



---

**Universidad de Valladolid**  
**Facultad de Ciencias**  
**Económicas y Empresariales**

**Trabajo de Fin de Grado**

**Grado en Marketing e Investigación de**  
**Mercados**

**Cumplimiento medioambiental de**  
**las empresas**

Presentado por:

***Laura Vázquez Martín***

Tutelado por:

***Francisco José Cabo García***

Cotutora:

***Guiomar Martín Herrán***

*Valladolid, 24 de Junio de 2020*

## **RESUMEN**

En el presente trabajo se analiza el cumplimiento medioambiental de los hospitales, teniendo en cuenta un juego a la Stackelberg entre el gestor del hospital y un regulador preocupado por el bienestar social. El gestor del hospital deseará cumplir la ley pero también minimizar los costes de gestión de residuos, mientras que el regulador implantará estándares de contaminación y fijará mecanismos sancionadores para reducir la contaminación medioambiental de residuos sanitarios, aunque sin perder de vista el rendimiento del hospital. Se plantean las diferencias entre considerar una multa lineal o una multa cuadrática. El equilibrio del juego se calcula en el caso de la multa lineal.

### **Palabras clave**

Contaminación medioambiental; residuos sanitarios; multa por incumplimiento; juego dinámico a la Stackelberg;

## **ABSTRACT**

This paper analyses the environmental compliance of hospitals, taking into account a Stackelberg game to the between the hospital manager and a regulator concerned with social welfare. The hospital manager will wish to comply with the law and minimize the costs of waste management. Correspondingly the regulator will implement pollution standards and establish sanctioning mechanisms to reduce environmental pollution of sanitary waste, while keeping sight of the hospital's return. The differences between considering a linear or a quadratic fine are studied. The equilibrium of the game is computed in the case of the linear fine.

### **Key words**

Environmental pollution; Sanitary waste; Fine for non-compliance; Stackelberg differential game;

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	3
1.- INTRODUCCIÓN .....	4
2.- REVISIÓN DEL ESTADO ACTUAL DEL TEMA .....	7
2.1.- Mecanismo Sancionador .....	9
3. METODOLOGÍA.....	11
3.1.- Modelo de Optimización Estático del Gerente del Hospital .....	12
3.2.- Juego entre el Gerente del hospital y el Regulador.....	15
3.2.1.- Función objetivo del Planificador Central .....	21
3.2.2.- Juego de Stackelberg entre el Gerente del hospital y el Planificador Central.....	23
4.- CONCLUSIONES .....	27
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	30
GLOSARIO EXPRESIONES MATEMÁTICAS .....	32

## 1.- INTRODUCCIÓN

La Consejería de Sanidad de la Junta de Castilla y León propone en su Estrategia Regional de Desarrollo Sostenible (2009/2014) una serie de prácticas, con el objetivo de disminuir el impacto ambiental de la actividad administrativa, y cooperar a racionalizar el consumo energético en los hospitales y centros de salud de la comunidad:

### 1) Ahorro del consumo energético

El primero de sus objetivos sería el de impulsar el ahorro en el consumo eléctrico, del aire acondicionado y de la calefacción. Para ello se proponen medidas como: aprovechar la luz natural, colocar temporizadores y ajustar la climatización, liberar las salidas de calor y aire o utilizar de forma eficiente el correo electrónico, entre otras.

### 2) Aminoración del papel como materia prima

Otro de los objetivos que debemos destacar es el de emplear papel reciclado y reutilizar el papel usado únicamente por una cara como borrador, escanear la documentación, limitar la impresión, etc.

### 3) Adecuada utilización del papel como residuo

Se debe separar el papel por tipo de residuos y depositar el papel que ya se haya usado y no pueda ser reutilizado en los contenedores habilitados.

### 4) Segregación de residuos tóxicos y peligrosos

Los residuos sanitarios engloban la totalidad de residuos generados en actividades sanitarias (como pueden ser la atención socio-sanitaria y sanitaria, los análisis clínicos, los servicios veterinarios y las actividades de investigación que generan residuos asimilables a los sanitarios).

Los residuos sanitarios contienen los siguientes porcentajes por norma general: 32% plásticos, 32% textiles, 15% papel y cartón, 13% materias orgánicas, 6% yesos y 3% vidrios y agujas.

Estos residuos sanitarios<sup>1</sup> se pueden clasificar en:

- Residuos sanitarios asimilables a residuos sólidos urbanos o de tipo I

Se trata de residuos inertes que no necesitan exigencias especiales para su tratamiento. Por ejemplo el material de oficina, los residuos generados en comedores o aquellos que vienen de pacientes no infecciosos. Únicamente se deben llevar a un punto limpio o a un punto de reciclaje.

- Residuos sanitarios no específicos , asimilables a urbanos o de tipo II

Son aquellos residuos que no plantean exigencias en su gestión fuera del centro que los genera, pero se deben aplicar medidas de prevención durante el manejo, recogida, almacenamiento y transporte. Algunos ejemplos de residuos del tipo II serían los materiales de un solo uso y contaminados con sangre, secreciones, excreciones y los materiales de cura.

- Residuos sanitarios específicos de riesgo o de tipo III

Residuos que pueden presentar un riesgo para la salud laboral y pública. Por lo tanto, requieren normas de prevención dentro y fuera del centro generador en los pasos de manipulación, recogida, almacenamiento, transporte, tratamiento y eliminación.

En esta clasificación se encuentran las agujas o materiales punzantes, sangre y derivados en forma líquida, residuos sanitarios capaces de transmitir enfermedades infecciosas, o vacunas y residuos anatómicos humanos.

Dentro de este grupo, también se encuentran los residuos biopeligrosos. Según el decreto 204/1994 de “Ordenación de la Gestión de los Residuos Sanitarios”, en el tratamiento de los residuos biopeligrosos se puede optar o por la incineración, o por

---

<sup>1</sup> “Ley 11/1997, de 24 de abril”, de Envases y Residuos de Envases Goicoechea et al. (2011)

la desinfección “in situ” para residuos punzantes o cortantes, o extra centro para todos en general. En el caso de la gestión “in situ”, el centro esteriliza sus residuos biopeligrosos, incorporándolos luego a los asimilables a urbanos. En el caso de la gestión extra centro, según el principio de proximidad, los residuos deben gestionarse en instalaciones adecuadas lo más cercanas posible.

- Residuos sanitarios tipificados en normativas específicas o de tipo IV

Están sujetos a atenciones especiales tanto dentro como fuera del centro generador por su alto riesgo en el aspecto higiénico y medio ambiental.

Algún ejemplo de este tipo IV de residuos serían los residuos contaminados o poseedores de productos químicos como termómetros, pilas (deben ser depositadas en los contenedores habilitados en el edificio para que periódicamente el Servicio Municipal de Limpieza del Ayuntamiento de la provincia las recoja), medicamentos caducados, disolventes o baños de revelados de radiografías; aquellos restos anatómicos procedentes de operaciones quirúrgicas, cadáveres o abortos; los restos derivados de tratamientos que se aplican a enfermos de cáncer o residuos con contaminación química; y residuos radiactivos.

## 5) Otras medidas

Asimismo, se proponen medidas de racionalización y ahorro en la utilización del teléfono y del agua potable, y se plantea el fomento de la movilidad sostenible.

## 2.- REVISIÓN DEL ESTADO ACTUAL DEL TEMA

En la actualidad la filosofía adoptada, por la mayor parte de los países, en la clasificación de los residuos sanitarios es la gestión avanzada de los residuos sanitarios. Esta gestión, se basa en la prevención de los riesgos reales asociados a dichos residuos.

En la gestión avanzada los residuos se subdividen en dos categorías:

- 1) Residuos biosanitarios asimilables a urbanos: se pueden eliminar mediante los mismos sistemas aplicados a los residuos sólidos urbanos.
- 2) Residuos sanitarios especiales: se eliminan mediante sistemas especiales como la destrucción térmica o la desinfección.

La gestión avanzada de los residuos sanitarios conlleva tres fases:

- 1) Gestión intrahospitalaria: incluye la recogida selectiva, el transporte y el almacenaje interno.

La recogida selectiva trata de la adecuada recogida en origen utilizando recipientes preparados para cada tipo de los residuos.

Los residuos de tipo II y III deberán introducirse en envases o bolsas que posean determinadas características<sup>2</sup>. Los residuos de tipo IV se depositaran en envases de polietileno o de poliestireno con cierre hermético, resistentes a los agentes químicos, y que permitan la incineración completa. El caso particular de la recogida y eliminación de residuos con sustancias radiactivas compete exclusivamente a la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, S.A.

Los residuos con sangre, hemoderivados y secreciones orgánicas pueden verterse directamente al desagüe conectado a la red de saneamiento del centro sanitario.

---

<sup>2</sup> Fácilmente identificables, cierre de fácil apertura (pero no de forma accidental), resistente a la humedad al igual que a la carga y a los materiales punzantes, de volumen no superior a los 70 litros, impermeable a los gérmenes, y de material opaco. En el caso de emplear contenedores rígidos deberán estar provistos de bordes con agarre o asas.

El transporte interno consiste en transportar a los centros de tratamiento los residuos generados.

El transporte se realiza a través de carros de acero inoxidable que pueden ser automatizados para evitar el riesgo de rotura de las bolsas o recipientes. También, pueden emplearse bajantes verticales; aunque este método presenta algunos inconvenientes como la rotura de desechos o la posibilidad de liberar gérmenes en dependencias. El mejor método es el de los tubos neumáticos, ya que se trabaja en un sistema de presión cerrado que evita fugas de gérmenes.

El almacenamiento interno debe ser selectivo y con una duración no superior a 48 horas.

- 2) Transporte externo: se debe disponer o alquilar una flota de camiones especiales, con sistemas de carga y descarga adecuadas, isotérmicos y con cierre de seguridad. Asimismo, el personal deberá portar ropa exclusiva para trabajo y guantes.

### 3) Tratamiento y eliminación

Los residuos de tipo I y II no necesitan un tratamiento anterior a su eliminación, excepto una desinfección de alimentos correspondientes a secciones infecciosas.

Los residuos de tipo III se pueden eliminar mediante la incineración (destrucción térmica) o como alternativa mediante la desinfección (esterilización).

Para el caso de la incineración, se recomienda que lo realicen empresas autorizadas fuera del recinto sanitario. Los hornos utilizados en el tratamiento de los residuos sólidos urbanos son hornos con una entrada independiente.

Para evitar el riesgo de la incineración no completa, se está imponiendo la trituración previa de los residuos, y posterior esterilización.



El método de la desinfección consiste en la eliminación de los agentes nocivos que causan o pueden causar la infección. Se utiliza como pretratamiento de los residuos biosanitarios para luego adicionarlos a los residuos urbanos. Asimismo, es necesario desinfectar el material de uso cotidiano para su reutilización. Este material solo se destruirá cuando se haya quedado obsoleto.

Existen varios métodos de desinfección. Uno de ellos es la autoclave, basado en el uso controlado de vapor saturado a presión, y temperatura suficiente durante un periodo de tiempo establecido. Se emplea, sobre todo, para instrumental médico, material textil, etc. Los costes de inversión de la autoclave son menores que en la incineración. Entre sus limitaciones, destaca no poder tratar cantidades grandes de residuos o líquidos biológicos o anatómicos humanos.

Alternativamente, la desinfección puede tener lugar en dos fases. Primero, los residuos son triturados y la masa triturada se desinfecta por alta temperatura, a través del microondas, o químicamente, mediante un desinfectante líquido. Esto último, es el método de desinfección más empleado en medios sanitarios.

### **2.1.- Mecanismo Sancionador**

El mecanismo sancionador ante el incumplimiento de la eliminación de residuos sanitarios es muy poco preciso. Únicamente se establece, en el artículo 7 de la ley 8/2010 del 31 de marzo, una clasificación de las distintas sanciones posibles:

- Las infracciones muy graves se sancionarán con una multa entre 85.001 € y 1.200.00 €.
- Las infracciones graves se sancionarán con una multa entre 6.001€ y 85.000 €.
- Las infracciones leves se sancionarán con una multa no superior a 6.000 €.

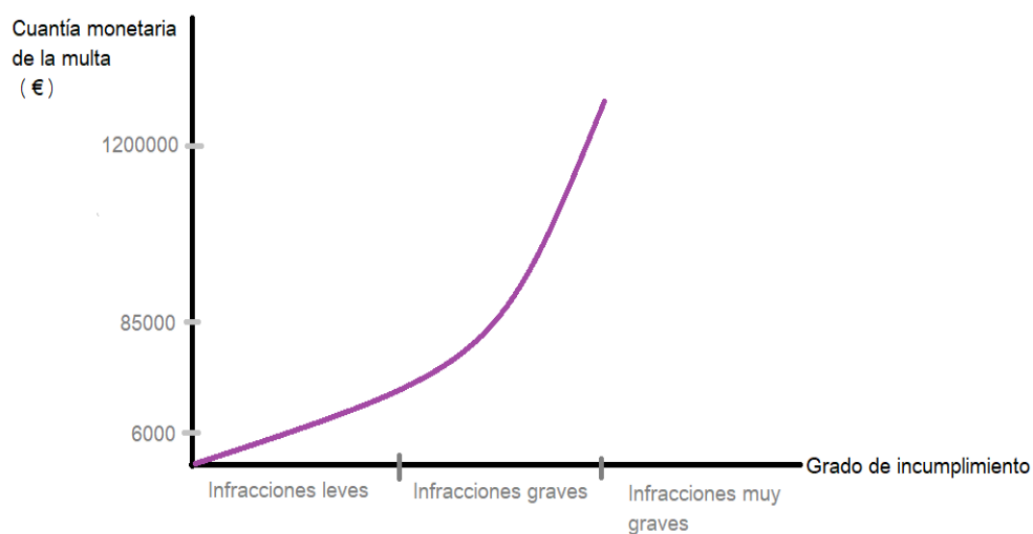
A partir de esta información se puede dibujar la multa esperada como función del grado de incumplimiento con la normativa. Los

peldaños cada vez más elevados en el valor de las sanciones permiten justificar una función cuadrática de la multa, lo que significa una multa marginal creciente con el nivel de incumplimiento.

No obstante, el desconocimiento de la diferencia entre una multa leve, grave y muy grave admite una función cuadrática pero también una función lineal de la multa. Si el salto de infracción leve a grave y muy grave es de anchura constante se obtendría una multa cuadrática (Gráfico 2.1.). Pero si el grado de incumplimiento que define una infracción leve es un intervalo muy estrecho, y el de las infracciones graves y muy graves son intervalos más y más grandes, entonces esta legislación sería compatible con el supuesto de una multa lineal (Gráfico 2.2.).

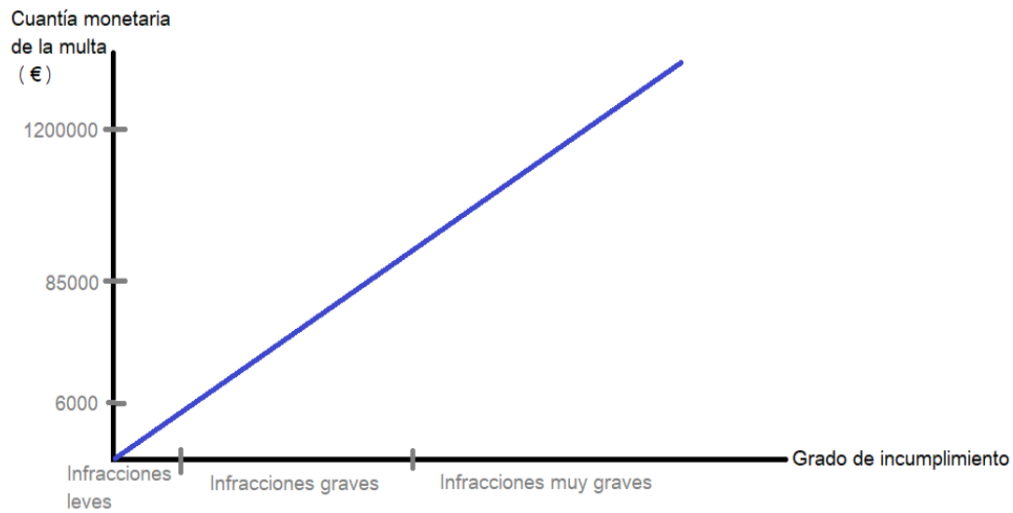
Por tanto, la función multa esperada tiene una forma múltiple.

Gráfico 2.1. Función cuadrática de la multa esperada.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 2.2. Función lineal de la multa esperada.



Fuente: Elaboración propia

### 3. METODOLOGÍA

La aplicación de la normativa ambiental es un proceso que involucra a dos partes: por un lado al regulador de protección ambiental, y por otro, a la empresa. El objetivo del regulador es minimizar la contaminación de la empresa, a través de la fijación de estándares. Mientras que el objetivo de la empresa es elegir niveles de incumplimiento de la ley. El regulador y la empresa entran por tanto en un juego, donde los gastos en las actividades de aplicación de la normativa competirán con el uso eficaz del limitado presupuesto del regulador.

En el presente trabajo se va a estudiar la aplicación de la normativa ambiental en el sector sanitario, por lo tanto el término de la empresa hará referencia a un hospital.

### 3.1.- Modelo de Optimización Estático del Gerente del Hospital

En el desarrollo de su actividad, un hospital necesariamente genera residuos. Se denominará  $N$  a los residuos generados por la actividad del hospital, y  $K$  a los residuos generados y no tratados, es decir aquellos no reciclados adecuadamente y que por tanto contaminan.

Se designará  $R(K)$  al rendimiento del hospital. Este rendimiento estará representado por la función  $R(K) = I - C_p - C_g(K)$ , que recoge la diferencia entre los ingresos, los costes de producción y los costes de gestión de residuos. Cada uno de estos términos puede interpretarse de la forma siguiente:

- Si se considera un hospital público, los ingresos del hospital pueden definirse a través de una función compuesta por una cuantía fija,  $A$ , y por una parte variable, que se compone de la subvención,  $s$ , por cada uno de los  $n$  pacientes que recibe el hospital.  $I = A + s.n$ .

Con independencia del método de financiación del hospital, el supuesto fundamental para el análisis de este trabajo es que los ingresos no dependen, en principio, de las decisiones sobre gestión de residuos que tome el hospital.

Esta función de rendimientos también puede describir el caso de un hospital privado, en cuyo caso,  $A$  representa los ingresos fijos por subvenciones públicas y /o donaciones privadas, y  $s$  el ingreso medio que obtiene el hospital por paciente.

- Los costes de producción pueden dividirse en un coste fijo, y un coste variable dependiente del número de pacientes que atiende el hospital.  $C_p = c_p^0 + c_v \frac{n^2}{2}$ , con  $c_p^0$  y  $c_v > 0$ .
- Los costes de gestión de residuos dependen de los residuos generados por la actividad del hospital, menos aquellos residuos generados y no tratados, es decir los residuos tratados

adecuadamente  $N - K$ . Supondremos que los costes de gestión tienen una parte fija  $c_0$ , y crecen con la cantidad de residuos gestionados adecuadamente de manera más que proporcional.

$$C_g(K) = c_0 + c_1 (N - K) + \frac{c_2}{2} (N - K)^2$$

$$= c_0 + c_1 N + \frac{c_2}{2} N^2 - (c_1 + c_2 N) K + \frac{c_2}{2} K^2$$

Suponer unos costes marginales crecientes en la cantidad de residuo gestionado correctamente es equivalente a suponer que el ahorro generado por contaminar es marginalmente decreciente con la cantidad de residuo no reciclado. De hecho, si la cantidad de contaminación generada es muy elevada un incremento adicional de la misma ya no generara un ahorro, sino un coste. Esto se puede justificar suponiendo que esta función recoge los costes de reputación del hospital, la cual puede verse seriamente dañada si su actitud en relación a la gestión de residuos es muy irresponsable.

Por lo tanto en ausencia de regulación, el gerente del hospital deberá determinar la cantidad de contaminación a generar con objetivo de maximizar la función de rendimiento del hospital. Esto se recoge en el siguiente modelo de optimización estático:

$$\max_K R(K) = A + s \cdot n - (c_p^0 + c_v \frac{n^2}{2}) - (c_0 + c_1 N + \frac{c_2}{2} N^2 - (c_1 + c_2 N) K + \frac{c_2}{2} K^2)$$

s.a.  $K \in [0, N]$

Dado que los ingresos, los costes de producción y la parte constante de los costes de gestión no dependen de cuántos residuos deje el hospital sin reciclar, ya que son más o menos invariables en relación a la contaminación, se denominará a dicho conjunto con la letra  $M$ . En consecuencia, el modelo de optimización estático del gerente del hospital será:

$$\max_K R(K) = M - (c_1 + c_2 N) K + \frac{c_2}{2} K^2.$$

$$\text{s.a. } K \in [0, N]$$

Entre las funciones del gerente del hospital está la de encontrar el valor óptimo de  $K$ , es decir hallar el nivel de residuos generados pero no tratados, que maximizan la función de rendimiento. Para ello, primero se calcula la función de rendimiento marginal, y después, se calcula el valor de  $K$  para el que dicha derivada es igual a cero:

$$R'(K) = (c_1 + c_2 N) - c_2 K$$

$$\text{O lo que es lo mismo } R'(K) = -C'_g(K)$$

$$R'(K) = 0 \rightarrow K = \frac{c_1 + c_2 N}{c_2}.$$

$C'_g(K)$  es el coste marginal de contaminar o, equivalentemente,  $-C'_g(K)$  es el beneficio marginal por contaminar. Es decir, el coste marginal de reciclar una unidad adicional. De acuerdo a esta condición, el gestor del hospital debería incrementar la contaminación (reducir el tratamiento adecuado de los residuos) hasta que el beneficio marginal de contaminar se anule.

La contaminación óptima en ausencia de regulación,  $\frac{c_1 + c_2 N}{c_2}$ , la denotaremos, en adelante, con la letra  $\alpha$ .

Se puede concluir que la solución del modelo de optimización estático del gerente del hospital sin regulación es  $K = \alpha$ , es decir, mientras el regulador no imponga ningún tipo de estándar de contaminación residual al hospital, el nivel de residuos generados y no tratados será igual a  $\alpha$ . Para garantizar que la solución encontrada es un máximo de problema se deben cumplir la condición de segundo orden:  $R''(K) < 0$ , es decir,  $-c_2 < 0$ .

### 3.2.- Juego entre el Gerente del hospital y el Regulador

En esta sección se analiza la interacción entre el gestor de un hospital que, como se ha comentado, busca maximizar el rendimiento, y un regulador, interesado en que también se tenga en cuenta el problema medioambiental que supone la contaminación generada por el hospital.

El regulador determina el nivel de contaminación a partir del cual establecerá sanciones a los hospitales, qué tipo de multas impondrá, y qué estrategias de monitoreo llevará a cabo. El monitoreo hace referencia a las labores de vigilancia con el cumplimiento de la normativa. Estas labores son costosas para el regulador, pero necesarias para que el gestor del hospital no asocie impunidad al incumplimiento de las normas. Mayores gastos en monitoreo irán asociados a una mayor probabilidad de ser inspeccionado. Dentro de este marco de regulación, el gerente del hospital elegirá el nivel de incumplimiento de la ley.

El regulador establece que los hospitales deben generar una contaminación residual inferior o igual a  $K_0$ . Los hospitales eligen un nivel de contaminación,  $K$ , y en consecuencia un nivel de incumplimiento  $K - K_0$ . Aquellos hospitales que incumplan y sean detectados serán multados basándose en su nivel de violación de la ley. El regulador podrá decidir sobre el grado de severidad de la multa y/o sobre la intensidad de sus actividades de monitoreo<sup>3</sup> y, por tanto, sobre la probabilidad de detectar infracciones.

El estándar de contaminación residual establecido por el regulador,  $K_0$ , se situará por debajo del nivel de residuos generados y no tratados por el hospital y que maximizaba el rendimiento del hospital en ausencia de regulación,  $\alpha$ . Contaminar por debajo de  $\alpha$  tendrá un coste

---

<sup>3</sup> La probabilidad de que inspeccionen el hospital estudiado depende de la estrategia de monitoreo llevada a cabo por el regulador (cuánto más dinero invierta en inspectores más aumenta la probabilidad de ser inspeccionado y por tanto sancionado).

para el hospital, el coste de abatimiento<sup>4</sup>. Como veremos a continuación, el gerente del hospital decidirá situarse en un nivel de contaminación,  $K$ , al existir regulación, siendo  $K_0 < K < \alpha$ . El coste marginal de abatimiento es, por definición, igual al ingreso marginal por emisión.

Con la regulación impuesta, el rendimiento por contaminar,  $R(K)$ , estará representado por la siguiente función:

$$R(K) = I - C_p - C_g(K) - EF(K, K_0, e, \eta).$$

Junto con los ingresos, los costes de producción y los costes de gestión de residuos, el gestor del hospital también debe tener en cuenta la multa esperada en caso de incumplimiento,  $EF(K, K_0, e, \eta)$ . La multa esperada se define como la probabilidad de ser detectado,  $p$ , multiplicada por la multa,  $F$ .

La probabilidad de multa,  $p$ , es la probabilidad de que se produzca un monitoreo en el hospital, y estará entre 0 y 1. Esta probabilidad puede suponerse constante o dependiente del esfuerzo de monitoreo que realice el regulador,  $e$ , y del vector de parámetros judiciales<sup>5</sup>,  $\eta$ . Asimismo, también se puede argumentar que depende del grado de incumplimiento, es decir, de la diferencia entre el nivel de contaminación en el que se sitúa el hospital,  $K$ , y el nivel de contaminación exigido por el regulador,  $K_0$ . En consecuencia, denotaremos la probabilidad de multa como  $p(K, K_0, e, \eta)$ .

Supondremos que la multa,  $F$ , se define como el nivel en el que se sitúa el hospital al existir dicha normativa,  $K$ , y aquel nivel de contaminación exigido por el regulador,  $K_0$ . Asimismo, también depende del nivel de intensidad de la multa, definido por la variable  $\beta$ :  $F(K, K_0, \beta)$ .

Como ya se ha mencionado con anterioridad, la multa se puede definir de dos formas alternativas (Grafico 3.1):

---

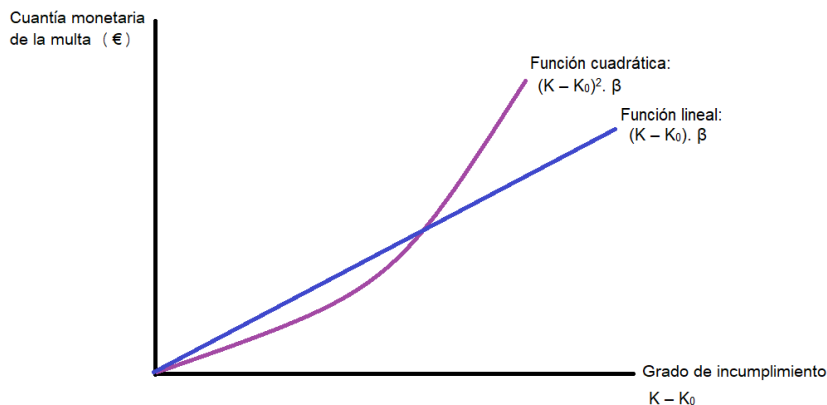
<sup>4</sup> Los costes de abatimiento para el gerente del hospital son aquellos costes por emitir menos contaminación de la que emitiría si no hubiese regulación.

<sup>5</sup> Se trata del entorno socio-jurídico institucional en el que operan los hospitales y el regulador.



- Función lineal del grado de incumplimiento<sup>6</sup>:  $(K - K_0) \cdot \beta$
- Función cuadrática grado de incumplimiento<sup>7</sup>:  $(K - K_0)^2 \cdot \beta$

Gráfico 3.1. Forma múltiple de la función multa.



Fuente: Elaboración propia.

Para pequeños incumplimientos es más gravosa una multa lineal que una cuadrática, y lo contrario sucede cuando el grado de incumplimiento es muy elevado. En ambas formulaciones la multa se incrementa con el grado de incumplimiento,  $K - K_0$ . En el caso lineal, la multa marginal,  $\beta$ , se mantiene constante. Por el contrario, en la formulación cuadrática, la multa marginal,  $2 \beta (K - K_0)$ , crece con el nivel de incumplimiento.

La función de rendimiento del hospital con regulación será:

$$R(K) = I - C_p - C_g(K) - p(K, K_0, e, \eta) \cdot F(K, K_0, \beta).$$

Por lo tanto, el problema de optimización estático del gerente del hospital con la presencia de regulación, será igual a:

$$\text{Max}_K R(K) = I - C_p - C_g(K) - p(K, K_0, e, \eta) \cdot F(K, K_0, \beta).$$

<sup>6</sup> Siendo la multa, la diferencia entre el nivel de contaminación en el que se sitúa el hospital al existir el estándar fijado por el regulador, y aquel nivel fijado por la ley. Todo ello multiplicado por una constante a la que se le asigna el nombre de “ $\beta$ ”.

<sup>7</sup> La multa cuadrática está compuesta por el valor fijado por el regulador como límite de contaminación menos el nivel de contaminación en el que decide situarse el gerente del hospital ante dicha imposición. Todo ello elevado al cuadrado y multiplicado por una constante denominada “ $\beta$ ”.

El gerente del hospital tiene como principal función elegir la cantidad real de contaminación, es decir, determinar el valor de K. Para ello, deberá primero obtener la función de rendimiento marginal, y después, calcular el valor de K para el que dicha derivada es igual a cero:

$$R(K) = I - C_p - C_g(K) - p(K, K_0, e, \eta) F(K, K_0, \beta)$$

$$R'(K) = -C'_g(K) - (p(K, K_0, e, \eta) F(K, K_0, \beta))'_K$$

$$-C'_g(K) - (p(K, K_0, e, \eta) F(K, K_0, \beta))'_K = 0$$

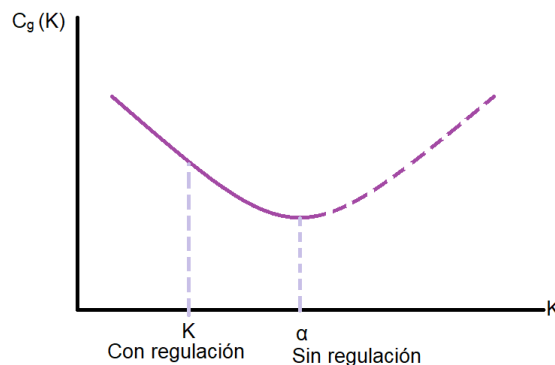
$$-C'_g(K) = (p(K, K_0, e, \eta) F(K, K_0, \beta))'_K$$

$$-C'_g(K) = p'_K(K, K_0, e, \eta) F(K, K_0, \beta) + p(K, K_0, e, \eta) F'_K(K, K_0, \beta)$$

La condición de optimalidad establece que el gestor debe contaminar hasta el punto en el que el coste marginal de reciclar una unidad adicional se iguale a la multa marginal esperada.

En ausencia de regulación los costes marginales de gestión o el beneficio marginal por contaminar eran iguales a cero, mientras que con regulación el beneficio marginal por contaminar debe ser igual a la multa marginal esperada. Dado que en la zona relevante, el coste marginal de gestionar los residuos aumenta a medida que la contaminación, K, disminuye; el gerente contamina menos cuando este coste marginal ha de igualarse a la multa marginal (véase gráfico 3.2).

Gráfico 3.2. Contaminación elegida por el gerente del hospital con o sin regulación.



Fuente: Elaboración propia.

En el caso particular en el que la probabilidad de ser detectado no dependa del grado de incumplimiento, el nivel óptimo de contaminación bajo regulación se obtienen de forma sencilla. A continuación, se calculan las condiciones de optimalidad para los dos tipos de multa suponiendo una probabilidad de detección constante,  $p(K, K_0, e, \eta) = p$ :

- Cuando se trate de una función de multa lineal:

$$R(K) = I - C_p - C_g(K) - p (K - K_0) \beta,$$

$$R'(K) = - C'_g(K) - p\beta = 0,$$

$$- C'_g(K) = p\beta.$$

En consecuencia, la función de reacción del gestor del hospital cuando se considera de una multa lineal:

$$(c_1 + c_2 N) - \frac{c_2}{2} 2K = p \beta,$$

$$K_L(p, \beta) = \frac{(c_1 + c_2 N) - p \beta}{c_2}. \quad (1)$$

- Mientras que, si se trata de una multa cuadrática:

$$R(K) = I - C_p - C_g(K) - p (K - K_0)^2 \beta,$$

$$R'(K) = - C'_g(K) - p 2 (K - K_0) \beta = 0,$$

$$- C'_g(K) = p 2 (K - K_0) \beta.$$

Y la función de reacción del gestor del hospital será:

$$(c_1 + c_2 N) - c_2 K = p 2 (K - K_0) \beta,$$

$$c_1 + c_2 N + 2 p K_0 \beta = [2 p \beta + c_2] K,$$

$$K_C(p, K_0, \beta) = \frac{c_1 + c_2 N + 2 K_0 p \beta}{2 p \beta + c_2}. \quad (2)$$

En presencia de regulación y siendo la probabilidad de ser detectado independiente del grado de incumplimiento, se puede concluir, que el coste marginal de gestión cuando la multa posee una forma lineal es igual a la probabilidad de ser detectado multiplicada por la multa marginal,  $\beta$ . Igualmente, si se trata de una multa cuadrática, la cantidad óptima de contaminación,  $K$ , se alcanza cuando el coste marginal de gestión sea igual a la probabilidad de ser detectado multiplicada por la

multa marginal,  $2 (K - K_0) \beta$ . La diferencia radica en que ahora la multa marginal se incrementa con el nivel de contaminación.

Por último, ante posibles variaciones en la probabilidad de inspección,  $p$ , la intensidad de la multa,  $\beta$ , o el nivel de contaminación máxima permitida,  $K_0$ , el gestor del hospital reaccionará de manera distinta según el tipo de multa. Supondremos que se produce un aumento en alguna de ellas:

#### - Multa lineal

Si se produce un aumento en la probabilidad de multa,  $p$ , lógicamente esto reducirá la cantidad de contaminación que fija el gestor del hospital,  $K_L(p, \beta)$ .

$$(K_L)'_p = \frac{-\beta}{c_2} < 0. \quad (3)$$

Del mismo modo el gestor reaccionará reduciendo la cantidad de contaminación, si el nivel de intensidad de la multa aumenta.

$$(K_L)'_\beta = \frac{-p}{c_2} < 0. \quad (4)$$

#### - Multa cuadrática

Si se produce un aumento en la probabilidad de multa,  $p$ , también se reduce  $K_C(p, K_0, \beta)$ .

$$(K_C)'_p = - \frac{c_1 + c_2 N}{2 c_2 p^2 \beta} < 0. \quad (5)$$

Finalmente si se incrementa el nivel de intensidad de la multa,  $\beta$ , el gestor, de nuevo, reaccionará reduciendo la contaminación por residuos no tratados adecuadamente.

$$(K_C)'_\beta = - \frac{c_1 + c_2 N}{2 c_2 p \beta^2} < 0. \quad (6)$$

Si bien es cierto que un aumento de la probabilidad de multa o de la intensidad de la multa induce al gestor del hospital a reducir la contaminación tanto en el supuesto de una multa lineal como cuadrática,

la intensidad de su reacción ante estas variaciones es diferente. El efecto de un aumento en la probabilidad de multa,  $p$ , sobre el gestor del hospital presenta el mismo signo en los casos lineal y cuadrático, como se puede ver comprando las expresiones (3) y (4). Sin embargo, es interesante resaltar su diferente nivel. Cuando la intensidad de la multa,  $\beta$ , es muy pequeña, la reacción del gestor en el caso lineal es muy suave, mientras que en el caso cuadrático es muy acusada. Por el contrario, si la intensidad de la multa es muy grande, la reacción ante aumentos en la probabilidad de inspección es muy grande en el caso lineal y muy suave en el cuadrático. Un razonamiento similar puede hacerse respecto al efecto de un aumento en la intensidad de la multa,  $\beta$ . Si la probabilidad de inspección es baja, la reacción ante un aumento de la multa es suave en el caso lineal y brusca en el cuadrático. Lo contrario sucede si la probabilidad de inspección es alta.

Por último, observamos que si el regulador sitúa el nivel de contaminación máximo permitido en un punto más elevado, es decir aumenta  $K_0$ , el gestor del hospital no variará su nivel de contaminación en el caso de una multa lineal, y lo incrementará en el caso de una multa cuadrática.

$$(K_C)'_{K_0} = - \frac{1}{c_2} > 0. \quad (7)$$

### 3.2.1.- Función objetivo del Planificador Central

La multa debido al incumplimiento con la regulación sobre residuos es impuesta por el regulador. Este agente puede tomar decisiones sobre el tipo de multa (lineal o cuadrática), sobre el nivel de contaminación a partir del cual imponer la multa, sobre la intensidad de la multa, o sobre la intensidad en las actividades de supervisión, y por tanto, la probabilidad de inspección. Consideraremos al regulador como un planificador central que se preocupa por el bienestar común. Este agente internaliza la externalidad negativa medioambiental.

Se denominara H a la función objetivo del planificador central. Esta función recoge el rendimiento del hospital, los costes de monitorización y el daño ambiental. Cada uno de estos términos puede interpretarse de la forma siguiente:

- Como se explicó anteriormente, el rendimiento de un hospital público sin la presencia de regulación viene dado por  $R(K) = M - (c_1 + c_2 N) K + \frac{c_2}{2} K^2$ , sabiendo que K pertenece al intervalo  $[0, N]$ .
- Los costes del regulador se pueden dividir en los costes de supervisión/monitorización, más aquellos de *enforcement* (es decir de aplicación). Los costes de monitorizar están compuestos por una cuantía variable que crece con la probabilidad de multa. Además, supondremos que incrementar la probabilidad de detección tiene unos costes marginales crecientes.

Los costes de *enforcement* son los costes de gestión de las multas. Supondremos que la empresa será más reticente a pagar la multa cuanto mayor sea el nivel de incumplimiento,  $K - K_0$ , y la intensidad de la multa,  $\beta$ .

$$C_m(p, \beta, K - K_0) = a \frac{p^2}{2} + b \left[ \frac{\beta^2}{2} + \frac{(K - K_0)^2}{2} \right].$$

- El daño ambiental dependerá del nivel de contaminación del hospital, K. Supondremos que el daño marginal se incrementa con el nivel de contaminación y, por tanto, se define una función de daño cuadrática:

$$D_a(K) = -d \frac{K^2}{2}.$$

El regulador desea un alto rendimiento del hospital, pero sin ignorar el problema medioambiental que esto genera. Por lo tanto, la función objetivo del planificador central será igual a:

$$H(K, p, \beta, K_0) = R(K) - C_m(p, \beta, K - K_0) - D_a(K),$$

$$H(K, p, \beta, K_0) = M - (c_1 + c_2 N) K + \frac{c_2}{2} K^2 - a \frac{p^2}{2} - b \left[ \frac{\beta^2}{2} + \frac{(K - K_0)^2}{2} \right] - d \frac{K^2}{2}.$$

(8)

### 3.2.2.- Juego de Stackelberg entre el Gerente del hospital y el Planificador Central

El juego de Stackelberg<sup>8</sup> recoge situaciones no cooperativas, en las que los papeles que desempeñan los participantes son asimétricos. Se trata de un juego jerarquizado, en el que el jugador líder toma sus decisiones sabiendo cuál es la función de reacción del otro jugador, llamado seguidor. Supondremos que el líder es el planificador central, ya que es quien dispone de plena información, y seguidor el gerente del hospital.

Las principales variables sobre las que puede incidir el regulador son: la probabilidad de inspección,  $p$  (a través de los gastos en supervisión), el nivel de contaminación a partir del cual imponer la multa,  $K_0$ , y/o la intensidad de la multa,  $\beta$ . A continuación, estudiaremos los resultados si el regulador elige el valor óptimo de uno de estos tres instrumentos tomando como fijos los otros dos. A partir de ahora, nos centraremos únicamente en el supuesto de una multa lineal.

El regulador incorpora la función de reacción del gestor del hospital (1) dentro de su función objetivo (3). Así, se sustituye  $K$  por  $K_L(p, \beta)$ :

$$H(p, \beta, K_0) = M - (c_1 + c_2 N) \frac{(c_1 + c_2 N) - p\beta}{c_2} + \frac{c_2}{2} \left( \frac{(c_1 + c_2 N) - p\beta}{c_2} \right)^2 - a \frac{p^2}{2} - b \left[ \frac{\beta^2}{2} + \frac{\left( \frac{(c_1 + c_2 N) - p\beta}{c_2} - K_0 \right)^2}{2} \right] - d \frac{\left( \frac{(c_1 + c_2 N) - p\beta}{c_2} \right)^2}{2}.$$

En primer lugar, supondremos que el planificador central va a decidir acerca de la probabilidad de multa,  $p$ , por lo tanto  $K_0$  y  $\beta$  tendrán valores fijos.

<sup>8</sup> Para una explicación más detallada de un juego a la Stackelberg véase, por ejemplo Cerdá et al. (2004), o Zapardiel (2014).

La condición de optimalidad para maximizar esta función es:

$$\frac{\partial H}{\partial p} = - (c_1 + c_2 N) \frac{-\beta}{c_2} + c_2 \frac{(c_1 + c_2 N) - p\beta}{c_2} \frac{-\beta}{c_2} - a p - b \left( \frac{(c_1 + c_2 N) - p\beta}{c_2} - K_0 \right) \frac{-\beta}{c_2} - d \frac{(c_1 + c_2 N) - p\beta}{c_2} \frac{-\beta}{c_2} = 0.$$

Si multiplicamos por  $c_2^2$ , la ecuación anterior tendremos:

$$(c_1 + c_2 N) \beta c_2 - \beta c_2 [(c_1 + c_2 N) - p\beta] - a p c_2^2 + b [c_1 + c_2 N - p\beta - K_0 c_2] \beta + d \beta [c_1 + c_2 N - p\beta] = 0,$$

Agrupando términos dependientes e independientes de p:

$$(c_1 + c_2 N) [b\beta + d\beta] - p\beta - K_0 c_2 + p [\beta^2 c_2 - a c_2^2 - b\beta^2 - d\beta^2] = 0,$$

O equivalentemente,

$$(c_1 + c_2 N) \beta (d+p) - b\beta K_0 c_2 = p [\beta^2 (b + d - c_2) + a c_2^2].$$

Y, por lo tanto, el valor óptimo de la probabilidad de inspección será:

$$p^* = \frac{(c_1 + c_2 N)\beta(d+p) - b\beta K_0 c_2}{\beta^2 (b+d-c_2) + a c_2^2}. \quad (9)$$

En segundo lugar, supondremos que el planificador central va a decidir acerca del nivel de contaminación a partir del cual imponer la multa,  $K_0$ , por lo tanto p y  $\beta$  tendrán valores fijos.

La condición de optimalidad para maximizar esta función es:

$$\frac{\partial H}{\partial K_0} = b \left( \frac{c_1 + c_2 N - p\beta}{c_2} - K_0 \right) = 0.$$

Despejando de esta ecuación, se obtendrá el valor óptimo del nivel de contaminación a partir del cual imponer una multa:

$$K_0^* = \frac{c_1 + c_2 N - p\beta}{c_2}. \quad (10)$$

Por último, supondremos que el planificador central va a decidir acerca de la intensidad de la multa,  $\beta$ , por lo tanto p y  $K_0$  tendrán valores fijos.



La condición de optimalidad para maximizar esta función es:

$$\frac{\partial H}{\partial \beta} = - (c_1 + c_2 N) \frac{-p}{c_2} + c_2 \frac{(c_1 + c_2 N) - p \beta}{c_2} \frac{-p}{c_2} - b [\beta + \left( \frac{(c_1 + c_2 N) - p \beta}{c_2} - K_0 \right) \frac{-p}{c_2}] - d \frac{(c_1 + c_2 N) - p \beta}{c_2} \frac{-p}{c_2} = 0.$$

Si multiplicamos por  $c_2^2$ , la ecuación anterior tendremos:

$$\frac{\partial H}{\partial \beta} = (c_1 + c_2 N) p c_2 - p c_2 [(c_1 + c_2 N) - p \beta] - b \beta c_2^2 + b [c_1 + c_2 N - p \beta - K_0 c_2] p + d p [c_1 + c_2 N - p \beta] = 0,$$

Agrupando términos dependientes e independientes de  $\beta$ :

$$(c_1 + c_2 N) [b p + d p] - b K_0 c_2 p + \beta [p^2 c_2 - b c_2^2 - b p^2 - d p^2] = 0,$$

Y, por lo tanto, el valor óptimo de la intensidad de la multa será:

$$\beta^* = \frac{(b c_1 + c_1 d - b c_2 K_0 + c_2 (b + d) N) p}{b c_2^2 + (b - c_2 + d) p^2}. \quad (11)$$

Posteriormente, podemos calcular la cantidad óptima de contaminación en cada uno de los escenarios.

En primer lugar, cuando el regulador determina la probabilidad de inspección óptima, reemplazando en (1),  $p$  por su expresión óptima en (9), la contaminación óptima es:

$$K_p^* = \frac{(c_1 + c_2 N) - \left( \frac{(c_1 + c_2 N) \beta (d + p) - b \beta K_0 c_2}{\beta^2 (b + d - c_2) + a c_2^2} \right) \beta}{c_2},$$

$$K_p^* = \frac{(c_1 + c_2 N) (\beta^2 (b + d - c_2) + a c_2^2) - \beta [(c_1 + c_2 N) \beta (d + p) - b \beta K_0 c_2]}{(\beta^2 (b + d - c_2) + a c_2^2) c_2},$$

$$K_p^* = \frac{a c_2 (c_1 + c_2 N) - (c_1 - b K_0 + c_2 N) \beta^2}{a c_2^2 + (b + d - c_2) \beta^2}. \quad (12)$$

Después, en el caso de que el regulador determine la intensidad de la multa óptima, reemplazando en (1),  $\beta$  por su expresión óptima en (11), la contaminación óptima es:

$$K_\beta^* = \frac{(c_1 + c_2 N) - p \left( \frac{b c_1 + c_2 d - b c_2 K_0 + c_2 (b + d) N}{b c_2^2 + (b - c_2 + d) p^2} \right) p}{c_2},$$

$$K_\beta^* = \frac{(c_1 + c_2 N) (b c_2^2 + (b - c_2 + d) p^2) - p^2 (b c_1 + c_2 d - b c_2 K_0 + c_2 (b + d) N)}{(b c_2^2 + (b - c_2 + d) p^2) c_2},$$

$$K_{\beta}^* = \frac{b c_2 (c_1 + c_2 N) - (c_1 - b K_0 + c_2 N) p^2}{b c_2^2 + (b + d - c_2) p^2}. \quad (13)$$

Por último, si el regulador determina el nivel de contaminación óptimo,  $K_0^*$ , no influirá en el valor de la contaminación óptima,  $K^*$  dado que nos encontramos ante una multa lineal:

$$K^* = \frac{c_1 + c_2 N - p \beta}{c_2}. \quad (14)$$

Por el contrario, como se puede observar en (2), este nivel sí influiría en la contaminación óptima en el caso cuadrático.

Para finalizar, supongamos que se cumple que  $a=b$ . En este caso particular, el coste para el regulador de incrementar la probabilidad de inspección coincide con el coste, para este agente, asociado a la intensidad de la multa. En este caso concreto, a partir de las expresiones (11) y (13) se tiene la contaminación óptima del gestor del hospital:

$$K_p^* = \frac{a c_2 (c_1 + c_2 N) - (c_1 - a K_0 + c_2 N) \beta^2}{a c_2^2 + (a + d - c_2) \beta^2}, \quad K_{\beta}^* = \frac{a c_2 (c_1 + c_2 N) - (c_1 - a K_0 + c_2 N) p^2}{a c_2^2 + (a + d - c_2) p^2}.$$

Es inmediato observar que el efecto de  $\beta$  en el escenario en el que el regulador fija la probabilidad de inspección, es equivalente al efecto de  $p$  en el escenario alternativo en el que el regulador fija la intensidad de la multa. En consecuencia, podemos decir que elegir la probabilidad de inspección considerando la intensidad de la multa constante, o fijar la multa tomando la probabilidad de inspección como una constante exógena, son escenarios equivalentes en cuanto a su capacidad para inducir al gestor a reducir la contaminación.

#### **4.- CONCLUSIONES**

Este trabajo analiza el cumplimiento medioambiental de las empresas en el tratamiento de los residuos, concretamente en el sector hospitalario. Por residuos sanitarios se entiende todos los materiales y productos que se crean en los centros sanitarios, y que deben mantenerse en determinadas condiciones, con el fin de evitar poner en peligro la salud de las personas que los manipulan y del medio ambiente.

En la actualidad, para la gestión de este tipo de residuos, se ha optado por la gestión avanzada de residuos sanitarios. Esta técnica plantea la clasificación de los residuos sanitarios en cuatro grupos, dependiendo del riesgo que representen su recogida y el método de eliminación. El regulador establecerá sanciones que variarán dependiendo del grado de incumplimiento en la gestión de este tipo de residuos sanitarios por parte de las empresas que los generan.

Este trabajo ha estudiado la gestión hospitalaria de los residuos sanitarios frente a las imposiciones de la ley, teniendo en cuenta el coste y las inversiones que deben realizarse para llevar a cabo la gestión avanzada de residuos. Dado que el mecanismo sancionador es muy poco preciso en este ámbito, los hospitales comparan entre los costes de cumplir exactamente la ley y, los costes de enfrentarse a una sanción incierta. El objetivo del gerente del hospital consiste en elegir los niveles de incumplimiento de la ley que maximicen su función de rendimiento. Por otro lado, el objetivo del regulador será maximizar el bienestar social fijando estándares, la multa a imponer o la probabilidad de inspección.

Nos encontraremos ante un juego de Stackelberg. En primer lugar, la parte seguidora de este juego sería el gerente del hospital, con un problema de optimización estático. En este modelo el gerente maximiza la función de rendimiento del hospital, en la cual están presentes los costes de gestión de residuos. El gestor deberá tener en cuenta que en estos costes de gestión de

residuos se incluyen los costes de reputación del hospital, la cual puede verse dañada si su actitud en relación a la gestión de residuos es muy irresponsable. El gerente deberá por tanto determinar el nivel de residuos generados pero no tratados que maximicen su función de rendimiento. En ausencia de regulación, el gestor del hospital incrementará la contaminación hasta que el beneficio marginal de contaminar se anule. En segundo lugar, el regulador es el jugador líder y establecerá el nivel de contaminación por encima del cual fijará sanciones, qué tipo de multas y las estrategias de monitoreo que llevará a cabo.

La multa esperada es función del grado de incumplimiento con la normativa. Analizamos dos especificaciones para la función de multa esperada: una multa lineal y una cuadrática. Para pequeños incumplimientos es más gravosa una multa lineal y, por contra, para grandes incumplimientos la cuadrática. Con la normativa establecida por el regulador, el gerente del hospital debe contaminar hasta el punto en el que el coste marginal de reciclar una unidad adicional se iguale a la multa marginal. Es decir, el beneficio marginal por contaminar debe ser igual a la multa marginal. En ausencia de regulación el beneficio marginal por contaminar ha de ser igual a cero.

Con regulación y siendo la probabilidad de ser detectado una constante independiente del grado de incumplimiento, se concluye que el coste marginal de gestión, cuando la multa es lineal, es igual a la probabilidad de ser detectado por la multa marginal. Si la multa es cuadrática, la cantidad óptima de contaminación se obtiene de igual manera, solo que ahora la multa marginal crecerá con el nivel de contaminación.

Cuando el regulador modifica la probabilidad de inspección, la intensidad de la multa o el nivel de contaminación mínimo permitido, el gestor reaccionará de diferente manera según el tipo de multa. Ante un aumento de la probabilidad de inspección o de la intensidad de la multa, el gestor disminuirá la contaminación, si bien el grado de intensidad será diferente para cada tipo de multa. Cuando la intensidad de la multa es muy reducida, la reacción del gestor ante un aumento de la misma es muy suave para el caso de una multa lineal,

sin embargo para el caso cuadrático será muy acusado. Por el contrario incrementos de la intensidad de la multa, cuando esta es muy alta, producen una fuerte respuesta del gestor del plan cuando la multa es lineal y suave cuando es cuadrática. Similar razonamiento es válido para la probabilidad de inspección. Ante un incremento de la contaminación máxima permitida, no variará la contaminación en el caso de una multa lineal, pero sí aumentará en el caso cuadrático.

En el trabajo se calcula para el supuesto de una multa lineal cual es la política óptima por parte del regulador, cuando éste fija, bien la probabilidad de inspección, bien la intensidad de la multa, o bien el nivel máximo de contaminación permitido. Así mismo, para cada uno de estos escenarios, se obtiene la contaminación óptima finalmente fijada por el gestor del hospital.

Sin duda, la mejor opción es considerar un regulador que determinase de manera óptima, tanto la probabilidad, como la intensidad de la multa. En este trabajo, sin embargo, hemos supuesto que sólo se determina una de ellas de manera óptima, para resaltar que son instrumentos equivalentes, dado que inducen una respuesta equivalente por parte del regulador.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adaire Jones, C. (1989) «Standard Setting with Incomplete Enforcement Revisited» *Journal of Policy Analysis and Management*, 8, pp. 72-87.
- Campos Guzmán, R. (2007) «Gestión Clásica y Gestión Avanzada de Residuos Sanitarios» *Enfermería Docente*, 86, pp. 20-24.
- Cerdá, E., Jimeno, J. L., Pérez, J. (2004): Teoría de Juegos. Editorial Pearson Prentice Hall, Madrid.
- Federación Regional de Sanidad de CC.OO., Federación de Sanidad de C.G.T., Ecologistas en Acción, Federación Regional de Sanidad de U.G.T. (1999). *Propuesta alternativa sobre residuos sanitarios en Castilla y León*. Disponible en:  
<https://www.nodo50.org/ecologistas.valladolid/IMG/pdf/proressanitcyl.pdf>  
[consulta 27/01/2020].
- Garvie, D. y Keeler A. (1994) «Incomplete enforcement with endogenous regulatory choice», *Journal of Public Economics*, 55, pp. 141-162.
- Goicoechea Larracochea, N., Gómez Delgado, R., Larracochea Madariaga M. I. (2011). Tratamiento de Residuos Sanitarios. Disponible en:  
[https://www.aepro.com/files/congresos/2005malaga/ciip05\\_2165\\_2176.131.pdf](https://www.aepro.com/files/congresos/2005malaga/ciip05_2165_2176.131.pdf)  
[consulta 15/01/2020].
- Harford, J. D. (1978) «Firm behavior under imperfectly enforceable pollution standards and taxes», *Journal of Environmental Economics and Management*, 5, pp. 26-43.
- Junta de Castilla y León. Consejería de Sanidad (2009) Estrategia Regional de Desarrollo Sostenible de Castilla y León (2009/2014). Buenas prácticas medioambientales, eficiencia, ahorro energético y sostenibilidad en la Consejería de Sanidad. Disponible en:

<https://www.saludcastillayleon.es/institucion/es/estrategia-regional-desarrollo-sostenible/actuaciones-especificas-materia-desarrollo-sostenible.ficheros/154908-> [consulta 30/01/2020].

- “Ley 11/1997, de 24 de abril”, de Envases y Residuos de Envases.
- “Ley 8/2010, de 31 de marzo”, por la que se establece el régimen sancionador previsto en los Reglamentos (CE) relativos al registro, a la evaluación, a la autorización y a la restricción de las sustancias y mezclas químicas (REACH) y sobre la clasificación, el etiquetado y el envasado de sustancias y mezclas (CLP), que lo modifica.
- Politeconomics Economics made simple (2019). *Duopolio de Stackelberg*  
Disponible en:  
<https://politeconomics.com/es/duopolio-stackelberg/> [consulta 04/02/2020]
- Soto Torres, M. D. y Fernández Lechón, R. (1995) «Estrategias de Stackelberg en un juego diferencial», *Anales de estudios económicos y empresariales*, 10, pp. 157-166.
- Zapardiel Quirós, C. (2014) *La teoría de los juegos y sus aplicaciones en la economía actual*, pp. 37-39.

## GLOSARIO EXPRESIONES MATEMÁTICAS

$$(1): K_L(p, \beta) = \frac{(c_1 + c_2 N) - p \beta}{c_2}.$$

$$(2): K_C(p, K_0, \beta) = \frac{c_1 + c_2 N + 2K_0 p \beta}{2p \beta c_2}.$$

$$(3): (K_L)'_p = \frac{-\beta}{c_2} < 0.$$

$$(4): (K_L)'_\beta = \frac{-p}{c_2} < 0.$$

$$(5): (K_C)'_p = -\frac{c_1 + c_2 N}{2 c_2 p^2 \beta} < 0.$$

$$(6): (K_C)'_\beta = -\frac{c_1 + c_2 N}{2 c_2 p \beta^2} < 0.$$

$$(7): (K_C)'_{K_0} = -\frac{1}{c_2} > 0.$$

$$(8): H(K, p, \beta, K_0) = M - (c_1 + c_2 N) K + \frac{c_2}{2} K^2 - a \frac{p^2}{2} - b \left[ \frac{\beta^2}{2} + \frac{(K - K_0)^2}{2} \right] - d \frac{K^2}{2}.$$

$$(9): p^* = \frac{(c_1 + c_2 N)\beta(d+p) - b\beta K_0 c_2}{\beta^2 (b+d-c_2) + a c_2^2}.$$

$$(10): K_0^* = \frac{c_1 + c_2 N - p \beta}{c_2}.$$

$$(11): \beta^* = \frac{(b c_1 + c_1 d - b c_2 K_0 + c_2 (b+d)N)p}{b c_2^2 + (b - c_2 + d)p^2}.$$

$$(12): K_p^* = \frac{a c_2 (c_1 + c_2 N) - (c_1 - b K_0 + c_2 N)\beta^2}{a c_2^2 + (b + d - c_2)\beta^2}.$$

$$(13): K_\beta^* = \frac{b c_2 (c_1 + c_2 N) - (c_1 - b K_0 + c_2 N)p^2}{b c_2^2 + (b + d - c_2)p^2}.$$

$$(14): K^* = \frac{c_1 + c_2 N - p \beta}{c_2}.$$