

# Un sistema de permisos negociables para el control de la contaminación de empresas con vertimientos a la red de alcantarillado

*A tradable permit systems for the control of pollution of firms with waste water discharges to the sewerage network*

JOHANNA MILDRED MÉNDEZ SAYAGO

*Profesora Universidad EAN*

*jmmendez@correo.ean.edu.co*

JHON ALEXANDER MÉNDEZ SAYAGO

*Profesor Departamento de Economía, Universidad del Valle*

*jhmendez@univalle.edu.co*

Recibido 10.11.2009  
Aprobado 05.05.2010

## Resumen

En este artículo, se propone un sistema de permisos negociables para el control de la contaminación de usuarios industriales y comerciales, con vertimientos a la red de alcantarillado. Este sistema, junto con un esquema de sanciones individuales y colectivas, tiene la capacidad de inducir un comportamiento socialmente deseable, en los agentes contaminadores, es decir, permite lograr una meta de contaminación, al mínimo costo. La propuesta es una alternativa al instrumento vigente de Tasas Retributivas, para el control de la contaminación de agentes con vertimientos, sobre los cuerpos de agua, cuya reglamentación y aplicación no favorece el principio de costo efectividad en el control de la contaminación, para este tipo de usuarios.

**Palabras clave:** Permisos negociables, tasas retributivas, monitoreo.

## Abstract

In this paper is proposes a tradable **permit systems** for the control of pollution from industrial and commercial users with waste water discharges to the sewerage network to the sewerage network. This system in conjunction with a scheme of individual and collective sanctions has the ability to induce socially efficient behavior in firms that generate waste water, i.e. can achieve a goal of contamination at the lowest cost. The proposal is different from the current instrument of retributive rates for the control of pollutants with discharges on bodies of water, whose regulation and implementation does not conducive to the principle of cost effectiveness in pollution control for these users.

**Key words:** Tradable permits, retributive rates, monitoring.

**JEL Classification:** Q25, K32, H23.

## Introducción

La política para el control de la contaminación del recurso hídrico, en Colombia, pretende mitigar el impacto de los vertimientos de aguas residuales, sobre los cuerpos receptores, a través de dos instrumentos. El primero, un instrumento de comando y control (Decreto 1594, de 1984). El segundo, un instrumento económico denominado Tasas Retributivas (TR), que tiene como origen, el Artículo 18, del Decreto 2811 de 1974, reglamentado por el Decreto 901 de 1997, pero derogado por el Decreto 3100 de 2003, modificado, a su vez, por el Decreto 3440 de 2004. (Gandini, Pérez y Madera, 2005).

Las TR están fundamentadas en el mecanismo para la reducción de la contaminación, propuesto por Baumol & Oates (1971), que busca reducir la contaminación de los cuerpos de agua, al mínimo costo; es decir, persiguen la eficiencia económica, pero reconocen la imposibilidad de lograr la optimalidad. Un impuesto ambiental uniforme, por unidad de sustancia contaminante, como el precisado en las TR (versión del Decreto 901 de 1997) conduce a la equimarginalidad de los costos de abatimiento de las firmas, lo que satisface la condición fundamental, para la minimización de los costos de reducción de la contaminación.

Desde la perspectiva de la teoría económica, la implementación conjunta de los instrumentos que se presenta en Colombia resulta contradictorio, porque aunque en principio la normatividad de las TR perseguía la costo efectividad a través del impuesto uniforme de la tasa, en el Decreto 901 de 1997, la modificación plasmada, en el Decreto 3440 de 2004, sobre las metas a los grupos de usuarios y a las empresas de servicios públicos, nos devuelve a un esquema análogo al de la regulación directa, en el cual, cuando el grupo de usuarios no cumple con su meta de reducción de la contaminación, se les penaliza, con una sanción económica. Para el caso del Decreto en cuestión resulta ser un pago más alto, por unidad de contaminación (producto de un factor regional diferenciado). La contradicción se presenta, porque no se puede lograr la equimarginalidad, con impuestos unitarios diferenciados, entre los agentes contaminadores.

Por otra parte, la reglamentación de las TR sujeta al pago de la tasa a quien hace los vertimientos finales al cuerpo de agua, lo que incluye a las empresas prestadoras del servicio de acueducto y alcantarillado. Sin embargo, la regulación vigente, sobre el sistema de tarifas de los servicios públicos, obliga a que se traslade al usuario final, los costos de operación requeridos para la prestación del servicio, incluyendo los costos que se derivan del pago de las TR (Rudas, 2005).

Tenemos así un sistema en el que operan tres agentes: La autoridad ambiental (AA), la empresa de servicios públicos y los usuarios de la red, cada uno con sus propios intereses y objetivos. La AA pretende el cumplimiento de una meta de contaminación, al mínimo costo, que permita el cumplimiento de algún estándar ambiental del cuerpo de agua. La empresa de servicios públicos estará interesada en el cumplimiento de la meta de contaminación, porque es un compromiso pactado con la AA. El usuario final pretenderá ejercer su actividad contaminadora, al menor costo posible.

Un arreglo institucional apropiado considerará los intereses de todos usuarios y facilitará (en lo posible) su realización. Es decir, la reglamentación debería fomentar la consecución de la meta de contaminación, al mínimo costo, y que cada agente contaminador pague, de acuerdo con su nivel efectivo de vertimientos, una tarifa mínima, de conformidad con la meta. Lo que se demuestra, en este artículo, es que no es posible en teoría, ni en la práctica, que la reglamentación de las TR concilie todo el conjunto de objetivos.

La consecución de la meta de contaminación, al mínimo costo, cuando funcionan plantas de tratamiento de aguas residuales municipales (PTAR), implica la equimarginalidad entre los costos de abatimiento de todos los usuarios y los de la PTAR. Como se demostrará en este documento, la formulación actual de las TR no induce esta condición. La reglamentación está diseñada para que al agente contaminador se le cobre la tarifa mínima, por concepto de la TR, y sea mediante la operación de la PTAR, que se logre el ajuste de contaminación necesario, para garantizar la meta. Esto genera sobrecostos en la reducción de la contaminación, que son asumidos por las mismas firmas contaminadoras y los hogares.

Por otra parte, el buen funcionamiento de cualquier sistema de regulación de la contaminación requiere mecanismos de vigilancia y monitoreo de la contaminación de los agentes contaminadores. El diseño y la operación exitosa de estos mecanismos corresponde a las autoridades ambientales. Sin embargo, las autoridades ambientales, en Colombia, no otorgan prioridad a la TR, como un mecanismo basado en incentivos, para el control de la contaminación, sino como fuente, para el recaudo de recursos para su funcionamiento. Como el usuario final (quien paga la tasa) es la empresa de acueducto y alcantarillado, esta normatividad desincentiva la realización de monitoreos a los usuarios de la red.

En este estudio, se propone, como arreglo institucional alternativo, *un sistema de permisos negociables, para el control de la contaminación de empresas, con vertimientos a la red de alcantarillado*. La propuesta se fundamenta en que este sistema asegura el cumplimiento de una meta de contaminación, mediante la emisión del mismo número de permisos de contaminación. Además, es bien conocido que el sistema es costo efectivo, porque logra la equimarginalidad de costos de abatimiento de todos los usuarios, ya que estos deciden cuánta cantidad de permisos compran, al igualar sus costos marginales de abatimiento, con el precio de los permisos.

La propuesta incluye el planteamiento de un esquema de incentivos, que evite el costo excesivo de realizar monitoreos periódicos a la totalidad de las firmas, sin caer en el problema del riesgo moral. El esquema de incentivos comprende un sistema de sanciones individuales y colectivas que, junto con una baja proporción de monitoreos, logra inducir el comportamiento socialmente eficiente de las firmas (desincentiva la contaminación fraudulenta).

Además de esta introducción, el trabajo está organizado en seis secciones. En la siguiente, se analizan las condiciones, para la asignación óptima de la contaminación. En la segunda, se describe el instrumento de Baumol y Oates, para la reducción costo

efectiva de la contaminación. En la tercera, se expone el instrumento de la legislación colombiana de tasas retributivas, para el control de la contaminación de los cuerpos de agua. La cuarta sección analiza las condiciones, para la reducción costo efectiva de la contaminación, en presencia de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. En la quinta, se presenta la propuesta ya señalada y, finalmente, en la última sección, se presentan las conclusiones.

## 1. Contaminación óptima

Existe una estrecha relación de interdependencia entre la economía y el medio natural. El sistema económico depende del medio natural, el que lo surte de materias primas, y le sirve de sumidero de sus desechos. Lamentablemente, la sobreexplotación de los recursos naturales y su acelerado agotamiento, así como el drástico cambio en las condiciones atmosféricas y la contaminación excesiva, son secuelas de tal dependencia (Velásquez, 2002).

La economía ambiental atribuye el exceso de contaminación a las fallas de mercado. Esto se debe a que el mercado no incorpora, en los costos de productores o consumidores, el daño de la actividad económica, sobre el medio natural, así que estos daños no inciden en las decisiones económicas de productores y consumidores, generando la degradación de la calidad ambiental. Según el enfoque intervencionista, esto requiere la participación del gobierno, para que regule el uso del medio ambiente, como receptor de desechos, e induzca al contaminador a tomar acciones socialmente convenientes.

El gobierno representado por la AA debe determinar cuál es el mejor nivel de contaminación para la sociedad (denominado *contaminación óptima*), y enfrentarse al problema de que no siempre le es posible controlar al contaminador, de manera precisa.

El criterio económico para fijar el nivel de contaminación óptimo es la minimización de todos los costos sociales, derivados de la actividad contaminadora. Estos costos comprenden tanto el daño generado por la contaminación, como los costos totales en los que se incurra al reducirla (costo de abatimiento). A partir de este criterio, se deduce que la contaminación óptima  $e^*$  corresponde a aquella en la cual los costos marginales de abatimiento  $CMR(e^*)$  son iguales a los daños marginales  $DMA(e^*)$  causados por los niveles de contaminación:

$$CMR(e^*) = DMA(e^*) \quad (1)$$

### Impuesto pigouviano

El enfoque pigouviano, para el control de la contaminación, consiste en la implementación de un impuesto sobre la actividad contaminadora, igual al daño marginal social. El Impuesto eleva el costo de uso del medio ambiente, como sumidero, y da al contaminador la flexibilidad de encontrar la estrategia de menor costo, para el control de la contaminación.

Nótese que, con el cobro de un impuesto por unidad de contaminante, los costos en los que incurre una empresa  $j$ , por contaminar, están dados por:

$$CT_j = t * e + C_j(e_j) \quad (2)$$

Donde  $t * e$  es el monto a pagar, por concepto del impuesto; y  $C_j(e_j)$  es el costo de abatimiento de la empresa  $j$ . La minimización de costos de la empresa conduce a que su nivel de contaminación sea aquél para el cual el costo marginal de reducción de la contaminación sea igual al impuesto:

$$CMR_j(\tilde{e}_j) = t \quad (3)$$

En la expresión anterior,  $\tilde{e}_j$  es denominada contaminación eficiente de la firma  $j$ .

Dado el nivel óptimo de contaminación  $e^*$ , la solución económica al problema de exceso de contaminación consistiría en cobrar un impuesto, por unidad de sustancia contaminante emitida, igual al impuesto pigouviano:

$$t_{pigou} = CMR_j(e^*) = DMA(e^*) \quad (4)$$

Luego, con el impuesto pigouviano, se tendría que:  $\tilde{e}_j = e^*$

## 2. Eficiencia sin óptimalidad

En la práctica, la aplicación del impuesto pigouviano es poco factible, debido a las limitaciones, al tratar de identificar e implementar la contaminación óptima. Así, la AA no dispone de la información necesaria, para la determinación del impuesto pigouviano (preferencia de los hogares y tecnología de las firmas).

Como solución, Baumol & Oates (1971) recomendaron que la AA fijara algún nivel de contaminación socialmente deseable, e implementara este estándar ambiental al mínimo costo, mediante la aplicación de un impuesto uniforme (precio), por unidad de emisión fijado a prueba y error. Dicho impuesto uniforme conduce a la *equimarginalidad* de los costos de reducción de todas las fuentes contaminadoras, y la *equimarginalidad*, garantiza la reducción de la contaminación, al mínimo costo.

Ante el cobro del impuesto uniforme, todos los agentes contaminadores actúan de acuerdo con la expresión (4), lo que conduce a la equimarginalidad:

$$CMR_1(\tilde{e}_1) = CMR_2(\tilde{e}_2) = \dots = CMR_j(\tilde{e}_j) = t \quad (5)$$

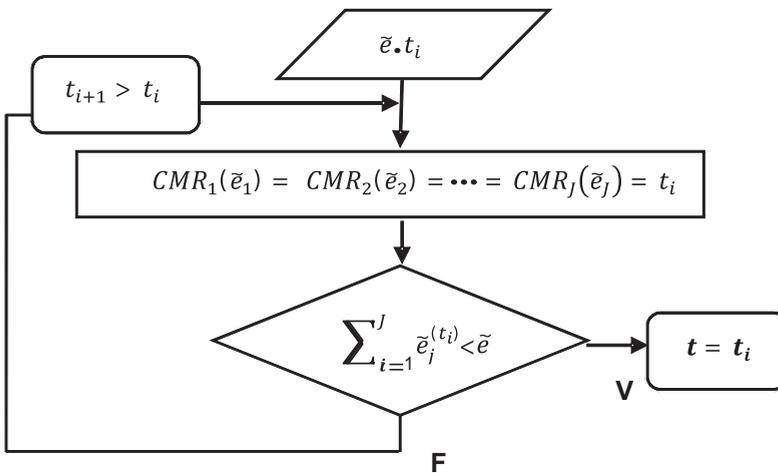
El mecanismo de Baumol y Oates se ilustra en la Figura N°1 y funciona de la siguiente forma: la agencia reguladora fija un precio  $t_i$  por unidad de emisión, y una meta de contaminación socialmente deseable  $\bar{e}$ , como aproximación del óptimo social  $e^*$ . Las firmas deciden cuál es su nivel de contaminación, de acuerdo con (5). Si la

contaminación agregada es superior a la meta, el impuesto unitario es ajustado, hasta cuando se alcance un nivel de impuesto, para el cual se cumpla la meta de contaminación.

### 3. Tasas retributivas (TR)

Según la legislación colombiana, las tasas representan un ingreso ordinario no tributario, que deben pagar los particulares, por ciertos servicios que presta el Estado (Velásquez, 2002). Las TR son consecuencia indirecta del Decreto 2811 de 1974, que señala que “las aguas son de dominio público, inalienables e imprescriptibles del Estado. Las aguas de dominio público son de uso público, y su administración y manejo corresponde al Estado”.

Figura N°1. Mecanismo de Baumol y Oates.



Fuente: Elaboración propia

Desde la perspectiva económica, la TR es un instrumento económico, para el control de los vertimientos contaminantes del recurso hídrico. Su principal objetivo es reducir la contaminación de los cuerpos de agua, al mínimo costo; es decir, persigue la eficiencia, pero reconoce la imposibilidad de lograr la optimalidad. Están fundamentadas en el mecanismo de Baumol & Oates (Méndez, 2008). Las TR obedecen el principio del contaminador-pagador, principio básico en derecho ambiental, que busca la restitución o el resarcimiento del daño ambiental, causado a la comunidad, por un agente contaminador.

“Quien causa el deterioro, paga los gastos requeridos para prevenir o corregir el mismo. De tal suerte que quien es así gravado, redistribuirá los costos entre los compradores de sus productos, cargándolos en los precios; o a los usuarios de sus servicios (si se trata de una municipalidad o una entidad prestadora de servicios), cargándolos

a las tarifas, y debe detallar claramente dicho traslado” (Velásquez, 2002, pág. 155). De allí se desprende un segundo objetivo, en la aplicación de las TR: la generación de recursos, para financiar la gestión y la inversión ambiental.

### 3.1. Funcionamiento de las TR

El mecanismo propuesto en el Decreto 3100 de 2003, requiere que la AA defina no sólo una meta global de reducción de la carga contaminante total, sino también metas individuales y sectoriales, para las entidades prestadoras de servicio de alcantarillado y otros usuarios, cuya carga vertida sea mayor al 20% del total de la carga que recibe el cuerpo de agua. La meta global se redefine cada quinquenio, para cada cuerpo de agua. La meta también es diferente para cada una de las sustancias contaminantes, objeto del cobro de la tasa, y obedece al potencial de daño de cada una de ellas, y a la capacidad de asimilación del recurso.

Las sustancias contaminantes, objeto del cobro de la tasa, son la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y los sólidos suspendidos totales (SST). La fórmula para el cálculo del monto a pagar mensual, por concepto de la tasa para cada contaminante  $i$ , es la siguiente:

$$MP_i = C_i * Tm_i * Fr_i \quad (6)$$

Donde:

$MP_i$ : Monto a pagar por la sustancia  $i$

$C_i$ : Carga contaminante de  $i$ , vertida durante el periodo de cobro (un mes)

$Tm_i$ : Tarifa mínima del parámetro  $i$

$Fr_i$ : Factor regional del parámetro  $i$

El valor de la tarifa mínima, para cada sustancia contaminante, la fijó el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Actualmente, está vigente lo establecido en la Resolución 372 de 1998.

En la expresión del monto a pagar, el producto  $Tm_i * Fr_i$  corresponde al precio de la contaminación sugerido por Baumol & Oates. El factor  $Fr_i$  es el que permite el ajuste gradual del precio, hasta cuando se logre cumplir la meta de reducción.

El factor regional empieza con un valor igual a uno, y se ajusta anualmente, a partir de la finalización del segundo año, para los usuarios sujetos al pago de la tasa, que no hayan cumplido con la meta de reducción. Esto implica la posibilidad de que a los contaminadores se les cobren diferentes precios, violando así el principio de equi-marginalidad, condición básica para la reducción costo efectiva de la contaminación.

### 3.2. Cobro de las TR a los usuarios del servicio de alcantarillado

La Resolución 287 de 2004, proveniente de la Comisión Reguladora de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA), que regula las formulas tarifarias de los servicios

de acueducto y alcantarillado, obliga a trasladar a los usuarios todos los costos de operación y de reposición de la inversión, requeridos para su prestación. Dentro de estos costos, se encuentran todos los relacionados con el manejo de las aguas servidas, incluyendo los derivados del cumplimiento de la obligación de pagar las tasas, por los vertimientos a los cuerpos de agua.

El cargo por consumo (CC) de la tarifa de alcantarillado incluye tres componentes: el Costo Medio de Operación y Mantenimiento (CMO), el Costo Medio de Inversión (CMI) y el Costo Medio de Tasas Ambientales (CMT). El CMT para el servicio de alcantarillado está asociado con las TR:

$$CMT_{AL} = \frac{MP}{AV} \quad (7)$$

El Artículo 37 de la Resolución 287 diferencia entre los suscriptores con caracterización, y aquéllos sin caracterización de vertimientos. Para los usuarios con caracterización de vertimientos:

$$MP_{cj} = \sum_i C_{ij} * TM_i * Fr_i \quad (8)$$

$MP_{cj}$  es el monto total a pagar, establecido conforme al Decreto 3100 de 2003, para el suscriptor  $j$ , con caracterización, correspondiente a la última actualización base de la declaración de la tasa retributiva.

$C_{ij}$ : Carga contaminante estimada de la sustancia  $i$ , para el usuario  $j$ .

$AV_{cj}$ : Sumatoria de vertimientos facturados por el prestador, para el suscriptor  $j$ .

El factor regional  $Fr$  siempre será 1, que es el valor aplicable, si se cumple la meta<sup>1</sup>.

Puede deducirse, de (7) y (8), que estas empresas pagan la TR, de acuerdo con su contaminación (declarada), porque cuando se calcula el monto de la tarifa del servicio, se multiplica el *cargo por consumo*, por el *consumo* (en metros cúbicos), el cual corresponde a  $AV_{cj}$ , así que el usuario paga, por concepto de la tarifa, el monto  $MP_{cj}$ .

Las empresas sin caracterización de vertimientos no pagan la TR de acuerdo con sus niveles de contaminación. Lo hacen, de acuerdo con una concentración de la contaminación estimada (en promedio) y con su volumen de agua vertida, que en la práctica se asimila a la consumida.

Se debe resaltar que, en la Resolución 287 de la CRA, no hay explícito ningún descuento, a favor de los usuarios, por la remoción de sustancias contaminantes, como resultado de la operación de las PTAR municipales, a pesar de que el Artículo 16 del mismo Decreto traslada a los usuarios los costos de operación del tratamiento<sup>2</sup>. Lo correcto sería que si las empresas y los hogares pagan por la reducción de la

1 Según el Artículo 8 del Decreto 3100 de 2003, la AA competente debe establecer metas individuales de reducción de carga contaminante, para las ESP sujetas al pago de la tasa.

2 La consulta sobre esta inconsistencia de la reglamentación fue elevada a la CRA. La entidad respondió: "Según el Decreto 287 del 2004, "la carga contaminante estimada (c.) se verá afectada por el efecto que tenga el sistema

contaminación, resultante de la operación de la PTAR municipal, se les descuenta de sus vertimientos, una fracción equivalente al mismo porcentaje de reducción de la PTAR.

#### 4. Reducción costo efectiva de la contaminación, en presencia de las PTAR.

Algunos municipios de Colombia cuentan con PTAR, que contribuyen a la eliminación parcial de la contaminación de los vertimientos de la red de alcantarillado. Desde esta situación, cuando la AA pretende alcanzar una meta de reducción de la contaminación particular, surgen las preguntas: ¿cuál debe ser el esfuerzo de reducción de los agentes contaminadores (usuarios de la red de alcantarillado)?, ¿cuál debe ser la eficiencia de remoción, por parte de la planta de tratamiento de aguas residuales municipales?

Para dar respuesta a los interrogantes, se formula un modelo, que es una adaptación del modelo de Baumol y Oates (1971) para la situación planteada.

Considérese un conjunto de "J" empresas contaminadoras, que producen un mismo bien "X" y una meta de contaminación " $\bar{e}$ ". El problema de minimización del costo total de la reducción de la contaminación será:

$$\text{Min}_{x_j, e_j} \sum_{j=1}^J C(q, x_j, e_j) + C_p(R) \quad \text{s. a.} \quad \sum_{j=1}^J x_j \geq \bar{X} \quad \wedge \quad \sum_{j=1}^J e_j + e_D - R \leq \bar{e} \quad (9)$$

Donde:

$C(q, x_j, e_j)$ : Es la función de costos de la empresa. Incluye el precio de los factores de producción  $q$ , el nivel de producción  $x_j$  y la contaminación  $e_j$ .

$$\frac{\partial C}{\partial q} > 0, \quad \frac{\partial C}{\partial x} > 0 \quad \text{y} \quad \frac{\partial C}{\partial e} < 0 \quad \frac{\partial^2 C}{\partial e^2} > 0$$

$C_p(R)$ : Función de costo de reducción de la PTAR.  $\frac{dC_p}{dR} > 0$  y  $\frac{d^2C_p}{dR^2} > 0$ .

$e_D$ : Contaminación de origen doméstico

$R$ : Efectividad de la PTAR.  $R = \sum_{j=1}^J e_j + e_D - \varepsilon$ .

$\varepsilon$ : Contaminación vertida al cuerpo de agua.

$$L = \sum_{j=1}^J C(q, x_j, e_j) + C_p \left( \sum_{j=1}^J e_j + E[e_D] - \varepsilon \right) - \mu \left( \sum_{j=1}^J x_j - \bar{X} \right) + \lambda (\varepsilon - \bar{e}) \quad (10)$$

de tratamiento de aguas residuales, en la reducción de esta carga contaminante". No obstante, esta aclaración no está contenida en la reglamentación; por tanto, a lo sumo, se trata de una regla informal.

Condiciones de primer orden:

$$\frac{\partial L}{\partial x_j} = \frac{\partial C}{\partial x_j} - \mu = 0 \quad \forall_j \quad (10)$$

$$\frac{\partial L}{\partial e_j} = \frac{\partial C}{\partial e_j} + \frac{\partial C_p}{\partial R} * \frac{\partial R}{\partial e_j} = 0 \quad \forall_j = 1, \dots, J \quad (12)$$

Dado que:  $CMR_j(e_j) = -\frac{\partial C}{\partial e_j}$

$$CMR_j(e_j) = \frac{\partial C_p}{\partial R} \quad \forall_j = 1, \dots, J$$

$$\frac{\partial L}{\partial \varepsilon} = \frac{\partial C_p}{\partial R} * \left(\frac{\partial R}{\partial \varepsilon}\right) + \lambda = 0 \quad (13)$$

Como:  $\frac{\partial R}{\partial \varepsilon} = -1 \Rightarrow \frac{\partial C_p}{\partial R} = \lambda$

$$CMR_1(e_1) = CMR_2(e_2) \dots = CMR_J(e_J) = \frac{\partial C_p}{\partial R} = \lambda \quad (14)$$

La condición de optimalidad (14) establece que la reducción costo efectiva de la contaminación, cuando existen PTAR, requiere que los costos marginales de reducción de los usuarios de la red sean iguales al costo marginal de reducción de la PTAR.

**Economías de escala, en los costos del tratamiento de aguas residuales.**

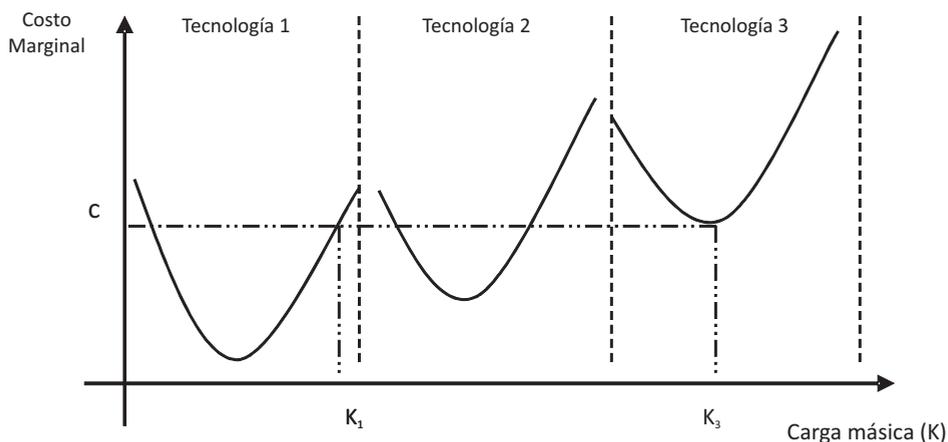
Satisfacer la condición (14), parece físicamente improbable o excesivamente costoso, para las firmas contaminadoras. La asociación entre los costos marginales de abatimiento crecientes, y la considerable carga másica<sup>3</sup> que manejan las PTAR, puede dar la impresión de que los costos marginales de abatimiento de las PTAR son tan altos, que resultarían incomparables con los costos marginales de abatimiento de las firmas contaminadoras individuales.

Realmente, para una tecnología particular, con el aumento paulatino de la carga másica por tratar, la tecnología tiende a ser menos eficiente, lo que resulta en costos marginales de abatimiento crecientes. Sin embargo, a medida que las tecnologías para el tratamiento de las aguas residuales se hacen más complejas, aparecen las economías de escala, con costos totales crecientes, pero marginalmente menores, respecto de otras tecnologías más simples. Lo anterior es ilustrado en la Figura N°2. Obsérvese cómo, para un mismo costo marginal de abatimiento  $c$ , la carga másica  $k_3$ , tratada

3 Se define como el producto de la carga contaminante, por el volumen del agua residual por tratar.

mediante la tecnología 3 (el cual sería el caso de una PTAR), es muy superior a la carga másica  $k_1$ , tratada mediante la tecnología 1 (que se asimila a la tecnología de abatimiento de las firmas).

Figura N°2. Economías de escala, en las PTAR.



Fuente: Adaptado de Guerrero (2003)

### Costo efectividad de las TR:

La Figura N°3 ilustra un escenario muy probable, para las TR, para los usuarios industriales y comerciales de la red de alcantarillado, incluyendo la PTAR. En la Figura, se simula la fijación de una meta de reducción de la contaminación, por parte de la AA, igual a  $\bar{e}$ , en cumplimiento del Artículo 8 del Decreto 3100 de 2003.

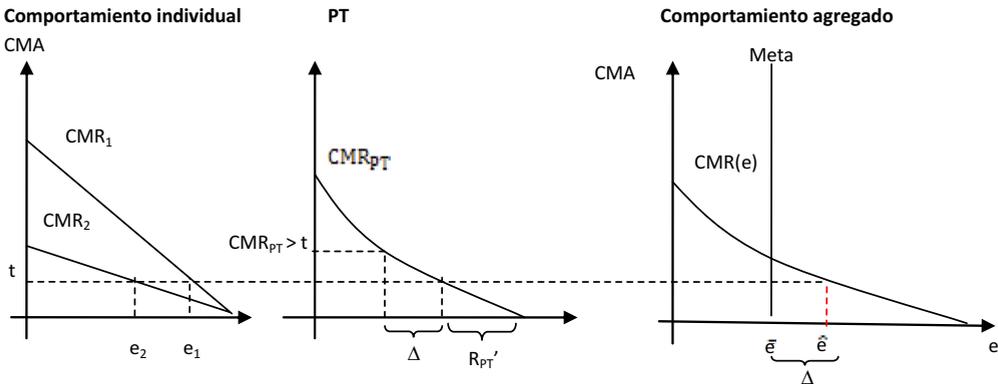
Recuérdese que, según el mismo Decreto y la Resolución 287 de 2004, de la CRA, si el usuario final (ESP) cumple con la meta de reducción de la contaminación, el factor regional imputado es de uno, configurándose una tarifa de la tasa, relativamente pequeña  $t$ . Para este precio, los niveles de contaminación de un par de empresas 1 y 2 son, en su orden  $e_1$  y  $e_2$ . Así mismo, la reducción eficiente de la PTAR es  $R_{PT}$ . Esto puede conducir a un nivel agregado de contaminación de  $\hat{e}$ , superior a la meta  $\bar{e}$ .

No obstante, el cumplimiento de la meta obliga a la sobrerreducción de la contaminación  $\Delta$ , en la PTAR. Para la reducción resultante de la contaminación ( $\Delta + R_{PT}$ ), el costo marginal abatimiento de la PTAR es superior al costo marginal de reducción de las firmas (igual a  $t$ ), con lo que se viola la condición de costo efectividad<sup>4</sup> (14). Sin

4 Por ejemplo, según información suministrada por la Empresa de Acueducto, Agua y Alcantarillado de Bogotá, los costos promedios mensuales de operación de la PTAR, de la cuenca del Salitre, ascienden a \$1.235'446.429, desde el 1 de julio de 2004, al 30 de septiembre de 2009. La remoción promedio mensual de SST es de 1422.2 Ton, y de DBO, de 1140.4 Ton, con base en un caudal promedio tratado de 10'305.777 m<sup>3</sup>/mes. Los valores de la tarifa mínima de la TR, para el año 2009, son: \$44.46/kgSST y \$103.97/kgDBO (información

embargo, las firmas no resultan perdedoras con este arreglo institucional imperfecto, porque, aunque la reducción de la contaminación es más costosa, se ven compensadas, al pagar un menor precio, por el uso del cuerpo de agua como sumidero. Además, el costo de la ineficiencia es compartido con los hogares.

**Figura N°3. Ineficiencia en la reducción de la contaminación.**



Fuente: Elaboración propia

## 5. Permisos de contaminación transferibles (PCT)

La idea de los permisos de contaminación transferibles fue introducida por Dales (1968). Tiene, como propósito, crear mercados para un “mal” como la contaminación y, así, alcanzar objetivos ambientales, bajo un sistema que asegure, al mismo tiempo, la eficiencia económica.

El sistema de permisos de contaminación transferibles consiste en establecer la máxima cantidad del recurso, que puede ser utilizado por el conjunto de agentes contaminadores, de conformidad con cierta meta de calidad ambiental, definida en términos de un nivel aceptado de emisiones. Los niveles de la calidad ambiental se expresan en permisos de contaminación. Luego, son distribuidos entre los agentes del mercado, a manera de cuotas que constituirán derechos de uso, sobre el recurso o servicio.

Un aspecto interesante de los mercados de PCT es que la distribución inicial de los permisos, entre las empresas contaminadoras, no importa desde el punto de vista de la eficiencia económica. Los permisos son adjudicados, normalmente, por la AA, mediante algún procedimiento de distribución equitativo y gratuito (grandfathering<sup>5</sup>);

tomada de la página web del MAVDT). Utilizando estas tarifas como referencia, las cantidades removidas de DBO y SST tienen un costo, para las firmas, de \$181'798.400. A partir de esta cifra, se puede concluir que el costo marginal de reducción de la PTAR es aproximadamente 6.8 veces más alto, que la tarifa mínima (precio de la tasa, que resulta igual al costo marginal de reducción de las firmas usuarias de la red de alcantarillado).

5 Este sistema de asignación gratuita de los permisos respeta los derechos adquiridos por las empresas, establecidas con anterioridad a la entrada en vigor del mercado PCT. Es decir, la asignación de los permisos se hace de acuerdo con el registro histórico de contaminación de las empresas.

o bien ofrecidos en subasta pública. Obtenidos los permisos, las firmas involucradas podrán negociarlos entre ellas, ya sea comprándolos o vendiéndolos.

Si el sistema PCT es un mercado perfectamente competitivo, y se asume pleno cumplimiento, el sistema garantiza la consecución de la meta ambiental, al mínimo costo, ya que todas las firmas deciden a qué cantidad de permisos acceden, igualando sus costos marginales de abatimiento, con el precio “p” de los permisos. Esta decisión de las firmas conduce al cumplimiento de la condición de costo efectividad:

$$CMR_1(\tilde{e}_1) = CMR_2(\tilde{e}_2) = \dots = CMR_j(\tilde{e}_j) = p \quad (15)$$

Las empresas que pueden reducir más fácilmente la contaminación estarán dispuestas a vender los permisos que se les asignan. Las que no pueden reducir la contaminación, por sus costos elevados, tendrán que comprar los permisos que necesitan. Con la existencia de un libre mercado de derechos de contaminación, la asignación final será eficiente, cualquiera que haya sido la asignación inicial (Navarrete, 2003).

Entre las experiencias internacionales más reconocidas, sobre el sistema de PCT están: el Programa Estadounidense de Limitación y Comercio (Cap and Trade), diseñado para el control de las emisiones de SO<sub>2</sub>. El Mercado Europeo de transacción de Emisiones (EU-ETS), creado para ayudar a cumplir a los países de la Unión Europea sus compromisos del Protocolo de Kioto, sobre la reducción de gases del efecto invernadero<sup>6</sup>.

El programa estadounidense de Limitación y Comercio se creó como resultado de la promulgación de las Enmiendas a la Ley de Aire Limpio, de 1990, que otorgaban competencias, para tomar diversas medidas, a fin de reducir las emisiones precursoras de la lluvia ácida. El sistema consistió en un programa de limitación y comercio de dos fases, diseñado para reducir las emisiones de SO<sub>2</sub> procedentes de las centrales eléctricas, que consumían combustibles fósiles y que estaban situadas en los 48 Estados continentales de los Estados Unidos. Según Ellerman (2004), esta experiencia exitosa ha demostrado que los sistemas de incentivos, basados en el mercado, pueden reducir las emisiones, con la misma eficacia que las medidas convencionales de comando y control, y con un costo considerablemente menor.

Pero sin lugar a dudas, el mercado de PCT más importante de la actualidad es el EU-ETS, que abarca las emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes de la energía, los metales ferrosos y las industrias minerales, como el cemento, el vidrio, la cerámica y las industrias de pasta y papel.

El EU-ETS es un sistema *cap and trade*, en el que se establecen objetivos de reducción de emisiones. Los derechos de emisión pueden comprarse y venderse, y las fuentes emisoras deben tener suficientes derechos, para cubrir sus emisiones (Del Rio y Labandeira, 2009).

6 La Unión Europea está obligada, por el Protocolo de Kioto, a una reducción de sus emisiones, en un 8%, respecto de las emisiones de 1990.

La Directiva Europea<sup>7</sup> establece un tope máximo (cap) de emisiones, para cada Estado miembro, durante un período de varios años. Estos límites se distribuyen entre las instalaciones de cada Estado, mediante el Plan Nacional de Asignaciones (PNA)<sup>8</sup>. Las emisiones, hasta el nivel del cap, están respaldadas por derechos de emisión. Por encima del cap, las emisiones dan lugar a penalizaciones. Dado que el límite global de las emisiones respaldadas por los derechos de emisión es inferior al conjunto de las emisiones reales, cuando un Estado no ha cumplido aún su objetivo, el esquema genera incentivos, para que los agentes reduzcan sus emisiones de CO<sub>2</sub>, con el objetivo de evitar sanciones.

Un aspecto importante del EU-ETS es que permite que las compañías usen créditos de emisiones, provenientes de los otros mecanismos de flexibilidad del Protocolo de Kioto<sup>9</sup>, los cuales ayudan al cumplimiento de las obligaciones adquiridas por las compañías.

Según Hyvärinen (2005), el EU-ETS no ofrece incentivos poderosos, para reducir las emisiones, ya que como la asignación se realiza para cada período de comercio de emisiones, en función de criterios históricos, es muy posible que el sistema induzca a la inacción. Dado que las asignaciones para el futuro se basan en las emisiones anteriores, ¿por qué disminuirlas? Además, en la industria de la electricidad, emisor y elemento principal del sistema, el incentivo para reducir los niveles de emisión de CO<sub>2</sub> es muy cuestionable, ya que la industria puede repercutir, en los consumidores, tanto el costo real del EU ETS, como los costos de oportunidad.

### 5.1. PCT en la contaminación hídrica

Los permisos transferibles de contaminación hídrica se usan para la protección y gestión de la calidad del agua superficial. Su funcionamiento no difiere de la concepción teórica: una autoridad responsable fija el límite máximo de las emisiones totales permisibles de un contaminante. Posteriormente, se distribuye esa cantidad total, entre las fuentes emisoras, a través de permisos que autoricen a los agentes contaminadores, para realizar vertimientos, con una cantidad definida del contaminante, durante un período de tiempo determinado. Después de su distribución inicial, los permisos pueden ser transados (Kraemer, Kampa e Interwies, 2003).

Según Kraemer y Banholzer (1999), transar permisos de contaminación hídrica implica manejar cierto grado de complejidad adicional (comparado con un siste-

---

7 Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo, por la que se establece un régimen para el comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, en la Comunidad. Dicha Directiva crea y regula un mercado europeo, para el comercio de derechos de emisión.

8 Son las herramientas de distribución de las asignaciones gratuitamente atribuidas a los estados miembros. Se elaboran, de acuerdo con lo establecido en la directiva Europea sobre comercio de emisiones. Los Estados miembros de la UE deben presentar, para cada periodo de implementación de la directiva (de tres años de duración, el primero( 2005-2007), y de cinco años, el segundo, (2008-2012), un PNA, que debe ser aprobado por la Comisión Europea.

9 Mecanismo de Implementación Conjunta y Mecanismo de Desarrollo Limpio.

ma de permisos transferibles de agua), ya que el agua puede ser contaminada por un buen número de sustancias que tienen efectos muy variados, en los ecosistemas hídricos. “La presencia de dos o más contaminantes, al mismo tiempo, puede producir sinergias positivas y negativas. Más aún, la mayor parte de las fuentes emisoras entregan más de una sustancia peligrosa para el ambiente acuático” (Kraemer, Kampa e Interwies, 2003, pág. 16).

Kraemer, Kampa e Interwies (2003) también presentan una amplia revisión de experiencias internacionales, en la implementación de derechos transables de contaminación hídrica, diferenciados por tipos de contaminantes o parámetros individuales, como sal, sustancias orgánicas degradadoras del oxígeno y nutrientes. En esta revisión, la experiencia internacional más afín con la propuesta de este documento es la del Río Fox, en Wisconsin, Estados Unidos.

Las transacciones de derechos, para descargar contaminantes en el río Fox, fueron aprobadas en 1981. Las fuentes puntuales de contaminación hídrica pueden transar derechos, para descargar residuos que aumenten la demanda por oxígeno biológico (DBO). El programa de Wisconsin tiene, por objeto, darle flexibilidad a las fuentes puntuales. En este caso, las plantas de celulosa y las plantas municipales de tratamiento de aguas servidas, para cumplir las normas estatales de calidad de agua. Las fuentes que reducen las descargas que contienen DOB, por debajo de las cantidades permitidas, pueden vender el exceso de reducción a otras fuentes.

Sin embargo, en Nishizawa (2003), se afirma que, a la fecha, sólo se habían materializado dos transacciones, lo que pone en duda la capacidad del sistema, para reducir la contaminación de forma costo efectiva. Entre las razones citadas por Carlin (1992), para la limitada actividad del mercado, se destaca que las fuentes emisoras desarrollaron varias alternativas, para cumplir con sus límites de vertimientos, las que no estaban contempladas, cuando se diseñaron las regulaciones. Por ello, el Estado impuso restricciones severas, para la posibilidad de transar con las fuentes.

Por otra parte, Kraemer, Kampa e Interwies (2003) afirman que la discusión limitada sobre los efectos de los derechos transables de contaminación hídrica, en las regulaciones ambientales, se debe a la falta de experiencias, porque la mayoría de los casos se encuentran en su etapa experimental.

A pesar de esto, a partir del análisis de los pocos casos disponibles, se concluye que, para que el mercado de permisos de emisión transables funcione bien, deben existir suficientes participantes, en el mercado. “En el caso de la contaminación hídrica, esto significa que debería haber muchas fuentes contaminantes, que afectan el mismo parámetro, dentro de la misma área. Más aún, las diferentes fuentes de contaminación deben tener curvas de reducción de costos diferentes, de modo que transacciones beneficiosas sean posibles” Kraemer, Kampa e Interwies (2003, pág. 44).

También se necesita un sistema de monitoreo bien diseñado, para vigilar tanto las transacciones de contaminación hídrica, como el cumplimiento de los permisos de contaminación. Una AA ineficiente, con baja capacidad de fiscalización y monitoreo, limitaría el desarrollo y el buen funcionamiento del sistema.

Tao Zhou Barron y Yang (2000) evaluaron económicamente las ventajas de pasar del tradicional sistema de permisos no mercadeables, a un sistema de permisos mercadeables, Encontraron, en un programa piloto, que el ahorro en el costo de reducción de la contaminación, por el cambio en el sistema, era del 18.4%. Ellos concluyen (entre otras cosas) que, para que el sistema de permisos mercadeables sea eficiente, se necesita un sistema de información computarizado, con la información sobre todos los participantes y sobre la calidad del agua. También recomiendan seleccionar cuidadosamente el mecanismo de distribución inicial de los permisos, porque el ahorro, en los costos de reducción de la contaminación, con el sistema de PCT, es muy sensible a la asignación inicial.

## 5.2. PCT como solución, para el control de vertimientos de los usuarios de la red.

En teoría, asumiendo pleno cumplimiento, el sistema de PCT garantiza la consecución de una meta de reducción de la contaminación, que facilita el cumplimiento de un estándar ambiental. Mediante un sistema de PCT, también es posible garantizar el cumplimiento de la condición de costo efectividad para la reducción de la contaminación, en presencia de la PTAR. La propuesta consiste en lo siguiente:

- i. La AA fija una meta de contaminación socialmente deseable, y genera una cantidad de permisos de contaminación  $L$  (para cada sustancia, DBO y SST).
- ii. La AA subasta la cantidad  $L$  de permisos, entre la ESP operadora de la PTAR y los agentes contaminadores usuarios de la red. Estos últimos tienen claros incentivos para comprar los permisos, y como ya se comentó, la decisión de cuántos permisos compran la toman, al comparar el precio de los permisos, con su costo marginal de abatimiento de la contaminación. No obstante, resulta necesario fijar incentivos, para que la ESP tome sus decisiones, de forma tal que se garantice el cumplimiento de la expresión (14).

En la Figura N°4, el precio de los permisos  $\bar{p}$  logra la equimarginalidad, en los costos de reducción de la contaminación, entre los usuarios de la red y la PTAR. Las asignaciones eficientes de permisos son  $l_{USU}$  y  $l_{PT}$ . La reducción eficiente en la PTAR es  $\bar{R}_{PT}$ .

Una conjetura sobre la adquisición de permisos, por parte de la ESP, es que preferiría acceder a la menor cantidad posible de permisos y, así, reducir la mayor cantidad de contaminación, en la PTAR. Esto se debe a que estas empresas reciben una remuneración (regulada), según sus costos de operación, entre otros. Esta remuneración “ $r * C_p(R)$ ” es proporcional a la reducción de la contaminación efectuada en la PTAR, donde “ $r$ ” es la compensación marginal.

Obsérvese que si la ESP compra muy pocos permisos (para así tratar una mayor cantidad de contaminación  $\bar{R}_{PT} > \bar{R}_{PT}$ ) el precio del permiso sería  $\bar{p} < \bar{p}$ .

Para disuadir este comportamiento, es suficiente con que la reglamentación reconozca a la ESP únicamente los costos de abatimiento:

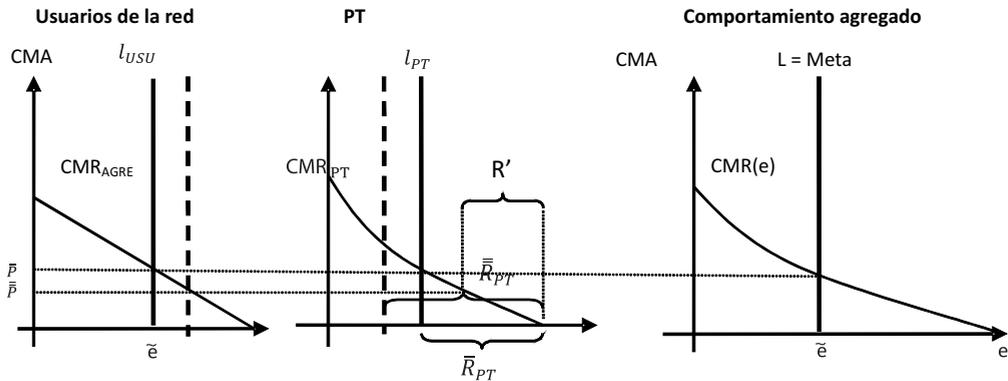
$$\text{Costo de abatimiento reconocido} = \int_0^{R'} \text{CMR}_{PT}(R) dR + (\bar{R}_{PT} - R') * \bar{p} \quad (16)$$

Donde  $R'$  es tal que:  $\text{CMR}_{PT}(R') = \tilde{p}$ . La empresa tendría una pérdida equivalente a:

$$\text{Pérdida} = \int_{R'}^{\bar{R}_{PT}} (\text{CMR}_{PT}(R) - \tilde{p}) dR \quad (17)$$

La ESP tratará de evitar la pérdida, adquiriendo una cantidad de permisos  $l \geq l_{PT}$ .

Figura N°4. Asignación de PET.



Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, si no se cumpliera la conjetura y la empresa decidiera comprar muchos permisos, el precio resultante de los permisos sería superior a  $\bar{p}$ . Como  $\text{CMR}_{PT}(\cdot) < \bar{p}$ , sería suficiente con que la reglamentación advirtiera a la ESP, que reconocería, como precio de los permisos, el valor mínimo, entre el precio del mercado y el costo marginal de reducción de la planta de tratamiento.

La aplicación conjunta del par de mecanismos induce que la demanda de permisos de la ESP sea  $l_{PT}$ , asegurando así la reducción óptima de la contaminación, en la PTAR.

Otro argumento, a favor de los PCT, para el control de la contaminación de usuarios industriales y comerciales, con vertimientos a la red de alcantarillado, es que es compatible con el sistema de metas concertadas, que instituyó el Decreto 3100 de 2003, aún vigente. Es evidente que la intención de este sistema es beneficiar a los

usuarios con mayores esfuerzos de reducción de la contaminación (los que cumplen con su meta), cobrándoles una tarifa de la tasa más baja<sup>10</sup>.

### 5.3. Sistema mixto de sanciones individuales y colectivas

La implementación conjunta de los sistemas de PCT y de monitoreo, con sanciones individuales y colectivas, es superior, en términos de costo efectividad al esquema de control de la contaminación actual<sup>11</sup> de los usuarios, con vertimientos a la red de alcantarillado; además, la sanción colectiva compromete más al conjunto de usuarios contaminadores, con la tarea de monitoreo de la AA, so pena de asumir una multa cuantiosa, como resultado de la contaminación fraudulenta.

El control de la contaminación, para esta clase de agentes contaminadores, es un escenario ideal para la sanción colectiva, porque la contaminación agregada de las empresas puede estimarse fácilmente, sin la influencia de factores ambientales, tras descontar la contaminación estimada de origen doméstico.

Considérese, nuevamente, un conjunto de “ $J$ ” empresas contaminadoras. Suponga también que, en lugar de monitorear los niveles de contaminación individuales, la AA exige a las firmas autodeclaraciones de su contaminación “ $e^z$ ” y monitorea la contaminación, al final del tubo de la red de alcantarillado (contaminación agregada  $E^{12}$ ).

Supóngase que:

Si  $E^z > E$  la AA cobra una sanción marginal colectiva “ $\phi_K$ ” sobre cada firma con vertimientos a la red de alcantarillado. Donde  $E^z = \sum_{j=1}^J e_j^z$ .

Ahora, sea “ $\bar{p}$ ” el precio de equilibrio del sistema de PCT igual a  $\lambda$ , en la ecuación (14). Adviértase que:

Si  $\phi_K < \bar{p} \rightarrow$  ninguna firma reducirá la contaminación hasta su nivel eficiente “ $\tilde{e}_j$ ” ya que preferirían pagar la sanción. La contaminación de la firma será tal que “ $CMR_j(\check{e}_j) = \phi_K$ ” con  $\check{e}_j < \tilde{e}_j$ . El monto total de la sanción colectiva para cada firma será:

10 Bajo el sistema del PCT, los usuarios con mayores esfuerzos de reducción se verán premiados, al poder obtener un ingreso extra, por la venta de permisos.

11 Puede advertirse que el sistema de metas de la regulación vigente, y el hecho de que el sujeto pasivo de la tasa sea el usuario final, simplifican mucho la tarea de la AA, en términos de sus esfuerzos de monitoreo y el cumplimiento de los objetivos ambientales, porque sus esfuerzos se concentran únicamente en el usuario final (ESP) y en el cumplimiento de su meta de contaminación. Es decir, el esquema actual hace que la contaminación fraudulenta de las empresas no sea objeto de preocupación, para las AA, porque finalmente la meta de contaminación se puede lograr a través de la reducción de la PTAR. No obstante, esto hace que el cumplimiento de la meta de contaminación se alcance, a costos muy altos.

12 A la contaminación agregada monitoreada, se le debe descontar la contaminación esperada, de origen doméstico:  $E = E_{\text{monit}} - E[e_D]$

$$\Phi_K^j = \phi_K * \left( E - \sum_{j=1}^J \check{e}_j \right) = \phi_K * \sum_{j=1}^J (\check{e}_j - \check{e}_j) \quad \forall j=1..J \quad (18)$$

Como resultado, tenemos una situación en la cual no se cumple la meta ambiental<sup>13</sup>, con altos costos para todas las firmas, ya que las empresas son sancionadas, por el exceso de contaminación y por el exceso de contaminación de las demás.

Si  $\phi_K > \bar{p} \rightarrow$  El resultado esperado corresponde a múltiples equilibrios de Nash, ya que se puede presentar el caso de que algunas firmas contaminen ilegalmente (declaran una menor contaminación que la efectiva:  $e_j^z < e_j$ ) y que otras compensen la contaminación ilegal, comprando más permisos de los que necesitan, para evitar así pagar una sanción marginal colectiva, superior al precio de los permisos. Paradójicamente, la compensación de la contaminación es la que incentiva la contaminación fraudulenta.

No se considera el caso para el cual  $\phi_K = \bar{p}$ , porque la AA no puede determinar, a priori, el valor exacto del precio de los permisos.

Para evitar tales ineficiencias o inequidades, en Kritikos (2004), se propone un sistema mixto de sanciones individuales y colectivas, para la regulación de la contaminación, en el contexto de un impuesto a la contaminación. La propuesta es modificada en este documento, para adaptarla al sistema de permisos de contaminación negociables. El sistema mixto tiene las siguientes características:

$$\Phi^j = \alpha \Phi_I^j + \beta \Phi_K^j \quad (19)$$

$\alpha = 1$  Si la firma es monitoreada y se descubre que  $e_j^z < e_j$ .  $\alpha = 0$ . En otro caso.

$\beta = 0$  Si  $E \leq \sum_{j=1}^J e_j^z$  o si la firma es monitoreada y se certifica que  $e_j \leq e_j^z$ .  $\beta = 1$ . En otro caso.

Donde:

Sanción Individual:  $\Phi_I^j = \phi_I * (\varepsilon_j - \varepsilon_j^z)$

Sanción Colectiva:  $\Phi_K^j = \phi_K * (E - \sum_{j=1}^J e_j^z)$

### Proposición:

Sea  $\psi$  la probabilidad de monitoreo individual (con  $0 < \psi < 1$ ), bajo el esquema mixto de sanciones individuales y colectivas, la desigualdad:

$$(1 - \psi) * \phi_K < \bar{p} < \phi_K + \psi * \phi_I \quad (20)$$

13 Según el esquema de reconocimiento de costos, propuesto anteriormente, la ESP no tendrá incentivos, para reducir el exceso de contaminación.

Es una condición necesaria para mediante un único equilibrio, inducir la reducción de la contaminación al nivel eficiente de cada firma con  $e_j = e_j^z = \tilde{e}_j \forall_j$ . Es decir, todas las firmas tienen la estrategia estrictamente dominante iterada de comprar una cantidad de permisos " $l^j = \tilde{e}_j$ ", con lo que se lograría la meta de contaminación al mínimo costo, al desincentivar la compensación y la contaminación fraudulenta. Adviértase que la desigualdad se satisface cumple para:

$$\phi_k = \phi_1 = \phi = \bar{p} \rightarrow (1 - \psi) * \phi < \bar{p} < \phi * (1 + \psi)$$

Como, *a priori*, el precio de los permisos es desconocido para la AA, la determinación de la sanción  $\phi$  se conseguiría, mediante un proceso iterativo.

Escenarios posibles:

a. Si el valor de la sanción marginal inicial  $\phi^{(0)}$  es tal, que se cumple la desigualdad (20), el sistema funcionará correctamente. Para que esto ocurra, sería recomendable una alta probabilidad de monitoreo, al principio de la aplicación del sistema.

b. Por otra parte, si resultase que  $\phi^{(0)}$  es tal que:

$$\phi^{(0)} * (1 + \psi) < \bar{p} \rightarrow \begin{cases} \sum_{j=1}^J e_j > \tilde{e} \\ p < \bar{p} \end{cases}$$

El resultado se debe a que resultaría más costoso, para las firmas, pagar por los permisos de contaminación, que asumir la sanción individual (en caso de ser monitoreado) y la sanción colectiva (por la misma razón, no hay incentivo, para la estrategia de compensación).

Demostración:

Las contaminaciones declarada y efectiva se obtienen de la minimización del valor esperado, respecto del costo total de la contaminación efectiva y fraudulenta (véase el Anexo 1):

$$\text{Min}_{e_j, e_j^z} E[CT_j] = C_j(e_j) + p * e_j^z + \psi * \phi^{(0)} * (e_j - e_j^z) + \phi^{(0)} * \left[ (e_j - e_j^z) + \sum_{k \neq j} (e_k - e_k^z) \right] \quad (21)$$

$$\frac{\partial CT_j}{\partial e_j} = \frac{\partial C_j(e_j)}{\partial e_j} + \psi * \phi^{(0)} + \phi^{(0)} = 0 \rightarrow CMR_j(e_j) = \phi^{(0)} (1 + \psi)$$

Asumiéndose que:

$$\phi^{(0)} (1 + \psi) < \bar{p} \rightarrow CMR_j(e_j) < CMR_j(\tilde{e}_j) \rightarrow e_j > \tilde{e}_j$$

Todas las firmas actúan de la misma forma:

$$CMR_1(e_1) = CMR_2(e_2) = \dots = CMR_j(e_j) = \phi^{(0)} (1 + \psi)$$

Se tendría que:  $\sum_{j=1}^J e_j > \sum_{j=1}^J \tilde{e}_j$ . Como  $\sum_{j=1}^J \tilde{e}_j = \tilde{e} \rightarrow \sum_{j=1}^J e_j > \tilde{e}$

El precio “p” resultante de equilibrio de los permisos será:

$$CMR_1(e_1) = CMR_2(e_2) = \dots = CMR_j(e_j) = p = \phi^{(0)}(1 + \psi)$$

Como:  $\phi^{(0)}(1 + \psi) < \bar{p} \rightarrow p < \bar{p}$ .

Los resultados precisarían que la AA incremente el valor de la sanción marginal “ $\phi^{(1)} > \phi^{(0)}$ ”, repitiéndose el proceso hasta que “ $p < \phi^{(t)} * (1 + \psi)$ ”. también sería recomendable un aumento en la probabilidad de monitoreo “ $\psi$ ”.

Si  $\phi^{(0)}$  es tal que:  $\phi^{(0)} * (1 - \psi) > \tilde{p}$  hay incentivos para la estrategia de compensación y, por tanto, para la contaminación fraudulenta.

$$\phi^{(0)} * (1 - \psi) > \tilde{p} \rightarrow \begin{cases} \sum_{j=1}^J e_j \cong \tilde{e} \\ p > \bar{p} \end{cases}$$

Demostración:

Si se sigue una estrategia de compensación, los costos totales por contaminar serían:

$$CT_j^c = C_j(e_j) + p * e_j^z$$

$$e_j^z = e_j + \sum_{k \neq j} (e_k - e_k^z)$$

La empresa que decida compensar sus emisiones, decide también su contaminación, minimizando los costos totales por contaminar:

$$\text{Min}_{e_j} CT_j^c = C_j(e_j) + p \left[ e_j + \sum_{k \neq j} (e_k - e_k^z) \right] \quad (22)$$

De donde se obtiene la C.P.O:

$$CMR_j(e_j) = p$$

Así, que las empresas honestas deciden cuánto contaminar (y comprar), igualando sus costos marginales de reducción, con el precio de los permisos:

$$CMR_1(e_1) = CMR_2(e_2) = \dots = CMR_L(e_L) = p$$

Siendo “L” las empresas que actúan con honestidad.

Por otra parte, nótese que  $\tilde{p}$  es tal que:

$$CMR_1(\tilde{e}_1) = CMR_2(\tilde{e}_2) = \dots = CMR_j(\tilde{e}_j) = \tilde{p}$$

$$\sum_{j=1}^J \tilde{e}_j = \tilde{e}$$

Adviértase que:  $\sum_{j=1}^J \tilde{e}_j = \sum_{j=1}^J [e_j^0 - \tilde{R}_j]$ . La reducción agregada de la contaminación es:  $R = \sum_{j=1}^J \tilde{R}_j$ .

Con la contaminación fraudulenta, es muy probable que la contaminación declarada sea superior a “R”, o que la reducción de la contaminación de las firmas transgresoras sea menor que la eficiente. Es decir:  $R_j < \tilde{R}_j \quad j = L + 1, \dots, J$ . Por estas circunstancias, para evitar la sanción colectiva, la reducción de la contaminación de las firmas, con estrategia de compensación, debe ser superior a la eficiente:

$$R_j > \tilde{R}_j \rightarrow e_j < \tilde{e}_j \quad j: 1, \dots, L.$$

Una menor contaminación implica unos costos marginales de reducción más altos:

$$CMR_j(e_j) > CMR_j(\tilde{e}_j) \rightarrow p > \bar{p}$$

Sin embargo, “ $p \leq \phi^{(0)} * (1 - \psi)$ ” porque, de lo contrario, las firmas preferirán asumir la sanción.

Se deduce que un precio de los permisos, por debajo del límite inferior de la desigualdad (20), es señal de una posible reducción ineficiente de la contaminación, debido a la contaminación fraudulenta y la estrategia de compensación. En este caso, es recomendable la reducción del parámetro  $\phi^{(1)} < \phi^{(0)}$ , repitiendo el proceso, hasta que “ $p > \phi^{(t)} * (1 - \psi)$ ”. También sería recomendable un aumento en la probabilidad del monitoreo “ $\psi$ ”.

Queda demostrada la suficiencia potencial del sistema mixto de sanciones individuales y colectivas, para inducir el comportamiento deseable, en los contaminadores usuarios de la red. Este sistema, junto con el mercado de permisos negociables, ofrece incentivos suficientes, para garantizar el cumplimiento de una meta de calidad ambiental, mediante la reducción de la contaminación, al mínimo costo.

## 6. Conclusiones

En este artículo, se establece que la reglamentación actual de las tasas retributivas no es un arreglo institucional eficiente, para el control de la contaminación de usuarios industriales y comerciales, con vertimientos a la red de alcantarillado.

La reglamentación vigente está diseñada para que, sólo mediante la operación de la planta de tratamiento de aguas residuales, se reduzca la contaminación, hasta una meta concertada, entre la empresa de servicios públicos operadora de la planta y la AA. El cumplimiento de la meta asegura que el cobro del monto de la tasa retributiva a las empresas se realice sobre la base de la tarifa mínima de la tasa, así que el incentivo para la reducción de la contaminación no es muy significativo.

El sobrecosto de la reducción de la contaminación se traslada a todos los usuarios de la red, incluyendo los hogares, a través de las tarifas del servicio de alcan-

tarillado, que incluyen el costo de operación de la planta de tratamiento de aguas residuales.

Otra revelación importante es que la reglamentación de las tarifas de alcantarillado no tiene en cuenta descuentos a favor de los usuarios, por la remoción de sustancias contaminantes, como resultado de la operación de las plantas de tratamiento de aguas residuales, a pesar de que la misma reglamentación traslada al usuario sus costos de operación. Es decir, los usuarios de la red pagan dos veces la contaminación removida.

Un sistema de permisos negociables, para las firmas con vertimientos a la red de alcantarillado, junto con un sistema mixto de sanciones individuales y colectivas, tienen la capacidad de inducir el comportamiento socialmente eficiente, en los agentes contaminadores. Sin embargo, esto requiere fijar incentivos, para que la empresa de servicios públicos tome sus decisiones de compra de permisos, de forma tal, que el precio de los permisos sea equivalente al costo marginal de reducción de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas.

El buen funcionamiento del sistema propuesto puede requerir una etapa de ajuste, en la que es necesario modificar, de forma iterada, el parámetro de sanción marginal, hasta obtener el comportamiento socialmente eficiente, por parte de los agentes contaminadores.

También es necesario tener en cuenta que, para que el mercado de permisos de emisión transables funcione bien, deben existir suficientes participantes, en el mercado. Esto estaría asegurado en las ciudades grandes, en donde existe una cantidad considerable de firmas, con vertimientos a la red de alcantarillado, además, prácticamente todas las empresas generan contaminación por DBO y SST.

## Referencias bibliográficas

- BAUMOL, W., Oates, W. (1971). The Use of Standards and Prices for Protection of the Environment. *Swedish Journal of Economics*, 73, 42-54.
- CARLIN, A. (1992). The US Experience with Economic Incentives to Control Environmental Pollution. EPA-230-R-92-001, Washington, D.C. EPA.
- CÓDIGO DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES Y PROTECCIÓN AL MEDIO AMBIENTE. Decreto-Ley 2811 de 1974. Editorial Legis. Bogotá, 2002.
- COLOMBIA. Decreto 1594 de 1984. Usos del Agua y Residuos Líquidos. Bogotá, 1984.
- COLOMBIA. Ministerio del Medio Ambiente. Decreto 901 de 1993. Bogotá, 1993.
- COLOMBIA. Ministerio del Medio Ambiente. Ley 99 de 1993. Tasas Retributivas por la utilización directa del agua, como receptor de vertimientos puntuales. Bogotá, abril de 1997.
- COLOMBIA. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Decreto 3100 de 2003. Tasas Retributivas por la utilización directa del agua, como receptora de vertimientos puntuales. Bogotá, octubre de 2003.

- DEL RÍO, P., LABANDEIRA, X., (2009) El Sistema Europeo de Comercio de Emisiones: Diseño, Funcionamiento y Perspectivas. In Becker, F., Cazorla, L. and Martínez-Simancas, J. (eds) Tratado de Regulación del Sector Eléctrico. Aranzadi, Madrid.
- DALES, J., (1968). *Pollution, Property and Prices*. University of Toronto Press, Toronto.
- ELLERMAN, D., (2004). *Tradeable Permits: Policy Evaluation, Design and Reform*. Capítulo 3: The U.S. SO<sub>2</sub> Cap-and-Trade Programme, OCDE.
- GANDINI, PÉREZ Y MADERA (2005). Política de control de contaminación hídrica en Colombia: Elementos de discusión asociados a objetivos de tratamiento. En: I Conferencia Latinoamericana en Lagunas de Estabilización y Reuso. Universidad del Valle, Cinara, Cali.
- GUERRERO, S., (2003). Evaluación de la racionalidad del Plan de Descontaminación del Río Bogotá, a partir del análisis de costo mínimo y tasa retributiva. Universidad Externado. En: [http://portal.uexternado.edu.co/irj/go/km/docs/documents/UExternado/pdf/1\\_facultadEconomia/Publicaciones/DocumentosDeTrabajo/EvaluacionRacionalidadPlanDescontaminacion.pdf](http://portal.uexternado.edu.co/irj/go/km/docs/documents/UExternado/pdf/1_facultadEconomia/Publicaciones/DocumentosDeTrabajo/EvaluacionRacionalidadPlanDescontaminacion.pdf)
- HYVÄRINEN, E., (2005). Los Inconvenientes del comercio de emisiones de la Unión Europea: Consideraciones de la industria de la pasta y el papel. *Unasywa*, 56 (3).
- KRITIKOS, A., (2004). A Penalty System as Enforcement Device of Policy Measures Under Incomplete Information. *International Review of Law and Economics*, Vol. 24, 3, Pag. 385-403.
- KRAEMER, R. BANHOLZER, K., (1999). Tradable Permits in Water Resource Management and Water Pollution Control, OECD Proceedings, Implementing Domestic tradable Permits for Environmental Protection, Paris: OECD
- KRAEMER, R., KAMPA, E., INTERWIES, E., (2003). El papel de los permisos de emisión transables en el control de la contaminación hídrica. Presentado en el Seminario Técnico sobre la Factibilidad de la Aplicación de Permisos de Emisión Transables en la Gestión del agua en Chile (13-14 de noviembre, 2003). En [idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=958774](http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=958774)
- MÉNDEZ, J., (2008). Adaptación de Algoritmos Genéticos para la Simulación del Comportamiento Estratégico de los Agentes Contaminadores Ante el Cobro de Tasas Retributivas. *Revista Cuadernos de Administración*, (21), 35,161-187.
- NAVARRETE, J., (2003). Política Fiscal y Medio Ambiente Instrumentos y Experiencias en el Nivel Subcentral de Hacienda Español. En [www.unisantos.br/mestrado/gestao/egesta/artigos/32.pdf](http://www.unisantos.br/mestrado/gestao/egesta/artigos/32.pdf)
- NISHIZAWA, E., (2003). Effluent Trading for Water Quality Management: Concept and Application to the Chesapeake Bay Watershed. *Marine Pollution Bulletin* 47, 169-174
- RUDAS, G. (2005). *Instrumentos económicos y regulación de la contaminación industrial: Primera aproximación al caso del río Bogotá (Colombia)*. Segundo congreso latinoamericano de economistas ambientales y de recursos naturales (ALEAR), Oaxaca, México.
- TAO, W., ZHOU, B., BARRON, W., YANG, W., (2000). Tradable Discharge Permit System for Water Pollution Case of the Upper Nanpan River of China. *Environmental and Resource Economics*, 15, 27-38.

VELÁSQUEZ, C., (2002). Financiación de la Gestión Ambiental en Colombia: El Caso de las Tasas. *Revista de Derecho Universidad del Norte*, 18, 151-171.

## Anexo 1

Demostración de que la proposición:

$$(1 - \psi) * \phi_k < \bar{p} < \phi_k + \psi * \phi_1$$

Es una condición necesaria para, mediante un único equilibrio, inducir la reducción de la contaminación, al nivel eficiente de cada firma, con  $e_j = e_j^z = \tilde{e}_j \quad \forall_j$ .

Considere, en esta demostración, que  $CT(\cdot)$  son los costos totales en los que incurre la firma, por contaminar, los cuales incluyen los costos de reducción de la contaminación, el gasto en permisos de contaminación y las sanciones por incumplimiento.

### Pasos para la prueba de la proposición:

1. Demostrar que la compensación es una estrategia estrictamente dominada, para todas las firmas. Es decir:  $CT_j^c > E[CT_j^*]$ . Donde  $CT_j^*$  son los costos totales por contaminar, bajo el comportamiento socialmente eficiente.

2. Dado que ninguna firma espera que se compensen sus emisiones, hay que probar que la contaminación ilegal no es la mejor estrategia de respuesta. Es decir:

$$E[CT_j^*] < E[CT_j] \text{ con } e_j > e_j^z.$$

#### 1. Prueba de $CT_j^c > E[CT_j^*]$

Comportamiento de compensación:  $CT_j^c = C_j(\tilde{e}_j) + \bar{p} * e_j^z$

Donde:  $e_j^z = \tilde{e}_j + \sum_{k \neq j} (e_k - e_k^z)$  Recordando que “ $\tilde{e}_j$ ” es tal que:  $CMR_j(\tilde{e}_j) = \bar{p}$

Con contaminación fraudulenta se tiene que:  $\sum_{k \neq j} (e_k - e_k^z) > 0$

$$\rightarrow CT_j^c = C_j(\tilde{e}_j) + \bar{p} * \tilde{e}_j + \bar{p} * \sum_{k \neq j} (e_k - e_k^z)$$

Comportamiento socialmente eficiente:

$$\text{Costo Total Esperado} \quad \begin{cases} \psi : & C_j(\tilde{e}_j) + \bar{p} * \tilde{e}_j \\ (1 - \psi) : & C_j(\tilde{e}_j) + \bar{p} * \tilde{e}_j + \phi_k [E - E^2] \end{cases}$$

$$E[CT_j^*] = C_j(\tilde{e}_j) + \bar{p} * \tilde{e}_j + (1 - \psi) * \phi_k [E - E^2]$$

$$E[CT_j^*] = C_j(\tilde{e}_j) + \bar{p} * \tilde{e}_j + (1 - \psi) * \phi_k * \sum_{k \neq j} (e_k - e_k^z)$$

Cuando:  $\phi_k = \phi_1 = \bar{p} \rightarrow E[CT_j^*] = C_j(\tilde{e}_j) + \bar{p} * \tilde{e}_j + (1 - \psi) * \phi * \sum_{k \neq j} (e_k - e_k^z)$

Finalmente:  $CT_j^c - E[CT_j^*] = \psi * \bar{p} * \sum_{k \neq j} (e_k - e_k^z) \rightarrow CT_j^c > E[CT_j^*]$

1. Prueba de  $E[CT_j(e_j)] > E[CT_j^*]$  con  $e_j > e_j^z$ .

Costo esperado de por la contaminación ilegal ( $e_j > e_j^z$ ):

$$\text{Costo Total Esperado} \quad \begin{cases} \psi & : & C_j(e_j) + \bar{p} * e_j^z + \phi_l * (e_j - e_j^z) + \phi_k [E - E^z] \\ (1 - \psi) & : & C_j(e_j) + \bar{p} * e_j^z + \phi_k [E - E^z] \end{cases}$$

$$E[CT_j] = C_j(e_j) + \bar{p} * e_j^z + \psi * \phi_l * (e_j - e_j^z) + \phi_k [E - E^z]$$

$$E[CT_j] = C_j(e_j) + \bar{p} * e_j^z + \psi * \bar{p} * (e_j - e_j^z) + \bar{p} * [E - E^z]$$

$$E[CT_j] = C_j(e_j) + \bar{p} * e_j^z + \psi * \bar{p} * (e_j - e_j^z) + \bar{p} * (e_j - e_j^z) + \bar{p} * \sum_{k \neq j} (e_k - e_k^z)$$

$$E[CT_j^*] = C_j(\tilde{e}_j) + \bar{p} * \tilde{e}_j + (1 - \psi) * \bar{p} * \sum_{k \neq j} (e_k - e_k^z)$$

$$E[CT_j^*] = C_j(\tilde{e}_j) + \bar{p} * \tilde{e}_j - \psi * \bar{p} * \sum_{k \neq j} (e_k - e_k^z) + \bar{p} * \sum_{k \neq j} (e_k - e_k^z)$$

Nótese que aún siendo  $e_j^z = 0 \wedge e_j$  tal que  $CMR_j(e_j) = 0$ , se tendría que:

$$C_j(\tilde{e}_j) + \bar{p} * \tilde{e}_j < C_j(e_j) + \bar{p} * e_j$$

Ya que  $\tilde{e}_j$  es el óptimo del problema:

$$\text{Min.}_{e_j} C_j(e_j) + \bar{p} * e_j$$

Así que:

$$C_j(\tilde{e}_j) + \bar{p} * \tilde{e}_j - \psi * \bar{p} * \sum_{k \neq j} (e_k - e_k^z) < C_j(e_j) + \bar{p} * e_j^z + \psi * \bar{p} * (e_j - e_j^z) + \bar{p} * (e_j - e_j^z)$$

$$\rightarrow E[CT_j^*] < E[CT_j]$$

El término " $\bar{p} * \sum_{k \neq j} (e_k - e_k^z)$ " no se tiene en cuenta porque aparece en  $[CT_j^*]$  y  $E[CT_j]$ .