Cuadernos de Economía, Año 31, N° 92, pp. 45-57 (abril 1994)

REGULACION OPTIMA DE PROBLEMAS DE CONTAMINACION DIFUSA

GUILLERMO DONOSO H.*

ABSTRACT

Nonpoint sources of pollution have been receiving increasing attention in policy discussions. As progress is made in reducing emissions from point sources of pollution, nonpoint sources account for growing shares of total pollution, so that further reductions in pollution have become more dependent on tackling nonpoint source emissions. In response to this growing importance of nonpoint source pollution sources, several recent articles have examined the characteristics of first best pollution control strategies focusing on the uncertainty of the relationship between the characteristics of production and the ambient pollution levels (see e.g. Segerson (1988) and Cabe and Herriges (1992)).

One important consideration not taken into account in this literature is that mitigation activities (e.g. treating polluted water) is often not only viable but also attractive. Since Coase (1960), economists have understood that pollution problems exhibit a certain symmetry in that damage from pollution depends jointly on the efforts of both polluters and pollution victims. In general, it will be optimal for both parties to bear some of the costs of pollution so that both will have incentives to reduce damages.

This paper analyzes the implications of incorporating the possibility of mitigation on the part of the victims into the design of a first best linear tax scheme, and discusses in which cases monitoring the ambient pollution level and knowledge of producer's beliefs are sufficient to obtain the desired results of a first best Piguovian linear tax scheme.

I. INTRODUCCIÓN

El diseño de políticas óptimas de regulación de los procesos de contaminación difusa ha adquirido mayor importancia en los últimos años debido, en parte, a que los avances logrados en la reducción de las emisiones provenientes de fuentes fijas han provocado un aumento en la importancia relativa de la contribución de los procesos de contaminación difusa

* Departamento de Economía Agraria, Pontificia Universidad Católica de Chile.

a la contaminación ambiental. Por ejemplo, la contaminación aérea provocada por automóviles, lavasecos y otras fuentes móviles en Santiago es sustancial (Hajek, Gross y Espinoza (1990) y Espinoza, Gross y Hajek (1991)). Además, la contaminación de aguas superficiales y subterráneas proviene de una variada gama de fuentes, en las cuales se incluyen la agricultura, silvicultura, producción pecuaria, aguas servidas de zonas urbanas y pozos sépticos en mal estado. Por ende, las futuras reducciones significativas en los niveles de contaminación ambiental dependerán, en forma creciente, de las reducciones de emisiones de fuentes difusas.

Una característica principal de los procesos de contaminación difusa, que la difiere de los procesos de contaminación de punto fijo, es que las emisiones de cada contaminador individual no pueden ser cuantificadas. En algunos casos de contaminación difusa, las emisiones actuales podrían, en principio, ser identificadas y cuantificadas; sin embargo, cuando existe un número excesivo de fuentes, no se determinan las emisiones de cada una, ya que el costo de monitorear cada contaminador sería prohibitivo. Los lavasecos son un ejemplo de este tipo de contaminación difusa, en la cual el medir las emisiones de compuestos carbonados volátiles para cada fuente sería excesivamente costoso; las emisiones de gases de vehículos motorizados también caen en esta categoría. En otros casos, las emisiones de los contaminadores no pueden ser cuantificadas con exactitud o en forma cierta debido a problemas de medición. Por ejemplo, es muy difícil medir la proporción exacta de la cantidad de nitratos que contaminan aguas superficiales y subterráneas que provienen de cada productor agrícola, ya que los puntos de salida de este contaminante son numerosos; estos puntos de salida incluyen la absorción por parte de la planta, la lixiviación de nitratos a napas freáticas y el escurrimiento superficial a aguas superficiales.

A pesar de estos problemas de cuantificación de las emisiones individuales, la participación relativa de la contaminación difusa puede determinarse al monitorear el nivel de contaminación ambiental, descontando de ésta las emisiones provenientes de puntos fijos. Además, aunque no sea posible cuantificar las emisiones en forma exacta, es, en general, posible conocer en forma cualitativa cuáles fuentes contribuyen en mayor grado a la contaminación ambiental. Es decir, en los procesos de contaminación difusa es posible realizar un *ranking* ordinal, pero no cardinal, de las distintas fuentes en términos del monto de emisión de cada una. Por ejemplo, la producción de cultivos y pecuaria tiene una mayor participación en la contaminación de aguas superficiales con nitratos cuando esta producción se realiza en zonas de lomajes, ya que el escurrimiento de nitratos es mayor en tierras de mayor pendiente. De igual forma, automóviles de distintas marcas, edades y tamaños de motor emiten mezclas distintas de contaminantes y cantidades distintas de éstos.

Debido a que en los procesos de contaminación difusa no se conocen las emisiones exactas de cada fuente, los reguladores han aplicado, en general, políticas regulatorias uniformes a todos los contaminadores (i.e. *blanket pollution control measures*); ejemplos de estas políticas regulatorias son los convertidores catalíticos para los automóviles y la imposición de prácticas productivas. En relación a este último ejemplo, para controlar la contaminación difusa proveniente de la actividad silvoagropecuaria, el Clean Water Act de 1987 establece que cada estado de EE.UU. debe desarrollar e implementar prácticas productivas que reduzcan el impacto ambiental (BMP's) (Freeman III (1990)). Claramente, estas prácticas productivas debieran implementarse sólo si los beneficios sociales son mayores que los costos de implementación; sin embargo, Leathers (1991) presenta evidencia de que en algunos casos se han impuesto prácticas productivas cuando los costos de su implementación exceden los beneficios sociales generados. Por otro lado, la imposición de políticas regulatorias uniformes ha sido criticada por no ser, en general, políticas regulatorias

de mínimo costo en las cuales los agentes que tienen menores costos para reducir emisiones realicen un mayor esfuerzo, y viceversa.

Por estas razones, dichos procesos de contaminación difusa han recibido mayor atención en las discusiones sobre regulación de contaminación ambiental. En respuesta a este incremento en la importancia relativa de la contaminación de fuentes difusas, varios estudios han examinado las características de las posibles estrategias de control, analizando la relación incierta que existe entre las características de producción y los niveles de contaminación ambiental. Segerson (1988), incorporando heterogeneidad de los contaminadores para reducir los costos de la regulación, propuso un esquema de incentivos en el cual las firmas contaminadoras pagan un impuesto Piguoviano, el cual es función del nivel de contaminación ambiental; este mecanismo elimina la necesidad de monitorear las emisiones de cada contaminador y, además, el diseño de este impuesto Piguoviano evita el problema del polizonte (*free rider*), ya que la responsabilidad de los contaminadores depende de los niveles de contaminación ambiental (ver e.g. Holmstrom (1982)). El impuesto Piguoviano es equivalente a la "colocación de una burbuja encima del grupo contaminador, dentro de la cual se fija un estándar para el grupo completo en vez de fijar un estándar para cada contaminador" (Segerson (1988): p.94). Cabe y Herriges (1992) extienden los resultados de Segerson (1988) al emplear un modelo Bayesiano para incorporar posibles diferencias entre las percepciones subjetivas de los productores y de los reguladores sobre la relación entre las actividades productivas y el nivel de polución ambiental. Los autores investigan el papel de la información en el diseño del impuesto lineal Piguoviano propuesto por Segerson (1988) y demuestran que es importante obtener información sobre las percepciones subjetivas que los productores tienen sobre el mecanismo de transporte del contaminante y sobre la relación que existe entre sus actividades productivas y el nivel de contaminación ambiental, para determinar si un impuesto lineal Piguoviano es un mecanismo regulatorio eficiente y, también, para determinar sus posibles efectos sobre las actividades productivas y niveles de contaminación ambiental. En particular, Cabe y Herriges (1992) determinan que la educación de los contaminadores es un componente importante de las políticas regulatorias eficientes de los procesos de contaminación difusa.

Una consideración significativa que no ha sido incorporada en esta literatura es que las actividades preventivas de las víctimas para disminuir su exposición a la contaminación ambiental y para reducir el daño provocado por ésta (e.g. instalación de sistemas de filtración para limpiar aguas contaminadas) no sólo son viables, sino que también son atractivas desde el punto de vista de la eficiencia de la regulación. Desde Coase (1960), los economistas han entendido que los problemas de contaminación ambiental tienen cierta simetría, ya que los daños causados por ésta son función tanto de los esfuerzos de los contaminadores para reducir las emisiones como de las víctimas para reducir su exposición a la contaminación. Los contaminadores pueden controlar la cantidad de contaminantes que se emiten al medio ambiente al instalar sistemas que reducen las emisiones para un nivel dado de producción, o alterando sus procesos productivos para reducir la creación de polución. Las víctimas, por otro lado, pueden adoptar medidas preventivas para así reducir (mitigar) los daños causados por la contaminación ambiental. En general, será óptimo desde el punto de vista social que ambas partes asuman los costos derivados de la polución, de manera que ambos tengan incentivos para reducir los daños (Olson y Zeckhauser (1970)). Sin embargo, existen algunos casos en los cuales la introducción de la posibilidad de que las víctimas adopten medidas preventivas implique que sea óptimo que sólo uno asuma el costo total de la polución (Shibata y Winrich (1983), Oates (1983)).

El presente trabajo analiza las implicancias de incorporar la posibilidad de que las víctimas adopten medidas preventivas en el diseño de un mecanismo regulatorio para los

problemas de contaminación difusa; se determina si el mecanismo de impuesto Pigouviano proporciona los incentivos óptimos para regular los procesos de contaminación difusa cuando las víctimas tienen la posibilidad de mitigar. Además, se discuten los casos en que la información sobre el nivel de contaminación ambiental y sobre el nivel de mitigación adoptada por todas las víctimas es suficiente para obtener los resultados deseados de un mecanismo *first best* de información completa, como el de impuestos lineales Pigouvianos y cuándo sería óptimo diseñar un sistema regulatorio *second best* de menores costos de monitoreo, en el cual se trata el problema como una situación de agencia. La siguiente sección desarrolla un modelo del cual se deriva el nivel de contaminación que es socialmente óptimo. En la tercera sección se diseña un impuesto lineal Piguoviano, el cual asegura que el nivel final de contaminación ambiental sea el socialmente deseado. En la cuarta sección se presenta un análisis de los requerimientos informativos para asegurar el funcionamiento eficiente del mecanismo regulatorio. Finalmente, la quinta sección presenta las conclusiones del trabajo.

II. Determinación del Nivel Optimo de Contaminación Ambiental

Se supone que en el modelo planteado a continuación existe un solo producto que se produce en N zonas contaminadoras determinadas por el mecanismo de transporte del contaminante y, además, M grupos distintos de víctimas definidos por el daño que el nivel de contaminación ambiental genera cada uno de ellos. Cuando el daño de la contaminación es función de si el individuo es un recién nacido, joven o adulto, por ejemplo, la división de los grupos de víctimas puede basarse en la edad de los individuos. Alternativamente, los grupos podrían estar basados en características físicas tales como la distancia de la zona de emisión o de las corrientes de aire prevalecientes.

Adicionalmente, se supone que las emisiones son un subproducto del proceso productivo en cada zona. Los contaminadores de cada zona i pueden adoptar un nivel de esfuerzo, α_i, de reducción de sus emisiones, a un costo que es función de α_i y del nivel de producción y_i. Se supone que este costo, representado por la función $C_i(\alpha_i, y_i)$, es no decreciente y convexo en (α_i, y_i); es decir, el costo marginal de producción y de reducción de las emisiones es no negativo y creciente (i.e. $\partial C_i/\partial \alpha_i \geq 0$, $\partial C_i/\partial y_i \geq 0$, $\partial^2 C_i/\partial \alpha_i^2 \geq 0$, $\partial^2 C_i/\partial y_i^2 \geq 0$).

El nivel de contaminación ambiental en cada zona, X_i, es afectado por las emisiones de los contaminadores de todas las zonas y está determinado por el mecanismo de transporte estocástico; formalmente, el nivel estocástico de contaminación en cada zona está dado por

$$(1) \qquad X = T(\alpha, y, \varepsilon)$$

donde $X = [X_1, X_2, ..., X_n]'$, $T(\alpha, y, \varepsilon) = [\, T_1(\alpha, y, \varepsilon), T_2(\alpha, y, \varepsilon), ..., T_n(\alpha, y, \varepsilon)]'$, y ε es un vector de efectos aleatorios. El nivel de contaminación ambiental en la i'ésima zona, $X_i = T_i(\alpha, y, \varepsilon)$, es no decreciente en y_j (ie., $\partial X_i/\partial y_j \geq 0$), cuanto mayor sea la producción en la j'ésima zona mayores serán las emisiones y, por lo tanto, mayor será el nivel de contaminación ambiental de la i'ésima zona; no creciente en α_j (i.e. $\partial X_i/\partial \alpha_j \leq 0$), el nivel de contaminación ambiental de la i'ésima zona disminuye cuando los productores de la j'ésima zona aumentan sus esfuerzos para reducir emisiones; y convexa en (α_j, y_j) $\forall$ j $\in$ [1, N] (i.e. $\partial^2 X_i/\partial \theta_j^2 \geq 0$, $\forall \theta = (\alpha, y)$. La contribución marginal del nivel de producción de la j'ésima zona al nivel de contaminación ambiental de la i'ésima zona es creciente, mientras que la

efectividad marginal del esfuerzo para reducir las emisiones es decreciente. La percepción subjetiva sobre la distribución probabilística de ε se representa por la función de densidad $f(\varepsilon)\ \forall\ \varepsilon \in \Xi$, donde Ξ es el soporte de ε[1].

El daño que produce el nivel de contaminación ambiental de cada zona, X_i, a cada grupo de víctimas, depende de las medidas preventivas que éste haya adoptado, β_j. Estas medidas preventivas tienen un costo de $K_j(\beta_j)$, el cual se asume es no decreciente y convexo en β_j (i.e. $\partial K_j/\partial\beta_j \geq 0$, $\partial^2 K_j/\partial\beta_j^2 \geq 0$). La función de daños generada por el nivel aleatorio de contaminación ambiental, representada por $D_j(X, \beta_j)$, se asume no decreciente en el nivel de contaminación ambiental X (ie. $\partial D_j/\partial X_i \geq 0\ \forall$ i); es decir, mientras mayor sea el nivel de contaminación ambiental mayores son los daños. Además, se supone que $D_j(X, \beta_j)$ es no creciente y convexa en el esfuerzo preventivo de las víctimas, β_j (i.e. $\partial D_j/\partial\beta_j \leq 0$, $\partial^2 D_j/\partial\beta_j^2 \geq 0$); al aumentar sus esfuerzos preventivos, las víctimas reducen su exposición al nivel de contaminación ambiental y, por ende, los daños provocados por un nivel de contaminación X disminuyen al incrementarse β_j. Esta disminución marginal en daños, sin embargo, es decreciente. Finalmente, se supone que las medidas preventivas adoptadas por la víctima j no tienen efectos sobre el daño sufrido por la víctima i (i.e. $\partial D_j/\partial\beta_j = 0,\ \forall\ i \neq j$).

El problema del regulador es el de determinar el nivel de producción, las reducciones de las emisiones necesarias, y los esfuerzos preventivos adoptados por las víctimas que maximicen la suma esperada del excedente del productor y del consumidor, considerando además los daños causados por el nivel de contaminación ambiental[2]; es decir, el problema de decisión se puede escribir como

$$(2)\qquad W^{**} \equiv \underset{\alpha,y,\beta}{\text{Max}}\ E\left\{ \int_0^y p(s)ds - \sum_{i=1}^{N} C_i(\alpha_i, y_i) - \sum_{j=1}^{M} \left\{ K_j(\beta_j) + D_j(X, \beta_j) \right\} \right\}$$

donde $E\{\bullet\}$ representa el valor esperado sobre la distribución probabilística de ε; $Y = \sum_{i=1}^{N} y_i$ representa el nivel de producción agregada; y $p(Y)$ es la función de demanda inversa del producto. Este problema de decisión puede ser simplificado al abordarlo en dos etapas. En la primera etapa, se determinan los esfuerzos preventivos óptimos de las víctimas para un nivel dado de contaminación ambiental. En la segunda etapa, se incorpora esta función óptima de medidas preventivas (i.e. función de valor máximo) en la determinación de las reducciones de emisiones y del nivel óptimo de producción que maximizan el bienestar social. Al adoptar esta metodología, el problema de decisión planteado en (2) puede reformularse como

$$(3)\qquad W^{**} \equiv \underset{\alpha,y,\beta}{\text{Max}} \int_0^y p(s)ds - \sum_{i=1}^{N} C_i(\alpha_i, y_i) - \delta(X),$$

1 En realidad, tanto los contaminadores como el regulador tienen información imperfecta y asimétrica sobre la variable estocástica ε. Esta diferencia en la percepción subjetiva de ε no provoca mayores cambios en los resultados; por lo tanto, para simplificar el modelo, se elimina esta distinción del análisis.

2 El problema del regulador establecido en (2) asume implícitamente que el regulador es indiferente al riesgo; es decir, que la varianza y los momentos de mayor orden de la distribución de daños no influyen en la determinación del nivel de contaminación deseado. El efecto de considerar aversión al riesgo sobre el nivel de contaminación esperado deseado no es claro; el efecto depende del efecto de y_i, α_i, y de β_j sobre el valor esperado del nivel de contaminación y sobre el segundo y tercer momento central de X (ver Donoso y Lichtenberg (1993)). Por ejemplo, si α_i no reduce la varianza de X mientras que β_j genera una reducción significativa en el segundo momento central de X, entonces el nivel deseado esperado de contaminación ambiental bajo el supuesto de aversión al riesgo será mayor que si el regulador fuera indiferente al riesgo.

donde $\delta(X)$ es la función óptima de medidas preventivas adoptadas por todas las víctimas, la cual se determina en la primera etapa del proceso de decisión como sigue[3]:

$$(4) \qquad \delta(X) \equiv \underset{\beta}{\text{Min}} \left\{ \sum_{j=1}^{M} E\{ K(\beta_j) + D_j(X, \beta_j) \} \right\}$$

Las condiciones necesarias de primer orden para esta primera etapa son

$$(4a) \qquad 0 = \frac{\partial K_j}{\partial \beta_j} + E\left\{ \frac{\partial D_j}{\partial \beta_j} \right\} \qquad j = 1, ..., M$$

Esto establece que cada víctima adopta medidas preventivas de tal forma de igualar el costo marginal de la medida con la reducción marginal esperada en los daños. En principio, se puede resolver el sistema de ecuaciones (4a) por los niveles óptimos de mitigación; cuando la efectividad marginal de las medidas preventivas aumenta ante un incremento en el nivel de contaminación ambiental (e.i. $\partial^2 D(\bullet)/\partial\beta_j \partial X_k \leq 0 \ \forall$ i,k), β_j^* es no decreciente en el nivel de producción ($\partial\beta_j/\partial y_i \geq 0$), no creciente en los niveles de reducción de las emisiones ($\partial\beta_j/\partial\alpha_i \leq 0$)[4].

Por lo tanto, el problema de decisión del regulador expresado en (3) se reduce a la determinación del nivel óptimo de reducción de las emisiones y de producción, de tal forma de maximizar el bienestar social. Las condiciones necesarias de primer orden, asumiendo que existe una solución interior, son:

$$(5a) \qquad 0 = p(Y) - \frac{\partial C_i}{\partial y_i} - \frac{\partial \delta}{\partial y_i}, \ \forall \ i,...., N$$

y

$$(5b) \qquad 0 = \frac{\partial C_i}{\partial \alpha_i} + \frac{\partial \delta}{\partial \alpha_i}, \ \forall \ i = 1,..., N$$

donde

$$(5c) \qquad \frac{\partial \delta}{\partial y_i} = \sum_{k=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} E\left\{ \frac{\partial D_j(X^*, \beta_j^*)}{\partial X_k} \frac{\partial X_k}{\partial y_i} \right\} \geq 0$$

y

$$(5d) \qquad \frac{\partial \delta}{\partial \alpha_i} = \sum_{k=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} E\left\{ \frac{\partial D_j(X^*, \beta_j^*)}{\partial X_k} \frac{\partial X_k}{\partial \alpha_i} \right\} \leq 0$$

3 En la formulación del problema de decisión del óptimo nivel de mitigación que cada víctima adopta, se asume que se conoce el nivel de producción y los esfuerzos de reducción de emisiones adoptados por los contaminadores de cada zona. Es decir, al momento de determinar el nivel de mitigación, no se conoce el valor de X, pero sí su distribución probabilística condicional sobre (α, y).

4 Estos resultados se demuestran en la Proposición 1 presentada en el Apéndice.

representan el valor esperado para el regulador del cambio marginal en el daño que afecta a todas las víctimas, producido por un cambio marginal en el nivel de producción y en la reducción en las emisiones, respectivamente[5].

La condición de primer orden (5a) establece que el nivel óptimo de producción se alcanza cuando el costo marginal social se iguala al precio de mercado del producto cuyo proceso productivo genera los problemas de contaminación ambiental. Este costo marginal social está compuesto de (i) el costo marginal privado de producción y (ii) el incremento marginal en los daños sufridos por todas las víctimas, provocado por un aumento marginal en el nivel de producción. De similar forma, la condición (5b) establece que el nivel óptimo de reducción de las emisiones se determina al igualar el costo marginal de α_i a su beneficio marginal, el cual está dado por la disminución marginal en los daños sufridos por todas las víctimas debido al incremento marginal en las reducciones de las emisiones.

Las condiciones de primer orden (5a) y (5b) se pueden resolver por los niveles óptimos de producción y de reducción de las emisiones (y^*, α^*). Estos, a su vez determinan el nivel esperado deseado de polución ambiental, $\bar{X}^* = E\{T(\alpha^*, y^*, \varepsilon)\}$, y la función óptima de medidas preventivas implementadas por las víctimas, $\beta_j^{**} = \beta_j^*(\bar{X}^*)\ \forall_j$. El mecanismo regulatorio por implementarse (i.e. un impuesto lineal Piguoviano) debe diseñarse de tal forma que el nivel de contaminación ambiental final esperado sea $\bar{X}^*$. A continuación se desarrollará el mecanismo de impuestos lineales Piguovianos incorporando la posibilidad de que las víctimas adopten medidas preventivas[6].

III. Diseño de un Impuesto Piguoviano Lineal

Siguiendo la metodología propuesta por Cabe y Herriges (1992) y Segerson (1988), el impuesto que se le aplicará al productor de la i'esima zona está definido como un porcentaje proporcional a la magnitud de desvío entre el nivel de contaminación ambiental actual y el nivel esperado deseado; es decir, el impuesto lineal Piguoviano está dado por $t_i(X - \bar{X}^*)$, donde $t_i \equiv (t_{i1}, \ldots, t_{in})$ y t_{ij} es la tasa del impuesto aplicada al contaminador de la i'ésima zona por su efecto en la contaminación ambiental de la j'ésima zona. A través de este mecanismo de incentivos, el regulador controla directamente los niveles de producción, y, y la reducción de las emisiones, α; sin embargo, el regulador no tiene ningún control sobre las medidas preventivas adoptadas por las víctimas, β.

En esta formulación, el nivel esperado deseado de contaminación ambiental afecta la transferencia entre firmas y el regulador, pero no la solución del problema de decisión. Además, este mecanismo de incentivos elimina el problema del *free rider*, ya que al decidir sus niveles de producción y de reducción de emisiones, el contaminador compara los costos adicionales que tendría que afrontar por causa de un aumento en las reducciones de sus emisiones con la disminución en el valor esperado de pago por concepto del impuesto debido al menor nivel de emisiones. Por otro lado, existe el incentivo para no ser un *free rider*, ya que al aumentar las reducciones en las emisiones no sólo se reduce el monto de pago por concepto del impuesto Puguoviano sino que también la probabilidad de que el nivel de contaminación ambiental exceda el nivel esperado deseado y, en el caso que $X < X^*$ el contaminador recibe un subsidio proporcional a la diferencia (Segerson (1988)).

5 La derivación de (5c) y (5d) es una aplicación directa del Teorema de la Envolvente; ver Proposición 2 para mayores detalles.

6 Esta metodología es aplicable a otros mecanismos regulatorios.

El problema de decisión que enfrentan los productores, bajo los supuestos que son indiferentes al riesgo, tomadores de precios, y que toman como dados los niveles de producción y de reducción de las emisiones de otras zonas, es

$$(6) \qquad \Pi_i(t_i) \equiv \underset{y_i,\alpha_i}{\text{Max}} \; E\left\{ \left(py_i - C_i(y_i, \alpha_i) - t_i \left(X - \bar{X}^*\right) \right) \right\}$$

donde $E\{\bullet\}$ representa el valor esperado distribución probabilística de ε. Si existe una solución interna a este problema, las condiciones necesarias de primer orden son

$$(6a) \qquad 0 = p - \frac{\partial C_i}{\partial y_i} - \sum_{k=1}^{N} t_{ik} E\left\{ \frac{\partial X_k}{\partial y_i} \right\}$$

y

$$(6b) \qquad 0 = - \frac{\partial C_i}{\partial \alpha_i} - \sum_{k=1}^{N} t_{ik} E\left\{ \frac{\partial X_k}{\partial \alpha_i} \right\}$$

El último término de 6(a) representa el incremento marginal en el costo debido al aumento en el pago de impuesto por causa del aumento marginal en las emisiones que afectan a cada zona. A su vez, el último término de (6b) representa la disminución marginal en costos en el pago de impuesto por la reducción marginal en las emisiones. Al comparar las ecuaciones (5) y (6), queda de manifiesto que si existe un impuesto, t*, tal que

$$(7a) \qquad \sum_{k=1}^{N} t_{ik}^{*} E\left\{ \frac{\partial X_k}{\partial y_i} \right\} = \sum_{k=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} E\left\{ \frac{\partial D_j(X,\beta_j^*)}{\partial X_k} \frac{\partial X_k}{\partial y_i} \right\}$$

y

$$(7b) \qquad \sum_{k=1}^{N} t_{ik}^{*} E\left\{ \frac{\partial X_k}{\partial \alpha_i} \right\} = \sum_{k=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} E\left\{ \frac{\partial D_j(X,\beta_j^*)}{\partial X_k} \frac{\partial X_k}{\partial \alpha_i} \right\}$$

entonces el regulador puede inducir los niveles Pareto óptimos de producción, reducción de emisiones y de mitigación. Es importante destacar que el impuesto diseñado por Cabe y Herriges (1992) es un caso especial de (7a) y (7b) donde $\beta_j^* = 0 \; \forall$ j=1,..., M; este caso especial puede ocurrir cuando el costo marginal de implementar actividades preventivas excede la reducción marginal en daños debido a estas actividades y, por lo tanto, no sea óptimo adoptar medidas preventivas, o cuando no exista la posibilidad de mitigar los daños.

Este resultado indica que, en principio, una solución *first best* es alcanzable a través de un mecanismo de impuestos lineales Piguovianos cuando las víctimas pueden mitigar el daño debido a la contaminación ambiental. Más aún, si el nivel de producción no afecta directamente al nivel ambiental de contaminación, el impuesto lineal Piguoviano sería determinado por la relación (7b) y el nivel de contaminación ambiental sería una función

implícita del nivel de reducción de las emisiones y del nivel de actividades preventivas adoptadas por las víctimas. Además, en el caso especial en que existe únicamente una zona contaminadora y sólo un grupo de víctimas, (i.e. N = 1 y M = 1), el impuesto óptimo sería

$$(8) \qquad t^* = \frac{E\left\{ \frac{\partial D}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial \alpha} \right\}}{E\left\{ \frac{\partial X}{\partial \alpha} \right\}}$$

el cual es similar a la definición del impuesto óptimo propuesto por Cabe y Herriges (1992). Bajo el supuesto de que la efectividad marginal de las medidas preventivas aumenta ante un incremento en el nivel de contaminación ambiental, se cumple que la tasa de impuesto implementada al no considerar las actividades preventivas adoptadas por las víctimas es mayor a la tasa Pareto óptima. Es decir, al excluir las posibilidades de que las víctimas adopten medidas preventivas, cuando éstas existen, lleva al regulador a fijar un impuesto muy alto en el sentido de que el nivel de las reducciones en las emisiones serán mayores al óptimo social, mientras que el nivel de contaminación ambiental resultante y el de producción serán menores al óptimo social (véase proposición 3 del Apéndice).

IV. Medición del Nivel de Contaminación Ambiental y el Logro de una Solución Pareto Optima

Segerson (1988) muestra que es suficiente monitorear la contaminación ambiental para fijar el impuesto lineal Piguoviano y asegurar que éste proporcione los incentivos para lograr el nivel deseado de contaminación ambiental para los casos de contaminación difusa. Cabe y Herriges (1992) establecen que el regulador requiere, además, de información sobre las percepciones subjetivas de los productores sobre la distribución probabilística de los elementos estocásticos del mecanismo de transporte. Estos resultados implican que, en general, los costos de monitoreo y de implementación no justifican la necesidd de diseñar un mecanismo regulatorio *second best*, en el cual se trata la regulación de los problemas de contaminación difusa como una situación de agencia.

Los resultados presentados en (7a) y (7b) indican que, además de monitorear el nivel de contaminación ambiental, es necesario determinar las actividades preventivas adoptadas por las víctimas. Esto último puede implicar que los requerimientos de información para implementar este impuesto Piguoviano sean excesivamente altos y ya no sea óptimo implementar un mecanismo regulatorio *first best*. Si este es el caso, es necesario comparar la pérdida social asociada con una solución *second best*, con el aumento en el costo de obtener la información necesaria para implementar una solución *first best* (Spulber (1988)).

Por ende, los resultados de Segerson (1988) y de Cabe y Herriges (1992) no son robustos cuando las víctimas pueden adoptar medidas para mitigar los daños generados por la contaminación ambiental. La factibilidad de implementar una política regulatoria *first best* a los problemas de contaminación difusa depende, entonces, de los requerimientos de información que están determinados, a su vez, por la factibilidad y los costos de mitigación por parte de las víctimas, los cuales son diferentes para cada tipo de contaminación difusa.

Consideremos, inicialmente el problema de la contaminación de aguas subterráneas. La contaminación de este recurso con pesticidas, nitratos o compuestos carbonados volátiles (VOC's) puede ser mitigada por las víctimas cuando instalan sistemas de filtración (véase Brown, Jayawardena, y Zelmanovich (1991)). Más aún, en algunos casos, el utilizar sistemas de filtración es menos costoso que reducir las emisiones. Por otro lado, los usuarios de las aguas subterráneas pueden adoptar otras medidas preventivas como la compra de agua embotellada o cambiarse a otra fuente de suministro de agua (Abler y Shortle (1991)). Estas medidas preventivas tienden a ser aún menos costosas que los sistemas de filtración y las medidas implementadas para reducir las emisiones (ver, por ejemplo, Hall *et al.* 1987). Por lo tanto, en el caso de contaminación de las aguas subterráneas no será óptimo fijar los impuestos de emisiones basados exclusivamente en el nivel de contaminación ambiental, debido a que las medidas preventivas adoptadas por las víctimas tienen un papel importante en las políticas regulatorias óptimas.

El caso de la sedimentación y contaminación de las aguas superficiales, en cambio, presenta una situación distinta. Algunos de los daños provocados por la contaminación de este recurso pueden ser mitigados al adoptar medidas preventivas. Por ejemplo, las empresas proveedoras de agua potable pueden disminuir o eliminar los sedimentos y algunos de los elementos contaminantes a través de procesos de decantación y filtración. Sin embargo, existen daños a ecosistemas acuáticos, tales como la pesca recreativa y comercial, que no pueden ser mitigados una vez que el contaminante ingresa al ecosistema. Por ende, cuando el objetivo de la política regulatoria es mejorar la calidad del agua potable, es necesario considerar los esfuerzos preventivos adoptados por las víctimas en el diseño de la política regulatoria óptima. Cuando el objetivo de la política es el mejorar los ecosistemas acuáticos, en cambio, fijar un impuesto en función de la contaminación ambiental sería suficiente para alcanzar un óptimo social.

La regulación óptima de la polución aérea causada por las emisiones de fuentes difusas, tales como el parque automotriz o los lavasecos que emiten VOC's, también es ambigua. Las víctimas pueden adoptar ciertas medidas preventivas como el permanecer dentro de sus viviendas y filtrar el aire a través de equipos de aire acondicionado (Dickey y Gerking (1991)). La regulación óptima deberá contemplar más información que el nivel de contaminación ambiental en la medida que los esfuerzos preventivos sean efectivos y de costo accesible.

V. Conclusiones

En resumen, no es óptimo regular los diferentes problemas de contaminación difusa con mecanismos regulatorios *first best* y es necesario analizar el problema de contaminación que se desea regular, para así determinar si es preciso incorporar el hecho de que las víctimas puedan mitigar los daños asociados a la contaminación ambiental. En base a este análisis se determinan los costos de monitoreo y de obtención de la información necesaria para implementar una política regulatoria *first best*. Por ende, no se deben excluir *a priori* las medidas preventivas que las víctimas pueden adoptar.

Existen problemas de contaminación difusa en los cuales los requerimientos informativos para implementar un mecanismo de impuestos Piguovianos son excesivamente altos, de tal forma que sea óptimo analizar el problema como una situación de agencia, en el cual se diseña un mecanismo regulatorio que proporcione los incentivos necesarios para que

cada agente económico tome decisiones óptimas por cuenta propia[7]. Sólo en aquellos casos en los cuales las posibilidades de mitigación por parte de las víctimas no son técnicamente factibles o económicamente viables, se logrará regular los problemas de contaminación difusa con un mecanismo basado sobre el monitoreo exclusivo del nivel de contaminación ambiental, como los propuestos por Segerson (1988) y Cabe y Herriges (1992).

REFERENCIAS

Abler, D.G. y Shortle, J. S. (1991), The political economy of water quality protection from agricultural chemicals, *Northeastern Journal of Agricultural and Resource Economics* 20, 53-60 (1991).

Brown, J.; Jayawardena, N. y Zelmanovich, Y. (1991), Water systems for pharmaceutical facilities, *Pharmaceutical Engineering* 11, 15-23.

Cabe, R. y Herriges, J.A. (1992), The regulation of non-point source pollution under imperfect and asymetric information, *Journal of Environmental Economics and Management* 22, 134-146.

Coase, R.H. (1960), The problem of social cost, *Journal of Law and Economics* III, 1-44.

Dickie, M. y Gerking, S. (1991), Valuing reduced morbidity: A household production approach, *Southern Economic Journal* 57, 690-702.

Donoso, G. y Lichtenberg, E. (1993), Source reduction vrs. mitigation in non-point source pollution, Working Paper Department of Agricultural and Resource Economics, University of Maryland, College Park.

Espinoza, G.; Gross, P. y Hajek, E. (1991), Problemas ambientales de la región metropolitana de Santiago, Comisión Nacional del Medio Ambiente, Secretaría Técnica y Administrativa.

Freeman, A.M. III (1991), Water pollution policy, en P.R. Portney (ed.) *Public Policies for Environmental Protection*, Resources for the Future, Washington, D.C.

Hajek, E.R.; Gross, P. y Espinoza, G.A. (1990), Problemas ambientales de Chile, Volumen I. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.

Hall, C.H.; Lichtenberg, E.R.; Patton, S.E.; Layton, D.W.; Hanemann, W.M. y Stuermer, D.H. (1987), Cost of alternative treatment technologies for 1, 2-Dibromo-3-Chloropropane (DBCP) in California Groundwater Supplies, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, mayo.

Holmstrom, B. (1982), Moral hazard in teams, *Bell Journal of Economics* 13, 324-340.

Oates, W.E. (1983), The regulation of externalities: Efficient behavior by sources and victims, *Public Finance* 3, 362-374.

Olson Jr. M. y Zeckhauser, R. (1970), The efficient production of external economies, *American Economic Review* LX, 512-517.

Segerson, K. (1988), Uncertainty and incentives for non-point pollution control, *Journal of Environmental Economics and Management* 15, 87-98 (1988).

Shibata, H. y Winrich, J.S. (1983), Control of pollution when the offended defend themselves, *Economica* 50, 425-437.

Spulber, D.F. (1988), Optimal environmental regulation under asymetric information, *Journal of Public Economics* 35, 163-181.

7 Cabe destacar, como lo señaló un árbitro anónimo, que el problema de costo de monitoreo y de obtención de información necesaria y su efecto sobre el diseño de políticas regulatorias es aplicable a problemas más generales y no sólo es relativo al problema de contaminación difusa cuando las víctimas pueden adoptar medidas preventivas. Se concentra en el caso de la contaminación difusa, con posibilidad de mitigación, para analizar si ciertas políticas regulatorias del tipo *first best* propuestas para estos problemas son realmente eficientes.

APENDICE

Proposición 1: La función óptima de mitigación es no decreciente en el nivel de producción y no creciente en las reducciones de emisiones.

Proof: La función óptima de mitigación se determina de tal forma que

$$(A.1) \quad \delta(X) \equiv \underset{\beta}{\text{Min}} \left\{ \sum_{j=1}^{M} \{ K_j(\beta_j) - E\,(D(X, \beta_j)) \} \right\}$$

La condición necesaria de primer orden es

$$(A.2) \quad 0 = \frac{\partial K_j}{\partial \beta_j} + E \left\{ \frac{\partial D_j}{\partial \beta_j} \right\} \quad \forall\ j = 1, ..., M$$

y la condición suficiente de segundo orden es

$$(A.3) \quad H = \sum_{j=1}^{M} \left\{ \frac{\partial^2 K_j}{\partial \beta_j^2} + E \left\{ \frac{\partial^2 D_j}{\partial \beta_j^2} \right\} \right\} > 0$$

Diferenciando completamente (A.2) con respecto a (y_i, α_i) implica

$$(A.4) \quad \begin{bmatrix} \frac{\partial \beta_j^*}{\partial y_i} \\ \\ \frac{\partial \beta_j^*}{\partial \alpha_i} \end{bmatrix} = H^{-1} \begin{bmatrix} - \sum_{j=1}^{M} \sum_{k=1}^{N} E \left\{ \frac{\partial^2 D_j}{\partial \beta_j \partial X_k} \frac{\partial X_k}{\partial y_i} \right\} \\ \\ - \sum_{j=1}^{M} \sum_{k=1}^{N} E \left\{ \frac{\partial^2 D_j}{\partial \beta_j \partial X_k} \frac{\partial X_k}{\partial \alpha_i} \right\} \end{bmatrix}$$

Las condiciones de segundo orden implican que H es no negativo; además, se asumió que el nivel de contaminación ambiental de la zona k es no decreciente en y_i y no creciente en α_i. Por ende, cuando la efectividad marginal de las medidas preventivas es creciente en el nivel de contaminación ambiental (i.e. $\partial^2 D_j / \partial \beta_j X_k \leq 0$), entonces β_j^* es no decreciente en el nivel de producto y no creciente en las reducciones de las emisiones logradas por los productores de la zona i.

Proposición 2: El Teorema de la Envolvente implica que

$$\text{(i)} \qquad \frac{\partial \delta}{\partial y_i} = \sum_{k=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} E\left\{ \frac{\partial D_j (X^*, \beta_j^*)}{\partial X_k} \frac{\partial X_k}{\partial y_i} \right\} \geq 0$$

y

$$\text{(ii)} \qquad \frac{\partial \delta}{\partial \alpha_i} = \sum_{k=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} E\left\{ \frac{\partial D_j (X^*, \beta_j^*)}{\partial X_k} \frac{\partial X_k}{\partial \alpha_i} \right\} \leq 0$$

Proof: El Teorema de la Envolvente establece que

$$\text{(A.5)} \qquad \frac{\partial F(x,\vartheta)}{\partial \vartheta_j} = \frac{\partial F(X(\vartheta), \vartheta)}{\partial \vartheta_j}$$

donde $F(\bullet)$ es la función objetivo, x es un vector de variables de decisión y ϑ representa un vector de parámetros del problema de decisión. Al aplicar este teorema a la función de valor mínimo derivada en (A.1) genera los resultados (i) y (ii).

Proposición 3: Si la efectividad marginal de los esfuerzos avertivos son crecientes en el nivel de contaminación ambiental, entonces el nivel de impuesto para el caso especial de un contaminador y una víctima es no decreciente en el nivel de medidas preventivas.

Proof: El impuesto óptimo para el caso de un contaminador y una víctima, está dado por

$$\text{(A.6)} \qquad t^{**} = \frac{E\left\{ \frac{\partial D}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial \alpha} \right\}}{E\left\{ \frac{\partial X}{\partial \alpha} \right\}}$$

Completamente diferenciado (A.6) con respecto a β^* implica

$$\text{(A.7)} \qquad \frac{\partial t^{**}}{\partial b^*} = \frac{E\left\{ \frac{\partial^2 D}{\partial X \partial \beta^*} \frac{\partial X}{\partial \alpha} \right\}}{E\left\{ \frac{\partial X}{\partial \alpha} \right\}}$$

el cual es no positivo cuando la efectividad marginal de las medidas preventivas es creciente en el nivel de contaminación ambiental. Por lo tanto, no tomar en cuenta la posibilidad de que la víctima adopte medidas preventivas (es decir, imponer la restricción que $\beta^* = 0$) implica que el impuesto fijado será mayor que el óptimo social.