comunicación previa al juego, es decir, que los participantes de un juego se comuniquen entre ellos antes de jugar (Fudenberg y Tirole, 1991).

Es necesario introducir otro término que amplía las explicaciones basadas en argumentos de dominación, como es la “dominación paretiana” o en el sentido de Pareto, que engloba el conjunto de perfiles estratégicos de todos los jugadores en un juego que provoca que ningún participante pueda cambiar su forma de jugar por ser óptima. Esto implica que ningún jugador puede lograr ganancias o pérdidas si no es a costa de otro jugador. Conceptualmente, se asemeja a la optimalidad paretiana en Teoría del Consumidor vinculada al intercambio, la situación en la que ningún participante puede mejorar sin que empeoren los demás. Se trata de una medición de la eficiencia del juego completo, de todos los jugadores, en vez de la respuesta óptima de cada jugador individualmente (como es el caso de las estrategias dominantes, que son a nivel individual). Por tanto, se podría hablar de una medida de eficiencia “social”, comprendiendo en la sociedad a todos los jugadores del juego y su bienestar colectivo.

Entonces, un perfil de estrategias será un óptimo de Pareto si no está dominado en el sentido de Pareto por ningún otro perfil (Cerdá et al., 2004). Retomando el dilema del prisionero, el EN que se alcanza, porque cada jugador sigue sus estrategias dominantes, es realmente ineficiente en el sentido de Pareto, dado que el Óptimo de Pareto sería la solución (*Callar, Callar*). Si esto lo vinculamos al estudio de economía del comportamiento mencionado anteriormente, podemos observar como el hecho de que existan “puntos focales”, experiencias previas, cultura (como el caso de la camorra) puede llevar a que la conclusión del juego sea un óptimo de Pareto y no un EN, lo cual resulta sorprendente. En cambio, en el caso de la batalla de sexos (o batalla de gustos), los EN sí son óptimos en el sentido de Pareto (Fudenberg y Tirole, 1991).

Todo esto, atendiendo de nuevo al dilema del prisionero, nos dirige a una interesante cuestión, y es la diferencia entre el comportamiento individualmente óptimo y el socialmente óptimo. Para los prisioneros, lo mejor es (*Callar, Callar*), sin embargo, la estrategia dominante a nivel individual es (*Confesar, Confesar*). La diferencia entre alcanzar un resultado o el otro, como se ha desarrollado a lo largo del apartado, son los supuestos que se establezcan para el modelo. Si se introducen factores como el contexto, que los jugadores se conozcan o que existan consecuencias fuera del juego (como una paliza en prisión o el desprecio social), puede cambiar drásticamente el resultado del juego, y llevarlo de un EN a un resultado óptimo en el sentido de Pareto (Cerdá et al., 2004). O, tal y como afirman Fudenberg y Tirole (1991), la comunicación previa al juego, aunque no existan circunstancias que avalen lo que se digan los jugadores entre sí, puede llevar a que efectivamente decidan jugar un perfil de estrategias que constituya un óptimo de Pareto (a nivel social) por encima de estrategias dominantes (a nivel individual), aunque entrañe cierto riesgo. No obstante, no tiene por qué ser así en todos los juegos, dado que deben cumplir la característica de no ser de suma cero y que los incentivos para traicionar la confianza (aunque el juego solo se repita una vez) no sean lo suficientemente altos.

3.5.5 Juegos bipersonales de suma cero

Este tipo de juegos representa conflictos puros entre jugadores, situaciones que podrían relacionarse con el óptimo de Pareto, dado que las ganancias de un jugador se extraen de las pérdidas del otro. Ninguno de los participantes puede mejorar, sin que el otro participante empeore en la misma medida. A pesar de que estos juegos son excepciones

en la vida real, su capacidad analítica y sus predicciones son mejores que las de otros juegos, de ahí su uso intensivo de forma didáctica.

La condición para que un juego sea de suma cero viene definida en (Cerdá et al., 2004) de la siguiente forma: un juego es de suma cero si para todo par de estrategias puras de ambos jugadores, la suma de los pagos que a ambos corresponde es nula. En este tipo de juegos basta con definir los pagos para un jugador, dada la naturaleza de suma cero. Un ejemplo de juego de suma cero es el descrito en la Tabla 3.7, el juego de las monedas. En este tipo de juegos se suele aplicar la estrategia *minimax* que, junto a la estrategia *maximin*, se van a explicar en el siguiente punto.

3.5.6 Estrategias maximin y minimax

Las estrategias *maximin* y *minimax* están relacionadas a la aversión al riesgo y la búsqueda de seguridad dentro de juegos en los que las acciones de un pueden perjudicar al otro jugador directamente. Dado un juego representado en forma estratégica, la estrategia *maximin* es aquella que busca maximizar la ganancia mínima que puede obtenerse (Pindyck y Rubinfeld, 2009), es el máximo de los mínimos de todas las filas del jugador 1, es decir, todas las estrategias puras del primer jugador. La estrategia *minimax*, por otro lado, busca minimizar la pérdida esperada, es el mínimo de los máximos de todas las columnas de la matriz para el jugador 1. Una combinación de fila-columna (una combinación de estrategias de los jugadores vinculada a una celda con sus respectivos pagos) es un “punto de silla” si es el máximo de la columna y el mínimo de la fila. Es un tipo de equilibrio racional en los juegos de suma cero que busca la seguridad y está condicionado por la aversión al riesgo (Cerdá et al., 2004).

En este tipo de estrategias también se observa un conflicto entre lo individualmente óptimo y lo conjuntamente óptimo. Se puede explicar mejor a través de un ejemplo como el representado en la Tabla 3.9. En primer lugar, la estrategia *maximin*, aquella que busca maximizar la ganancia mínima.

Tabla 3.9 Juego de la inversión

Juego de la inversión		Jugador 2	
		No invertir	Invertir
Jugador 1	No invertir	0, 0	-10, 10
	Invertir	-100, 0	20, 10

Fuente: Elaboración propia a partir de Pindyck y Rubinfeld (2009)

Para el Jugador 1 no existe estrategia dominante, mientras que para el Jugador 2, *invertir* es la estrategia dominante. Suponiendo la racionalidad de ambos jugadores, el Jugador 2 decidirá *invertir*, y, por tanto, el Jugador 1 tomará la elección de *invertir* también, logrando una ganancia de 20. El EN es (*Invertir, Invertir*) por el proceso de eliminación iterativa. Sin embargo, suponiendo que son empresas competidoras, es posible que el Jugador 2 pueda decidir *no invertir*, y si el Jugador 1 juega *invertir* incurriría en unas pérdidas de -100, muy superiores a -10. Por consiguiente, la estrategia *maximin* del Jugador 1 (la que busca maximizar la ganancia mínima) sería jugar *no invertir*, mientras que la estrategia *maximin* para el Jugador 2 sería *invertir* (Pindyck y Rubinfeld, 2009). Es decir, el Jugador 1 busca reducir el riesgo que corre, porque es averso al riesgo (la utilidad lograda por las ganancias por debajo de la media supera a la obtenida por las ganancias por encima de la media). En otras palabras, prefiere no perder, a ganar. Por tanto, busca la estrategia que le otorgue mayor seguridad.

En segundo lugar, la estrategia *minimax* es aquella que persigue minimizar la pérdida esperada, también busca maximizar la seguridad, o reducir los riesgos. Se busca señalando los mínimos de las columnas del juego representado en forma estratégica, mientras que el *maximin* se busca señalando el máximo de las filas. Se muestra un ejemplo práctico en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10 Juego con estrategias *maximin* y *minimax*

Juego de posiciones (otra versión)		Jugador 2	
		Izquierda (I)	Derecha (D)
Jugador 1	Arriba (A)	3*, 2	1*, 4
	Centro (C)	1*, 3	2*, 1
	Abajo (B)	2*, 2	2*, 0

Fuente: Elaboración propia a partir de Cerdá Et al. (2004)

Para el jugador 1, se señalan los mínimos de las filas con un asterisco superíndice y los máximos de las columnas con un asterisco subíndice.

En este ejemplo, la estrategia *maximin* del Jugador 1 es [$\max(1, 1, 2) = 2$] y la estrategia *minimax* es [$\min(3, 2, 2) = 2$], y existe un punto de silla que corresponde a la estrategia B. Por tanto, la estrategia *maximin* del Jugador 1 será la que se corresponde con jugar B.

3.6 JUEGOS DINÁMICOS CON INFORMACIÓN COMPLETA

Los juegos dinámicos reciben su nombre porque, a diferencia de los juegos estáticos, no se toman las acciones de forma simultánea, sino sucesiva. De nuevo, nos encontramos ante un juego con información completa o cuya estructura es completa es de dominio público, lo cual es muy relevante a la hora de que los jugadores tomen sus decisiones. Además, la representación habitual de este tipo de juegos es la extensiva (forma de árbol) y dado que se juega de forma sucesiva, uno de los jugadores tendrá conocimiento de las estrategias jugadas por el otro participante a la hora de elegir qué jugar. En este tipo de juegos se van a abordar dos conceptos de solución, el de EN perfecto en los subjuegos, y el de inducción hacia atrás (o solución recursiva).

Dada la representación extensiva del juego, es necesario destacar algunos elementos adicionales para facilitar la comprensión de los juegos. Gráficamente, la representación se compone de ramas que unen nodos. Se tiene el nodo inicial, que representa el inicio del juego, y los nodos finales o terminales, que ilustran el final del juego. Los nodos no terminales pueden ser nodos de azar (representan una jugada de azar) o nodos de decisión (representan una jugada de uno de los participantes). El camino que une el nodo inicial con un nodo terminal se denomina senda, resultado, desarrollo o trayectoria posible. En cada “partida” del juego solo se recorre una senda. Después, las estrategias de un jugador son todas las opciones que tiene en un juego, y el perfil estratégico es un vector concreto de estrategias que ha desarrollado en una partida.

Una vez aclarados estos términos, y teniendo en cuenta que el juego dinámico tiene información completa, es necesario concretar si la información es, además, perfecta o imperfecta. En el caso de la información perfecta, todos los jugadores tienen conocimiento pleno (unitario) del juego y los jugadores, mientras que la información no es perfecta si alguno de los jugadores no posee un conjunto de información unitario. Se entiende mejor con un ejemplo: en el caso del ajedrez, la información es perfecta; mientras que, en el juego de las cartas, no lo es (Cerdá et al., 2004).

3.6.1 Juegos dinámicos con información completa y perfecta

A la hora de buscar la solución de un juego dinámico con información completa y perfecta no basta con la aplicación de los conceptos de solución vistos en apartados previos, sino que es necesaria la inclusión del equilibrio de Nash perfecto en los subjuegos. Este

requerimiento aparece porque, a la hora de expresar los juegos dinámicos de forma normal en vez extensiva, se pierde información, lo que provoca que algunos EN que aparentan ser lógicos al jugar de forma simultánea, en realidad no lo sean si el juego se desarrolla de forma sucesiva (Cerdá et al., 2004).

Esos EN que no son lógicos al razonar el juego de forma sucesiva se acaban manifestando como “amenazas no creíbles”. Lo más ilustrativo es un ejemplo. A continuación, se va a mostrar el juego representado de forma normal, donde los EN hallados son (*Entrar, Competir Suave*) y (*No entrar, Competir duro*). Ambos son razonables si se jugará de forma simultánea.

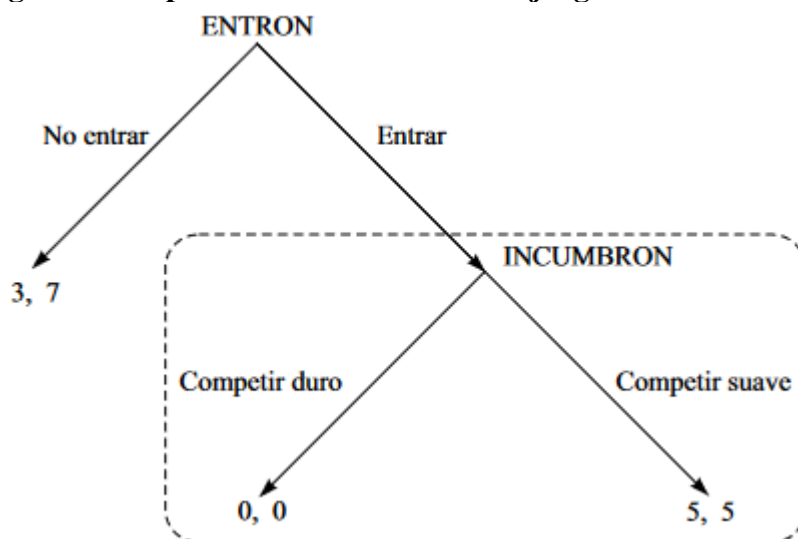
Tabla 3.11 Representación normal del juego de la disuasión

Juego de entrada al sector (Juego de disuasión)		Incumbron (Jugador 2)	
		Competir duro	Competir suave
Entron (Jugador 1)	Entrar	0, 0	5, 5
	No entrar	3, 7	3, 7

Fuente: Elaboración propia a partir de Cerdá Et al. (2004)

Sin embargo, si se atiende a la representación extensiva del juego y se aplica un razonamiento basado en la racionalidad de los agentes se alcanza un “EN” diferente.

Figura 3.4 Representación extensiva del juego de la disuasión



Fuente: Cerdá Et al. (2004)

A continuación, se analiza uno de los EN inferidos a partir de la representación normal del juego: (*Entrar, Competir Suave*). Entron, quién decide primero que jugar, se decanta por *entrar*. Incumbron, como elige a continuación, decide jugar *competir suave*,

alcanzando pagos de (5,5). Los dos jugadores han actuado de forma racional jugando lo que más les convenía. Se trata de un EN perfecto en los subjuegos.

Por otro lado, se analiza el EN (*No Entrar, Competir Duro*). Una vez más, Entron ocupa el primer nodo de decisión, y elige *no entrar* para lograr un pago de 3, ya que, si decidiera *entrar*, como Incumbron anuncia que jugaría *competir duro*, obtendría un pago de 0 (según el segundo EN que nos ofrece el análisis a parte de la representación normal). Sin embargo, como se juega de forma sucesiva y no simultánea, Incumbron, una vez que Entron no ha jugado *no entrar*, no va a jugar *competir duro*, porque no será la elección óptima. En su lugar, elegirá *competir suave* para maximizar sus ganancias, porque le resulta más rentable que *competir duro*.

Sin embargo, esta situación jamás se va a dar, ya que suponemos racionalidad e información perfecta. Es decir, Entron conoce que a Incumbron le resulta más beneficioso *competir suave* que *competir duro*, por lo que, si decide *entrar*, Incumbron no tendrá más remedio que *competir suave*, es decir, la amenaza de Incumbron de *competir duro* no es creíble, por tanto, Entron siempre decidirá jugar *entrar*. De este modo, queda patente que el EN (*No Entrar, Competir Duro*) no es realmente un equilibrio que se vaya a alcanzar en ninguna circunstancia. No es un EN perfecto en los subjuegos.

Este nuevo equilibrio fue propuesto por Reinhard Selten en 1965, como se referencia en el libro de Teoría de Juegos (2011) y es una ampliación del previo EN, dado que incorpora la dimensión de la credibilidad. Adicionalmente, existe otra forma de solucionar los juegos dinámicos con información completa y perfecta, el método conocido como inducción hacia atrás, muy vinculado al EN perfecto en los subjuegos. Este método también se puede denominar como solución recursiva.

Para hallar la solución recursiva, primero han de identificarse todos los posibles subjuegos de un determinado juego que llevan a su conclusión (es decir, aquellos que conducen al reparto de los pagos y que no se tomen más decisiones). Estos subjuegos tienen un único jugador tomando decisiones, y en todos ellos el EN “clásico” es su jugada óptima. A continuación, se eliminan los subjuegos, excepto el nodo decisorio de comienzo, atribuyendo las ganancias de haberse tomado la decisión óptima (EN en este subjuego), quedando un esquema reducido sobre el que se vuelve a realizar el mismo proceso. Se trata de jugar el juego en sentido inverso, desde el final. Cabe destacar, que esta solución no es aplicable a aquellos juegos cuya información no sea perfecta (Cerdá et al., 2004).

Aplicando la inducción hacia atrás a la Figura 3.3 se puede hallar que jugarán los individuos. En el subjuego en el que Incumbron debe decidir entre *competir duro* o *competir suave* elegirá competir suave, dado que es la más beneficiosa. “Podando” el árbol se llega a que Entron tiene dos opciones: *no entrar* y *entrar*, con unos pagos asociados de 3 y 5 respectivamente. Por tanto, tomará la decisión de *entrar*. De este modo llegamos al EN perfecto en los subjuegos (*Entrar, Competir Suave*) con un pago asociado de (5, 5).

3.6.2 Juegos dinámicos con información completa e imperfecta

Como se ha especificado en el anterior apartado, el método de inducción hacia atrás no es viable si existe algún jugador cuyo conjunto de información no es unitario. No obstante, el razonamiento tras el método permite una aplicación generalizada en casos donde la información es imperfecta: el algoritmo de inducción hacia atrás generalizado.

El proceso es similar. En primer lugar, se identifican todos los subjuegos que conducen a nodos terminales (implica el reparto de los pagos), y se calculan los EN en cada uno. En segundo lugar, si sólo existe un EN para cada subjuego, el nodo de decisión previo se sustituye por el nodo terminal correspondiente a ese EN. El proceso se repite hasta alcanzar el primer nodo decisorio del juego. Si existiera más de un EN en algún subjuego se deberían formar tantos árboles “podados” como EN en el subjuego para continuar el proceso. Se puede ilustrar dicho proceso con las Figuras 3.4 y 3.5 mostradas a continuación., retomando el juego de entrada al sector (juego de disuasión) entre Entron e Incumbron.

Tabla 3.12 Juego de la disuasión con información completa e imperfecta

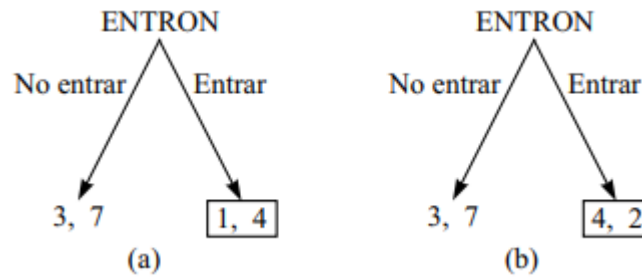
Juego de entrada al sector (Juego de disuasión) con información imperfecta		Incumbron (Jugador 2)	
		A	B
Entron (Jugador 1)	A	-2, -2	4, 2
	B	1, 4	-1, -1

Fuente: Elaboración propia a partir de Cerdá Et al. (2004)

En este modelo se tiene que Incumbron inicia un subjuego consistente en un juego estático (Simultáneo), representado en la Tabla 3.12. En el juego encontramos dos EN, los cuales son (B, A) y (A, B), correspondiendo los pagos (1, 4) y (4, 2) a los respectivos EN. A continuación, siguiendo el método de inducción generalizado, sustituimos dichos pagos

en el nodo de decisión de Incumbron, creando así dos “árboles” en la representación extensiva de todo el juego. Esto queda representado en la Figura 3.4.

Figura 3.5 Representación extensiva de juegos reducidos a partir de dos EN en el juego de la disuasión



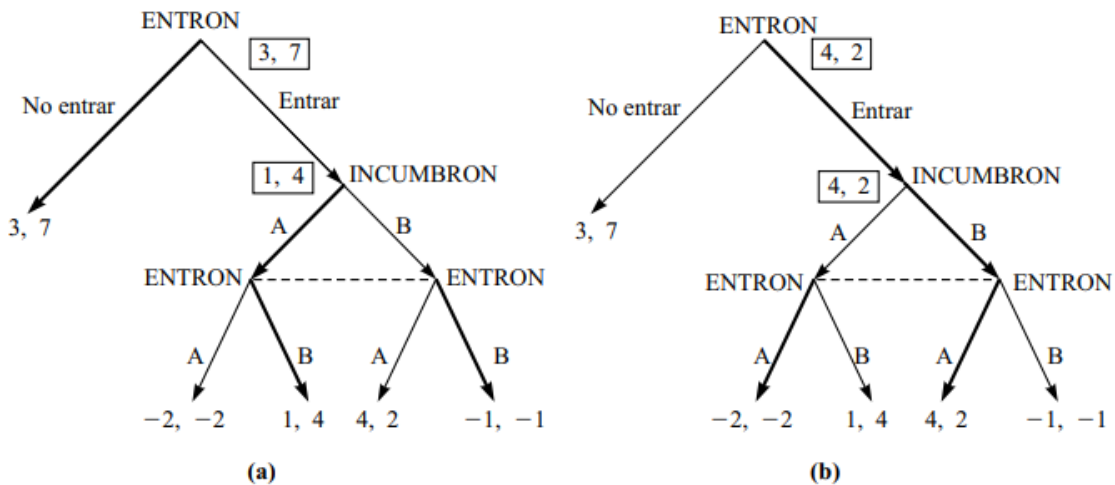
Fuente: Cerdá Et al. (2004)

Es decir, una vez hallados los EN del juego estático que inicia Incumbron, se sustituye el pago por su nodo, dando lugar a la decisión de Entron, la cuál sería cronológicamente anterior. En el árbol (a) se sustituye el subjuego por el EN (B, A) , mientras que en el árbol (b) se sustituye por el EN (A, B) . Hay que tener en cuenta que Entron desconoce qué EN de los dos se va a jugar en el juego simultáneo, por tanto, se lleva a cabo el proceso para cada posible resultado.

Si se jugara el EN (B, A) en el juego simultáneo (suceso cronológicamente posterior a la decisión primera de Entron), entonces tendría que elegir entre jugar *no entrar* y *entrar*. En este caso, elegiría *no entrar*, logrando así un pago de (3, 7). El EN perfecto en los subjuegos sería $(No\ entrar-B, A)$

En cambio, si se jugase el EN (A, B) , Entron se hallaría ante el árbol (b) y, por tanto, optaría por jugar *entrar*, consiguiendo un pago de 4 en lugar de un pago de 3. El EN perfecto en los subjuegos sería $(Entrar-A, B)$ Este proceso completo se muestra en forma extensiva en la figura 3.6.

Figura 3.6 Representación extensiva del juego de la disuasión aplicando el método de inducción hacia atrás generalizado



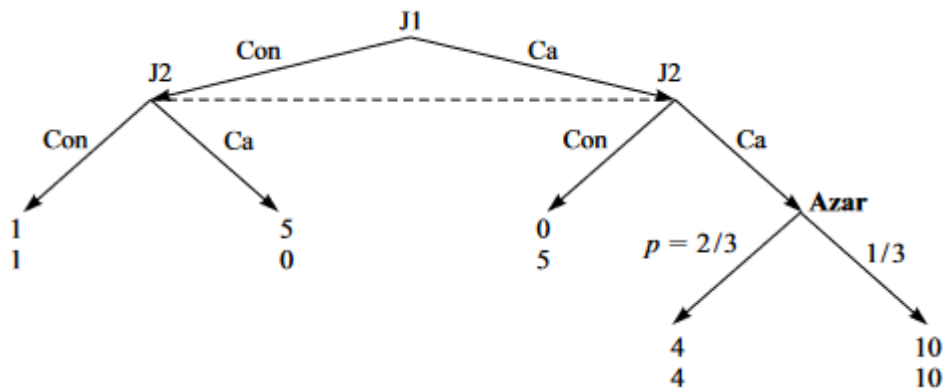
Fuente: Cerdá Et al. (2004)

Es importante tener en cuenta una vez más que el subjuego que inicia el nodo de decisión de Incumbron es un juego estático (simultáneo).

3.7 JUEGOS ESTÁTICOS CON INFORMACIÓN INCOMPLETA

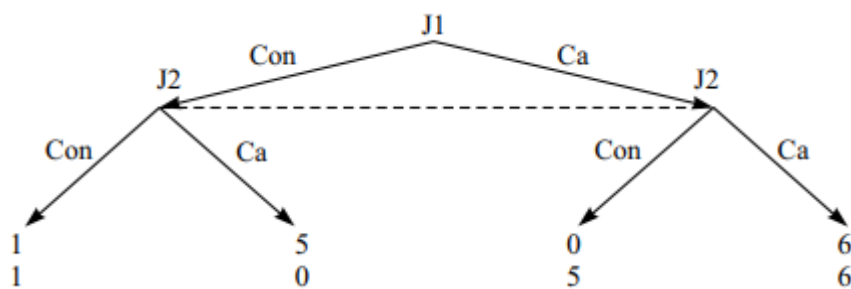
En este tipo de juegos se elimina un supuesto de los juegos estáticos con información completa, y es que ahora no toda la estructura del juego es de dominio público, por lo que es posible que un jugador desconozca pagos. Este tipo de juegos se asemeja más a la realidad de algunas situaciones como las de duopolio.

Una primera aproximación a este tipo de juegos es con la incorporación del azar a las tomas de decisiones. Es decir, existen una serie de pagos que no son ciertos, sino que dependen en cierta medida del azar. Se puede poner de ejemplo un dilema del prisionero en el cuál pueda o no haber falta de pruebas, en cuyo caso, si ambos presos (jugadores) deciden callar, es posible que reciban un pago u otro según si realmente existían o no evidencias.

Figura 3.7 Dilema del prisionero con información incompleta

Fuente: Cerdá Et al. (2004)

Si ambos deciden *confesar* reciben unos pagos de (1, 1). Si el primer jugador decide *confesar* y el segundo *callar*, reciben unos pagos de (5, 0) respectivamente. Si el primero decide *callar*, y el segundo *confesar*, unos pagos de (0, 5). Hasta este punto es el dilema del prisionero clásico. La diferencia radica en el nodo de decisión en el que el segundo jugador decide *callar* cuando el primero también jugó *callar*. Los presos desconocen si la policía tiene o no suficientes pruebas, pudiendo depender en cierta medida de que se delaten. Si ambos deciden *callar*, y efectivamente había suficientes pruebas ($p=2/3$) reciben un pago de (4, 4), pero si tienen buena suerte y hay insuficiencia de pruebas, ambos logran una ganancia de 10. Si los presos emplean la Esperanza de pagos asociada a (*Callar*, *Callar*) se puede eliminar el subjuego del azar, dando lugar a la siguiente representación.

Figura 3.8 Dilema del prisionero tras sustituir un nodo de decisión por azar

Fuente: Cerdá Et al. (2004)

Se llegaría a un EN perfecto en los subjuegos de (*Callar*, *Callar*), existiendo además dos EN (*Callar*, *Callar*) y (*Confesar*, *Confesar*), los mismos EN que encontrábamos en el juego estático con información completa.

De este tipo de juegos se ocupa la teoría de la decisión bayesiana, dado que uno o varios de los resultados de la elección de un jugador pueden depender de la naturaleza y, por tanto, del azar. Es decir, que, a los jugadores y a las acciones, hemos de añadir una serie

de “estados de la naturaleza”, esto es, variables no controlables por el decisor pero que influyen en los resultados. Ante los “estados de la naturaleza” el decisor (jugador) se puede encontrar de tres formas distintas: puede tener certidumbre ante ellos, de modo que tiene conocimiento perfecto de cómo se presentará la naturaleza; puede soportar riesgo, es decir, que conoce la distribución de probabilidad del fenómeno que condiciona el resultado; o puede hallarse en incertidumbre, que se corresponde con la ignorancia sobre las probabilidades del fenómeno.

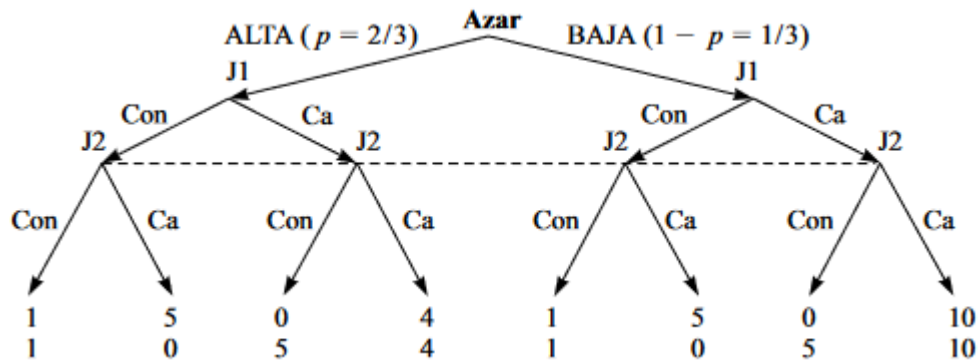
Según la propia teoría bayesiana el decisor siempre se encuentra en riesgo, por tanto, pudiendo asignar probabilidades.

Lo más relevante dentro de la decisión bayesiana es el Equilibrio Bayesiano de Nash, cuya aplicación se da en juegos estáticos con información incompleta donde alguno de los jugadores dispone de alguna información oculta para los demás, y cuyos pagos dependen en cierta medida de esa información. En el ejemplo inicial del duopolio, se tendría que tomar una decisión bayesiana si una empresa conoce con certeza los costes de producción propios, pero no los de la otra empresa.

Este equilibrio bayesiano, en la práctica, ha de ser un EN perfecto en los subjuegos que se mantenga como un EN perfecto en los subjuegos habitual en caso de que la información oculta (privada) desaparezca. A su vez, suponemos que esa información oculta o privada es atribuida por un jugador adicional imaginario (el azar) antes del juego, como nodo inicial (siguiendo el procedimiento de Harsanyi, como cita Teoría de Juegos (2004)) como se describe en la Figura 3.9.

En el siguiente juego representado en la Figura 3.9 se va a modificar el dilema del prisionero de la Figura 3.7 para incluir una circunstancia de azar al principio del juego, en lugar de al final. Es decir, el primer nodo decisorio será cuestión de azar. Además, el Jugador 1 conocerá con exactitud el resultado del azar, pero el Jugador 2 solo conocerá las probabilidades (además, el Jugador 2 sabe que el Jugador 1 conoce el resultado del azar).

Figura 3.9 Dilema del prisionero con información incompleto y Equilibrio bayesiano de Nash en representación extensiva



Fuente: Cerdá Et al. (2004)

La jugada de azar consiste en el lanzamiento de un dado. Si ha salido una puntuación mayor de 2 (3, 4, 5 o 6), entonces se considera una tirada *alta* (probabilidad de $2/3$). Sin embargo, si es de 1 o 2 (probabilidad de $1/3$) se considera una tirada *baja*. Por tanto, en función de si la tirada es *alta* o *baja* se llegará a un juego estático con pagos diferentes (el dilema del prisionero). Los dos “árboles” que nacen de la decisión de azar también podrían representarse de forma estratégica con el único cambio de que los pagos asociados a (*Callar, Callar*) serían (4, 4) si la tirada de azar es *alta* o (10, 10) si la tirada es *baja*.

Por tanto, dado que el Jugador 1 conoce el resultado del dado, sabe en qué juego estático están, pero el Jugador 2 no. Debido a esto, el Jugador 1 puede optar por cuatro perfiles estratégicos distintos, que serán de la siguiente forma (ejemplo): El Jugador 1 jugaría *callar* si el resultado del dado ha sido de dos o inferior, y jugaría *confesar* si la tirada ha sido de tres o superior. En cambio, el Jugador 2 no observa la jugada de azar, por tanto, solo elige entre *confesar* y *callar*, y debe estimar los pagos (emplear la esperanza matemática). Esto se ilustra de forma normal en la siguiente tabla.

Tabla 3.13 Dilema del prisionero con información incompleta y Equilibrio Bayesiano de Nash en representación estratégica

Dilema del prisionero con información incompleta		Jugador 2 (preso 2)	
		Confesar	Callar
Jugador 1 (preso 1)	Confesar-Confesar	1, 1	5, 0
	Confesar-Callar	2/3, 7/3	20/3, 10/3
	Callar-Confesar	1/3, 11/3	13/3, 8/3
	Callar-Callar	0, 5	6, 6

Fuente: Elaboración propia a partir de Cerdá Et al. (2004)

Al final, en este ejemplo concreto, se hallan dos EN consistentes en (*Confesar-Confesar*, *Confesar*) y (*Callar-Callar*, *Callar*). El resultado de este juego tal y como se ha construido es el ya observado en el dilema del prisionero con información completa, sin embargo, alterando las probabilidades, se pueden alcanzar soluciones diferentes.

3.8 JUEGOS DINÁMICOS CON INFORMACIÓN INCOMPLETA

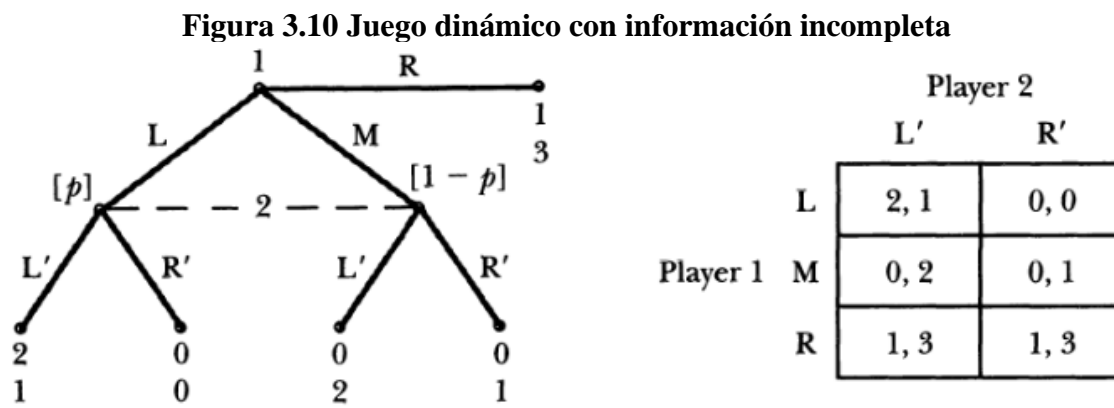
Este tipo de juegos están vinculados a la existencia de información privada que motiva a los jugadores a intentar comunicar información (auténtica o falsa) a otros juegos o hacer intentos de conseguir la información oculta. El modelo más sencillo es el del juego de la señalización. En dicho modelo existen dos jugadores, uno con información privada y otro sin ella. El juego se desarrolla en dos etapas, una primera etapa en la cuál el primer jugador da información, da una señal, y una segunda etapa en la que el segundo jugador, que acaba de ver la señal, responde. Un ejemplo habitual es el de la señal de la educación a la hora de buscar empleo (Gibbons, 1997).

Una vez más, este tipo de juegos se pueden conectar con el dilema del prisionero y el apartado de la optimalidad de Pareto, ya que según cita Gibbons (1997) algunos autores como (Kreps, Milgrom, Roberts y Wilson en 1982) mostraron que un dilema del prisionero repetido de forma finita en el cual, antes del juego, se comparte cierta información privada (se daba una señal) puede conducir a un equilibrio cooperativo óptimo en el sentido de Pareto.

Aparece el concepto de Equilibrio Bayesiano perfecto. En este tipo de equilibrio, las creencias de los jugadores ganan importancia, siendo tan relevantes como las propias estrategias. Es decir, teniendo en cuenta que el juego no es dominio público, el equilibrio

ya no depende de qué perfil estratégico se elige, sino también de qué pensamientos tiene cada jugador cuando le toca actuar. En este punto, no deben confundirse las creencias con algo abstracto, sino que deben relacionarse con las intuiciones vinculadas a las amenazas creíbles y no creíbles ya explicadas. Es decir, los pensamientos y creencias de los jugadores han de ser razonables (Gibbons, 1997).

Por tanto, se trata de un equilibrio bayesiano donde cada jugador recibe una serie de señales de los demás jugadores, y dicho conocimiento de la señal permite calcular ciertas probabilidades en la búsqueda de la optimización de los pagos respecto a la actuación del resto de jugadores. Por tanto, deben ser EN perfectos en los subjuegos igual que en los juegos dinámicos con información completa, pero se añade además un componente de incertidumbre para algunos jugadores (Cerdá et al., 2004). En la siguiente figura se representa un juego dinámico con información incompleta en representación extensiva y estratégica.



En este juego tenemos dos jugadores, el primero en jugar tiene tres opciones: dos que continúan el juego (L y M), y una tercera opción (R) que finaliza el juego con unos pagos asociados de $(1, 3)$, provocando que el segundo jugador no tenga que tomar ninguna decisión. Si el jugador 1 decide jugar L o M , el jugador 2 recibe la señal de que el jugador 1 no ha jugado R , pero desconoce si ha jugado L o M . Entonces, debe elegir entre L' y R' . Para el jugador 2, el jugador 1 actúa en base a probabilidades $(p$ y $1-p)$. Siguiendo el proceso de solución habitual encontramos dos EN, (L, L') y (R, R') . No obstante, el EN (R, R') se basa en una amenaza no creíble.

Tal y como se ha explicado, si el jugador 1 elige jugar R , el juego termina. Por tanto, el jugador 2 no podrá jugar R' , de modo que debe especular sobre si el jugador 1 ha elegido L o M . Teniendo en cuenta que el jugador 1 sí conoce los pagos, y que se estaría

enfrentando a un pago de 2 asociado a (L, L') o a un pago de 0 en caso de jugar (L, R') , y que el pago será de 0 independientemente de lo que juegue el jugador 2 si toma la elección de jugar M , la creencia razonable del jugador 2 es que el jugador 1 juega L' con probabilidad $p = 1$. De modo que el equilibrio Bayesiano perfecto es (L, L') .

A continuación, se explican los juegos de señalización, los cuáles también tienen gran aplicación en infinidad de circunstancias cotidianas, desde la búsqueda de empleo a la adquisición de un vehículo de segunda mano.

Son juegos en los que habitualmente existen dos jugadores. En ellos, uno de los jugadores dispone de una información que el otro desconoce, y que querría que este conociera. Sin embargo, las palabras no bastan, y es necesario demostrar la información a través de los actos (señales) (Cerdá et al., 2004). Un ejemplo simple es el de la educación, que se supone demuestra la capacidad y la productividad de un trabajador. Dicha educación representa una elección del trabajador, quien ha soportado un coste por estudiar (de oportunidad, económico o de otra clase) y se supone que es menos costoso para aquellos buenos trabajadores (menos años estudiando, mayor facilidad, etc.). Por tanto, la educación se configura como una buena señal para el mercado de trabajo y da a entender al contratante el posible nivel de desempeño del trabajador.

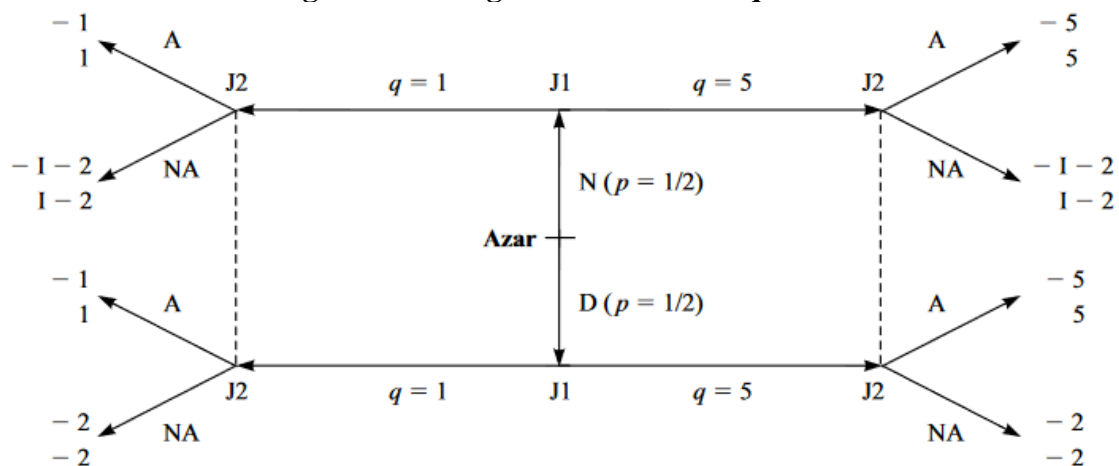
Otro ejemplo habitual, descrito en el libro de Teoría de Juegos (2004) es el de la venta de coches usados, que origina la conocida como “paradoja de los cacharros”. Un jugador desea vender su coche usado, y solo él conoce el estado real en el que está. El otro jugador desconoce dicho estado. La señal inicial es el precio. Presuntamente, un precio alto indica que el coche es de calidad, dado que el jugador que vende desea recibir un precio acorde al valor del coche. Sin embargo, el jugador que desea comprar desconoce si está pagando un sobreprecio. Por otro lado, un precio demasiado bajo puede indicar que el coche es una chatarra. En un mercado amplio, donde se mezclan coches en buen y mal estado, los vendedores que deseen deshacerse de un cacharro lo pondrán a un precio mayor, aprovechando que los compradores desconocen si está en buen o mal estado, y aquellos vendedores que deseen enajenar un buen coche, se verán forzados a rebajarlo, por el temor de los compradores a que sea un mal coche.

Como es lógico, los vendedores de buenos coches decidirán retirarlos del mercado, porque no quieren recibir menos de lo que es justo, y los que vendan malos coches, intentarán vender por todos los medios. Esto conducirá a la conocida como paradoja de los cacharros, donde el mercado de segunda mano estará invadido por vehículos de mala

calidad. Se llega a esta situación debido a que el precio no se consolida como una buena señal.

La única solución a esta paradoja es la de introducir una señal que resulte costosa, pero menos costosa para el mejor producto. Por ejemplo, se puede incluir una garantía por un año. El jugador que vende se hace cargo de los gastos si a lo largo de un año el vehículo tiene una avería. Si el coche es bueno, no tendrá averías habitualmente. Sin embargo, si es de mala calidad, supondrá un coste más elevado para el vendedor, ya que el coche al ser un cacharro dará más problemas. A continuación, en la figura 3.10 se va a exponer el juego de señalización de la querrela. En dicho juego, existe un demandante (Jugador 2) y un demandado (Jugador 1). El Jugador 1 puede ofrecer un trato al Jugador 2 a cambio de no ir a juicio (juicio que ocasiona una pérdida de -2 a cada jugador), pudiéndole ofrecer una suma de 1.000 u.m. o de 5.000 u.m. ($q = 1$ y $q = 5$). El Jugador 2 puede *aceptar* o *no aceptar* el trato. Los pagos para cada jugador dependen, por un lado, de la compensación que ofrezca el Jugador 1, y, por otro lado, de si dicho jugador es *diligente* o *negligente*, además de si acaban en juicio o no (que el Jugador 2 opte por jugar o no jugar). Cabe destacar que el Jugador 1 conoce si él *diligente* o *negligente*, pero el Jugador 2 solo conoce las probabilidades.

Figura 3.11 Juego de señales de la querrela



Fuente: Cerdá Et al. (2004)

Si el Jugador 1 (el demandado) ofrece una compensación de $q = 1$, el Jugador 2 (el demandante) tiene dos opciones (*Aceptar* y *No aceptar*), sin embargo, los pagos asociados a dichas opciones dependen del azar (50% de que sea *Negligente* o *Diligente*). Por tanto, en caso de que el Jugador 1 sea *negligente*, el Jugador 2 puede lograr un pago de 1 si *acepta*, y un pago de 3 ($5 - 2$, que es la indemnización menos los costes del juicio) si *no*

acepta (dado que el Jugador 1 será declarado culpable y habrá de pagar una indemnización). Sin embargo, si el Jugador 1 fuera *diligente*, el Jugador 2 lograría un pago de 1 si juega *aceptar* y de -2 si juega *no aceptar*. Es decir, que existe un pago cierto de 1 para el Jugador 2 si juega *aceptar*, y dos pagos inciertos si juega *no aceptar*, lo que obliga a calcular la esperanza, que resulta ser $\frac{1}{2}$. En este caso, la estrategia óptima para el Jugador 2 es jugar *aceptar*.

Aplicando el mismo análisis a la situación en la que el Jugador 1 ofrece una compensación de $q = 5$ al Jugador 2, llegamos a la misma conclusión, y es que el pago esperado (cierto, en este caso) asociado a la jugada *aceptar* es superior al asociado a *no aceptar*, por tanto, *aceptar* se configura como la jugada óptima para el Jugador 2.

Por otro lado, el Jugador 2 ha de elegir entre proponer $q = 1$ y $q = 5$. Dicho Jugador, conoce si es *negligente* o *diligente*. Si ofrece $q = 5$ siendo *negligente* y $q = 1$ siendo *diligente*, el Jugador 2 jugará *aceptar* tras cualquier oferta. Por tanto, esta estrategia no es óptima para el Jugador 2. Si ofrece $q = 1$ cuando es *negligente* y $q = 5$ cuando es *diligente*, el Jugador 1 jugará *no aceptar* a $q = 1$ y *aceptar* a $q = 5$, por tanto, tampoco es respuesta óptima para el Jugador 2.

Por tanto, podemos intuir que el juego se desarrollará con el Jugador 1 ofreciendo $q = 1$ y el Jugador 2 optando por *aceptar*.

3.9 JUEGOS REPETIDOS

Se trata de una serie de juegos dinámicos particulares, dado que se repite un determinado número de veces un juego concreto, distribuyendo ganancias y haciendo de dominio público los resultados cada vez que se juega una etapa (se termina un juego individual de la sucesión) (Cerdá et al., 2004). Un juego repetido de forma infinita sin descontar (posteriormente se profundizará en este aspecto) se llama superjuego (Rasmusen, 1999). No se trata de jugar una y otra vez el mismo juego de forma aislada e ir acumulando resultados, sino de juegos que están interconectados e influyen entre sí, dado que las decisiones en juegos posteriores se verán influidas por las tomadas en los juegos previos, y no se decidirá jugar igual el primer juego, que el último (de haberlo).

Un ejemplo directo es el de las empresas en un duopolio que fijan precios. Si bien es difícil que en la vida real el dilema del prisionero se repita contando con los mismos jugadores más de una vez, es muy probable que las empresas se vean constantemente en la tesitura de tener que modificar precios, como podrían ser las compañías de telefonía

móvil (Pindyck y Rubinfeld, 2009). E incluso se pueden encontrar ejemplos más mundanos, como el de dos amigos que quedan para comer los fines de semana y que, compartiendo cuenta, deciden si pedir o no un postre caro cuando ya están muy llenos.

Es relevante aclarar que los juegos repetidos implican que se juega una y otra vez el mismo juego, con la misma estructura, pero conociendo qué ha sucedido en los juegos previos. Se trata de un juego dinámico, de modo que se emplea el ya explorado EN perfecto en los subjuegos. Por tanto, también es aplicable la inducción hacia atrás generalizada, y podemos afirmar que en el último de los juegos se llegará a un EN.

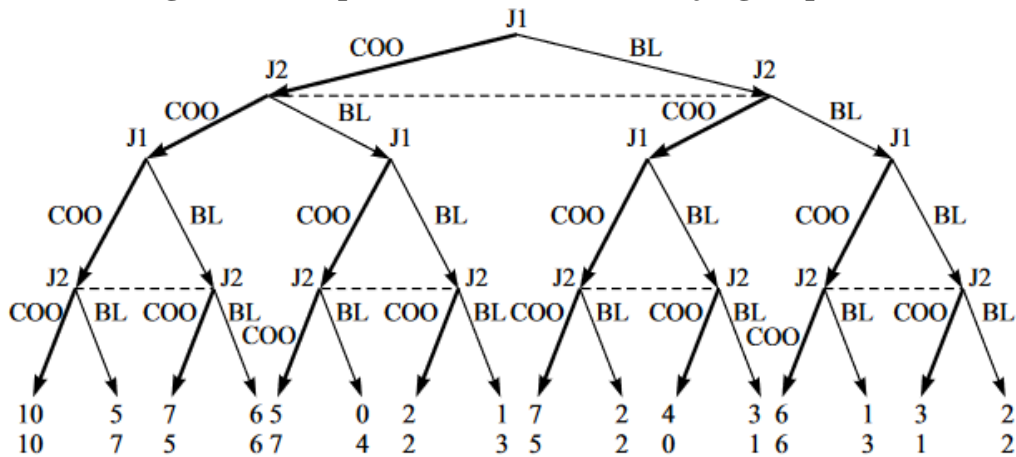
Para empezar, dado que los juegos repetidos suelen espaciarse en el tiempo, hay que tener en cuenta que el valor que los jugadores asignan a los pagos difiere en función del momento del tiempo en que vayan a recibirse. Esto tiene importantes implicaciones a la hora de determinar las preferencias de los jugadores, ya que existirán condicionantes vinculados a la preferencia de liquidez y a la incertidumbre sobre el futuro. Habitualmente, se valora en mayor medida el momento presente que el futuro, por tanto, es necesaria la aplicación de un factor de descuento para hallar el valor presente descontado de los pagos de las etapas futuras. Las preferencias de los jugadores se pueden unificar con distintos factores de descuento. Cabe la posibilidad de encontrar casos extremos de valoración nula del futuro (máxima preferencia por la liquidez) y de la valoración nula del presente (valorar los pagos como una renta perpetua). En la Tabla 3.14 se representa un juego repetido 2 veces de forma estratégica y en la Figura 3.11 de forma extensiva.

Tabla 3.14 Representación normal de juego repetido

Juego de la caza		Jugador 2 (cazador 2)	
		Cooperar	Buscar liebre
Jugador 1 (cazador 1)	Cooperar	5, 5	0, 2
	Buscar liebre	2, 0	1, 1

Fuente: Elaboración propia a partir de Cerdá Et al. (2004)

Figura 3.12 Representación extensiva de juego repetido



Ante un juego repetido dos veces consistente en *cooperar* para cazar un ciervo o *buscar una liebre* se observa cómo los jugadores pueden tomar diversas decisiones. Atendiendo a la representación normal del juego existen dos EN, (*Cooperar, Cooperar*) y (*Buscar liebre, Buscar liebre*). Dado que se repiten dos veces, los pagos finales obtenidos por cada jugador, respectivamente, serían (10, 10) o (2, 2) si en cada subjuego toman decisiones en función de sus EN.

Atendiendo al juego representado en forma extensiva, sin embargo, aplicando la solución recursiva (inducción hacia atrás generalizada) se llega a la conclusión de que el EN perfecto en los subjuegos será (*Cooperar, Cooperar*) para todos los subjuegos.

En el caso de los juegos repetidos de forma finita, si el juego tiene un único EN, entonces el juego repetido tendrá un único EN perfecto en los subjuegos, que consiste en que cada participante juegue su única estrategia óptima. Un ejemplo es el dilema del prisionero:

Tabla 3.15 Representación normal de la primera etapa del dilema del prisionero como juego repetido

Dilema del prisionero en primera etapa en juego repetido 2 veces		Jugador 2 (preso 2)	
		Callar	Confesar
Jugador 1 (preso 1)	Callar	5, 5	1, 6
	Confesar	6, 1	2, 2

Fuente: Elaboración propia a partir de Cerdá Et al. (2004)

Suponiendo que los jugadores vayan a actuar de forma racional alcanzando un EN en las dos etapas, actualizando los pagos de la segunda etapa se observa la Tabla 3.16 como

representación de la primera etapa del juego, donde al pago (1, 1) vinculado a la estrategia (*Confesar, Confesar*) se adiciona para cada jugador el pago vinculado a la segunda etapa del juego (1, 1), dando lugar a que en el juego actualizado a la primera etapa el pago sea de (2, 2). En consecuencia, el único EN perfecto en los subjuegos será *confesar* en cada etapa. Se expresa de la siguiente manera: ((*Confesar, Confesar*), (*Confesar, Confesar*)). Hay que tener en cuenta a la hora de calcular los EN perfectos en los subjuegos que un juego de etapa puede tener más de un EN. Esto puede dar lugar a situaciones curiosas con un cierto grado de coordinación basado en la confianza, en ningún caso en acuerdos vinculantes.

Tabla 3.16 Juego repetido con dos EN

Juego de posiciones repetido		Jugador 2	
		Izquierda (I)	Derecha (D)
Jugador 1	Arriba (A)	4, 4	1, 1
	Abajo (B)	3, 2	1, 2

Fuente: Elaboración propia a partir de Cerdá Et al. (2004)

En el caso del juego descrito de forma normal en la Tabla 3.16, un posible EN perfecto en los subjuegos sería el siguiente:

El jugador 1 jugará *B* en la primera etapa y jugará *A* en la segunda si en la primera etapa el jugador 2 ha jugado *I*, en caso contrario, jugará *B*.

El jugador 2 jugará *I* en la primera etapa, y jugará *I* en la segunda etapa si en la primera el jugador 1 jugó *B*, jugando *D* en cualquier otro caso.

Por tanto, si el resultado de la primera etapa es (*B, I*) en la segunda etapa se jugará (*A, I*), y, si no, se jugará (*B, D*) en la última etapa.

Finalmente, lo que se alcanza es un EN en el juego en su conjunto, sumando todas las ganancias de todas las etapas. Esta coordinación se sustenta sobre una promesa creíble de colaborar en (*A, I*) bajo la amenaza de acabar en (*B, D*) si alguno incumple el trato.

Existe también el caso de los juegos repetidos de forma infinita. Retomando los juegos estáticos en los que el resultado deseable no suele coincidir con el EN por las altas posibilidades de fraudes (como el dilema del prisionero o la fijación de precios en euopolio), se le puede dar otro enfoque si lo planteamos con un juego repetido infinitas veces. ¿Sería posible llegar a una situación de colaboración voluntaria más beneficiosa para los jugadores, aunque el EN en cada etapa les indique que lo óptimo es el egoísmo?

Si se repite un número finito de veces no, sin embargo, si incorporamos la dimensión infinita sí (Rasmusen, 1999).

Esta intuición nos lleva a las “estrategias de gatillo” o “perfil de estrategias de disparador” (Cerdá et al., 2004). Dichas estrategias se configuran de la siguiente manera: en una etapa determinada, cada jugador elige la misma acción que jugó el otro participante en la etapa anterior. Retomando una vez más el dilema del prisionero, si en la etapa anterior el Jugador 1 jugó *callar*, en la etapa presente el Jugador 2 juega *callar*.

Que ambos jugadores elijan callar es un EN, pero no es un EN perfecto en los subjuegos, dado que si el Jugador 2 sabe que el Jugador 1 va a jugar *callar* (porque están colaborando) está incentivado a jugar *confesar*, para obtener un pago superior en esa etapa que si *callase*. Sin embargo, en la siguiente etapa el Jugador 1, traicionado, elegiría *confesar* también, y acabarían en el otro posible EN, que no es el deseable. Existirán consecuencias para esa traición, por tanto, el modo de jugar podría resumirse de la manera siguiente: el Jugador 2 jugará siempre *callar* mientras el Jugador 1 también eligiese *callar* en la etapa anterior. En el momento en el que el Jugador 1 juegue cualquier cosa distinta de *callar*, el Jugador 2 jamás volverá a jugar *callar*, encallando ambos en un EN no deseable.

Adicionalmente, otra variante sería la de “ojo por ojo”, que funciona de forma similar, pero incorporando un ciclo de arrepentimiento tras una traición que acaba devolviendo a la pareja de jugadores al EN deseable tras una serie de etapas fuera de un EN (Cerdá et al., 2004). Inclusive, se pueden explorar modelos como el de Hirshleifer (1987) (como se referencia en Rasmusen, (1999)) que incluyen sentimientos (basados en la utilidad) como los de venganza y gratitud.

Cabe destacar, además, que la colaboración o la traición en el dilema del prisionero repetidas infinitas veces no solo depende de cuál sea el óptimo deseable de forma objetiva, sino que depende de la valoración subjetiva de los pagos presentes y futuros por parte de los jugadores. Esto significa que aquellos jugadores que valoren en mayor medida los pagos presentes que los futuros, tendrán mayores inclinaciones a la traición por un pago mayor en el presente, que aquellos que valoren en mayor medida los pagos futuros. De cara a la aplicación del experimento en circunstancias reales, es importante tener en cuenta ese perfil subjetivo de los participantes.

Una conclusión que se puede alcanzar al respecto está vinculada a la de la optimalidad paretiana una vez más, y es que, si ambos jugadores logran cooperar en cada juego, se alcanza una situación a lo largo de todos los juegos más conveniente socialmente, para ambos jugadores.

4. TEORÍA ECONÓMICA DEL MEDIO AMBIENTE

4.1 INTRODUCCIÓN A LA TEORÍA ECONÓMICA DEL MEDIO AMBIENTE

La RAE define el medio ambiente como el conjunto de circunstancias exteriores a un ser vivo (Real Academia Española, s. f.). Sin embargo, esta definición resulta muy vaga para el propósito del presente trabajo, dado que se ha de enmarcar el medio ambiente dentro de la teoría económica. La mejor forma de definir el concepto es a través de la teoría de los bienes públicos y, en este caso concreto, los bienes públicos globales. Esta teoría ocupará el segundo apartado de esta sección del trabajo dedicada al medio ambiente. Adelantando el contenido, podemos hablar de que el medio ambiente es algo compartido entre todos los seres vivos. Todos pueden disfrutar de él e influir en él de alguna manera, y no hay posibilidad de privar a un individuo de su “uso”. Estas nociones se desarrollarán en la forma de no rivalidad y no exclusión en el consumo que se explicarán en el mencionado segundo punto. En un tercer punto se abordará la teoría de las externalidades y su estrecha relación con los bienes públicos. Por último, se explicará “la tragedia de los comunes” como un caso concreto de bien público y los problemas que pueden aparecer.

4.2 TEORÍA DE LOS BIENES PÚBLICOS

Un primer acercamiento a los bienes públicos puros sería el de que se trata de un bien cuyo uso no es conveniente racionar, y cuyo uso o consumo individual por parte de una persona, no impide el consumo simultáneo a otra persona (Ramis Olivos, 2013).

Otro acercamiento podría ser a través de la teoría de los fallos del mercado. Esta especial clase de bienes se pueden considerar como un fallo de mercado, dado que habitualmente son bienes muy valorados por una gran mayoría de consumidores y que, sin embargo, no son producidos por el mercado en la cantidad óptima o demandada. Esto se debe a las características que definen esta particular clase de bienes. En primer lugar, se trata de un bien que, una vez producido (o una vez existe, dado que algunos no pueden producirse), es casi imposible evitar que sea consumido por alguien no deseado por parte del productor (Pindyck y Rubinfeld, 2009). Es decir, es muy complicado excluir de su consumo a alguien. Por tanto, dado que el mercado es un mecanismo de exclusión mediante precios, estos bienes quedan excluidos del sistema de precios. Un ejemplo es un faro en el litoral. Una vez construido, no es posible evitar que un barco no se beneficie de su servicio. Es imposible apagar el faro de forma que solo lo vean barcos que hayan pagado una cuota.

En segundo lugar, una unidad del bien público puede ser consumida a la vez por más de un individuo, no existe una rivalidad en el consumo del bien. Un ejemplo de bien rival en el consumo es una camisa, porque un individuo no puede ponerse una camisa que ya lleva puesta otra persona a la vez. No pueden ponérsela los dos a la vez. En cambio, todos los barcos pueden beneficiarse del faro a la vez sin impedir por ello el consumo de otros barcos (Pindyck y Rubinfeld, 2009, p. 95).

Una tercera vía de abordar este nuevo objeto es a través del primer nombre dado por el economista Paul A. Samuelson, dado que los define en su obra como bienes de consumo colectivo. Esta expresión está cargada de significado, dado que implica que son bienes destinados a que sean disfrutados por un grupo de gente, por una comunidad, como puede ser el monte vecinal típico de los pueblos de España o la calle y el alumbrado de aceras de un barrio. El consumo del bien por parte de un individuo no provoca que otro individuo no pueda disfrutar, o lo haga en menor medida, del mismo bien (aunque cada uno disfrutará del bien en función de sus preferencias y su función de utilidad personal) (Samuelson, 1954).

Por tanto, las características principales de los bienes públicos es que son **no-rivales en el consumo** y son **no-excluibles en el consumo** (Benegas Lynch, s. f.). Además, la no rivalidad en el consumo tiene una implicación económica directa: el coste marginal del bien no se incrementa cuando se incrementa el número de consumidores. Se puede seguir con el ejemplo del faro, o incluso de la defensa nacional. Una vez un gobierno ha establecido un sistema de defensa nacional, todos los ciudadanos residentes de un país se benefician de ello, no se puede excluir a ninguno, y el hecho de que se incremente el número de ciudadanos no incrementa los costes de la defensa del país.

Por todo ello, si se confía en el mercado, no se logra una provisión eficiente del bien, ya que es muy difícil que se rentabilice su producción. Entonces, se hace necesaria otra forma de provisión de bienes, y esto es a través de mecanismos públicos, dado que todos los mecanismos privados acaban sufriendo el problema de los free-riders (que se va a desarrollar a continuación). Además, el logro de una provisión eficiente se basa en la optimalidad paretiana, según la cual ningún consumidor debería poder mejorar su bienestar sin empeorar el de otro (Pindyck y Rubinfeld, 2009).

4.3 LA PROVISIÓN EFICIENTE DE LOS BIENES PÚBLICOS PUROS

4.3.1 Bienes públicos generales

De forma habitual, en la mayoría del mundo, se suele confiar en los mercados la provisión de los bienes demandados en una economía. Por tanto, para explicar cómo se alcanza la provisión óptima de bienes públicos puros para una sociedad, primero se ha de descartar la provisión de estos a través del mercado. Ello se vincula, como ya se adelantó en el primer apartado de esta sección, a la imposibilidad de aplicar el principio de exclusión mediante precios a esta clase de bienes. Esta imposibilidad puede darse por varias razones que se explican mejor a través de ejemplos. Ante el lanzamiento de fuegos artificiales, es técnicamente imposible que una vez lanzados, cualquier alrededor pueda verlos. Ante una calle peatonal, como puede ser la calle Ancha de León (España), se podría decidir poner peajes en cada extremo y cobrar a los ciudadanos por pasear, sin embargo, el coste político y social sería demasiado alto (los ciudadanos, por el momento, no aceptarían de ninguna forma tal medida), por lo que su aplicación resulta imposible. Por tanto, la imposibilidad puede ser por razones técnicas, políticas, históricas, sociales, culturales... Algunas son razones más fuertes o permanentes que otras, pero todas tienen las mismas consecuencias: no se puede excluir mediante precios los bienes públicos (García Arias, 2004). Como consecuencia, sin precios, el mercado no tiene aplicación. Es un fallo del mercado, ya que directamente no es necesario excluir a nadie, porque tampoco existe rivalidad en el consumo.

Por tanto, todavía en el ámbito privado, las comunidades que requieran de estos bienes públicos pueden optar por organizarse para lograr una provisión del bien que satisfaga sus necesidades. Esto puede ejemplificarse con un bien público impuro como es la protección contra el fuego materializada en forma de parque de bomberos. Se supone la existencia de una comunidad que tiene la necesidad de protección contra el fuego. Dicha protección es un bien público impuro, dado que puede sufrir de saturación, esto es que bajo ciertas condiciones el bien sí sea rival en el consumo. Si se produce un incendio no pasa nada, pero si se producen varios incendios a la vez en varios puntos, el servicio puede saturarse o congestionarse. Por otro lado, incluir un vecino más o menos que requiera de protección contra el fuego en la comunidad no tiene consecuencias sobre el coste marginal del servicio, y tampoco se puede excluir a nadie porque los incendios pueden extenderse si no se apagan.

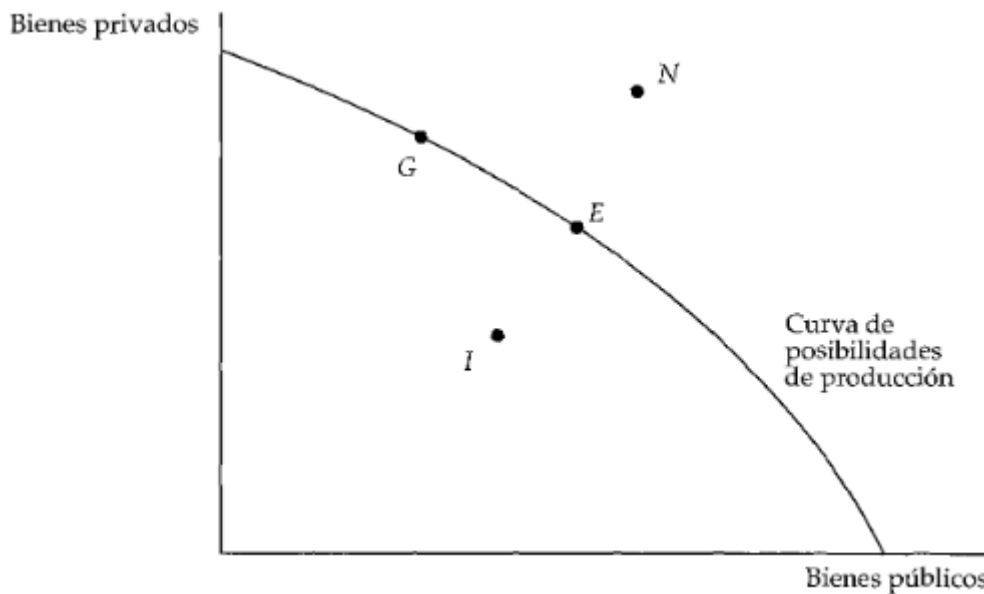
De modo que una comunidad se pone de acuerdo para financiar colectivamente y de forma voluntaria un parque de bomberos, todos se comprometen a realizar una aportación de acuerdo a su necesidad (valoración subjetiva) de la protección contra incendios (Stiglitz, 2000, p. 155). Sin embargo, existen dos problemas: primero, los individuos pueden no revelar sus verdaderas necesidades (sus funciones de utilidad) para realizar una aportación menor; y, segundo, esto puede llegar al extremo de que ciertos individuos se nieguen a pagar nada, ya que, aunque se incendie su casa, si la comunidad no quiere que el fuego se extienda a otra casa que sí ha pagado, se ven obligados a apagar el fuego. Estos individuos se conocen como *free-riders*, polizones en español (o gorriones en un lenguaje más vulgar). Como la protección contra incendios es un bien que produce efectos para todos sin poder excluir a nadie, los polizones se aprovechan de ello. Sin embargo, como son bienes que o se producen para todos o no se producen, muchos otros individuos se convierten también en *free-riders*, y el resultado acaba siendo una provisión ineficiente del bien. Los miembros de la comunidad prefieren comprar un extintor para su casa (que ante incendios graves no hará nada, por tanto, es un nivel ineficiente de provisión) antes que financiar un parque de bomberos del que se aprovecharán gran cantidad de gorriones (Benegas Lynch, s. f.).

El resultado es que la comunidad está pobremente protegida contra el fuego, no se alcanza la provisión óptima, porque existen suficientes incentivos para defraudar por parte de los polizones. Esto es así porque no existe un mecanismo coercitivo que obligue a pagar a todos los individuos que se beneficiarían del bien. El mecanismo coercitivo que se concibe entonces para asegurar la provisión eficiente es el sector público (en la mayoría de los casos, ya que, como afirma Elinor Ostrom, en algunos casos que se cumplen ciertas características los que mejor pueden gestionar un recurso común son los propios implicados) (Ramis Olivos, 2013).

El sector público se define como un ente, una institución, cuya dirección es elegida democráticamente (representa la voluntad colectiva) y que posee derechos de coerción, es decir, puede obligar al pago de impuestos ante la amenaza creíble de un castigo (que puede ser una expropiación). Una vez concebido este sector público, ha de razonar cuál es la cantidad óptima de bienes públicos que son necesarios, es decir, aquella cantidad que permite alcanzar un óptimo de Pareto en el que no puede mejorar el bienestar de ningún individuo sin empeorar el de otro. Pero, hay que tener en cuenta que existen importantes restricciones en la producción, ya que en economía los recursos son escasos y las necesidades ilimitadas. Para poder determinar la cantidad óptima de bienes públicos

producida, también es necesario determinar la cantidad óptima de bienes privados, dado que su producción es rival. Esta relación se ilustra en la Figura 4.1 con la curva o frontera de posibilidades de producción.

Figura 4.1 Curva de posibilidades de producción entre bienes públicos y bienes privados



Fuente: Stiglitz (2000)

Los puntos N e I quedan automáticamente descartados por ser imposible técnicamente uno e ineficiente el otro, respectivamente. Por otro lado, los puntos G y E son posibles. En el punto G la sociedad disfruta de una mayor cantidad de bienes privados que de bienes públicos, y en el punto E se da una producción equilibrada entre sendos tipos de bienes. Ahora se debe hallar el punto óptimo de la curva, la combinación de bienes públicos y privados que maximice la utilidad colectiva.

Ahora, la condición de provisión eficiente de los bienes públicos consiste en que el sumatorio de relaciones marginales de sustitución (RMS) de todos los individuos de la comunidad se iguale con la relación marginal de transformación (RMT).

La RMS de bienes públicos por privados indica la cantidad de bien privado a la que un individuo renunciaría a cambio de una unidad adicional de bien público, es decir, mide la preferencia, ya que es el cociente de utilidades marginales.

La RMT indica la cantidad de bien privado a la que debe renunciarse realmente para obtener una unidad adicional de bien público, es el cociente de los costes marginales de producción (no confundir el incremento de coste marginal de producir una unidad

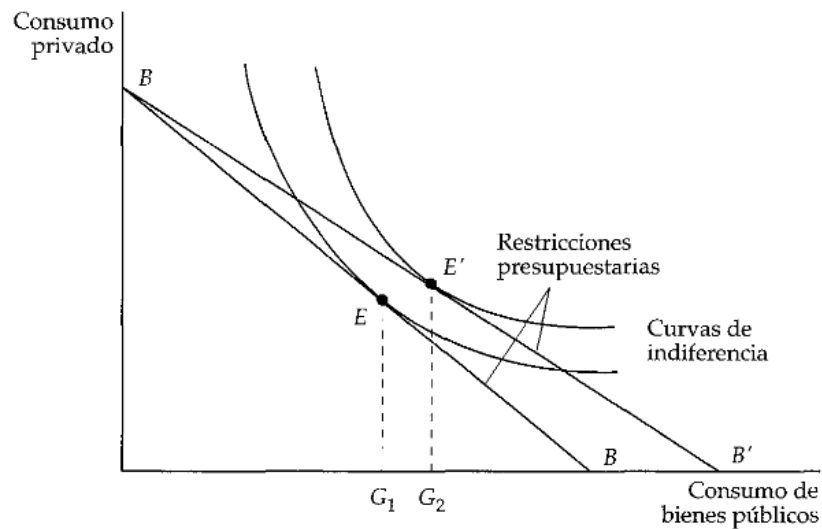
adicional, al coste marginal adicional por el incremento del número de consumidores) (Stiglitz, 2000).

Por tanto, lo óptimo es que coincida la cantidad de bien privado a la que los individuos están dispuestos a renunciar con la cantidad que efectivamente es necesario que renuncien. Es decir, que la RMS se iguale a la RMT.

De modo que, una vez que se ha calculado cuál es la provisión eficiente del bien, es necesario determinar cómo se va a financiar. Lógicamente, dado que es el sector público y tiene poder coercitivo, lo llevará a cabo a través de impuestos, pero estos impuestos deben idearse de tal forma que sean justos y eficientes, procurando gravar a cada individuo en la medida que realmente se beneficie del bien público. Para esta tarea se idean curvas de pseudo-demanda, modelizando cuánto estarían dispuestos a pagar los individuos a cambio de una unidad adicional del bien. Por tanto, se desciende hasta un nivel individual de consumo. Si por cada u.m. de gasto público, un individuo debe pagar un precio en impuestos p , considerando C como consumo de bienes privados, G como cantidad de bienes públicos suministrados e Y como la renta del individuo, tenemos que su restricción presupuestaria será la siguiente:

$$C + pG = Y$$

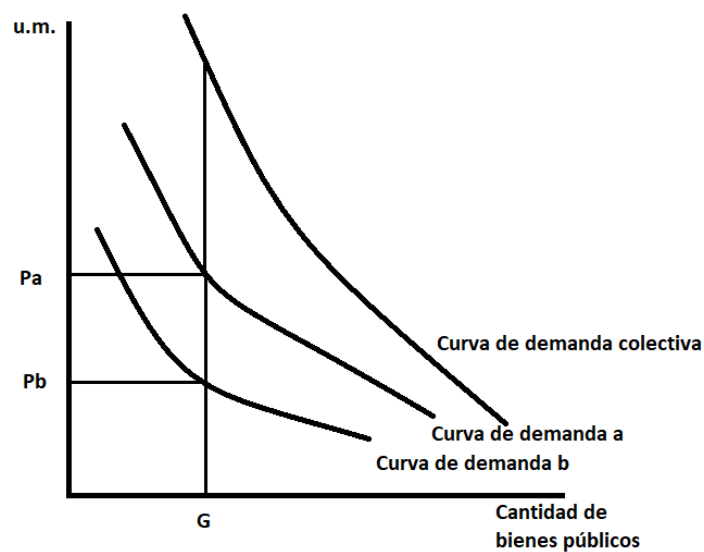
Gráficamente, representa las combinaciones de bienes públicos y privados que el consumidor puede adquirir dada su renta. Por otro lado, el consumidor tendrá una función de utilidad que tomará la forma de curvas de indiferencia entre bienes públicos y privados, cuya pendiente en cada punto será la RMS. Dado que se supone que los consumidores son racionales, procurarán maximizar su utilidad, esto es, gráficamente, la tangencia entre la restricción presupuestaria y su curva de utilidad más alejada del origen de coordenadas. (Stiglitz, 2000, p. 164).

Figura 4.2 Curvas de utilidad y restricciones presupuestarias de un consumidor individual

Fuente: Stiglitz (2000)

El punto E se corresponde con dicha tangencia, y G_1 será el nivel de bien público que el individuo desea consumir, dado que se encuentra en el punto más alejado del eje de ordenadas que la restricción presupuesta le permite. Ante un cambio de la restricción presupuestaria (debido a un abaratamiento relativo del consumo de bienes públicos) el consumidor podrá acceder al punto E' , donde logra un consumo de bienes públicos superior, G_2 , dado que se da un efecto sustitución (por el abaratamiento del pseudo-precio del bien público).

Ahora, la gran diferencia entre este análisis y el análisis circunscrito a bienes privados, llega cuando se ha de agregar las curvas de demanda individuales para lograr la demanda agregada. Como los bienes públicos no son rivales en el consumo, con una cantidad G_1 o G_2 de bien público, se puede satisfacer a una cantidad ilimitada de consumidores. Es decir, gráficamente, las demandas no se agregan horizontalmente, sino verticalmente (Samuelson, 1954, p. 2).

Figura 4.3 Agregación vertical de curvas de demanda individuales

Fuente: Stiglitz (2000)

En la Figura 4.3 se puede distinguir una *curva de demanda b* que se corresponde con el *consumidor b* y que tiene asociado un *pago de precio de impuestos de P_b* , así como una *curva de demanda a* con su correspondiente *pago de precio de impuestos P_a* . A su vez, agregando verticalmente las curvas sobre una demanda común de bienes públicos de una cantidad G , se logra una *curva de demanda colectiva* de bienes públicos.

Una vez hallada la curva de demanda colectiva, solo quedaría determinar la curva de oferta, que se construiría igual que en el caso de bienes privados, ya que la producción de unidades adicionales de un bien público si provoca incrementos del coste marginal (dados los supuestos de rendimientos marginales decrecientes de los factores productivos implicados en su producción). Por tanto, el equilibrio, la provisión óptima de bienes públicos, se dará cuando el coste marginal de producción (que es igual a la RMT) se iguale con la RMS, gráficamente, en la intersección entre la oferta y la demanda.

Sin embargo, esta solución no es completa, dado que se buscaba que cada individuo contribuyese exactamente en la medida en que se beneficia, por tanto, habría que practicar discriminación de precios (impuestos, en este caso) para cada contribuyente. Adicionalmente, esto genera un problema que ya se observaba en la provisión privada pero colectiva, la aparición de *free-riders* que no señalicen verazmente su valoración subjetiva del bien público y que, por tanto, conduzca a provisiones ineficientes o a escasez de fondos para el aprovisionamiento del bien. Por tanto, un sistema basado en la voluntad y la sinceridad no bastará para lograr una provisión eficiente de bienes públicos (Samuelson, 1954). A fin de cuentas, prácticamente todos los productos que se producen

(incluso los privados) son susceptibles de la aparición de polizones, es un problema con el que hay que lidiar siempre. Existe una relación directa entre este tema y la Teoría de Juegos: la aparición de *free-riders* se asemeja al dilema del prisionero, donde, pese a que el EN óptimo en el sentido de Pareto sería (*Callar, Callar*), que en este caso sería que todos revelen sus verdaderas preferencias sobre los bienes públicos; realmente se alcanza una situación de (*Confesar, Confesar*), donde todos los individuos intentan actuar como *free-riders*, al suponer que los demás los harán, y acaban en una situación muy alejada de un óptimo de Pareto (Benegas Lynch, s. f.). Como ya se ha mencionado, pueden existir algunas soluciones para evitar que proliferen estos *free-riders*, relacionadas con los puntos focales que se explican en la tercera sección del trabajo, o con los estudios de Elinor Ostrom (1990) que, a su vez, se vinculan a la economía del comportamiento. Otras vías que se plantean para aproximarse a una provisión eficiente de bienes públicos se vinculan a la distribución de la renta, dado que usualmente los individuos que perciben menor renta son los que más se benefician de los bienes públicos, pero a su vez los que tienen menor capacidad de pago. Por tanto, se prioriza el gravar la renta de los ricos por encima de la renta de los pobres, a pesar de ser los pobres los que más se benefician de los bienes públicos, lo cual empieza a generar contradicciones e introducir criterios de justicia o equidad, que pueden interferir con la eficiencia. Es decir, se trata de un conflicto entre el *principio del beneficio*, y el *principio de la capacidad de pago* como mecanismo de financiación (García Arias, 2004).

4.3.2 Bienes públicos globales

Dentro de los bienes públicos puros, existe una categoría adicional que impone criterios más estrictos y que, a la vez, caracteriza a los que probablemente sean los bienes de consumo colectivo más importantes y especiales de todos: los bienes públicos globales (BPG). Son elementos fundamentales de la realidad, pero no son tan materiales como puede ser un parque o un faro en el litoral. Son ideas, como el Teorema de Pitágoras; ideales, como la paz o la justicia; o bienes naturales, como el medio ambiente.

El fenómeno de los BPG ha cobrado especial relevancia junto a la globalización, dado que algunos bienes públicos se han hecho transnacionales, inclusive mundiales, en algunos casos. Esta circunstancia ha generado una problemática especial, y es la inexistencia de un sector público supranacional o mundial que pueda gestionar una provisión eficiente de estos BPG o, en el peor de los casos, evitar una sobreproducción

de males públicos globales, como es el caso de la contaminación ambiental o las crisis económicas extendidas por la financiarización (García Arias, 2004).

Los BPG están definidos por las siguientes características, dos de ellas compartidas por los bienes públicos puros convencionales:

- No exclusividad, o **no-exclusión mediante precios**, ya que un bien una vez ha sido producido, todos los individuos pueden beneficiarse de su consumo, tanto los que sufragaron el coste de producir el bien, como los que no.
- **No-rivalidad**, que consiste en que el consumo de una unidad del bien por parte de un individuo no reduce la oferta disponible para otro individuo, ya que se puede consumir de forma simultánea y no genera costes adicionales.

Además de las características habituales ya presentadas en el primer punto de la sección, hay que añadir tres más que son únicas de los BPG:

- Los **beneficios deben ser universales** en términos de países, es decir, que deben afectar a un grupo de países o a la totalidad. Por ejemplo, la estabilidad cambiaria del euro es un bien público global que afecta a todos los países relacionados con dicha moneda, con externalidades positivas para el comercio y la movilidad geográfica.
- Los **beneficios deben extenderse a todos los grupos de la población**, es decir, a todas las personas. Que haya paz afecta positivamente (se supone) tanto a clase alta, como media y baja, indistintamente.
- Los **beneficios deben satisfacer las necesidades de las generaciones presentes, sin reducir la capacidad de desarrollo de las generaciones futuras**. El Teorema de Pitágoras no se va a gastar por usarse hoy, que hoy día se emplee de forma habitual no va a provocar que no esté disponible en el futuro o que tenga una peor calidad (Velásquez González, 2009).

Estas características deben entenderse como que los principios de no-rivalidad y no-excluibilidad han de globalizarse de tres formas: afectando a un número lo bastante grandes de países, a distintos grupos socio-económicos y a diferentes generaciones (García Arias, 2004).

A su vez, los males públicos globales pueden considerarse como el inverso de los BPG, es decir, que se da por hecho la provisión eficiente del BPG (como un medio ambiente limpio), hasta que la provisión resulta ineficiente, en cuyo caso aparece el mal público global (medio ambiente contaminado) (Velásquez González, 2009). Por tanto, se puede hablar de provisión eficiente de BPG para referirnos también a evitar la sobreproducción

de males públicos globales lejos de lo que es socialmente óptimo. Respecto a la provisión eficiente, vuelven a aparecer todos los problemas observados cuando se trata con bienes públicos puros (aparición de *free-riders*, revelación falsa de preferencias, dificultad para establecer el mecanismo para sufragar la producción, etc.) y, adicionalmente, los derivados de que estos BPG tienen un carácter transnacional, ya que, a pesar de la existencia de organizaciones internacionales de toda clase, todavía no existe ningún sector público transnacional o mundial con capacidad coercitiva real sobre los países (García Arias, 2004).

Esto tiene una consecuencia inmediata: el mundo se halla ante un enorme juego no-cooperativo (dado que es imposible obligar a los países a establecer acuerdos realmente vinculantes) en el que los pagos no solo afectan a las generaciones actuales, sino que tienen consecuencias para el porvenir de las futuras generaciones. Y, en principio, no se trata de un juego de suma cero, pero está claro que si no se da una cierta cooperación voluntaria (o se halla la forma de lograr una cooperación coercitiva), el mundo se va a quedar encallado en un EN que no va a resultar ser un óptimo de Pareto. En términos del dilema del prisionero, se va a repetir el perfil estratégico de (*Confesar, Confesar*).

4.4 EXTERNALIDADES

Las externalidades son otro tipo de fallo del mercado. En condiciones normales, el sistema de precios internaliza todas las consecuencias existentes tanto para productores como para consumidores. Sin embargo, a veces existen efectos colaterales a ciertas actividades de consumo o producción. Estos efectos colaterales, indirectos, sobre otros individuos, están fuera del sistema de precios de mercado, es decir, que cuando demandantes y oferentes realizan sus cálculos racionales basados en la utilidad, no tienen en cuenta los posibles efectos positivos o negativos que se desprenden de estos y afectan a terceros (Pindyck y Rubinfeld, 2009).

Habitualmente, el término “externalidad” tiene connotaciones negativas, pero no tiene porqué ser así. Una externalidad puede ser positiva, negativa o ambas, en función de quién sufra las consecuencias. Por ejemplo, un individuo puede realizar una acción de consumo, como perfumarse. Ese individuo valora positivamente el perfume y ha pagado un precio, un coste, por desprender esa fragancia que el mismo puede oler, pero todos los individuos que estén a su alrededor también van a olerlo. Aquellos cuyo gusto coincida con el del usuario del perfume percibirán externalidades positivas relacionadas con captar un buen

aroma. Sin embargo, aquellos a los que el olor les desagrade sufrirán una externalidad negativa. Por tanto, aquellos que disfrutan del perfume preferirían que el usuario que lo consume lo usara de forma más frecuente, mientras que para los que les disgusta el olor, sería preferible que lo usase con menor frecuencia.

La externalidad negativa más habitual es la de la contaminación, lo que nos lleva a establecer una relación directa entre los bienes públicos (incluidos los BPG) y las externalidades. La relación entre ambos puede verse desde dos puntos de vista, dado que se puede decir que las externalidades son un tipo de bien público no puro, o bien que los bienes públicos son un caso de bien que genera externalidades.

Como se ha explicado, los bienes de cuyo consumo (o producción) se derivan efectos colaterales en otros individuos generan externalidades. En el caso de los bienes públicos puros, un individuo puede decidir consumir una cantidad concreta y, dado que no puede excluir a otros de su consumo ni rivaliza en el consumo, otras personas también pueden disfrutar de esos bienes, se están beneficiando de una externalidad. El hecho de que alguien decida consumir o producir una cantidad determinada de un bien público, genera unas externalidades en los individuos que están alrededor (que cada cual valorará según su función de utilidad).

Por ejemplo, el mal público global “contaminación” genera importantes externalidades negativas para todos los habitantes de la tierra presentes y futuros, mientras que el bien público local “parque” puede generar externalidades positivas a todos los que decidan consumirlo, pese a no haber contribuido a su financiación (Stiglitz, 2000). Por tanto, las externalidades derivadas de los bienes públicos son posibles gracias a la no-exclusión en el consumo y la no-rivalidad.

Las externalidades son consecuencia de efectos indirectos no contemplados en el sistema de precios del mercado, efectos que generan ineficiencias, porque las actuaciones racionales calculadas de los agentes no tienen en cuenta todas las consecuencias derivadas de sus acciones. En el ejemplo del perfume, resulta en una producción ineficientemente baja para quienes disfrutan del aroma, y excesivamente alta para quienes no comparten el gusto del usuario.

Por tanto, la forma habitual de solucionar las externalidades es internalizando todos los efectos colaterales de la producción o el consumo, es decir, incluyendo todos los costes y beneficios a terceros en el sistema de precios. Dado que suele ser necesaria una fuerza coercitiva para internalizar las externalidades (no siempre es necesario), suele ser el sector público quién se ocupa de la tarea. Los dos mecanismos más habituales son las

subvenciones para las externalidades positivas (para promocionar incrementos en su producción) y los impuestos o las multas para las negativas (con el fin de que las empresas o los consumidores consideren los costes de las consecuencias negativas de sus actuaciones y, de este modo, las incorporen a sus cálculos racionales) (Pindyck y Rubinfeld, 2009).

4.5 TRAGEDIA DE LOS COMUNES (SIN SUPERVISIÓN)

La tragedia de los comunes se trata de un dilema vinculado a un bien público impuro donde el egoísmo individual provoca la extinción del propio bien común que se trata, acabando con las ganancias de todos los que se beneficiaban de él. Fue descrito originalmente por Garrett Hardin en 1968 y se basa en la hipótesis de que si dejas que un grupo de pastores usen conjuntamente un pasto que comparten, pronto ese bien común quedará arruinado, porque el pasto tiene una capacidad limitada de regeneración (para poder seguir siendo usado) y cada pastor sobreexplotará el pasto sin importarle el resto de los pastores. En esencia, es un dilema del prisionero con muchos jugadores, un bien de consumo común plagado de *free-riders* (Hardin, 1994). Se ha denominado el bien público como impuro porque es susceptible de sufrir congestión o de agotarse si se sobreexplota.

El caso es que, como todos los ganaderos sufren pérdidas, pero son pequeñas, ninguno está incentivado a enfrentarse a los que sobre-explotan el pasto y, al final, todos acaban con un comportamiento similar. Por tanto, una situación de “laissez-faire” no es deseable para gestionar los bienes públicos. Adicionalmente, cuantos más sean los que emplean el bien público, peor será la situación, ya que será más fácil actuar como un *free-rider*. Si se extrapola la tragedia de los comunes al ámbito mundial, tenemos que el medio ambiente es un enorme bien de consumo común que ha de aprovecharse, que tiene capacidad de regeneración, pero que de forma sistemática todos los países están poniendo al límite. Los países se están comportando como los pastores agresivos, como los *free-riders*, y el resultado, sin supervisión y control, es el mismo. El medio ambiente quedará irremediablemente arruinado si no se impone algún tipo de sistema de supervisión y control, dado que, individualmente, los países parece que pierden muy poco, sin embargo, en conjunto, las pérdidas son catastróficas, permanentes y transgeneracionales.

Retomando la propia tragedia, Garret Hardin (1994) propone dos posibles vías para gestionar los bienes comunes: de forma privada, dividiendo la parcela entre los granjeros

y que cada uno sea responsable de su éxito o fracaso (transformándolo por tanto en bienes privados); y de forma común (socialista, según lo describe), siendo todavía un bien común, pero administrado por un individuo concreto que, en principio, busque lo mejor para la mayoría. Sin embargo, también considera que ambos métodos pueden triunfar o fracasar en función de las actuaciones de los granjeros individuales o del administrador. A su vez, si se escala, cuanto mayor sea el bien común y los individuos involucrados, incluso con estos sistemas, mayores serán las posibilidades de fracaso, *free-riders* y comportamientos negligentes.

Pero, existiría una tercera vía según la politóloga estadounidense y premio Nobel Elinor Ostrom (1990). Sus resultados podrían vincularse a los que se hallan cuando se aplican los puntos focales de Schelling a la Teoría de Juegos. Entre todas las ideas que plantea en su libro “Governing the commons”, una es una tercera vía para solucionar la tragedia de los comunes, sin necesidad de dividir el bien en parcelas privadas ni designar un administrador. En su modelo, que denomina “una solución alternativa”, pone a los pastores a negociar entre ellos y a elaborar un contrato que, si bien no es vinculante, si tiene importantes consecuencias sociales. En esencia, rompe con el dilema del prisionero, dado que los presos no pueden modificar el juego en el que se encuentran. Sin embargo, los ganaderos que disfrutan del pasto año tras año, que se conocen, que viven en una comunidad, sí pueden comunicarse y cambiar las reglas del juego. Pueden diseñar su propio contrato para gestionar el pasto entre todos, incentivados por el beneficio colectivo que logran y evitar arruinar el pasto, sumando además que tienen los conocimientos necesarios para ello. ¿Cómo soluciona el problema de los *free-riders*? Como se ha mencionado, los pastores se conocen entre sí, se ven, son parte de una comunidad. Si alguno observa que otro comete una infracción, que tiene un comportamiento oportunista, va a estar motivado a denunciarlo ante el resto de ganaderos, ya que su comportamiento le perjudica a él y a todos. Es decir, aquellos que han firmado un contrato (aunque no sea vinculante) van a estar pendientes del comportamiento de los demás firmantes (y sin el coste adicional que tendría un administrador o los perjuicios de dividir las parcelas). Es cierto que pueden seguir apareciendo fallos, como que el conjunto de los pastores sobrestime o subestimen la capacidad del pasto, que acontezcan sucesos externos y otras circunstancias, pero, suponiendo que eso va bien, parece ser la mejor solución de las tres, con menores costes y mayores probabilidades de éxito.

En su libro, el ejemplo empírico que utiliza es el de un pequeño pueblo llamado Alanya en el que hay alrededor de 100 pescadores que trabajan en pequeños botes de dos o tres

personas y más de la mitad son parte de una cooperativa de productores locales. Comenta que en la década de los 70's la actividad de la pesca estuvo en riesgo porque, por un lado, el descontrol en la pesca llevó a hostilidades que incluyeron violencia entre pescadores y, por otro lado, la competitividad entre ellos por conseguir los mejores lugares de pesca incrementó costes y la incertidumbre sobre el potencial de pesca de cada individuo. Por tanto, para evitar que "se arruinara la cosa común", algunos miembros de la cooperativa decidieron intentar un experimento que consistía en asignar sitios de pesca a los miembros. Diez años después, cada septiembre se prepara una lista con todos los pescadores aptos que tienen licencia en Alanya, sean o no miembros de la cooperativa. Además, todos los sitios de pesca están listados y se asignan de septiembre a mayo a una serie de pescadores y, después, de septiembre a enero cada día los pescadores se mueven en dirección este al siguiente punto de pesca. A partir de enero, hacen lo mismo, pero al oeste, así todos los pescadores pasan por todas las ubicaciones y no tienen que competir por los mejores puntos de pesca. Por tanto, no se gastan recursos compitiendo ni se sobreexplotan sitios concretos de pesca.

El día que a un pescador le toque un buen sitio, está claro que estará allí pronto, por tanto, si algún otro pescador que le haya tocado un mal punto ese día intenta moverse a otro mejor, se encontrará con el primer pescador, por tanto, es difícil hacer trampas con el sistema, ya que el primero se defenderá incluso con medios físicos si es necesario, y sus derechos serán refrendados por el resto de pescadores, para cuando a ellos mismos les toque ese punto. En cierto modo, actúan de forma egoísta, pero con ello logran un bien común. Relata que, como anécdota, los pocos problemas que ha habido se han podido solucionar adecuadamente en la cafetería del pueblo (Ostrom, 1990).

En conclusión: sin necesidad de un sistema de tipo socialista con un administrador externo, ni necesidad de privatizar el bien común (las dos vías que exploraba Garrett Hardin), se ha podido solucionar un problema que iba a acabar como la tragedia de los comunes. Si en una comunidad existe cierta cohesión social, hay posibilidades de castigos sociales o físicos y hay un bien de consumo común, mediante métodos de acuerdos institucionales (aunque sean no vinculantes) se puede llegar a un EN óptimo en el sentido de Pareto en juegos no-cooperativos. Una vez más, como recordatorio, esto está estrechamente ligado a los puntos focales de Schelling.

5. APLICACIÓN EMPÍRICA: EL PROTOCOLO DE KYOTO

Explicada la Teoría de Juegos y el marco teórico que involucra los bienes públicos (incluidos los BPG), las externalidades y la tragedia de los comunes, se puede abordar una aplicación empírica conjunta. Dentro de las situaciones vinculadas a BPG y que pueden ser explicadas a través de modelizaciones de Teoría de Juegos, el Protocolo de Kyoto resulta una de las más interesantes, tanto por sus implicaciones, como por el hecho de que ha pasado suficiente tiempo desde su firma para poder estudiar las consecuencias. El Protocolo de Kyoto, que entró en vigor el año 2005 tras ser firmado en el año 1997, puso en funcionamiento la “Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático”, que se trata de un compromiso por parte de los países industrializados para limitar el crecimiento de las emisiones contaminantes de gases de efecto invernadero o reducirlos, según el caso. Trata de forma diferenciada a los países dado que se basa en la premisa de que los países actualmente más desarrollados son los que más han contaminado en el pasado y, por tanto, son los que deben reducir en mayor medida sus emisiones, respecto a otros países menos desarrollados.

No obstante, el acuerdo sólo exige que los países comprometidos implanten medidas de mitigación y que informen de los resultados regularmente. Además, solo existen objetivos “vinculantes” para 26 países industrializados y la Unión Europea, y algunos de los países más contaminantes (cómo Estados Unidos) no han firmado el protocolo. De hecho, la Convención Marco solo tenía vigencia hasta el 2012, y la posterior enmienda (aprobada en Doha) para extender el periodo hasta el 2020, todavía no ha entrado en vigor. Por tanto, ya pueden intuirse algunos de los problemas que tiene este protocolo.

Adicionalmente, el Protocolo incluye una serie de mecanismos para flexibilizar la distribución de la contaminación entre países (Würth, s. f.), como son los permisos de emisión. La lógica detrás de estos permisos está en la teoría de las externalidades, dado que los permisos tienen coste y, de esa forma, se internalizan dentro de los cálculos de maximización individuales. Además, se supone que incentivará la sustitución de tecnología contaminante por tecnología más “verde”, al resultar más barata en términos relativos.

El Protocolo incluye tres mecanismos de mercado, por un lado el Comercio Internacional de los derechos de Emisión (ONU, s. f.-b), el mecanismo de Desarrollo Limpio, que consiste en que un país desarrollado puede implementar proyectos de reducción de emisiones en países en desarrollo y que cuente como si lo redujesen en su propio país a

través de la conversión a créditos de reducción de emisiones (ONU, s. f.-e); y la Aplicación Conjunta, similar al mecanismo anterior, pero con el foco sobre otros países firmantes (ONU, s. f.-c).

Por tanto, un país puede cumplir con lo estipulado en la Convención Marco de varias formas: con medidas políticas que reduzcan las emisiones en el país, realizando proyectos de reducción de emisiones en países en desarrollo o en otros países firmantes, comprando derechos de emisión a otros países que no los necesiten para ampliar su cupo, o una combinación de las anteriores.

En lo que sigue, se va a estudiar, a través de la Teoría de Juegos, las posibles explicaciones teórica relativas al Protocolo de Kyoto y los problemas que se han desprendido del mismo. Dichos problemas, van a vincularse al carácter voluntario de la participación de los países para, posteriormente, comparar los resultados con la realidad. De este modo, se valorará la capacidad de la Teoría de Juegos para explicar el funcionamiento de los acuerdos internacionales (principalmente aquellos colectivos y vinculados a los BPG) y se determinará el grado de éxito del Protocolo de Kyoto como acuerdo, tanto en el cumplimiento como en la participación de los países firmantes.

5.1 MODELO DE EMISIONES GLOBALES

Desde un punto de vista totalmente teórico, se puede plantear el siguiente modelo (pongo las ecuaciones, las explico un poco, lo no-cooperativo y lo cooperativo).

Suponemos N países, donde $i \in I = \{1, 2, 3, \dots, N\}$, y el bienestar de un país i se denota como π_i , que es el resultado de la suma de unos beneficios derivados de emitir gases de efecto invernadero, $\beta_i(e_i)$ y la resta de unos daños causados por el sumatorio global de emisiones de todos los países, $\phi_i(\sum e_j)$, siendo e_i las emisiones de un país. Tomamos la función de bienestar como cóncava y la de daños como convexa. Por tanto, la función que mide el bienestar de un país es la siguiente:

$$\pi_i = \beta_i(e_i) - \phi_i(\sum_{j=1}^N e_j) \quad [1]$$

Como se puede observar en la fórmula, las emisiones contaminantes juegan un doble papel. Por un lado, como subproducto necesario o consecuencia de la producción, se generan una serie de beneficios en función de la cantidad de gases emitidos (pueden considerarse también como un coste de oportunidad) Por otro lado, dado que la contaminación es un BPG, cada país sufre el conjunto de contaminación de todos los demás países, causando unos daños que reducen el bienestar. Ante esta ecuación, un país

puede decidir actuar de dos maneras en la búsqueda de la maximización del bienestar. La primera, descrita en la ecuación [2] es la que se corresponde con un país que actúa de forma no-cooperativa y que solo considera los daños que la contaminación causan al bienestar de individual del propio país:

$$\begin{aligned}\pi_i &= \beta_i(e_i) - \phi_i(\sum_{j=1}^N e_j) \text{ tomando derivadas} \\ \beta_i'(e_i) &= \phi_i'(\sum_{j=1}^N e_j) \forall i \in I\end{aligned}\quad [2]$$

Iguala los costes marginales de producción con los daños marginales causados por la contaminación. Por ende, los niveles de emisión del país en cuestión dependerán de los niveles de emisión de otros países (similar a la construcción de un modelo de oligopolio). Surge un único EN, que como se define en este trabajo, se halla en la intersección de las funciones de reacción de los demás países, esto es, el nivel de emisiones que deciden fijar el resto de países (Finus, 2000).

La segunda forma de decidir el nivel de emisiones, formalizado en la ecuación [3], corresponde al comportamiento cooperativo del país, donde no solo incluye los daños causados a sí mismo, sino también los daños que la contaminación causa al conjunto de países del mundo, es decir, el sumatorio de los daños causados por la contaminación derivado de todas las funciones individuales de bienestar. Por tanto, al decidir el nivel de emisión contaminante, busca maximizar el conjunto de bienestar global, esto es, el óptimo en el sentido de Pareto (Chander y Tulkens, 2011).

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^N \pi_i &\Leftrightarrow \pi_i = \beta_i(e_i) - \sum_{j=1}^N \phi_j(\sum_{j=1}^N e_j) \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \beta_i'(e_i) = \sum_{j=1}^N \phi_j'(\sum_{j=1}^N e_j) \quad \forall i \in I\end{aligned}\quad [3]$$

Para ello, se iguala el coste marginal de oportunidad del país i con el sumatorio de costes marginales de todos los países (se consideran homogéneas las funciones de bienestar de los países para este propósito). El equilibrio cooperativo que se alcanza de esta forma logra maximizar el bienestar global, con el mínimo posible de emisiones contaminantes para tal efecto. Entre estos dos puntos tan dispares, existen otros intermedios, tales como las soluciones no-cooperativas con colaboración, como es el caso del Protocolo de Kyoto y de la totalidad de acuerdos internacionales en la práctica (Finus, 2000). No obstante, cabría añadir una tercera opción que se da cuando un país que no tiene en consideración

el daño causado por la contaminación, y las empresas productoras de dicho país se limitan a maximizar en función de los costes que efectivamente perciben, es decir, no se internalizan las externalidades. Por esta tercera vía, los países contaminarían el máximo (Chander y Tulkens, 2011).

En conclusión, desde un punto de vista estrictamente teórico y lógico, la mejor de las opciones es la de la cooperación, dado que, por construcción, es la que maximiza el bienestar total. Es decir, es la solución del juego que constituye un óptimo en el sentido de Pareto, en vez del equilibrio de Nash que se alcanza a través de la no-cooperación. Además, desde un punto de vista práctico y realista, la cooperación también es la mejor opción a nivel colectivo, ya que maximiza el bienestar global. Sin embargo, en la práctica surgen varios problemas importantes que complican en extremo la cooperación:

- a) Las funciones de bienestar individuales pueden ser heterogéneas, es decir, algunos países pueden beneficiarse en mayor medida de contaminar que otros, por tanto, una reducción de emisiones que globalmente es beneficioso, individualmente puede ser mucho más costoso para algunos países que para otros. Por tanto, surgen problemas en cuanto al reparto de los beneficios del acuerdo, que, al ser un bien público global, se distribuye de forma moderadamente uniforme en todos los países en forma de “no-daños”. Por tanto, aparece la necesidad de una compensación para que existan suficientes incentivos para algunos países a la hora de firmar los acuerdos, dado que la firma debe ser individualmente racional (Finus, 2000). Por ejemplo, para el caso de Estados Unidos, donde los costes de producción energéticos de las empresas son bajos y perciben “pocos” daños por contaminación (deslocalización), se opta por la maximización individual en vez de la optimización global, de ahí su negativa a la ratificación del Protocolo de Kyoto (Chander y Tulkens, 2011).
- b) Los acuerdos son completamente voluntarios, ya que no existe ningún ente a nivel mundial que pueda obligar a los países soberanos a hacer algo. Por tanto, no estamos en el marco teórico de los juegos cooperativos, donde los acuerdos son vinculantes, sino en el marco teórico de los juegos no-cooperativos con cierto grado de colaboración. A su vez, se desprenden dos problemas adicionales de este punto:
 - Las condiciones que se pactan en los acuerdos dependen directamente de los firmantes, esto es, que las condiciones que estipulan los convenios internacionales pueden no ser realmente óptimos, y responder

directamente a las necesidades individuales de los países. Por ejemplo, un país firmante que se beneficie en gran medida de la contaminación, si bien va a considerar que una reducción global es beneficiosa, probablemente tenga en mente una cifra menor de la socialmente óptima. Por tanto, aunque varios países estén de acuerdo en que es necesario hacer algo para atajar el problema, difícilmente estarán de acuerdo en la forma y cuantía de hacerlo, así como en la forma y la distribución de los perjuicios y las compensaciones a causa del acuerdo y los importantes costes de oportunidad que surjan.

- Normalmente, no existe forma de obligar a la firma o al cumplimiento del acuerdo, por tanto, surge el problema de los free-riders en dos vertientes, dado que estamos ante bienes públicos globales: si existe un acuerdo para reducir emisiones con varios firmantes, cuantos más sean, mayores serán los incentivos para no ser uno de los firmantes, dado que podrá seguir contaminando según lo que individualmente le sea óptimo, pero además, beneficiándose de las reducciones globales que logren los firmantes. Por otro lado, una vez se firma un acuerdo, nada obliga al cumplimiento, por lo que, un país tiene importantes incentivos para no respetar lo firmado, especialmente si el resto de países, o una mayoría, si lo respetan. Por tanto, siempre será más óptimo no ser firmante que serlo y, de serlo, será más óptimo (individualmente) no respetar el acuerdo a hacerlo. Esto provoca que sea necesario algún tipo de instrumento que fuerce al cumplimiento de los acuerdos, fundamentalmente sanciones prefijadas en el documento a firmar. Sin embargo, sigue existiendo el problema de la casi imposibilidad de imponer sanciones a nivel internacional.

Por tanto, se pueden resumir en dos las principales dificultades: la proliferación de free-riders y el reparto de los costes y beneficios del acuerdo que, a su vez, están íntimamente ligados, dado que un país que reciba menores beneficios que otro en un acuerdo, puede acabar llevando a cabo un comportamiento de free-riders para auto-compensarse. A continuación, se va a estudiar el problema de los free-rider en los acuerdos internacionales a través de diferentes modelos de Teoría de Juegos (Finus, 2000).

5.2 JUEGOS DE COLABORACIÓN POR ETAPAS

Este tipo de juegos se desarrollan en tres etapas. En la primera etapa, los diferentes países deben decidir si firmar o no el acuerdo, es decir, si entrar a formar parte de una coalición (cooperar) o si mantenerse al margen (no cooperar). En la segunda etapa, los países deciden los niveles de emisiones de contaminación que desean mantener, de modo que los países que han firmado un acuerdo lo deciden de forma conjunta para lograr el óptimo social (entendiendo por social el conjunto de la coalición), y el resto de países deciden sus niveles de emisión a través de la optimización individual. Por último, en la tercera etapa, los países que cooperan deciden como distribuir los beneficios del acuerdo entre ellos, pudiendo hacer transferencias de bienestar para solventar posibles problemas de heterogeneidad (Finus, 2008).

A través del método de inducción generalizada, se puede condensar el juego en una sola etapa, transformándolo realmente en un juego estático cooperativo. Dado que los pagos esperados (y por tanto la respuesta óptima de cada país) varían en función del número de países que decidan o no firmar, para alcanzar el equilibrio en el juego es necesario que la coalición sea estable interna y externamente. Para que la coalición sea estable internamente, se requiere que ningún participante dentro de la coalición pueda mejorar sus ganancias al actuar al margen de ella. A su vez, para que sea estable externamente, es necesario que ningún país que está maximizando su bienestar individualmente pueda mejorar sus ganancias a través de unirse a la coalición (Carraro, 1998).

Una vez alcanzado el equilibrio y firmado el acuerdo, se supone que los países cumplen con lo acordado (lo cual choca con la realidad) y, aquellos que incumplen el acuerdo, son sancionados de forma que no logren los beneficios de actuar como free-riders (sin embargo, en la práctica han de ser descubiertos, y puede pasar tiempo hasta que eso suceda, lo que ocasiona que sí logren beneficios adicionales). Por tanto, este tipo de juegos solo explican el comportamiento de los free-riders relacionado con los incentivos para firmar o no un acuerdo, pero no los incentivos vinculados a cumplir o no una vez firmada la cooperación. Esto se debe a que el castigo por incumplir el acuerdo consiste en disolver la coalición, lo cual no resulta una amenaza creíble porque no es el comportamiento maximizador para el resto de países firmantes (Finus, 2000). Respecto al equilibrio interno y externo de los acuerdos de colaboración, existen ciertas corrientes de pensamiento que argumentan que para lograr auténtica estabilidad en materia mediambiental, lejos de perseguir ambiciosos tratados a nivel mundial, se ha de recurrir

a acuerdos más pequeños a nivel regional, entre áreas económicas del mundo o incluso entre partes de un mismo país (Chander y Tulkens, 2011). Esto podría relacionarse de algún modo con el trabajo de Elinor Ostrom (Ostrom, 1990) y la tragedia de los comunes, ya que si bajamos la escala a la que se trabaja hasta un nivel en el que sí existen autoridades con poder coercitivo y existen puntos focales, sí puede encontrarse una mejor solución al problema de los free-riders.

5.3 JUEGOS REPETIDOS

Los acuerdos internacionales, como los Convenios Marco de la ONU, pueden considerarse como juegos infinitamente repetidos, dado que suelen mantenerse vigentes durante bastante tiempo e incluso algunos con fecha de finalización suelen enmendarse, extenderse o reemplazarse por similares. Una vez más, se trata de juegos no-cooperativos donde puede darse cierta colaboración, dado que se mantiene la imposibilidad de obligar a la firma o al cumplimiento. Sin embargo, estos modelos sí responden al posible comportamiento de free-rider de los firmantes. Retomando lo explicado en el marco teórico de Teoría de Juegos, existen varias formas de actuar en los juegos repetidos (como los ciclos de traición y arrepentimiento o el ojo por ojo), y los participantes han de actualizar los pagos a través de factores de descuento (Cerdá et al., 2004). Por tanto, ante un incumplimiento del acuerdo por parte de un país, el resto pueden sancionarlo y un acuerdo se considera estable o en equilibrio si el castigo por el incumplimiento desincentiva el comportamiento oportunista de polizón. En consecuencia, si un acuerdo se halla en equilibrio, todos los firmantes se encuentran jugando las opciones que conducen a un óptimo social (dentro del acuerdo, dado que los compromisos que implanten no tienen por qué ser los realmente óptimos, ya que lo firmado en un acuerdo no deja de responder a los intereses individuales de los miembros).

Este tipo de acuerdos se pueden modelizar a través de las estrategias de gatillo (“trigger strategies”). En el momento en que se detecta el incumplimiento de un miembro del acuerdo, el resto de firmantes invalidan el acuerdo, dando lugar a que el resto del juego se sitúen en un EN correspondiente al comportamiento maximizador individual de los países. El acuerdo alcanzará la estabilidad si los beneficios de cumplir con el acuerdo a largo plazo superan los beneficios temporales de actuar como free-rider, incumpliendo lo pactado. Esto depende de los pagos asociados a cada estrategia, pero, sobre todo, el factor de descuento de cada país. Este factor de descuento dependerá de la valoración subjetiva

de los pagos futuros de cada país (tasa de descuento) y de las esperanzas que tiene el firmante de que el acuerdo se mantenga y cuánto tiempo.

Por tanto, la estabilidad de un acuerdo dependerá de la magnitud de las consecuencias negativas por traicionar el acuerdo, y de la credibilidad de esas consecuencias. La amenaza debe ser creíble en el aspecto estratégico (que la amenaza sea un EN perfecto en los subjuegos para los participantes que castigan) y en el aspecto técnico (que el acuerdo sea técnicamente posible de revertir). Además, a mayor sea la ambición del acuerdo, y a mayor sea la desigualdad en la distribución de las ganancias del acuerdo, mayores serán los incentivos para actuar como free-rider. A favor de la estabilidad del acuerdo está el control más frecuente del cumplimiento (exigir rendir cuentas de forma habitual a los países), así como la mayor duración y la mayor seguridad de su mantenimiento. Es decir, cuanto más se espere que vaya a durar un acuerdo, menos incentivos al comportamiento oportunista.

La parte clave del modelo son los castigos, que han de cumplir ciertas condiciones para ser realmente efectivos. Es decir, las estrategias de gatillo han de refinarse e incorporar ciclos de arrepentimiento, porque las estrategias cuyo castigo consisten en suspender el acuerdo incentivan al comportamiento de polizón (porque deteriora las expectativas de duración y estabilidad). De modo que entran en juego las “renegociaciones” de los acuerdos, es decir, que una vez un país ha incumplido el acuerdo, este no se termina, sino que se renegocia de forma que se aplique un castigo efectivo al infractor y, a su vez, se le dé la opción de redimirse. Para que el castigo sea efectivo, ha de cumplir las cuatro condiciones siguientes:

- El pago medio que reciba el polizón al ser castigado debe ser menor que el pago asociado a colaborar, para así tratar de evitar el comportamiento oportunista.
- El castigo no debe ser demasiado duro, para incentivar al polizón (si la primera condición no basta) de redimirse y volver a colaborar (de ahí que no se termine el acuerdo), pudiendo volver a la situación de colaboración total. El pago medio asociado a colaborar mientras se está castigado ha de ser menor que el de colaborar sin castigo, pero superior al de no colaborar con castigo, para promover ese arrepentimiento.
- El castigo no debe ser demasiado blando, por tanto, el pago conjunto de incumplir y luego arrepentirse, ha de ser menor que el de mantenerse colaborativo todo el tiempo.

- El pago recibido por los países que acometen el castigo no debe verse mermado, para que la amenaza se constituya como creíble, por tanto, el acuerdo debe renegociarse de tal forma que el resto de países que sí colaboran y que castigan al free-rider logren pagos de igual cuantía que cuando todos colaboran, para así que la amenaza sea perfecta en los subjuegos, por tanto, creíble.

Además, ante la posibilidad de que el país castigado abandone el acuerdo (porque no es vinculante), solo permite el uso de castigos más moderados (como los aquí planteados) que permitan la continuidad en el acuerdo.

No obstante, aunque esto parezca una posible solución para el problema de los free-riders una vez firmado el acuerdo, existen importantes dificultades para cumplir de forma simultánea las cuatro condiciones. Además, la inclusión de amenazas creíbles dificulta la cooperación, ya que, al firmar el acuerdo, los países están actuando racionalmente de forma individual, y todos valoran en cierta medida el actuar como free-riders tras firmar el acuerdo, por tanto, será más difícil que firmen un acuerdo que les puede perjudicar en un futuro. Incluso el cumplimiento individual de cada una de las condiciones tiene aparejadas importantes complicaciones. Por ejemplo, un país que haya hecho trampas y haya actuado como polizón, a la hora de demostrar arrepentimiento, si sus emisiones ya son muy bajas, será difícil que lo demuestre, además de llevar tiempo, o incluso ser técnicamente imposible. Sucede lo mismo con el castigo, algunas medidas que se implantan para cumplir con el acuerdo (como derribar una central térmica) son irreversibles, una vez derribada, no puedes volver a ponerla en funcionamiento para castigar a un infractor del acuerdo (Finus, 2000).

En conclusión, el uso de las emisiones como herramienta para moderar un acuerdo internacional resulta difícil en algunos casos, imposible en la mayoría e ineficiente en todos (incrementar las emisiones de un país para castigar a otro que ha incrementado sus emisiones, provoca que ninguno de los países cumpla con los deberes con los que se comprometió en el acuerdo). De hecho, las propias emisiones pueden llegar a ser una amenaza no creíble, dado que incrementar el volumen de emisiones en un país no solo le reporta beneficios, sino también costes (ecuación [1]), y es difícil pensar que un país va a implantar medidas que causan daño propio (Carraro, 1998). Y, por cuestiones de leyes internacionales y ausencia de regulador supranacional, no existen otras formas razonables (proporcionales) de castigar a los infractores. Por tanto, teóricamente las cuatro condiciones del modelo podrían asegurar la estabilidad de la colaboración, pero en la práctica vuelve a ser imposible (Finus, 2000).

En el caso particular del Protocolo de Kyoto se presentan cuatro posibles castigos secuenciales. Si un país, en un periodo, no cumple con sus obligaciones, en primer lugar, se le insta a comprar derechos de emisión (internalizar el daño de las emisiones). Además, para el siguiente periodo, tendrá que reducir las emisiones un 30% más, luego se le puede prohibir comerciar con derechos de emisión, y ha de realizar un plan para explicar cómo y cuándo va a cumplir con sus obligaciones. Para empezar, no haber cumplido con el acuerdo implica ganancias (ecuación [1]) si con el acuerdo produce menos del óptimo individual. Los castigos llegan en el siguiente periodo (por lo que, si el país en cuestión tiene una baja alta tasa de descuento, sufrirá lo que se conoce como miopía y preferirá los beneficios extraordinarios a corto plazo de incumplir el acuerdo), por tanto, existen incentivos para comportarse como polizón. Además, el precio de los derechos de emisión varía, de modo que, si el país espera que el siguiente periodo bajen de precio, nuevamente existen incentivos para incumplir el acuerdo y contaminar más. Y el mayor de los problemas es que, si el firmante que ha incumplido con lo pactado nuevamente incumple con la carga adicional del 30%, no existen castigos adicionales. Es decir, simplemente puedes traicionar el acuerdo en cada periodo y lograr beneficios netos superiores a cumplir con el acuerdo, especialmente al beneficiarse de las reducciones de emisiones de otros países que sí cumplan (de ahí los fuertes incentivos para actuar como free-rider). Encima, los miembros pueden abandonar el acuerdo con avisarlo con una antelación de tres años, teniendo en cuenta que los castigos se aplicarían en el segundo y tercer periodo, y que, de incumplirlos en el segundo, no existen cargas adicionales en el tercero, es posible incumplir el acuerdo hasta que te detecten como polizón, y luego abandonar el acuerdo sin grandes perjuicios para uno mismo. Por tanto, las sanciones planteadas en el Protocolo de Kyoto, aparentemente, no van a lograr detener el comportamiento de los free-riders ni evitarlo (Finus, 2008).

Todavía se mantiene el otro inconveniente: el reparto asimétrico de las ganancias y los costes del acuerdo. Este reparto asimétrico de las ganancias y los costes no se deriva del poder de negociación de los países, en el sentido de que logren tratos preferentes, sino que deriva del hecho de que algunos países tienen bajos costes producción energéticos y elevados beneficios (como el caso de Estados Unidos) y otros se encuentran en la situación contraria (como el caso de España) (Chander y Tulkens, 2011). Para eliminar esas desigualdades, se pueden plantear distintos mecanismos de transferencia, como el Mecanismo de Desarrollo Limpio o la Aplicación Conjunta del Protocolo de Kyoto (Würth, s. f.). Incluso se pueden implantar como promesa para que países que serían

perjudicados por firmar el acuerdo, accedan a ratificarlo si, a través de compensaciones, mejoran su bienestar (ya que se supone que el bienestar conjunto se incrementará) (Carraro, 1998). Pueden ser de dos formas: monetarios o en especie.

Las transferencias monetarias son efectivas al momento, dado que compensan directamente las disparidades de los costes en los distintos participantes. Dichas transferencias pueden llevarse a cabo a través de un mecanismo central o entre países. Sin embargo, existen problemas de incentivos con estas transferencias. Pueden darse situaciones en la que un país recibe el dinero, la compensación, pero luego no responde adecuadamente, o situaciones en las que un país afronta unos perjuicios, pero luego no es compensado. Incluso si se hace de forma simultánea, existen incentivos para el comportamiento de polizón. En un primer momento, podría pensarse que el retirar las transferencias puede actuar como un castigo más flexible que la modulación de las emisiones con objeto de desincentivar el comportamiento oportunista, ya que son un castigo directo para quienes las recibirían y una compensación automática para quienes las pagan. Es decir, pueden ayudar a reforzar los acuerdos reduciendo el comportamiento de free-rider de quienes reciben las transferencias. Sin embargo, surgen problemas por el lado de quienes han de pagar las transferencias, dado que eran los que más beneficios obtenían del acuerdo y, al pagar transferencias, perciben menores ganancias, por tanto, es necesario que los donantes de las transferencias valoren en mayor medida la cooperación, para no estar igualmente incentivados a comportarse como free-riders en el pago de las transferencias o en el cumplimiento del acuerdo.

Por otro lado, las transferencias en especie o capital son menos eficientes que las transferencias monetarias, pero también incluyen menos incentivos al comportamiento oportunista en ambos extremos (de ahí que sean los instrumentos más comunes en los acuerdos, como es el caso del Protocolo de Kyoto, que combina ambos instrumentos). Por ejemplo, un país desarrollado puede comprometerse a construir una planta eléctrica respetuosa con el medio ambiente en un país en vías de desarrollo. Es fácil controlar si se está cumpliendo o no con la construcción, los recursos destinados a la construcción no van a destinarse a otros fines (como puede pasar con las transferencias monetarias) y hasta que la planta no está construida, el país receptor no tiene que cumplir su parte del acuerdo. No obstante, son menos flexibles para usarse como castigo, pero también son menos propensas a generar comportamientos de polizón. Aunque, pueden existir problemas adicionales, como la falsa revelación de preferencias por parte de los países, la ausencia de transparencia en la revelación de costes y beneficios (para no incurrir en debilidad

estratégica internacional), o que los países tengan reticencias a hacer donaciones, para no parecer “débiles” en las negociaciones internacionales (problemas con la soberanía nacional).

Una posible corrección para estas desigualdades y problemas que surgen en el reparto de ganancias dentro de un acuerdo puede darse cuando los mismos países firman distintos acuerdos en lo referente a otros BPG, como, por ejemplo, temas de comercio internacional. La idea detrás de esta premisa reside en que las desigualdades generadas para unos países por un acuerdo pueden ser compensadas con los resultados de otro acuerdo diferente. De este modo, se reducirían los posibles comportamientos oportunistas, siguiendo con las estrategias de gatillo en juegos repetidos de forma indefinida (Carraro, 1998). Sin embargo, aparecen otros problemas vinculados a la valoración y la equiparación de los costes y beneficios entre los acuerdos, así como la revelación de preferencias y de costes; y también pueden existir problemas relacionados con el poder negociador de los países. En resumen, las transferencias monetarias pueden usarse como sanciones flexibles para castigar a los free-riders, pero generan comportamientos oportunistas en quienes han de pagarlas (como no pagarlas) y las transferencias de capital o en especie no sirven como herramienta de castigo y tampoco pueden obligar a quienes más se benefician del acuerdo a compensar a quienes sufren mayores perjuicios. Por tanto, si bien estas “transferencias” (permutas) siguen sujetas a las diferencias de poder negociador entre los países, la existencia de acuerdos en distintos campos puede nivelar las disparidades. No obstante, pueden existir diferencias de valoración entre los países al aislar los beneficios y costes de cada acuerdo, en vez de tener una percepción conjunta. Además, en la práctica, es difícil que los resultados de varios acuerdos acaben en ganancias totales iguales para todos los firmantes (sobre todo por cuestiones de poder negociador internacional), además de existir importantes costes de negociación, sobre todo cuántos más países firmen (y más complicado es que coincidan costes y beneficios adicionales en unos y otros acuerdos, de ahí que la mayoría de casos de éxito de estas permutas sean en acuerdos bilaterales) y, ante la aparición de free-riders, es complicado penalizar a un país por incumplir un acuerdo a través de otro acuerdo, sobre todo para que se mantenga la proporcionalidad (lo cual complica todavía más las cuatro condiciones para que los castigos sean eficientes y creíbles) (Finus, 2000).

5.4 RESULTADOS DE KYOTO: VALORACIÓN DEL ÉXITO DEL ACUERDO Y GRADO DE CUMPLIMIENTO

El Protocolo de Kyoto se constituye como un acuerdo no vinculante, carente de castigos creíbles y efectivos (como se explicó anteriormente), que incluye transferencias monetarias y en especie para la consecución de objetivos que no son realmente obligatorios, y que en el momento de la firma presentó importantes comportamientos de free-rider por parte de algunos de los países más relevantes y contaminantes, como Estados Unidos y Rusia (país que firmaría posteriormente). Además, se trata de un acuerdo entre países que han firmado otros acuerdos en materia de BPG, tales como ser miembros de la Organización Mundial del Comercio y de la propia Organización de las Naciones Unidas. A continuación, se presenta la Tabla 5.1 que muestra las variaciones en las emisiones de gases efecto invernadero. En dicha tabla se pueden observar marcados en color rojo los países no-cumplidores del acuerdo en base a los objetivos individuales marcados para el año 2012. De la misma forma, se marcan en color verde aquellos países que corrigieron dicha situación (reduciendo las emisiones) para el año 2020.

Haciendo uso del aparato teórico explicado en este apartado del trabajo se puede anticipar malos resultados, un bajo nivel de cumplimiento (muchos miembros actuando como free-riders) y, en general, el fracaso del acuerdo (el hecho de que su renovación no haya entrado en vigor aun después de haberse pasado el plazo que comprendía para su aplicación es una clara señal de free-riders en la firma del acuerdo).

El principal objetivo del acuerdo fue el de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en no menos del 5% del total de emisiones del año 1990 de cada país respectivo para el periodo 2008-2012. Dentro del compromiso individual de cada país, podemos ver algunos como España, que se comprometió a una reducción del 8% (que posteriormente se modificó a un incremento del 15%), la Unión Europea en su conjunto de media propuso un 8%, a dividir de diferente forma entre los países miembros, del 6% como Canadá o un incremento del 8% como el particular caso de Australia (ONU, 1997).

Tabla 5.1 Tasas de variación de gases de efecto invernadero de algunos países

País	Tasa de variación (%)		
	1990-2012	1990-2020	2012-2020
Australia	-9,55%	-22,08%	-13,85%
Austria	14,23%	9,01%	-4,57%
Belarus	-57,94%	-56,37%	3,74%
Bélgica	-15,87%	-25,68%	-11,65%
Bulgaria	-36,33%	-50,81%	-22,75%
Canada	32,16%	25,30%	-5,19%
Croacia	-15,34%	-25,26%	-11,72%
Chipre	57,48%	61,68%	2,66%
República Checa	-32,61%	-33,22%	-0,90%
Dinamarca	-27,62%	-40,51%	-17,81%
Estonia	-55,49%	-65,28%	-21,99%
Unión Europea (Convención)	-21,96%	-36,11%	-18,13%
Unión Europea (KP)	-21,78%	-35,95%	-18,12%
Finlandia	-34,52%	-47,18%	-19,33%
Francia	-14,29%	-26,48%	-14,22%
Alemania	-29,79%	-43,46%	-19,46%
Grecia	7,74%	-29,95%	-34,98%
Hungría	-38,59%	-38,95%	-0,58%
Islandia	7,34%	5,02%	-2,16%
Irlanda	6,96%	6,46%	-0,47%
Italia	-10,63%	-32,43%	-24,39%
Japón	9,98%	-9,00%	-17,26%
Kazakhstan	-20,51%	-7,98%	15,76%
Letonia	-47,05%	-18,24%	54,42%
Liechtenstein	5,71%	-21,69%	-25,92%
Lituania	-73,39%	-65,09%	31,15%
Luxemburgo	-10,70%	-32,29%	-24,18%
Malta	20,82%	-18,21%	-32,30%
Monaco	-13,19%	-31,83%	-21,46%
Países Bajos	-12,19%	-25,70%	-15,39%
Nueva Zelanda	22,27%	26,15%	3,18%
Noruega	-21,62%	-29,22%	-9,70%
Polonia	-18,34%	-20,15%	-2,22%
Portugal	-2,45%	-19,80%	-17,78%
Rumania	-56,36%	-65,16%	-20,18%
Federación Rusa	-54,42%	-52,02%	5,27%
Eslovaquia	-44,46%	-54,09%	-17,34%
Eslovenia	-15,81%	-11,69%	4,90%
España	24,34%	-5,87%	-24,29%
Suecia	-59,70%	-81,29%	-53,58%
Suiza	-4,09%	-19,29%	-15,84%
Turquía	127,56%	184,75%	25,13%
Ucrania	-53,63%	-65,32%	-25,20%
Reino Unido e Irlanda del Nor	-27,94%	-49,45%	-29,86%
Estados Unidos de América	3,82%	-6,62%	-10,06%

Fuente: Elaboración propia a partir de ONU (s. f.-a)

Para el año 2007, en España, las emisiones de CO₂ eran un 52% superiores a las registradas en 1990 (lógico, dado el crecimiento de la economía española en las dos décadas del protagonismo de la construcción (Vergés, s. f.)). Por tanto, España ha actuado como un free-rider tras la firma del acuerdo del Convenio Marco, igual que otros ocho países más. Sin embargo, los países que sí cumplieron con el acuerdo redujeron sus emisiones en un 24% (en gran medida por causa del deterioro económico y no tanto medidas a favor del medio ambiente) (Duarte, 2018).

En conclusión, observando la tabla de resultados, el Protocolo de Kyoto ha tenido un éxito parcial, por lo que cabe realizar dos valoraciones diferentes sobre sus resultados.

Por un lado, respecto al objetivo de reducir los gases de efecto invernadero en total, se podría concluir que el protocolo ha tenido éxito: para el año 2012, se logró una reducción media de los gases de efecto invernadero de aproximadamente el 20%, cuando el objetivo era el 5%, lo que significa que (teóricamente) se redujeron de forma drástica los daños ocasionados por la contaminación (Vergés, s. f.).

Por otro lado, como acuerdo de cooperación (no vinculante) internacional en materia de BPG se puede hablar de un fracaso (ONU, 1997), porque no se logró la participación de la totalidad de países responsables de la contaminación, ni se consiguió que los colaboradores cumplieran adecuadamente con lo firmado. Es decir, el objetivo de este tipo de acuerdos es, en primer lugar, lograr que todos los miembros relevantes firmen el acuerdo. Se fracasa en dicho objetivo al recibir la negativa de Estados Unidos (dentro de la que podría considerarse como la primera etapa actualizada de un juego pseudo-cooperativo), que actúa como el primer tipo de comportamiento de free-rider: abstenerse de firmar el acuerdo, no comprometerse a reducir las emisiones contaminantes, pero disfrutar del incremento de bienestar logrado por los firmantes del acuerdo. Países de gran relevancia se han limitado a actuar de forma óptima a nivel individual, es decir, siguiendo la ecuación [2]. En segundo lugar, un acuerdo como el Protocolo de Kyoto pretende que todos los miembros, una vez hayan firmado, cumplan con sus compromisos (dentro de lo que podría considerarse como un juego repetido de forma indefinida, dado que se esperaba continuación con París en 2012 y sucesivas enmiendas). Sin embargo, dada la inexistencia de mecanismos correctores creíbles, los incentivos para comportarse como free-riders son demasiado elevados, dando lugar al segundo tipo: firmar el acuerdo (por cuestiones políticas, electorales o del tipo que corresponda), pero, posteriormente, incumplir con lo acordado (matemáticamente nos remitimos a la función [2]). Dentro de este grupo tenemos a España, Austria, Chipre, Grecia, Irlanda, Japón, Liechtenstein,

Malta y Turquía, es decir, 9 países de 36 que ratificaron el acuerdo (ONU, s. f.-d) y se comprometieron a reducir emisiones, el 25%, una proporción bastante elevada, tal y como puede observarse en la Tabla 5.1

Por tanto, puede explicarse el fracaso del Protocolo de Kyoto como acuerdo internacional porque se enmarca, teóricamente, dentro de los juegos no-cooperativos. Esto implica que la colaboración existente no es vinculante, porque no existe ningún ente con capacidad coercitiva para obligar el cumplimiento de los acuerdos. Además, las herramientas para tratar de dotar de estabilidad a los acuerdos proporcionan importantes incentivos al comportamiento de free-rider. En consecuencia, dada la incapacidad de la Convención Marco para hacer firmar y cumplir los objetivos a todos los países, nos hallamos en una situación de provisión colectiva y privada del BPG “medio ambiente” que resulta insuficiente (García Arias, 2004). Por tanto, se reproducen los problemas ya observados en la provisión de bienes públicos sin sector público, con el resultado de una provisión ineficiente por debajo de lo óptimo socialmente deseado a causa de la aparición de una importante cantidad de polizones.

6. CONCLUSIONES

Para poder elaborar las conclusiones se han de recordar los objetivos planteados en la introducción: el primer y segundo objetivo, ligados a la primera y segunda parte del trabajo respectivamente, se dan por logrados, al haberse elaborado textos sintéticos a partir de la revisión e investigación bibliográfica de documentos apropiados de carácter académico y divulgativo. A su vez, las explicaciones son de utilidad para la tercera parte del trabajo y están íntimamente ligadas, de modo que la parte empírica del documento no se podría haber elaborado sin haberse detallado previamente las dos partes teóricas anteriores.

Respecto al tercer objetivo del trabajo, vinculado a la parte empírica del mismo, se pueden extraer dos conclusiones principales:

En primer lugar, el comportamiento de los países responsables de la contaminación respecto al Protocolo de Kyoto se ajusta en gran medida al comportamiento descrito de forma teórica en los modelos. En una primera fase, se detectan comportamientos de free-rider como el de Estados Unidos, quien no firma el tratado internacional y prioriza su comportamiento individual, maximizando su bienestar sin internalizar los costes a terceros de la contaminación que emite al producir. Se trata de un comportamiento de free-rider porque no contribuye a la reducción de los daños por la contaminación y, sin embargo, se beneficia de los esfuerzos del resto de países que sí colaboran, sin posibilidad de excluir al país norteamericano de las ganancias comunes. En una segunda fase, se detectan comportamientos de free-rider como el de España o Japón (entre otros), consistentes en firmar el acuerdo, pero, posteriormente, incumplir con lo pactado. Aunque estos países se comprometieron a reducir las emisiones (o a aumentarlas ligeramente, en función de su grado de desarrollo y su pasado), un 25% de los que ratificaron el acuerdo no cumplieron con sus compromisos. Se trata de un comportamiento de free-rider porque, aunque hayan firmado el acuerdo, posteriormente no contribuyen a lograr el objetivo, pero sí que se benefician de los esfuerzos del resto de países. Estos comportamientos se explican gracias a la Teoría de Juegos, ya que estos países tienen fuertes incentivos a actuar como polizones, dado que los castigos contemplados en el Protocolo de Kyoto no son efectivos, al no cumplir las condiciones teóricas que se exigen. Por tanto, se puede concluir que la Teoría de Juegos representa una herramienta útil para explicar el comportamiento individual de los países al decidir firmar o no acuerdos internacionales en materia de bienes públicos globales. Adicionalmente, se plantea como instrumento útil

para predecir el resultado de futuros acuerdos internacionales y qué condiciones podrían establecerse para procurar garantizar el máximo cumplimiento de los firmantes.

En segundo lugar, respecto a la valoración del Protocolo de Kyoto como acuerdo voluntario internacional en materia de bienes públicos globales, se puede concluir que ha resultado ser un fracaso. Si bien se han cumplido los objetivos colectivos, se ha fracasado con el objetivo de cumplimiento individual del acuerdo. El Protocolo de Kyoto se constituye bajo la premisa de que los países que más se han beneficiado históricamente de la contaminación (y los más contaminantes en la actualidad) son los primeros responsables en reducir la contaminación para asegurar la provisión socialmente óptima del bien público global “medio ambiente”; mientras, los países que menos se han beneficiado y que, potencialmente, pueden sufrir más las consecuencias (principalmente países en vías de desarrollo, de la periferia) tienen derecho a contaminar más o, al menos, a realizar menos sacrificios. Pero, como ya se ha indicado, existe un alto grado de incumplimiento. Por tanto, se puede hablar de un fracaso en el intento de evitar los comportamientos de free-rider de los países (tanto firmantes como no-firmantes).

En conclusión, a la vista de los resultados empíricos del Protocolo de Kyoto y su semejanza con las expectativas teóricas, se puede afirmar que la Teoría de Juegos es un instrumento de gran utilidad analítica para explicar los comportamientos de free-rider por parte de los países en materia de acuerdos internacionales voluntarios sobre bienes públicos globales; así como para establecer las condiciones necesarias para que dichas colaboraciones (enmarcadas en los juegos no-cooperativos) puedan gozar de mayor estabilidad y cumplimiento (si bien el cumplir dichas condiciones en la práctica resulta complicado por lo estricto de las mismas).

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Benegas Lynch, A. (s. f.). *Bienes públicos, externalidades y los free-riders: el argumento reconsiderado*. Eseade. Recuperado 21 de abril de 2023, de <https://riim.eseade.edu.ar/wp-content/uploads/2016/08/Benegas-Lynch-6.pdf>
- Carraro, C. (1998). *Beyond Kyoto. A Game-theoretic perspective*.
- Cerdá, E., Pérez, J., y Jimeno, J. L. (2004). *Teoría de juegos* (D. Fayerman Aragón, Ed.). Pearson Prentice Hall. https://books.google.com/books/about/Teor%C3%ADa_de_juegos.html?hl=es&id=uMIBsEUljFAC
- Chander, P., y Tulkens, H. (2011). *The Kyoto Protocol, the Copenhagen Accord, the Cancun Agreements, and beyond: An economic and game theoretical exploration and interpretation*.
- Curiel, I. J. (1980). *Cooperative Game Theory and Applications*.
- Fernández Fernández, Y., Fernández López, M. Á., y Olmedillas Blanco, B. (2009). Estrategias ante Kioto: Una visión de Teoría de Juegos. *Papeles de Economía Española*, 121, 36-44.
- Finus, M. (2000). *Game Theory and International Environmental Co-operation: A Survey with an application to the Kyoto-Protocol* (N.º 86; Vol. 63).
- Finus, M. (2008). The enforcement mechanisms of the Kyoto protocol: Flawed or promising concepts? *Letters in Spatial and Resource Sciences*, 1(1), 13-25. <https://doi.org/10.1007/s12076-008-0002-8>
- Fudenberg, D., y Tirole, J. (1991). *Game Theory*. Massachusetts Institute of Technology. [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=3KnuDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT11&dq=Fudenberg,+D.,+Tirole,+J.+\(1991\).+Game+Theory.+Cambridge,+Massachusetts,+MIT+Press.&ots=mAM8G3t81O&sig=oAzXLjSckuByDCYZknu2PpYO-7l#v=onepage&q=Fudenberg%2C%20D.%2C%20Tirole%2C%20J.%20\(1991\).%20Game%20Theory.%20Cambridge%2C%20Massachusetts%2C%20MIT%20Press.&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=3KnuDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT11&dq=Fudenberg,+D.,+Tirole,+J.+(1991).+Game+Theory.+Cambridge,+Massachusetts,+MIT+Press.&ots=mAM8G3t81O&sig=oAzXLjSckuByDCYZknu2PpYO-7l#v=onepage&q=Fudenberg%2C%20D.%2C%20Tirole%2C%20J.%20(1991).%20Game%20Theory.%20Cambridge%2C%20Massachusetts%2C%20MIT%20Press.&f=false)
- García Arias, J. (2004). Un nuevo marco de análisis para los bienes públicos: la Teoría de los Bienes Públicos Globales. *Estudios de Economía Aplicada*, 22(2), 187-212. www.revista-eea.net,
- Gibbons, R. (1997). An Introduction to Applicable Game Theory. *Journal of Economic Perspectives*, 11(1), 127-149.
- Hardin, G. (1994). The tragedy of the unmanaged commons. *Trends in Ecology and Evolution*, 9(5), 199. [https://doi.org/10.1016/0169-5347\(94\)90097-3](https://doi.org/10.1016/0169-5347(94)90097-3)
- Duarte, C. M. (2018, enero 5). El Protocolo de Kioto: ¿logro o fracaso? *El Español*. https://www.elespanol.com/ciencia/20180105/protocolo-kioto-logro-fracaso/272842718_12.html
- Martínez Rey, M. A., y Martínez Rey, M. M. (2011). Teoría de juegos. *Manual formativo de ACTA*, 60, 99-114. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5724682>
- Mendoza Huacchillo, M. S. (2019). *Estudio y aplicación de la Teoría de Juegos: El juego de emisión global* [Trabajo de Fin de Grado, Universidad de Sevilla]. <https://idus.us.es/handle/11441/88262>
- Myerson, R. B. (1991). Game Theory: Analysis of Conflict. En *Harvard*. Harvard University Press. <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=E8WQFRcsNr0C&oi=fnd&pg=PR11>

- &dq=R.+B.+Myerson,Game+Theory:+Analysis+of+Conflict,+Harvard+University+Press,+Cambridge,+1991.&ots=RtzcYxo2PB&sig=fVF4Sc2585nI5ygk2GUUg35YqOA#v=onepage&q&f=false
- Nese, A., O'Higgins, N., Sbriglia, P., y Scudiero, M. (2018). Cooperation, punishment and organized crime: a lab-in-the-field experiment in southern Italy. *European Economic Review*, 107, 86-98. <https://doi.org/10.1016/j.euroecorev.2018.05.004>
- ONU. (s. f.-a). Base de datos de emisiones de GHG. En UNFCCC. Recuperado 19 de mayo de 2023, de https://di.unfccc.int/time_series
- ONU. (s. f.-b). *Emissions Trading*. UNFCCC. Recuperado 18 de mayo de 2023, de <https://unfccc.int/process/the-kyoto-protocol/mechanisms/emissions-trading>
- ONU. (s. f.-c). *Joint implementation*. UNFCCC. Recuperado 18 de mayo de 2023, de <https://unfccc.int/process/the-kyoto-protocol/mechanisms/joint-implementation>
- ONU. (s. f.-d). *Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. UNFCCC. Recuperado 19 de mayo de 2023, de https://unfccc.int/process/parties-non-party-stakeholders/parties-convention-and-observer-states?field_partys_partyto_target_id%5B512%5D=512
- ONU. (s. f.-e). *The Clean Development Mechanism*. UNFCCC. Recuperado 18 de mayo de 2023, de <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-kyoto-protocol/mechanisms-under-the-kyoto-protocol/the-clean-development-mechanism>
- ONU. (1997). *Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático*.
- Ostrom, Elinor. (1990). *Governing the commons: the Evolution of Institutions for Collective Action* (J. E. Alt y C. North Douglass, Eds.). Cambridge University Press.
- Pindyck, R. S., y Rubinfeld, D. L. (2009). *Microeconomía* (A. Cañizal y M. Varela, Eds.; 7.ª ed.). Pearson Prentice Hall. www.pearsoneducacion.com
- Ramis Olivos, Á. (2013). *El concepto de bienes comunes en la obra de Elinor Ostrom*. 45, 116-121. <https://www.jstor.org/stable/43526869>
- Rasmusen, E. (1999). *Games and information: an Introduction to Game Theory* (4.ª ed.). Basil Blackwell.
- Real Academia Española. (s. f.). Definición de [Medio ambiente]. En *Diccionario de la lengua española*. Recuperado 20 de abril de 2023, de <https://dle.rae.es/medio?m=form2#BgNGPon>
- Samuelson, P. A. (1954). The Pure Theory of Public Expenditure. *The MIT Press*, 36(4), 387-389. <https://www.jstor.org/stable/1925895>
- Schelling, T. (1960). *The Strategy of Conflict*. Harvard University. https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=7RkL4Z8Yg5AC&oi=fnd&pg=PA3&dq=The+Strategy+of+Conflict&ots=43wTYeWShb&sig=9EUN4Ai17D_IHVI2VuKQKbFb6pc#v=onepage&q=The%20Strategy%20of%20Conflict&f=false
- Stiglitz, J. E. (2000). *La economía del sector público* (Antoni Bosch, Ed.; 3.ª ed.). <http://www.antonibosch.com>
- Vanegas de Medina, M., y Pascal Pinillo, J. (2014). Equilibrio de Nash y resolución de conflictos. *Revista de Ciencias Sociales (VE)*, 20(4), 658-677. <https://www.redalyc.org/pdf/280/28032820004.pdf>
- Velásquez González, J. A. (2009). Los bienes públicos globales y regionales: una herramienta para la gestión de la globalización. *Cuadernos unimetanos*, 18.

- Vergés, J. (s. f.). *El Protocolo de Kyoto, y el mercado de derechos de emisión de CO2; Regulación mediante mercado para una especial externalidad negativa.*
- Tenorio Villalón, Á. F., y Martín Caraballo, A. M. (2015). Un paseo por la historia de la Teoría de Juegos. *Boletín de Matemáticas*, 22(1), 77-95.
<https://revistas.unal.edu.co/index.php/bolma/article/view/51847>
- Würth, K. (s. f.). *¿Qué es el Protocolo de Kyoto?* UNFCCC. Recuperado 18 de mayo de 2023, de https://unfccc.int/es/kyoto_protocol

8. ANEXOS

Tabla A.1 Volumen de emisiones de gases de efecto invernadero medidas en kilotoneladas equivalentes de CO₂ de algunos países

País	1990	2012	2020
Australia	626.253,79	566.439,40	488.003,60
Austria	66.358,61	75.803,62	72.339,10
Belarus	116.062,53	48.812,11	50.637,08
Belgium	142.750,63	120.090,76	106.097,40
Bulgaria	80.468,09	51.234,67	39.580,40
Canada	531.184,87	702.022,20	665.593,45
Croatia	24.348,53	20.614,40	18.197,47
Cyprus	5.271,52	8.301,54	8.522,77
Czechia	188.019,02	126.699,27	125.560,38
Denmark	78.337,86	56.699,02	46.601,35
Estonia	37.015,28	16.476,44	12.853,08
European Union (Conventio	5.435.695,65	4.242.117,29	3.472.984,80
European Union (KP)	5.460.847,05	4.271.532,53	3.497.643,67
Finland	57.574,51	37.700,56	30.413,18
France	523.393,04	448.578,98	384.791,52
Germany	1.268.921,81	890.853,07	717.472,61
Greece	101.342,74	109.185,51	70.988,22
Hungary	91.721,57	56.324,07	55.997,24
Iceland	12.873,35	13.817,72	13.519,40
Ireland	61.015,92	65.264,41	64.958,54
Italy	516.260,19	461.385,79	348.846,95
Japan	1.204.584,25	1.324.844,48	1.096.111,66
Kazakhstan	381.694,78	303.413,78	351.244,26
Latvia	13.567,40	7.183,91	11.093,20
Liechtenstein	236,04	249,52	184,85
Lithuania	42.329,61	11.265,83	14.775,16
Luxembourg	12.895,38	11.516,18	8.731,52
Malta	2.591,13	3.130,58	2.119,41
Monaco	102,63	89,08	69,96
Netherlands	225.365,49	197.901,75	167.446,45
New Zealand	43.967,76	53.757,43	55.465,11
Norway	40.889,89	32.050,38	28.940,24
Poland	448.217,91	366.025,15	357.911,26
Portugal	65.926,62	64.312,69	52.876,00
Romania	222.395,12	97.058,01	77.472,87
Russian Federation	3.089.057,62	1.408.020,05	1.482.200,07
Slovakia	64.055,38	35.576,95	29.409,53
Slovenia	14.234,66	11.983,98	12.571,03
Spain	254.106,69	315.953,18	239.194,10
Sweden	34.850,48	14.044,81	6.520,21
Switzerland	51.522,32	49.413,58	41.585,73
Türkiye	163.984,01	373.163,26	466.949,58
Ukraine	910.983,12	422.406,13	315.940,94
United Kingdom of Great B	810.197,59	583.860,76	409.523,61
United States of America	5.592.825,17	5.806.598,66	5.222.411,06
Total	29.116.297,61	23.883.773,49	20.742.350,04

Fuente: Elaboración propia a partir de ONU (s. f.-a)