

Competencia y sostenibilidad: las decisiones medioambientales como instrumento estratégico

Andaluz Funcia, Joaquín (jandaluz@unizar.es)
Jarne Jarne, Gloria (gjarne@unizar.es)
Departamento de Análisis Económico
Universidad de Zaragoza

RESUMEN

En el campo de la Organización Industrial, ha surgido una línea de investigación cuyo objetivo es estudiar el papel estratégico de las acciones medioambientales llevadas a cabo por las empresas.

Las aportaciones existentes se desarrollan en contextos de oligopolio tanto bajo competencia en precios como en cantidades y, por lo general, se considera que cada empresa decide sus objetivos medioambientales (reducción del nivel de emisiones), la cantidad o el precio de forma simultánea. Desde nuestro punto de vista, dichas variables de decisión exigen periodos de ajuste diferentes. Por ello, en un duopolio espacial à la Hotelling (1929), en el que los consumidores prefieren consumir un bien menos contaminante, el objetivo del trabajo es analizar la influencia sobre los resultados de la estructura temporal en la toma de decisiones.

El análisis realizado muestra que los beneficios de las empresas son mayores cuando deciden secuencialmente su nivel de reducción de emisiones y los precios que cuando lo hacen simultáneamente. Asimismo, el equilibrio de Stackelberg en el subjuego de reducción de emisiones, permite demostrar que cada empresa prefiere ser líder a ser seguidora. Finalmente, se obtiene que, desde el punto de vista social, el mercado proporciona un nivel de reducción de emisiones insuficiente.

Palabras claves: Responsabilidad social medioambiental; reducción de emisiones; duopolio de Hotelling; equilibrio de Nash perfecto en subjuegos

ABSTRACT

In the field of Industrial Organization, a research line has emerged aiming to study the strategic role of environmental actions undertaken by firms. Existing contributions are developed in oligopoly contexts under both price and quantity competition, generally assuming that each firm simultaneously determines its environmental objectives (emission reduction level), quantity, or price. From our perspective, these decision variables require different adjustment periods. Therefore, in a spatial duopoly à la Hotelling (1929), where consumers prefer a less polluting product, this study aims to analyze the impact of the temporal structure of decision-making on market outcomes.

Our analysis shows that firms achieve higher profits when they sequentially decide their emission reduction levels and prices rather than doing so simultaneously. Moreover, the Stackelberg equilibrium in the emission reduction subgame demonstrates that each firm prefers to be the leader rather than the follower. Finally, from a social perspective, the market provides an insufficient level of emission reduction.

Keywords: Environmental social responsibility; emission reductions; Hotelling duopoly; subgame perfect Nash equilibrium

Área temática: Aspectos cuantitativos de problemas económicos y empresariales.

1. INTRODUCCIÓN

Fenómenos como la polución, el cambio climático o el calentamiento global, han ocasionado un creciente interés por el medioambiente, no solo por parte de las autoridades públicas sino también por parte de las empresas. Tal y como Xu y Lee (2022) señalan, grandes compañías como ExxonMobil, Walt Disney, Walmart, Intel, Xcel Energy o Microsoft, han incorporado objetivos medioambientales en su política de responsabilidad social corporativa. Por ejemplo, desde 2008, Intel y Xcel Energy compensan a sus empleados de acuerdo con indicadores de sostenibilidad, eficiencia energética, reducción de emisiones de efecto invernadero y la mejora de la reputación de la empresa como líder medioambiental. Asimismo, algunos trabajos empíricos, tales como los desarrollados por Margolis et al. (2007), Lu y Abeysekera (2014) y Xie et al. (2019), muestran que la incorporación de objetivos medioambientales en la responsabilidad social mejora el rendimiento financiero de la empresa.

Por otra parte, a pesar de que la adopción de responsabilidad social medioambiental conlleva un coste para las empresas, puede ser un instrumento estratégico para mejorar su reputación en el mercado y obtener mayores beneficios, aspecto este último que ha suscitado el interés en el campo de la Organización Industrial. Por ejemplo, Liu et al. (2015) demuestran que la adopción de responsabilidad social medioambiental incrementa la demanda y los beneficios. Lee y Park (2019), en el contexto de un duopolio con producto diferenciado y con delegación estratégica, consideran la competencia entre empresas contaminantes que pueden reducir sus emisiones y remunerar a sus managers de acuerdo con un incentivo medioambiental. Suponiendo que las empresas deciden su nivel de responsabilidad medioambiental de forma secuencial, los autores demuestran que cuando el grado de diferenciación del producto es bajo, la empresa que decide en segundo lugar fija un menor nivel de responsabilidad ambiental y obtiene un mayor beneficio que la empresa que decide en primer lugar.

Otra rama de la literatura analiza el efecto del establecimiento de impuestos medioambientales en contextos de competencia imperfecta, siendo relevantes las aportaciones de Katsoulacos y Xepapadeas (1995) y Lee (1999), quienes estudian la imposición óptima como medio de regulación medioambiental en un contexto de oligopolio. Poyago-Theotoky y Yong (2019), en un duopolio con delegación, analizan el

efecto de un impuesto a las emisiones sobre la calidad medioambiental y el bienestar social. En un contexto de monopolio, Fukuda y Ouchida (2020) y Wang (2021), estudian la relación entre los impuestos sobre emisiones y las actividades de responsabilidad social medioambiental de las empresas. Xu y Lee (2022) examinan la imposición sobre las emisiones en un duopolio, suponiendo que las empresas deciden su nivel de responsabilidad ambiental de forma cooperativa y no cooperativa, tanto bajo competencia en cantidades como en precios. Más recientemente, Xu et al. (2024) estudian la relación estratégica entre la imposición medioambiental y el diseño de contratos de delegación en un duopolio bajo competencia en precios y en cantidades.

La inmensa mayoría de los trabajos mencionados consideran que las decisiones medioambientales (reducción del nivel de emisiones contaminantes) y los precios (o las cantidades) se toman simultáneamente.¹

Desde nuestro punto de vista, ambas variables de decisión exigen periodos de ajuste diferentes, interpretando la fijación del precio o la elección de la cantidad como decisiones a corto plazo, mientras que el nivel de reducción de emisiones es una decisión de largo plazo. Por otra parte, como es sabido, la secuenciación de la toma de decisiones puede tener consecuencias importantes en la interacción estratégica entre las empresas y afectar a la competencia (véase Hamilton y Slutsky 1990). Por ello, tomando como referencia el duopolio espacial de Hotelling (1929), el objetivo del presente trabajo es analizar la influencia de la estructura temporal en la toma de decisiones relativas a la reducción de emisiones y a los precios, bajo el supuesto de que los consumidores prefieren consumir un bien menos contaminante.

El resto del trabajo se organiza de la siguiente forma: la sección 2 describe el modelo utilizado y la estructura de los distintos juegos planteados. En la sección 3 se analiza y resuelve el juego estático (de una etapa) en el que las empresas deciden simultáneamente sus niveles de reducción de emisiones y los precios. La sección 4 desarrolla un juego secuencial en el que, en una primera etapa, se determinan los niveles de reducción de emisiones y, en una segunda etapa, se compite en precios. En dicho escenario, se analizarán los casos en los que en la primera etapa ambas empresas deciden

¹ Como excepciones podemos mencionar las aportaciones de Poyago-Theotoky y Yong (2019), Fukuda y Ouchida (2020) y Wang (2021).

de forma simultánea, secuencial y cuando la decisión medioambiental es llevada a cabo por un regulador. En la sección 5 se comparan los resultados obtenidos en los distintos escenarios planteados. Finalmente, la sección 6 presenta las principales conclusiones y extensiones.

2. EL MODELO

Consideramos una versión del modelo básico de competencia espacial de Hotelling (1929).

Suponemos un mercado lineal representado por el intervalo unitario $[0, 1]$. En dicho mercado, se localizan dos empresas que ofrecen cantidades de un bien diferenciado únicamente por su localización. Supondremos que las localizaciones de las empresas son fijas. La empresa 1 se localiza en el extremo izquierdo del intervalo y la empresa 2 se localiza en el extremo derecho.

A efectos de simplificación, supondremos que los costes de producción de ambas empresas son nulos. No obstante, la producción implica polución, de modo que q_i unidades de output generan e_i unidades de contaminación. Siguiendo a Xu y Lee (2022), supondremos que ambas empresas pueden aplicar una determinada tecnología para reducir el nivel de emisiones. De este modo, si una empresa reduce su nivel de emisiones en z_i , las emisiones producidas son: $e_i = q_i - z_i$, donde $z_i \in [0, q_i]$. La reducción de la contaminación conlleva un coste que se supone cuadrático: $C_i(z_i) = z_i^2$.

Los consumidores se distribuyen de manera uniforme a lo largo del intervalo $[0,1]$. Cada consumidor comprará una unidad del producto a la empresa que le proporcione un mayor excedente. No consumirá cantidad alguna si su excedente es negativo (supuesto de demanda inelástica). En concreto, la función indirecta de utilidad de un consumidor localizado en el punto $m \in [0,1]$ que adquiere una unidad del producto a la empresa ubicada en la localización $s_i \in [0,1]$, viene dada como:

$$u(m, s_i, z_i, p_i) = v + \gamma z_i - p_i - t|m - s_i|$$

donde:

- v denota el precio de reserva, común para todos los consumidores y lo suficientemente elevado como para que el mercado esté cubierto.
- p_i representa el precio de fábrica (*mill price*) fijado por la empresa i .
- $t|m - s_i|$ denota el coste de transporte expresado en términos de la distancia entre la localización de la empresa y la del consumidor. En un contexto de diferenciación del producto, representa la pérdida de utilidad derivada de adquirir un producto distinto de la variedad ideal. A efectos de simplificación, supondremos que $t = 1$.
- $\gamma > 0$ es un parámetro que representa la preferencia de los consumidores por un producto menos contaminante. De este modo, un mayor esfuerzo por reducir las emisiones aumenta la disponibilidad a pagar de los consumidores ².

Funciones de demanda

Sea x la localización del consumidor indiferente entre adquirir la unidad del producto a la empresa 1 o a la 2. Formalmente:

$$v + \gamma z_1 - p_1 - x = v + \gamma z_2 - p_2 - (1 - x)$$

de donde se obtiene la expresión:

$$x = \frac{1 + \gamma(z_1 - z_2) + p_2 - p_1}{2} \quad (1)$$

A partir de (1), las demandas capturadas por ambas empresas vienen dadas por las siguientes funciones definidas a trozos:

$$q_1(p_1, p_2) = \begin{cases} 0 & \text{si } p_1 \geq p_1^{max} \\ x & \text{si } p_1^{max} > p_1 > p_1^{min} \\ 1 & \text{si } p_1^{min} \geq p_1 \end{cases}; \quad q_2(p_1, p_2) = \begin{cases} 0 & \text{si } p_2 \geq p_2^{max} \\ 1 - x & \text{si } p_2^{max} > p_2 > p_2^{min} \\ 1 & \text{si } p_2^{min} \geq p_2 \end{cases} \quad (2)$$

donde:

$$p_i^{min} = p_j - 1 + \gamma(z_i - z_j); \quad p_i^{max} = p_j + 1 + \gamma(z_i - z_j), \quad i, j = 1, 2; i \neq j$$

El objetivo de las empresas es maximizar su beneficio individual mediante la elección del precio y el nivel de reducción de emisiones. En este trabajo se considerarán dos escenarios:

² Dicho supuesto es utilizado por Xu et al. (2024), quienes definen una función de utilidad de un consumidor representativo en línea con Singh y Vives (1984).

- Un juego estático, en el que ambas empresas deciden de manera simultánea el precio y el nivel de reducción de emisiones.
- Un juego secuencial, en el que, en una primera etapa, se decide el nivel de reducción de emisiones y en una segunda etapa, se compite vía precios. Además, la primera etapa se estudiará en tres contextos alternativos: uno, en el que ambas empresas eligen simultáneamente el nivel de reducción de emisiones; otro, en el que la elección se lleva a cabo secuencialmente, actuando una empresa como líder y la otra como seguidora; y, un tercero, en el que el nivel de reducción de emisiones es decidido por un regulador maximizador del bienestar social.

3. ELECCIÓN SIMULTÁNEA DEL PRECIO Y DEL NIVEL DE REDUCCIÓN DE EMISIONES

Suponiendo que ambas empresas deciden de forma simultánea el nivel de reducción de emisiones y el precio, se obtiene un juego estático que se resuelve a continuación.

Teniendo en cuenta las demandas capturadas, dadas en (2), y suponiendo que ambas empresas son activas, el problema de la empresa i , dada la decisión de la empresa rival, (p_j, z_j) , es:

$$\text{Max}_{p_i, z_i} \Pi_i(p_i, z_i) = p_i \frac{1 + \gamma(z_i - z_j) + p_j - p_i}{2} - z_i^2$$

Las condiciones de primer orden son:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \Pi_i}{\partial p_i} &= \frac{1 + \gamma(z_i - z_j) + p_j - 2p_i}{2} = 0 \\ \frac{\partial \Pi_i}{\partial z_i} &= \frac{\gamma p_i}{2} - 2z_i = 0 \end{aligned} \right\}$$

de donde se deducen las funciones de mejor respuesta de la empresa i ($i \neq j$):

$$\left. \begin{aligned} p_i &= R_i^p(p_j, z_j) = \frac{4(1 - \gamma z_j + p_j)}{8 - \gamma^2} \\ z_i &= R_i^z(p_j, z_j) = \frac{\gamma(1 - \gamma z_j + p_j)}{8 - \gamma^2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

La condición que asegura que (3) constituye un máximo de la función de beneficios de la empresa i , es que dicha función es estrictamente cóncava en su dominio

de definición puesto que su matriz hessiana, $H\Pi_i(p_i, z_i) = \begin{pmatrix} -1 & \frac{\gamma}{2} \\ \frac{\gamma}{2} & -2 \end{pmatrix}$, es definida

negativa $\forall 0 < \gamma < 2\sqrt{2}$.

Resolviendo el sistema de ecuaciones, dado en (3), se deducen los niveles de reducción de emisiones y niveles de precios que constituyen el equilibrio de Nash del juego:

$$z_1^* = z_2^* = \frac{\gamma}{4}, p_1^* = p_2^* = 1$$

siendo los beneficios óptimos obtenidos por cada empresa:

$$\Pi_i^*(\text{simultáneo}) = \frac{8 - \gamma^2}{16}, i = 1, 2 \quad (4)$$

Teniendo en cuenta que se debe cumplir $z_i^* = \frac{\gamma}{4} \leq q_i^* = \frac{1}{2}$, se deduce, para este modelo, el intervalo de variación del parámetro representativo de la preferencia por un consumo menos contaminante $0 < \gamma \leq 2$.

La resolución llevada a cabo del juego estático que modeliza la situación en que ambas empresas deciden simultáneamente sobre los precios y la reducción en emisiones permite establecer el siguiente resultado.

Proposición 1.

En el juego estático en el que las empresas deciden simultáneamente el nivel de reducción de emisiones y el precio, si $0 < \gamma \leq 2$ el equilibrio de Nash viene dado por

$$z_1^* = z_2^* = \frac{\gamma}{4}; p_1^* = p_2^* = 1 \text{ y los beneficios son } \Pi_i^*(\text{simultáneo}) = \frac{8 - \gamma^2}{16}, i = 1, 2.$$

De las funciones de reacción de cada empresa dadas en (3), se concluye que los niveles de reducción de emisiones actúan como variables sustitutivas estratégicas, ya que:

$$\frac{\partial z_i}{\partial z_j} = \frac{-\gamma^2}{8-\gamma^2} \leq 0, \forall 0 < \gamma \leq 2$$

Por el contrario, los precios son variables complementarias estratégicas, puesto que:

$$\frac{\partial p_i}{\partial p_j} = \frac{1}{8-\gamma^2} > 0, \forall 0 < \gamma \leq 2$$

De ello se deduce que las empresas, en la fijación del precio presentan un comportamiento más colusorio, ya que los precios varían en la misma dirección, mientras que, en la elección del nivel de emisiones, tienen una conducta más competitiva.

4. ELECCIÓN SECUENCIAL DEL NIVEL DE REDUCCIÓN DE EMISIONES Y DEL PRECIO

Supongamos ahora que ambas empresas deciden secuencialmente el nivel de reducción de emisiones y el nivel de precios. Ello conduce a la resolución de un juego dinámico en dos etapas: en una primera etapa, se eligen los niveles z_1 y z_2 , y en una segunda etapa, los precios p_1 y p_2 . Como ya se ha comentado anteriormente, la primera etapa se estudiará en tres escenarios: un juego no cooperativo en el que ambas empresas eligen simultáneamente el nivel de reducción de emisiones; un juego secuencial, en el que una empresa actúa como líder y la otra como seguidora; y un tercer escenario, en el que el nivel de reducción de emisiones es decidido por un regulador.

4.1. Elección simultánea de los niveles de reducción de emisiones

La resolución del juego secuencial en dos etapas que se plantea se realiza mediante el algoritmo de inducción hacia atrás que nos permitirá obtener el equilibrio de Nash perfecto en subjuegos y el resultado perfecto en subjuegos asociado.

En la segunda etapa del juego, conocidos los niveles de reducción de emisiones, z_1 y z_2 , el objetivo de cada empresa es maximizar su beneficio a través de su precio,

dado el precio del rival. Así, para la empresa i , dado el precio de la empresa j , el problema a resolver es:

$$\underset{p_i}{\text{Max}} \quad \Pi_i(p_i) = p_i \frac{1 + \gamma(z_i - z_j) + p_j - p_i}{2} - z_i^2$$

La condición de primer orden es:

$$\frac{d\Pi_i}{dp_i} = \frac{1 + \gamma(z_i - z_j) + p_j - 2p_i}{2} = 0 \quad (5)$$

La condición suficiente de máximo se verifica, ya que $\frac{d^2\Pi_i}{dp_i^2} = -1 < 0$.

De la condición (5) se deduce la función de mejor respuesta de la empresa i :

$$p_i = R_i(p_j) = \frac{1 + \gamma(z_i - z_j) + p_j}{2}, \quad i \neq j$$

La intersección de ambas funciones de reacción define el candidato al equilibrio de Nash en precios, dado por:

$$p_1^* = \frac{\gamma(z_1 - z_2) + 3}{3}, \quad p_2^* = \frac{\gamma(z_2 - z_1) + 3}{3}, \quad \forall \quad \frac{-3}{\gamma} \leq z_1 - z_2 \leq \frac{3}{\gamma} \quad (6)$$

siendo los beneficios asociados:

$$\Pi_1^* = \frac{[\gamma(z_1 - z_2) + 3]^2}{18} - z_1^2, \quad \Pi_2^* = \frac{[\gamma(z_2 - z_1) + 3]^2}{18} - z_2^2 \quad (7)$$

A continuación, comprobaremos que ninguna de las empresas tiene incentivos a desviarse unilateralmente del equilibrio en precios. Razonemos desde el punto de vista de la empresa 1 y supongamos que dicha empresa fija un precio que le permite capturar toda la demanda. En ese caso, fijaría el precio:

$$\bar{p}_1 = p_1^{\min} = p_2^* - 1 + \gamma(z_1 - z_2) = \frac{2\gamma(z_1 - z_2)}{3}$$

alcanzando el beneficio:

$$\bar{\Pi}_1(\bar{p}_1, p_2^*) = \frac{2\gamma(z_1 - z_2)}{3} - z_1^2$$

Estableciendo la comparación entre los beneficios, se obtiene:

$$\Pi_1^* - \bar{\Pi}_1 = \frac{[\gamma(z_1 - z_2) - 3]^2}{18} > 0, \quad \forall \quad \frac{-3}{\gamma} \leq z_1 - z_2 \leq \frac{3}{\gamma}$$

Por tanto, los precios dados en (6) constituyen un equilibrio de Nash del subjuego de la segunda etapa.

En la primera etapa, cada empresa maximiza su beneficio individual, dado en (7), con respecto a su nivel de reducción de emisiones, dado el nivel de su rival. Así, la empresa i resuelve el problema:

$$\text{Max}_{z_i} \Pi_i^*(z_i) = \frac{[\gamma(z_i - z_j) + 3]^2}{18} - z_i^2$$

La condición necesaria para este problema viene expresada de la forma:

$$\frac{d\Pi_i^*}{dz_i} = \frac{\gamma[3 + \gamma(z_i - z_j)]}{9} - 2z_i = 0, \quad i \neq j$$

verificándose la condición suficiente de máximo $\forall 0 < \gamma < 3\sqrt{2}$, puesto que:

$$\frac{d^2\Pi_i^*}{dz_i^2} = \frac{\gamma^2}{9} - 2 < 0$$

De las condiciones de primer orden se deducen las funciones de mejor respuesta de las empresas, dadas por:

$$z_i = R_i(z_j) = \frac{\gamma(3 - \gamma z_j)}{18 - \gamma^2}, \quad i, j = 1, 2, i \neq j \quad (8)$$

cuya intersección define el candidato al equilibrio de Nash del subjuego de la primera etapa:

$$z_i^* = \frac{\gamma}{6}, \quad i = 1, 2 \quad (9)$$

dando lugar a los beneficios asociados:

$$\Pi_i^*(\text{secuencial}) = \frac{18 - \gamma^2}{36}, \quad i = 1, 2 \quad (10)$$

Teniendo en cuenta que se ha de verificar $z_i^* = \frac{\gamma}{6} \leq q_i^* = \frac{1}{2}$, se deduce que el intervalo de variación del parámetro representativo de la preferencia por el consumo de un bien menos contaminante en esta modelización es: $0 < \gamma \leq 3$.

Falta comprobar que efectivamente el resultado dado en (9) es un equilibrio de Nash del subjuego de la primera etapa. Supongamos que la empresa 1 elige un nivel de

reducción de emisiones que le permite capturar toda la demanda (el mismo razonamiento puede aplicarse desde el punto de vista de la empresa 2). En ese caso, fijaría el nivel:

$$\bar{z}_1 = \frac{3}{\gamma} + z_2^* = \frac{3}{\gamma} + \frac{\gamma}{6} = \frac{18 + \gamma^2}{6\gamma}$$

obteniendo un beneficio de:

$$\bar{\Pi}_1(\bar{z}_1, z_2^*) = \frac{-\gamma^4 + 36\gamma^2 - 324}{36\gamma^2}$$

Comparando los beneficios se observa:

$$\Pi_1^*(z_1^*, z_2^*) > \bar{\Pi}_1(\bar{z}_1, z_2^*) \Leftrightarrow \frac{18 - \gamma^2}{36} > \frac{-\gamma^4 + 36\gamma^2 - 324}{36\gamma^2}$$

Esta desigualdad se verifica para todo $0 < \gamma < 3\sqrt{2}$. Por tanto, se concluye que los niveles de reducción de emisiones dados en (9) constituyen un equilibrio de Nash del subjuego de la primera etapa.

Sustituyendo (9) en (6), se obtiene: $p_i^* = 1$ ($i = 1, 2$), obteniéndose el equilibrio de Nash perfecto en subjuegos y el resultado perfecto en subjuegos asociado, así como los beneficios obtenidos por cada empresa.

La resolución del juego secuencial permite obtener la siguiente proposición.

Proposición 2

En un juego secuencial en el que en una primera etapa ambas empresas eligen simultáneamente los niveles de reducción de emisiones y en una segunda etapa compiten simultáneamente en precios, si $0 < \gamma \leq 3$, el resultado asociado al equilibrio de Nash

perfecto en subjuegos viene dado por $z_1^ = z_2^* = \frac{\gamma}{6}$; $p_1^* = p_2^* = 1$ y los beneficios*

obtenidos son $\Pi_i^(\text{secuencial}) = \frac{18 - \gamma^2}{36}$, $i = 1, 2$*

4.2. Liderazgo en la elección de la reducción de emisiones

Extendemos el juego dinámico anterior suponiendo que la solución del subjuego de reducción de emisiones corresponde a un equilibrio de Stackelberg. Es decir, asumimos que, en la primera etapa, una de las empresas (líder) elige en primer lugar el

nivel de emisiones y la otra (seguidora), lo hace en segundo lugar. Ello equivale a plantear un juego secuencial en tres etapas. En una primera etapa, una empresa (por ejemplo, la 1) elige su nivel de reducción de emisiones z_1 . En una segunda etapa, la empresa 2 elige su correspondiente nivel de reducción z_2 y en una tercera etapa, ambas empresas compiten simultáneamente en precios.

Se resuelve en primer lugar el subjuego de la tercera etapa (competencia en precios) que es el mismo que el subjuego de la segunda etapa del juego secuencial anterior, cuyo equilibrio de Nash está dado en (6) y los beneficios asociados en (7).

Decisión del seguidor

Dado z_1 , elegido por la empresa 1 en la primera etapa, la decisión óptima de la empresa 2 respecto a su nivel de emisiones, viene dada por su función de mejor respuesta, dada en (8).

Decisión del líder

Dada la función de mejor respuesta del seguidor dada en (8), la demanda capturada por la empresa 1 (líder) se obtiene al sustituir (6) y (8) en (1):

$$x = \frac{9 - \gamma^2 + 3\gamma z_1}{18 - \gamma^2} \quad (11)$$

Si la empresa 1 fija un nivel de reducción de emisiones que le permita capturar toda la demanda:

$$x = \frac{9 - \gamma^2 + 3\gamma z_1}{18 - \gamma^2} = 1, \text{ se ha de cumplir: } \hat{z}_1 = \frac{3}{\gamma} \text{ y } \hat{z}_2 = 0$$

Teniendo en cuenta que ha de cumplirse que $\hat{z}_1 = \frac{3}{\gamma} \leq q_1 = 1$, se deduce que para que la empresa 1 capture toda la demanda, la preferencia de los consumidores por un consumo menos contaminante debe ser lo suficientemente elevada: $\gamma \geq 3$. Sustituyendo dicho nivel de reducción de emisiones en (6), se obtiene el precio fijado por ambas empresas: $\hat{p}_1 = 2$ y $\hat{p}_2 = 0$, dando lugar al nivel de beneficios:

$$\hat{\Pi}_1 = \frac{2\gamma^2 - 9}{\gamma^2}, \hat{\Pi}_2 = 0 \quad (12)$$

Si $z_1 < \frac{3}{\gamma}$, ambas empresas capturan cuota de mercado. En ese caso, sustituyendo

en (7) la función de mejor respuesta de la empresa 2 dada en (8), se obtiene el problema de maximización que dará la decisión óptima de la empresa 1 en la primera etapa:

$$\underset{z_1}{\text{Max}} \Pi_1(z_1) = \frac{2(9 - \gamma^2 + 3\gamma z_1)^2}{(18 - \gamma^2)^2} - z_1^2 \quad (13)$$

La condición de primer orden de máximo beneficio viene dada por:

$$\frac{d\Pi_1}{dz_1} = \frac{12\gamma(9 - \gamma^2 + 3\gamma z_1)}{(18 - \gamma^2)^2} - 2z_1 = 0$$

de donde se deduce el nivel de reducción de emisiones óptimo del líder:

$$z_1^L = \frac{6\gamma(9 - \gamma^2)}{324 - 54\gamma^2 + \gamma^4} \quad (14)$$

La condición suficiente que asegura que (14) es la decisión óptima es:

$$\begin{aligned} \frac{d^2\Pi_1}{dz_1^2} &= 2 \frac{18\gamma^2 - (18 - \gamma^2)^2}{(18 - \gamma^2)^2} = 2 \frac{324 - 54\gamma^2 + \gamma^4}{(18 - \gamma^2)^2} = \\ &= 2 \frac{(18 + 3\sqrt{2}\gamma - \gamma^2)(-18 + 3\sqrt{2}\gamma + \gamma^2)}{(18 - \gamma^2)^2} < 0 \end{aligned}$$

desigualdad que se verifica si $0 < \gamma < \frac{3\sqrt{2}(\sqrt{5}-1)}{2}$.

Introduciendo (14) en (11), se obtiene la demanda capturada por la empresa 1, dada por:

$$x = \frac{(9 - \gamma^2)(18 - \gamma^2)}{324 - 54\gamma^2 + \gamma^4}$$

Por otra parte, imponiendo la restricción:

$$z_1^L = \frac{6\gamma(9 - \gamma^2)}{324 - 54\gamma^2 + \gamma^4} \leq q_1^L = \frac{(9 - \gamma^2)(18 - \gamma^2)}{324 - 54\gamma^2 + \gamma^4}$$

se deduce que el parámetro representativo de la preferencia por un consumo menos contaminante debe verificar la desigualdad: $\gamma^2 + 6\gamma - 18 \leq 0$, obteniendo el rango de variación: $0 < \gamma \leq 3(\sqrt{3} - 1)$.

Sustituyendo (14) en la función de mejor respuesta del seguidor dada en (8), se determina el nivel de reducción de emisiones de dicha empresa:

$$z_2^S = \frac{9\gamma(6 - \gamma^2)}{324 - 54\gamma^2 + \gamma^4} \geq 0, \forall 0 < \gamma \leq 3(\sqrt{3} - 1) \quad (15)$$

Introduciendo en (6) los valores óptimos de reducción de emisiones dados en (14) y (15), se obtienen los niveles de precios que son el equilibrio de Nash del subjuego de competencia en precios:

$$p_1^L = \frac{2(18 - \gamma^2)(9 - \gamma^2)}{324 - 54\gamma^2 + \gamma^4}, p_2^S = \frac{54(6 - \gamma^2)}{324 - 54\gamma^2 + \gamma^4} \quad (16)$$

dando lugar a los beneficios:

$$\Pi_1^L = \frac{2(9 - \gamma^2)^2}{324 - 54\gamma^2 + \gamma^4}, \Pi_2^S = \frac{81(18 - \gamma^2)(6 - \gamma^2)^2}{(324 - 54\gamma^2 + \gamma^4)^2} \quad (17)$$

La resolución del juego secuencial llevada a cabo demuestra el siguiente resultado.

Proposición 3

Suponiendo un juego secuencial en el que en la primera etapa la empresa 1 (líder) elige en primer lugar el nivel de reducción de emisiones y la empresa 2 (seguidora) decide en segundo lugar y en una segunda etapa, ambas empresas compiten simultáneamente en precios:

- Si $\gamma > 3$ el resultado asociado al equilibrio de Nash perfecto en subjuegos es

$$z_1^L = \frac{3}{\gamma}, z_2^S = 0; p_1^L = 2, p_2^S = 0 \text{ y los beneficios son } \Pi_1^L = \frac{2\gamma^2 - 9}{\gamma^2}, \Pi_2^S = 0.$$

- Si $0 < \gamma \leq 3(\sqrt{3} - 1)$, el resultado asociado al equilibrio de Nash perfecto en subjuegos viene dado por:

$$z_1^L = \frac{6\gamma(9-\gamma^2)}{324-54\gamma^2+\gamma^4}; z_2^S = \frac{9\gamma(6-\gamma^2)}{324-54\gamma^2+\gamma^4};$$

$$p_1^L = \frac{2(9-\gamma^2)(18-\gamma^2)}{324-54\gamma^2+\gamma^4}, p_2^S = \frac{54(6-\gamma^2)}{324-54\gamma^2+\gamma^4}$$

y los beneficios obtenidos son:

$$\Pi_1^L = \frac{2(9-\gamma^2)^2}{324-54\gamma^2+\gamma^4}, \Pi_2^S = \frac{81(18-\gamma^2)(6-\gamma^2)^2}{(324-54\gamma^2+\gamma^4)^2}$$

4.3. Nivel de reducción de emisiones socialmente óptimo

Supongamos ahora que, en la primera etapa del juego, un regulador determina los niveles de reducción de emisiones que maximizan el bienestar social. Fijados los niveles de reducción de emisiones, en la segunda etapa, las empresas compiten simultáneamente en precios.

Aplicando la resolución mediante el algoritmo de inducción hacia atrás, se resuelve primero el subjuego en la segunda etapa cuyo equilibrio de Nash viene expresado en (6), siendo las demandas capturadas por las empresas:

$$x = \frac{\gamma(z_1 - z_2) + 3}{6}; 1 - x = \frac{\gamma(z_2 - z_1) + 3}{6}, \quad \forall \quad \frac{-3}{\gamma} < z_1 - z_2 < \frac{3}{\gamma} \quad (18)$$

En la primera etapa, el regulador determinará los niveles de reducción de emisiones que proporcionan el máximo bienestar (W), definido como la suma del excedente del consumidor (EC) y el excedente del productor (EP), menos el daño medioambiental³ (ED), es decir, $W = EC + EP - ED$, donde:

$$EC = \int_0^x (v + \gamma z_1 - p_1 - m) dm + \int_x^1 (v + \gamma z_2 - p_2 - (1 - m)) dm =$$

$$= v + \gamma [z_1 x + z_2 (1 - x)] - p_1 x - p_2 (1 - x) - \frac{[x^2 + (1 - x)^2]}{2}$$

$$EP = \Pi_1 + \Pi_2 = p_1 x - z_1^2 + p_2 (1 - x) - z_2^2$$

³ Suponemos que el daño medioambiental viene representado por una función cuadrática, en línea con Fukuda y Ouchida (2020), Wang (2021) y Xu et al. (2024).

$$ED = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^2 e_i \right)^2 = \frac{(1 - z_1 - z_2)^2}{2}$$

Teniendo en cuenta (18) y tras algunas manipulaciones, el problema a resolver por el regulador es:

$$\underset{z_1, z_2}{\text{Max}} W(z_1, z_2) = v + \frac{5\gamma^2 (z_1 - z_2)^2}{36} + \frac{(2 + \gamma)(z_1 + z_2) - 3(z_1^2 + z_2^2)}{2} - z_1 z_2 - \frac{3}{4} \quad (19)$$

Las condiciones necesarias de maximización vienen expresadas como:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial W(z_1, z_2)}{\partial z_1} &= \frac{5\gamma^2 (z_1 - z_2) - 54z_1 - 18z_2 + 9(2 + \gamma)}{18} = 0 \\ \frac{\partial W(z_1, z_2)}{\partial z_2} &= \frac{-5\gamma^2 (z_1 - z_2) - 54z_2 - 18z_1 + 9(2 + \gamma)}{18} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

La condición que asegura que la solución de (20) resuelve el problema dado en (19) es que $0 < \gamma \leq \frac{3\sqrt{10}}{5}$, ya que en este intervalo la matriz hessiana,

$$HW(z_1, z_2) = \begin{pmatrix} \frac{5\gamma^2 - 54}{18} & \frac{-(5\gamma^2 + 18)}{18} \\ \frac{-(5\gamma^2 + 18)}{18} & \frac{5\gamma^2 - 54}{18} \end{pmatrix}, \text{ es semidefinida negativa.}$$

La resolución del sistema de ecuaciones definido en (20), determina los niveles de reducción de emisiones: $z_1^* = z_2^* = \frac{2 + \gamma}{8}$. Sustituyendo dichos valores en (6), se deducen los niveles de precios que conforman el equilibrio de Nash de la segunda etapa:

$$p_1^* = p_2^* = 1, \text{ siendo los beneficios asociados } \Pi_i(\text{regulador}) = \frac{18 - 4\gamma - \gamma^2}{64}, i = 1, 2.$$

La resolución anterior del juego secuencial planteado demuestra la siguiente proposición.

Proposición 4.

Suponiendo un juego secuencial en el que en la primera etapa un regulador fija el nivel de reducción de emisiones que maximiza el bienestar social y en una segunda

etapa, ambas empresas compiten simultáneamente en precios, si $0 < \gamma \leq \frac{3\sqrt{10}}{5}$ entonces

el resultado asociado al equilibrio de Nash perfecto en subjuegos viene dado por:

$z_1^* = z_2^* = \frac{2+\gamma}{8}$; $p_1^* = p_2^* = 1$ y el beneficio óptimo para ambas empresas es

$$\Pi_i(\text{regulador}) = \frac{18-4\gamma-\gamma^2}{64}, i=1,2.$$

Es inmediato comprobar que los niveles de reducción de emisiones en este caso son superiores a los obtenidos en condiciones de competencia, en cualquiera de los tres escenarios analizados. Por tanto, el mercado proporciona una reducción de emisiones insuficiente desde el punto de vista social.

5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

En la Tabla 1 resumimos los resultados obtenidos en cada uno de los cuatro escenarios analizados.

	Reducción emisiones	Precios	Beneficios	$\Delta \gamma$
Simultáneo	$z_i^* = \frac{\gamma}{4}$	$p_i^* = 1$	$\Pi_i^*(\text{simultáneo}) = \frac{8-\gamma^2}{16}$	$(0,2]$
Secuencial	$z_i^* = \frac{\gamma}{6}$	$p_i^* = 1$	$\Pi_i^*(\text{simultáneo}) = \frac{18-\gamma^2}{36}$	$(0,3]$
Lider/ Seguidor	$z_1^L = \frac{3}{\gamma}, z_2^S = 0$	$p_1^L = 2, p_2^S = 0$	$\Pi_1^L = \frac{2\gamma^2-9}{\gamma^2}, \Pi_2^S = 0$	$[3,\infty)$
	$z_1^L = \frac{6\gamma(9-\gamma^2)}{324-54\gamma^2+\gamma^4}$ $z_2^S = \frac{9\gamma(6-\gamma^2)}{324-54\gamma^2+\gamma^4}$	$p_1^L = \frac{2(9-\gamma^2)(18-\gamma^2)}{324-54\gamma^2+\gamma^4}$ $p_2^S = \frac{54(6-\gamma^2)}{324-54\gamma^2+\gamma^4}$	$\Pi_1^L = \frac{2(9-\gamma^2)^2}{324-54\gamma^2+\gamma^4}$ $\Pi_2^S = \frac{81(18-\gamma^2)(6-\gamma^2)^2}{(324-54\gamma^2+\gamma^4)^2}$	$(0,3(\sqrt{3}-1)]$
Óptimo social	$z_i^* = \frac{2+\gamma}{8}$	$p_i^* = 1$	$\Pi_i^*(\text{regulador}) = \frac{28-4\gamma-\gamma^2}{64}$	$\left(0, \frac{3\sqrt{10}}{5}\right]$

Tabla 1

En el intervalo de variación del parámetro representativo de la preferencia por un consumo menos contaminante $\left(0, \frac{3\sqrt{10}}{5}\right]$, se deducen las relaciones entre niveles de beneficios: $\Pi_i^L > \Pi_i^*(\text{secuencial}) > \Pi_i^S > \Pi_i^*(\text{simultáneo}) > \Pi_i^*(\text{regulador})$.

Tal y como muestra la Figura 1, los niveles de beneficios presentan una relación decreciente con el valor del parámetro γ .

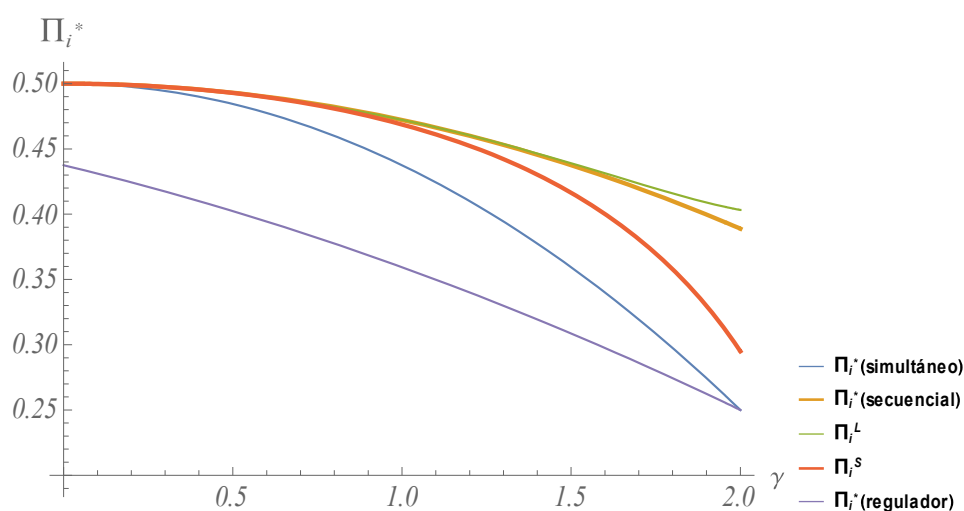


Figura 1

Respecto a los niveles de reducción de emisiones, de su comparación se deduce la relación: $z_i^*(\text{regulador}) > z_i^*(\text{simultáneo}) > z_i^L > z_i^*(\text{secuencial}) > z_i^S$.

La Figura 2 muestra su relación y evolución en función de la preferencia por un consumo menos contaminante.

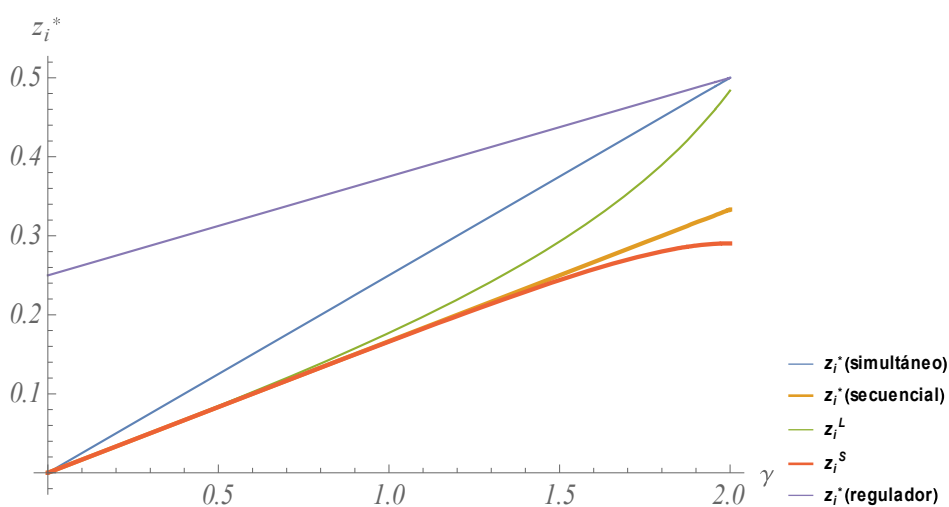


Figura 2

En cuanto a los precios, los resultados muestran que, tanto en un contexto de elección simultánea como secuencial y en el escenario en el que un regulador determina los niveles de reducción en emisiones, ambas empresas fijan un precio unitario. Por el contrario, en un juego secuencial en el que también las decisiones sobre reducción de emisiones se toman secuencialmente, el precio fijado por el líder es superior al fijado por el seguidor y su dependencia con respecto al parámetro γ es contraria. Un aumento en el valor de dicho parámetro incrementa el precio del líder y reduce el precio del seguidor. Todo ello se refleja en la Figura 3.

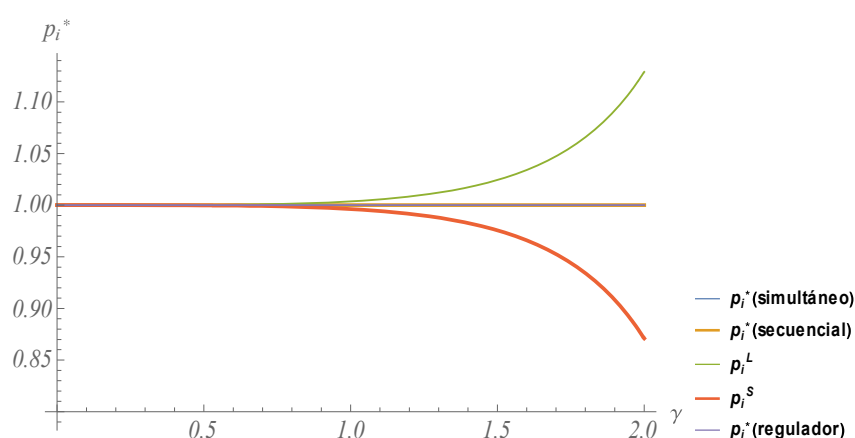


Figura 3

Se debe señalar que para un valor del parámetro representativo de la preferencia de los consumidores por un bien menos contaminante lo suficientemente elevado, $\gamma \geq 3$, la empresa líder puede actuar como un monopolista y abastecer toda la demanda. En ese caso, un aumento en el valor del parámetro γ reduce el nivel de reducción de emisiones

$$\left(\frac{dz_1^L}{d\gamma} < 0 \right) \text{ y aumenta el nivel de beneficios } \left(\frac{d\Pi_1^L}{d\gamma} > 0 \right).$$

6. CONCLUSIONES

En los últimos años, en el campo de la Organización Industrial, ha surgido una línea de investigación dedicada al estudio de la competencia entre empresas que incorporan la reducción de emisiones en su toma de decisiones. Las aportaciones existentes se desarrollan en contextos de monopolio y oligopolio con producto

homogéneo o diferenciado y en la mayoría de ellas, se considera que las decisiones medioambientales y las cantidades (o los precios), se toman de forma simultánea.

Tomando como referencia las aportaciones existentes, el presente trabajo pretende ofrecer una aportación en la literatura. Por una parte, se analizan las consecuencias de contextualizar ambos tipos de decisiones en un juego secuencial, lo que permite deducir el papel estratégico de la reducción de emisiones y su influencia en el comportamiento de las empresas. Por otra parte, el análisis se desarrolla en el contexto de un duopolio de competencia espacial, lo cual supone una clara diferencia con las aportaciones existentes, basadas en modelos de diferenciación de producto sin localización (*non-address*).

Del análisis desarrollado, se ha deducido que, las empresas obtienen un mayor beneficio cuando deciden de forma secuencial las emisiones y los precios, que cuando dichas variables se eligen de forma simultánea. Ello es debido a que, en un contexto secuencial, las empresas fijan un nivel de reducción de emisiones inferior al derivado en un juego de una sola etapa y, por tanto, su coste es menor.

Por otra parte, en la etapa de elección del nivel de emisiones, cada empresa prefiere actuar como líder, ya que dicha estrategia le proporciona un mayor beneficio y, para una preferencia de los consumidores por un consumo menos contaminante lo suficientemente elevada, le permite abastecer la totalidad de la demanda.

Finalmente, cuando los niveles de reducción de emisiones son fijados por un regulador cuyo objetivo es la maximización del bienestar, se concluye que la competencia entre las empresas da lugar a un daño medioambiental superior al socialmente óptimo.

Debemos señalar que los resultados obtenidos están condicionados por los supuestos introducidos en el modelo, fundamentalmente la simetría en los costes de las empresas. Por ello, una extensión inmediata sería considerar asimetría en los costes de reducción de emisiones, al igual que analizar la influencia de un impuesto que grave el nivel de contaminación.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por la Agencia Estatal de Investigación (PID2022-140010OB-100) y el Gobierno de Aragón (Grupo Consolidado S40_23R).

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FUKUDA, K. Y OUCHIDA, Y. (2020). “Corporate social responsibility (CSR) and the environment: Does CSR increase emissions?”. *Energy Economics*, 92, 104993.
- HAMILTON, J. H. Y SLUTSKY, S. M. (1990). “Endogenous Timing in Duopoly Games: Stackelberg or Cournot Equilibria”. *Games and Economic Behavior*, 2, (1), pp. 29-46.
- HOTELLING, H. (1929). “Stability in Competition”. *The Economic Journal*, 39, pp. 41-57.
- KATSOULAKOS, Y. Y XEPAPADEAS, A. (1995). “Environmental policy under oligopoly with endogenous market structure”. *The Scandinavian Journal of Economics*, 97 (3), pp. 411-420.
- LEE, S. H. (1999). “Optimal taxation for polluting oligopolists with endogenous market structure. *Journal of Regulatory Economics*, 15 (3), pp. 293-308.
- LEE, S. H. Y PARK, C. H. (2019). “Eco-firms and the sequential adoption of environmental corporate social responsibility in the managerial delegation”. *The B.E. Journal of Theoretical Economics*, 19 (1), 20170043.
- LIU, C. C. , WANG, L. F. Y LEE, S. H. (2015). “Strategic environmental corporate social responsibility in a differentiated duopoly market”. *Economics Letters*, 129, pp. 108-111.
- LU, Y. Y ABEYSEKERA, I. (2014). “Stakeholders’ power, corporate characteristics, and social and environmental disclosure: Evidence from China”. *Journal of Cleaner Production*, 64 (1), pp. 426-436.
- MARGOLIS, J. D., ELFENBEIN, H. A. Y WALSH, J. P. (2007). “Does it pay to be good? A meta-analysis and redirection of research on the relationship between corporate social and financial performance”. *Annals of Arbor*, 1001, pp. 48109-51234.

- POYAGO-THEOTOKY, J. Y SOO KEONG, Y. (2019). “Managerial Delegation Contracts, “Green” R&D and Emissions Taxation”. The B.E. Journal of Theoretical Economics, 19 (2), 20170128.
- SINGH, N. Y VIVES, X. (1984). “Price and quantity competition in a differentiated duopoly”. The Rand Journal of Economics, 15, pp. 546-554.
- WANG, C. (2021). “Monopoly with corporate social responsibility, product differentiation, and environmental R&D: Implications for economic, environmental, and social sustainability”. Journal of Cleaner Production, 287, 125433.
- XIE, J., WATARU, N., MICHYUQUI, Y., HIDEMICHI, F. Y SHUNSUKE, M. (2019). “Do environmental, social, and governance activities improve corporate financial performance?”. Business Strategy and the Environment, 28 (2), pp. 286-300.
- XU, L. Y LEE, S. H. (2022). “Non-cooperative and cooperative environmental corporate social responsibility with emission taxes”. Managerial and Decision Economics, 43, pp. 2849-2862.
- XU, L., YIN, Y. Y LEE, S. H. (2024). “Double managerial delegation contracts with relative profit performance and environmental performance incentives under emission taxes”. Managerial and Decision Economics, 45, pp. 4404-4414.