

Subsidios a hogares para inducir adopción de tecnologías de combustión de leña más eficiente y menos contaminantes: Simulación para el caso de Temuco y Padre Las Casas

Subsidy for households to promote the adoption of more efficient and less polluting wood burning technologies: A numerical simulation for the case of Temuco and Padre Las Casas

WALTER GÓMEZ*
SUE YEP**
CARLOS CHÁVEZ***

Resumen

Estudiamos el efecto de un subsidio a hogares que incentive el cambio a equipos de combustión de leña más eficientes y menos contaminantes. Se comparan, mediante simulaciones numéricas, diversos diseños de subsidio respecto del impacto sobre emisiones, costo y los indicadores de costo-efectividad. Dos variables importantes para el éxito de un programa de subsidio son el tiempo de uso restante asignado a equipos antiguos, y el acceso de los hogares a financiar el copago. Se observa que para escenarios regulatorios y/o análisis de costos diferentes, los diseños con mejores índices de costo-efectividad también difieren.

Palabras clave: *Política ambiental, costo-efectividad, incentivos económicos, contaminación urbana.*

Clasificación JEL: *Q48, H23, Q53, H31.*

Abstract

We study the effect of a household subsidy to induce the adoption of more efficient and less polluting wood combustion technologies. We compare, through numerical simulations, several subsidy designs with respect to the impact on aggregate emissions, costs, and cost-effectiveness indicators. Two variables that turn out to be important for the performance of a subsidy program are the remaining

* Departamento de Ingeniería Matemática, Universidad de La Frontera. Núcleo de Investigación en Economía Ambiental y de Recursos Naturales.

** Programa Magíster en Economía de Recursos Naturales y del Medio Ambiente, Universidad de Concepción.

*** Departamento de Economía, Universidad de Concepción. Núcleo de Investigación en Economía Ambiental y de Recursos Naturales y Centro Interdisciplinario para la Investigación en Acuicultura (INCAR).

time that an existing equipment can be used and the access of the households to credit to fund the co-payment of the equipment. We observe that for different regulatory designs and/or different cost analysis, the performance of a subsidy program based on the cost-effectiveness analysis differs.

Key words: Environmental policy, cost-effectiveness, economic incentives, urban pollution.

JEL Classification: *Q48, H23, Q53, H31.*

1. INTRODUCCIÓN

El propósito de esta investigación es explorar, mediante simulaciones numéricas, el diseño costo efectivo de instrumentos de regulación ambiental basados en incentivos económicos para el mejoramiento de la calidad del aire en zonas urbanas del centro-sur de Chile. El problema de deterioro de calidad del aire bajo estudio se origina fundamentalmente por el material particulado que se emite al combustionar leña en hogares urbanos (ver por ejemplo, PDA, 2009; Chávez *et al.*, 2009).

A diferencia de otros casos de contaminación atmosférica que involucran un número relativamente bajo de agentes, el problema a estudiar enfrenta al regulador ante decenas de miles de hogares que emiten individualmente cantidades pequeñas de material particulado. Esta condición asemeja el problema al caso de contaminación difusa (Shortle y Horan, 2001), a la vez que imposibilita una medición individualizada de las emisiones y el uso de instrumentos económicos basados en la observación de los niveles de emisión individuales. Una opción para el regulador consiste en el uso de instrumentos económicos indirectos enfocados a factores que generan la contaminación.

El instrumento económico, que estudiamos detalladamente en este trabajo, es un subsidio a los hogares consumidores de leña que incentive el recambio de equipos de combustión en uso por otros más eficientes y menos contaminantes¹. El diseño eficiente de subsidios con el fin propuesto constituye ciertamente un reto mayor para el regulador. Al ser un instrumento de incentivo económico, la adopción del recambio es voluntaria. Ello presupone que el monto a subsidiar debe ser cuidadosamente ajustado para lograr el recambio buscado, sin malgastar recursos públicos de manera indiscriminada. Especialmente en el caso que existan diferencias de ingreso importantes dentro de la población de agentes contaminantes, el diseño del subsidio debe ser diferenciado, por diversas razones, por ejemplo para poder rescatar correctamente la heterogeneidad de la disposición a aceptarlo.

La necesidad de un subsidio diferenciado en el caso de desigualdades en los niveles de ingreso también puede explicarse por razones de eficiencia económica

¹ En este trabajo, el término “equipo más eficiente y menos contaminante” se entenderá por aquel que, utilizando la misma cantidad de leña que el equipo existente, entrega más energía y menos emisiones de material particulado respirable, MP10 (partículas con diámetro aerodinámico inferior a 10 micrómetros).

(ver Chávez *et al.*, 2011). En el mismo trabajo se observa que para lograr un objetivo de costo-efectividad se requiere de subsidios diferenciados según tipos de equipos retirados, cuya propiedad por parte de los hogares se correlaciona con el ingreso.

Los objetivos de este trabajo son dos. Primero, desarrollar distintas metodologías para calcular indicadores de costo-efectividad de un programa de subsidio al recambio de equipos de combustión a leña. Segundo, comparar mediante simulaciones numéricas distintos diseños de subsidio utilizando la metodología planteada para el caso concreto de un subsidio en las comunas de Temuco y Padre Las Casas de la región de la Araucanía, en el sur de Chile.

La base del cálculo de la propiedad de costo-efectividad de cualquier programa de subsidio es la caracterización del efecto que produce ese instrumento económico sobre las decisiones de adopción al recambio dentro de la población de agentes regulados y finalmente sobre los niveles de emisión generados. Es necesario primeramente contar con un esquema de modelación que permita simular la reacción de los hogares ante el subsidio ofrecido. Esta modelación debe incluir tanto la decisión de cambiar o no el equipo de combustión, como la eventual influencia de esta decisión de recambio sobre el consumo de leña y sobre las emisiones generadas. Otro aspecto necesario para poder construir indicadores de costo-efectividad es una metodología que calcule los costos asociados a la implementación de la regulación por medio del subsidio.

Este trabajo aporta nuevos elementos a la literatura existente sobre el tema en varias direcciones. Por una parte se formaliza un nuevo modelo, basado en parámetros no utilizados anteriormente, que permite simular la decisión de hogares ante una oferta de subsidio al recambio de equipos de combustión a leña. Por otra parte, se proponen algunas metodologías para sistematizar el análisis de los costos asociados al ejercicio de subsidiar el recambio desde distintas perspectivas. Finalmente, los resultados de las simulaciones entregan un análisis de costo-efectividad nuevo para distintas estrategias de diseño de los programas de subsidio bajo estudio.

El resto del trabajo se organiza de la siguiente manera. La sección 2 presenta antecedentes básicos del problema de contaminación atmosférica del caso de estudio. En la sección 3 se detalla el marco conceptual incluyendo la metodología para las simulaciones. Los resultados de las simulaciones numéricas y del análisis de sensibilidad desarrollado son expuestos en la sección 4. Finalmente en la sección 5 se discuten las principales conclusiones obtenidas en el trabajo.

2. MOTIVACIÓN Y CASO DE ESTUDIO

La contaminación del aire en zonas urbanas es uno de los problemas ambientales más complejos que se enfrentan actualmente en Chile. En los últimos años el deterioro de la calidad del aire asociado a altas concentraciones de material particulado ha sido repetidamente constatado en centros urbanos de las zonas centro y sur. En muchos casos la causa principal de la contaminación es el uso de leña para cubrir la demanda de energía para calefacción y preparación de alimentos (ver PDA, 2009; Chávez *et al.*, 2008).

La intercomuna de Temuco y Padre Las Casas en la Región de la Araucanía chilena constituye un ejemplo relevante del problema de contaminación

atmosférica urbana mencionado. Se estima que en Temuco y Padre Las Casas habitan 350.000 personas en aproximadamente 86.000 viviendas, las que son responsables del 90% de las emisiones anuales de material particulado –principal contaminante de la zona– originadas por la combustión de leña (ver PDA, 2009; Gómez *et al.*, 2009).

El área de control de la contaminación de la Secretaría Regional Ministerial del Medio Ambiente-Región de La Araucanía, ha registrado en las comunas mencionadas para cada uno de los últimos años una cantidad alarmante de días con lecturas superiores a la norma diaria de MP10, destacándose los años 2008 y 2009 con un total de 36 y 37 episodios anuales, respectivamente (en la temporada otoño-invierno del año 2011 se contabilizó un total de 34 episodios).

El problema de control de la contaminación atmosférica en las comunas mencionadas es complejo por varias razones. Primero, involucra un número muy grande de agentes contaminantes (alrededor de 100.000 equipos de combustión de leña (ver Gómez *et al.*; 2009). Segundo, la contaminación se origina principalmente como consecuencia del uso de la leña para calefacción y preparación de alimentos en hogares, y por ende está asociada a actividades necesarias y cotidianas (ver PDA, 2009; Chávez *et al.*, 2009). Tercero, la ventaja del precio relativo de la leña frente a otros combustibles sustitutos permite suponer que la leña seguirá siendo la principal fuente de generación energética de los hogares (ver Gómez-Lobo, 2005).

En julio del año 2009 se estableció un Plan de Descontaminación Atmosférica (PDA) para las comunas de Temuco y Padre Las Casas (ver PDA, 2009) que se basa en cuatro líneas estratégicas de gestión: (i) mejoramiento de la calidad del combustible, (ii) mejoramiento de la calidad de los artefactos de combustión de leña, (iii) mejoramiento de la aislación térmica de las viviendas sociales existentes y (iv) sensibilización y educación a la comunidad.

De manera explícita se exige en el PDA (ver PDA, 2009), Capítulo II, Sección 2.2, Artículo 10) la puesta en marcha de un programa de recambio de artefactos de combustión a leña por equipos más eficientes y de menores emisiones de MP10. Este programa debe incluir instrumentos económicos que incentiven a los hogares a renovar sus equipos y contempla el recambio de al menos 12.000 artefactos en una década.

3. MODELOS Y METODOLOGÍA

En esta sección se presentan los modelos sobre los que se basa el análisis del diseño de las alternativas de programas de subsidios y la metodología de cálculo de indicadores de costo-efectividad.

3.1. Modelo de decisión individual sobre la oferta de subsidio

El objetivo de esta subsección es definir un esquema que modele el proceso de toma de decisiones de un hogar que utiliza leña como fuente de energía y se ve enfrentado a la posibilidad de utilizar un subsidio para recambiar sus equipos de combustión de leña. La elección sobre la manera en que se obtiene, o genera, la energía consumida en un hogar puede entenderse como un problema económico básico para el hogar, que involucra una decisión sobre invertir en la compra de

algunos equipos y/o sistemas de calefacción. Esta decisión no es con frecuencia requerida (tomándose cada 20-50 años, ver Wittmann, 2008), por lo que es difícil lograr una reconsideración voluntaria de la misma por parte del hogar.

Consideremos un hogar i , de características s_i , que utiliza un equipo de combustión a leña j , de características técnicas s_j para obtener energía, destinando una cantidad de leña $l_{i,j}$ a ser combustionada en el equipo. Si denotamos por P_l al precio de la leña, podemos identificar algunas magnitudes (ver Gómez *et al.*, 2009) asociadas con el uso del equipo j , por el hogar i , como por ejemplo: costo de mantención, $CM_{j,i} = CM(l_{i,j}, s_j)$; costo de operación, $CO_{j,i} = CO(P_l, l_{i,j}, s_j, s_i)$; y nivel de energía generado, $\bar{g}_{i,j} = g_j(l_{i,j}, s_j)$.

Tomando como situación base el escenario anterior en que el hogar i utiliza el equipo j consideremos un subsidio ofrecido al hogar para que cambie su equipo por otro equipo r con características distintas s_r . Por la naturaleza del problema estudiado, suponemos que el equipo subsidiado r es más eficiente y tiene un factor de emisión menor al del equipo j . Una hipótesis básica en nuestra modelación de la decisión del hogar i es que el recambio del equipo se realiza manteniendo el mismo nivel de consumo de energía $\bar{g}_{i,j}$ previo al recambio. Esta condición determina unívocamente un nivel de consumo de leña $l_{i,r}$ del hogar para el nuevo equipo r que aparece de solucionar, respecto de $l_{i,r}$, la siguiente ecuación

$$(1) \quad \bar{g}_{i,j} = g_r(l_{i,r}, s_r)$$

Habiendo calculado el consumo de leña $l_{i,r}$ se obtienen los nuevos costos de mantención y operación del equipo reemplazante, o sea, $CM_{r,i}$ y $CO_{r,i}$. Una variable importante al considerar el beneficio de un recambio inmediato es el número de años que el hogar pretende utilizar su equipo actual antes de cambiarlo. Asumamos que el hogar planea recambiar su actual equipo j de todas maneras en k años.

Con vistas a simplificar el análisis supongamos que la tecnología en oferta para recambiar equipos de combustión al momento del recambio k , planificado por el hogar, coincide, quizás debido a una norma que fija estándares a equipos en venta, con la tecnología del equipo ofrecido para recambiar en este momento. Bajo esta hipótesis, la pregunta que enfrenta el hogar es si debe adelantar el recambio y realizarlo ahora utilizando el subsidio, o esperar a realizarlo en el momento k , pero sin subsidio.

En nuestro modelo la decisión de aceptar el subsidio se basa en la comparación de dos magnitudes. Por una parte se tienen los beneficios que percibe el hogar por mejorar la tecnología, en tanto para producir la misma cantidad de energía \bar{g}_i se generan eventuales ahorros en costos de mantención y operación. En determinados escenarios, por ejemplo al cambiar de combustible a leña a pellets, los costos de operación pueden incrementarse generando en realidad costos adicionales para el hogar. Los beneficios generados por el recambio se contabilizan hasta el momento k , ya que se presupone que un recambio ocurriría en ese instante de todas maneras. Por otra parte, se encuentran los costos en

que incurre el hogar por adelantar la inversión desde el momento planificado k , hasta la actualidad. Este costo se compensa parcialmente con el subsidio ofrecido. La diferencia de las dos cantidades mencionadas definen el beneficio neto de aceptar el adelanto del recambio y se expresan de la siguiente manera.

$$(2) \quad BN_{r,j}^{i,k}(Sub_{i,r}) = - \left[(Inv_r^0 - Sub_i) - \frac{Inv_r^k}{(1+d)^k} \right] + \sum_{t=0}^k \frac{\Delta CM_{r,j}^i}{(1+d)^t} + \sum_{t=0}^k \frac{\Delta CO_{r,j}^i}{(1+d)^t}$$

En esta expresión Inv_r^0 y Inv_r^k representan el costo de adquirir el equipo r en el período actual y en el momento k , respectivamente. El subsidio ofrecido al hogar i para recambiar su equipo actual por un equipo r se denota por Sub_i . Las expresiones $\Delta CM_{r,j}^i$ y $\Delta CO_{r,j}^i$ se refieren al ahorro en costos de mantenimiento y operación asociados al recambio de tecnología. Para comparar estos ahorros, y la inversión Inv_r^k , con valores de inversión actuales se descuentan los mismos utilizando una tasa d .

El modelo de decisión utilizado en este trabajo estipula que si la expresión (2) resulta positiva, el hogar aceptará el subsidio y cambiará su equipo en el período actual. Como esta decisión depende sensiblemente del subsidio ofrecido hemos remarcado esta dependencia en la notación $BN_{r,j}^{i,k}(Sub_i)$. Una función útil para los cálculos subsiguientes es la indicadora de la decisión, que toma el valor 1 si el recambio es aceptado y cero en caso contrario, o sea:

$$(3) \quad Ind_i(Sub_i) = \begin{cases} 1, & BN_{r,j}^{i,k}(Sub_i) \geq 0 \\ 0, & BN_{r,j}^{i,k}(Sub_i) < 0, \end{cases}$$

Nótese que en este modelo de decisión el nivel de ingreso del hogar no influye en la decisión de aceptar el subsidio para realizar el recambio. En particular, el modelo excluye el caso en que un hogar no realice el recambio aunque tenga un beneficio neto esperado (2) positivo, porque no logre cubrir la inversión propia con su presupuesto mensual². Esto implícitamente asume que no hay restricciones de acceso al crédito, y puede inducir en las simulaciones a una sobreestimación de los recambios y de la reducción de emisiones para cada monto dado de subsidios.

Especialmente en el caso en que el subsidio es nulo y la expresión (2) es positiva el modelo de decisión considerado es extremo en tanto implica un recambio inmediato y espontáneo no atribuible a un programa del regulador. Si un análisis de costo-efectividad debe excluir estos recambios de la acción reguladora o no, depende de la interpretación de las hipótesis subyacentes y de

² En un estudio reciente (ver Chávez *et al.*, 2010) se ha encontrado evidencia empírica de una importante relevancia práctica que puede tener el acceso al crédito sobre la disposición a aceptar un subsidio al recambio tecnológico de equipos de combustión de leña en hogares.

los problemas de información y modelación asociados. Por una parte, el regulador no dispone de información suficiente para diseñar un programa que excluya subsidios innecesarios, por lo que los mismos deberían fluir en el análisis aunque no sean consecuencia directa de la acción del regulador. Por otra parte, asumir en el análisis que todos los recambios espontáneos ocurren, implica ignorar las restricciones de liquidez no observadas generando una sobreestimación de los efectos del programa. En nuestro trabajo analizamos solo el efecto directamente asociable a los subsidios, por lo que se excluyen del análisis los hogares que según la expresión (2) recambiarían su equipo incluso con subsidio cero.

La diferencia principal entre el modelo de decisión basado en (2) y el utilizado en las simulaciones de Gómez *et al.* (2009), es que se incorpora explícitamente mediante el parámetro k el tiempo de espera hasta el recambio natural del equipo actual por parte del hogar. Este parámetro ciertamente depende de las características mismas de los hogares, del equipo actual, y de eventuales condiciones exógenas, como por ejemplo, de una regulación sobre equipos para combustión de leña en hogares.

En este estudio las simulaciones se realizaron utilizando dos tipos de contextos regulatorios distintos. En el contexto más sencillo, y que probablemente mejor describe la situación real, el hogar no está sujeto a ninguna normativa sobre el uso de equipos de combustión a leña y puede esperar para recambiar su equipo un tiempo arbitrariamente largo, que incluso puede exceder la vida útil del equipo actual. En este caso consideramos que el hogar ignora en su análisis la necesidad de un recambio natural futuro, por lo que los beneficios netos se evalúan en (2) utilizando $k = \infty$. A este tipo de contexto regulatorio lo llamaremos “sin norma”.

El segundo tipo de contexto regulatorio considerado en las simulaciones se denomina “con norma” y presupone la entrada en vigor de una norma que restringe el uso de estufas a leña. La norma supuesta contempla la introducción escalonada de límites máximos para los factores de emisión de los artefactos a utilizar en los hogares³. Bajo la normativa supuesta los hogares deberán cambiar sus equipos en un plazo de 3-4 años, dependiendo de los equipos actuales que poseen. Este escenario, a pesar de ser irreal para los anteproyectos de norma referibles en Chile (estos se orientan a regular los equipos en venta en el mercado nacional, pero no los que ya están en uso), tiene semejanza con antecedentes internacionales sobre normativas que restringen la antigüedad máxima de equipos de combustión en uso (ECAN, 2009).

El efecto en el modelo de asumir la norma consiste en calcular la fórmula de beneficios netos (2) para $k = 3,4$ dependiendo del equipo base, que también puede interpretarse como un recambio natural cercano. Para estudiar también el efecto de un recambio natural más demorado, o de una norma que fije un límite máximo más holgado para el uso de artefactos antiguos en hogares, se incorporaron dos cálculos adicionales “con norma”, pero con valores $k = 10,15$.

³ Basado en el Anteproyecto de Norma de Emisión que existía al comienzo de realizar este estudio (ver CONAMA, 2007). El anteproyecto introduce de manera escalonada factores de emisión cada vez más exigentes para los equipos de combustión que se comercializan. Interpretando la norma como restrictiva también para los equipos en uso, se establece una obligación para los hogares a recambiar su estufa.

Luego de modelar la decisión del hogar respecto de aceptar el subsidio al recambio, es necesario cuantificar, en el caso positivo, las ganancias en términos de la eventual reducción de emisiones y los costos asociados al recambio de tecnología.

Para el cálculo de emisiones se utiliza un factor de emisión asociado a los equipos y que cuantifica la cantidad de material particulado emitido por cada kilogramo de combustible quemado. En este sentido, si un hogar i utiliza un equipo j para combustionar $l_{i,j}$ kilogramos de leña, estará emitiendo

$$(4) \quad e_{i,j} = l_{i,j} \varphi_j$$

donde $e_{i,j}$ representa el nivel de emisiones del equipo j en el hogar i y φ_j denota el factor de emisión del equipo j . Algunos hogares utilizan varios equipos de combustión, por lo que las emisiones totales de un hogar i se cuantifican como

$$(5) \quad e_i = \sum_{m \in J} l_{i,m} \varphi_m$$

En esta notación J denota el conjunto de todos los equipos de combustión que puede utilizar el hogar, incluyendo aquellos que pueden ser adquiridos con el subsidio.

En este modelo, el comportamiento de un hogar i queda completamente caracterizado por el vector de consumos $(l_{i,m})_{m \in J}$. Si un hogar i acepta la oferta de subsidio para cambiar su equipo j en uso por un nuevo equipo r , lo que ocurre es que reajusta su vector actual de consumo $(l_{i,m}^0)_{m \in J}$ a un nuevo vector $(l_{i,m}^S)_{m \in J}$. Este ejercicio presupone, en la notación utilizada, que se tienen las siguientes relaciones:

$$l_{i,j}^0 > 0, \quad l_{i,j}^S = 0 \quad (\text{El equipo actual estaba en uso y es retirado}).$$

$$l_{i,r}^0 = 0, \quad l_{i,r}^S > 0 \quad (\text{El equipo subsidiado no existía en el hogar y es ahora utilizado}).$$

$$g_j(l_{i,j}^0, s_j) = \bar{g}_{i,j}^0 = \bar{g}_{i,r}^S = g_r(l_{i,r}^S, s_r) \quad (\text{El recambio no altera la energía consumida}).$$

Con estas hipótesis y notaciones, la aceptación del recambio por parte del hogar i genera una reducción en las emisiones $\Delta e_i > 0$ dadas por

$$(6) \quad \Delta e_i = (e_i^0 - e_i^S) = \sum_{m \in J} (l_{i,m}^0 - l_{i,m}^S) \varphi_m$$

Para el análisis de los costos asociados al recambio es importante diferenciar la fuente de financiamiento. En este sentido consideramos una clasificación de

los costos del recambio en las siguientes categorías, que se refieren a un subsidio al hogar i para que recambie su equipo actual j por otro equipo r .

- Costos para el regulador: Estos se entienden como el desembolso del subsidio entregado y asciende a $Sub_{i,r}$.
- Costos privados: En este caso nos referimos al desembolso que realiza el hogar en el momento del recambio y que resulta en la magnitud $Inv_r^0 - Sub_{i,r}$.
- Costos netos: Si se busca el aporte final neto de ambas partes debemos sustraer al monto invertido en el equipo (subsidio más aporte del hogar) los beneficios monetarios que percibe el hogar por adelantar la inversión de recambio desde el momento inicialmente planificado k hasta la actualidad. Este costo se calcularía entonces como sigue.

$$(7) \quad Sub_{i,r} - BN_{r,j}^{i,k}(Sub_i) = \left[Inv_r^0 - \frac{Inv_r^k}{(1+d)^k} \right] - \sum_{t=0}^k \frac{\Delta CM_{r,j}^i}{(1+d)^t} - \sum_{t=0}^k \frac{\Delta CO_{r,j}^i}{(1+d)^t}$$

El costo neto refleja también el costo privado de adelantar el recambio en ausencia de subsidio y de acuerdo con la expresión (7) puede ser positivo o negativo.

3.2. Modelo global e indicadores de costo-efectividad

Para poder estudiar a escala global los efectos de una estrategia de subsidio es necesario extrapolar los resultados desde una perspectiva individual de los hogares hacia una agregación a toda la población bajo regulación.

Si suponemos que el total de hogares que recibe la oferta de subsidio y decide al respecto es igual a I , entonces los efectos globales de un diseño de subsidio arbitrario se basan en el cálculo agregado de las siguientes magnitudes, donde S denota el vector de todos los subsidios ofrecidos $S = (Sub_i, i \in I)$.

- Variación de las emisiones generadas:

$$(8) \quad \Delta E(S) = \sum_{i=1}^I \sum_{m \in J} Ind_i(Sub_i) \cdot (1 - Ind_i(0)) \cdot (l_{i,m}^0 - l_{i,m}^S) \cdot \varphi_m$$

- Costos para el regulador:

$$(9) \quad C_R(S) = \sum_{i=1}^I Ind_i(Sub_i) \cdot (1 - Ind_i(0)) \cdot Sub_i$$

- Costos privados:

$$(10) \quad C_P(S) = \sum_{i=1}^I Ind_i(Sub_i) \cdot (1 - Ind_i(0)) \cdot (Inv_{r(i)}^0 - Sub_i)$$

- Costos neto agregados:

$$(11) \quad C_N(S) = \sum_{i=1}^I \text{Ind}_i(\text{Sub}_i) \cdot (1 - \text{Ind}_i(0)) \cdot \left\{ \text{Sub}_{i,r(i)} - \text{BN}_{r(i),j(i)}^{i,k(i)}(\text{Sub}_i) \right\}$$

La inclusión de la indicadora definida en (3) en los costos calculados en las expresiones (8-11) permite que se involucre en el cálculo solo a aquellos hogares que finalmente deciden recambiar sus equipos. De manera análoga la inclusión del factor $(1 - \text{Ind}_i(0))$ en (8-11) excluye de nuestro análisis a aquellos hogares que adelantarían el recambio con un subsidio nulo.

Las fórmulas anteriores consideran flexibilidad en el diseño del programa de subsidios, ya que el recambio que se propone subsidiar, a saber, el retiro del equipo $j(i)$ e instalación del equipo $r(i)$, es individualizado para cada hogar $i \in I$. De manera general también se considera que el tiempo que esperaría el hogar i hasta realizar el recambio $k(i)$, $i \in I$ es diferenciado por hogar. En esta notación general el diseño del programa de subsidio se traduce entonces en la especificación de funciones $r(i)$, $j(i)$ y Sub_i . Por último, la función $k(i)$, que también influye en el efecto del programa de subsidios, se considera como un elemento menos flexible, aunque también variable.

Para comparar distintas estrategias de diseño del programa de subsidios utilizaremos en este trabajo los costos agregados y el efecto global en cuanto a reducción de emisiones. Este ejercicio nos lleva a considerar varios tipos de coeficientes de costo-efectividad, a saber:

- Costo-efectividad basada en costos del regulador:

$$(12) \quad CE_R(S) = \frac{C_R(S)}{\Delta E(S)}$$

- Costo-efectividad basada en costos privados:

$$(13) \quad CE_P(S) = \frac{C_P(S)}{\Delta E(S)}$$

- Costo-efectividad basada en costos netos agregados:

$$(14) \quad CE_N(S) = \frac{C_N(S)}{\Delta E(S)}$$

El coeficiente de costo-efectividad mejora (se reduce) si los costos del programa de recambio son menores y empeora (se incrementa) cuando la variación de las emisiones es menor.

3.3. Datos de cálculo y escenarios de las simulaciones

La principal información requerida para realizar las simulaciones de este trabajo es una clasificación de los hogares de las comunas bajo estudio respecto de distintos parámetros como el ingreso, el consumo de leña y el tipo de equipo de combustión que utilizan. Esta clasificación se encuentra disponible públicamente (ver, por ejemplo, la sección de estudios de la página web del PDA www.pdatemucopadrelascasas.cl) en el informe final del estudio “Diseño de un programa de recambio de artefactos existentes que combustionan leña por tecnología menos contaminante en las comunas de Temuco y Padre Las Casas” (ver Gómez *et al.*, 2009). La clasificación de hogares se obtuvo en el mencionado estudio mediante el cruce de dos encuestas; por una parte, una encuesta a Viviendas del grupo Ingeniería DICTUC (Pontificia Universidad Católica de Chile), realizada en el año 2007, y por la otra, la encuesta de Caracterización Socioeconómica de Hogares, CASEN, realizada por MIDEPLAN en el año 2006. En nuestro trabajo solo se utilizaron las tablas de clasificación de hogares provenientes de Gómez *et al.* (2009), por lo que no se hizo necesario trabajar con datos originales de las encuestas anteriormente mencionadas.

La clasificación de los hogares se orienta al nivel socioeconómico (valor declarado de ingresos promedio mensuales) y al consumo anual de leña (en kilogramos). Las Tablas A-1 y A-2 del Anexo muestran la nomenclatura y rangos utilizados en las cinco categorías utilizadas, a saber F1-F5 para el ingreso y C1-C5 para el consumo de leña. Para cada hogar de las 25 combinaciones se utilizó el mismo valor de ingreso y consumo de leña, por ejemplo un hogar de la categoría F3-C4 se asume que tiene un ingreso mensual de 27,4 UF y consume 6.750 kg de leña anuales⁴.

Los equipos de combustión a leña considerados se dividen primeramente en estufas y cocinas. Las estufas encontradas en los hogares se clasifican de la siguiente manera: “F” para equipos que tienen menos de 4 años de antigüedad; “G”, entre 4 y 14 años de antigüedad; “H”, entre 15 y 27 años de antigüedad; “S” para salamandras y “X” para chimeneas (ver Gómez *et al.*, 2009, pp. 92 y Ambiente Consultores-CONAMA, 2006). Las estufas consideradas para sustituir a los calefactores actualmente en uso son estufas de doble cámara de mejor calidad (denominadas D) y estufas a pellets (llamadas B). Uniendo entonces las cocinas a leña y los calefactores (en uso y nuevos) se llega a que el conjunto de equipos utilizables en un hogar *J* contiene en total 8 artefactos (cocinas, 5 estufas “antiguas”, 2 estufas “nuevas”).

El cálculo de las emisiones de un hogar depende de los factores de emisión que se consideren para los equipos del hogar. Los factores de emisión para los

⁴ Los grupos y rangos utilizados en la clasificación (Tablas A-1 y A-2 de Anexo) fueron diseñados resguardando el criterio de representatividad de cada subgrupo dentro de la población. Por ejemplo, cada grupo de ingreso, o de consumo de leña, cubre aproximadamente 20% de la población bajo estudio. Los detalles de construcción de los grupos pueden revisarse en Gómez *et al.* (2009).

ocho equipos considerados en las simulaciones se especifican en la Tabla A-3 del Anexo⁵.

El siguiente parámetro que interviene en el cálculo de las emisiones es la cantidad de leña utilizada en los equipos que posee el hogar. En base a los datos utilizados tenemos una situación simple: cada hogar utiliza solo una estufa, solo una cocina, o una estufa y una cocina. Teniendo en cuenta que nuestro estudio se limita a considerar recambios de estufas por estufas, las posibles combinaciones de uso de los equipos, incluyendo el caso de recambios, se restringen a 15 posibilidades, a saber: 14 combinaciones de estufas con y sin cocina; y el caso de cocina sola. Los hogares se clasifican entonces en 15 categorías de acuerdo con los equipos que usan para combustionar leña. Como de las 15 categorías mencionadas cuatro de ellas incluyen el uso de equipos ofrecidos en el recambio (B y D), que no son utilizados actualmente, la clasificación primaria de los hogares se puede reducir a 11 tipos.

Combinando estas 11 categorías de uso actual de equipos con las 25 mencionadas sobre ingreso y consumo de leña se arriba a un total de 275 tipos de hogares. Con un vector de 275 componentes enteras se resume la información de la distribución de la población entre los tipos de hogares considerados. La caracterización de la población bajo estudio se encuentra disponible en Gómez *et al.* (2009).

Una hipótesis considerada es que todos los hogares pertenecientes a uno de los 275 tipos mencionados tienen un comportamiento similar. Esto significa que reciben la misma oferta de subsidio y reaccionan de manera idéntica a la misma. Esta hipótesis incluye el supuesto que el tiempo k que esperaría un hogar para recambiar su equipo es el mismo para todos los hogares de una misma clasificación.

La oferta de subsidio considerada en las simulaciones de este estudio no es completamente flexible. El diseño del subsidio excluye el retiro de cocinas a leña⁶ e incluye una distinción de acuerdo con el ingreso del hogar. Específicamente, la oferta de recambio financiable por subsidio consistirá en el caso de familias con menores ingresos (categorías F1, F2, F3 en la Tabla A-1 del Anexo) en la sustitución del calefactor en uso por una estufa de doble cámara de mejor calidad (tipo D). En el caso de familias de mayores ingresos (F4 y F5 en la Tabla A-1) se ofrece

⁵ En este trabajo hemos calculado las simulaciones utilizando solamente factores de emisión llamados de laboratorio (presentados en la Tabla A-3 del Anexo). Estos factores de emisión se obtienen usualmente por pruebas en condiciones de laboratorio, con un manejo apropiado de los equipos y utilizando leña de buena calidad. En anteriores simulaciones y también en una versión extensa de este trabajo (ver Yep, 2010) se complementan los cálculos utilizando factores de emisiones más “realistas” (ver, por ejemplo, Gómez *et al.*, 2009), que se obtienen incrementando varias veces los de laboratorio y se justifican por la inadecuada manipulación de los equipos de combustión y el uso de leña húmeda en los hogares.

⁶ La restricción sobre el recambio de cocinas pretende reflejar de manera más realista las condiciones del mercado chileno, donde no se dispone de cocinas a leña que acrediten una tecnología más eficiente. En los estudios realizados para diseñar programas de recambio las cocinas a leña usualmente no pueden ser recambiadas por cocinas menos contaminantes (ver los estudios Gómez *et al.*, 2009; Chávez *et al.*, 2010 y 2011).

el subsidio para recambiar por una estufa a pellets (de categoría B)⁷. En ningún caso el hogar podrá disponer del subsidio para elegir el equipo al que prefiere cambiarse, escenario que asemeja el estudio hipotético realizado en Chávez *et al.* (2010), pero que difiera del tipo de oferta de subsidio implementado en la experiencia piloto del estudio Chávez *et al.* (2011)⁸. Los montos a subsidiar en los escenarios considerados son los presentados en la Tabla 1.

TABLA 1
ESCENARIOS CON DIFERENTES NIVELES DE SUBSIDIO,
VARIANDO POR NIVEL SOCIOECONÓMICO^a

| | Subsidios uniformes ^b | | | | Subsidios diferenciados ^b | | | |
|---|----------------------------------|------------|-------------|------------|--------------------------------------|------------|-------------|------------|
| | Escenario 1 | | Escenario 2 | | Escenario 3 | | Escenario 4 | |
| Tipos de hogares por nivel socioeconómico | Equipo “D” | Equipo “B” | Equipo “D” | Equipo “B” | Equipo “D” | Equipo “B” | Equipo “D” | Equipo “B” |
| Hogares tipo 1 (F1) | 20% | | 40% | | 50% | | 0% | |
| Hogares tipo 2 (F2) | 20% | | 40% | | 40% | | 0% | |
| Hogares tipo 3 (F3) | 20% | | 40% | | 30% | | 0% | |
| Hogares tipo 4 (F4) | | 20% | | 40% | | 20% | | 50% |
| Hogares tipo 5 (F5) | | 20% | | 40% | | 10% | | 50% |

Fuente: Elaboración propia.

Notas:

^a Rango de ingresos anuales (F1-F5) en Tabla A-1 de Anexos.

^b Se indican los porcentajes del valor total del equipo a subsidiarse

En los Escenario 1 y Escenario 2 se explora un subsidio uniforme del 20% y 40% del valor total del equipo. En los Escenarios 3 y 4 se explora un subsidio que diferencia el porcentaje de financiamiento de acuerdo con el nivel de ingreso. En el Escenario 3, la idea del subsidio es beneficiar en mayor cuantía a los hogares con menos recursos, en un intento por “suavizar” la disparidad de ingresos. En el Escenario 4 se ofrece un subsidio solo a los hogares con mayores ingresos con el fin de inducirlos a realizar el mayor aporte en la disminución de emisiones futuras (ver Chávez *et al.*, 2011).

⁷ En el diseño de todos los subsidios simulados se ha excluido la posibilidad de subsidiar la compra de equipos muy costosos (por ejemplo a pellets) por parte de hogares de ingresos bajos. Esta condición extra pretende disminuir el incentivo que pueda surgir en hogares de bajos ingresos a comercializar el equipo subsidiado y obtener mayores ingresos de ese activo fijo.

⁸ El estudio de Chávez *et al.* (2010) calculó, basándose en una encuesta de recambio hipotético, la disposición de los hogares a pagar por un recambio tecnológico de estufas. En el estudio Chávez *et al.* (2011) se realizó un experimento piloto de recambios a hogares, parcialmente contactado en el estudio anterior, con el objetivo de evaluar aspectos de diseño y funcionamiento práctico de programas de subsidios al recambio de equipos de combustión a leña.

Para evaluar los beneficios netos de los hogares por la ecuación (2) y modelar la decisión respecto de la oferta de subsidio se consideran los siguientes aspectos:

- Tasa de descuento d igual a 5% anual. Esta es una tasa de descuento privada que se ha calculado a base de la opción más simple de inversión de un hogar, a saber: la tasa a la cual rinde su ahorro en el banco. El valor utilizado es un promedio de las tasas anuales de depósito a plazo en diferentes bancos comerciales del país. Teniendo en cuenta que las tasas de descuento que consideran los hogares al tomar la decisión de recambio pueden ser mayores al 5% propuesto, en la sección 4.5 se realiza un análisis de sensibilidad que involucra este parámetro.
- Información de costos de mercado para los equipos nuevos (ver Tabla A-4).
- El valor residual del equipo actualmente en uso igual a cero. Suponemos, con esto, que el equipo retirado no se puede vender, ya que culminó su período de vida útil, o debido a que existe una normativa que prohíbe su utilización y comercialización.

Un cálculo básico para cuantificar los efectos del recambio es estimar la reducción en el consumo de leña. De acuerdo con el modelo sugerido en la ecuación (1), para calcular la variación en la cantidad de leña consumida por un hogar se requiere primeramente saber la cantidad de energía que el hogar produce en la situación previa al recambio, ya que asumimos que el hogar permanece produciendo la misma cantidad de energía con el nuevo equipo. En este punto se tiene un problema de información con los hogares que poseen varios equipos (en nuestros datos eso se traduce en una cocina y una estufa), ya que se necesita conocer la distribución del consumo del total de la leña entre ambos equipos, tanto para poder estimar la energía total como para calcular las emisiones totales. Existe poca información sobre el patrón que siguen los hogares para distribuir la leña que consumen entre distintos equipos. En nuestras simulaciones asumimos una distribución equitativa (50% en cocina y 50% en estufa)⁹.

Con el consumo de leña para cada equipo que posee un hogar puede calcularse la cantidad de energía que se produce en la situación base, considerando los valores de eficiencia térmica de los equipos en uso (Tabla A-3 del Anexo) y el poder calorífico del combustible leña (Tabla A-4 del Anexo). Los hogares que recambian su equipo necesitarán en general una menor cantidad de leña para producir la misma cantidad de energía que en la situación base. De nuevo podemos basarnos en los valores de eficiencia térmica de los equipos de recambio y el poder calorífico de la leña para resolver la ecuación (1) y obtener la cantidad consumida de leña luego del recambio.

En el caso de los hogares con mayores ingresos, a los que se les ofrece cambiar su equipo de combustión a leña por una estufa a pellets, se calcula de

⁹ Una pequeña muestra de hogares que recambiaron equipos en el marco del reciente estudio (Chávez *et al.*, 2011), da cuenta de una dispersión de magnitud importante de este parámetro, en torno a un promedio de 40% (porción del total de leña usada en la cocina). Un análisis de sensibilidad de este parámetro realizado para proporciones de 40%-60% y 30%-70% (cocina-calefacción) mostró que no hay cambios en las conclusiones extraídas en este estudio sobre la base de las simulaciones numéricas.

manera idéntica la cantidad de energía que se utiliza en la situación base y que se mantiene después del recambio. Sin embargo, los nuevos costos de operación se calculan a base de la energía en la situación previa al recambio, el poder calorífico de los pellets, la eficiencia térmica de la estufa a pellets (Tablas A-3 y A-4 del Anexo) y al precio y cantidad de pellets. En este caso los costos de operación pueden aumentar y generar un gasto adicional producto del recambio tecnológico de un equipo a leña por uno a pellets.

4. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

Esta sección presenta el impacto de los distintos programas de subsidio simulados numéricamente. En primer lugar se muestran los resultados relativos a la disminución en la cantidad de leña consumida. En segundo lugar se exponen los resultados de las estimaciones de reducción de emisiones para los diferentes escenarios. En tercer lugar se contabilizan los diferentes costos asociados a la aplicación del subsidio. En cuarto lugar se muestran los indicadores de costo-efectividad resultantes del ejercicio de simulación numérica realizado. Finalmente, en quinto lugar, se presenta un análisis de sensibilidad de los resultados respecto de parámetros del modelo sujetos a mayor incertidumbre.

4.1. Reducción en el consumo de leña

Presentamos en esta sección el impacto de los subsidios sobre el consumo de leña diferenciando por nivel socioeconómico.

Resalta claramente de los resultados en la Tabla 2 que al introducir una norma se incrementa el impacto de los subsidios sobre la reducción del consumo de leña, pero que este efecto tiende a amortiguarse si la norma no induce una reducción en los plazos para el recambio natural considerado por los hogares.

Otro aspecto llamativo es que el efecto que tiene el diseño del subsidio sobre la reducción en el consumo de leña es mucho más marcado en el caso que se tiene una norma. Se observa en general que un aumento de los subsidios a los hogares de mayores ingresos (F4-F5) genera un impacto importante. Este efecto se debe en parte a que los hogares de estos grupos de ingreso recambian estufas a leña por estufas a pellets (ver Tabla 1) y dejan de utilizar leña.

Si nos concentramos en el análisis de los hogares de menores ingresos (F1-F3) notamos que el impacto del diseño de los programas sobre el consumo de leña es relativamente bajo y se logra con subsidios inferiores.

El consumo total de leña asciende a 392.541 toneladas anuales, por lo que el escenario más optimista de reducción de 77.809 ton logra un impacto de disminución en el consumo de 21%, aproximadamente. Considerando que los hogares que cuentan solo con una cocina a leña no reciben ninguna oferta de recambio y consumen 24% (95.055 ton) del total de leña, podemos tomar alternativamente como punto de comparación un consumo de 297.486 toneladas anuales. Sobre esa perspectiva, el impacto logrado en el caso más optimista aumenta, y llega a representar una reducción del consumo de leña del 26%, que es todavía relativamente bajo.

Nuestros cálculos dan cuenta entonces que la reducción del consumo de leña tiende a ser limitada, lo que se relaciona con la exclusión del recambio

TABLA 2
REDUCCIÓN EN EL CONSUMO DE LEÑA EN TONELADAS POR AÑO POR TIPO DE SUBSIDIO SEGÚN NIVEL SOCIOECONÓMICO^a

| Nivel socio-económico | Subsidios uniformes | | | | | |
|-----------------------|---|---------------------|--------------------|----------------------------------|---------------------|--------------------|
| | Escenario 1: Subsidio del 20% | | | Escenario 2: Subsidio del 40% | | |
| | Sin norma | Con norma (k = 3-4) | Con norma (k = 10) | Sin norma | Con norma (k = 3-4) | Con norma (k = 10) |
| F1-F3b | 0 | 135 | 559 | 432 | 135 | 559 |
| F4-F5b | 92 | 14.504 | 5.272 | 806 | 33.227 | 14.434 |
| Total ^b | 92 | 14.638 | 5.832 | 1.238 | 33.362 | 14.994 |
| | Subsidios diferenciados | | | | | |
| Nivel socio-económico | Escenario 3: Subsidio 50% F1, 40% F2, 30% F3, 20% F4 y 10% F5 | | | | | |
| | Sin norma | Con norma (k = 3-4) | Con norma (k = 10) | Sin norma | Con norma (k = 3-4) | Con norma (k = 10) |
| | F1-F3b | 425 | 135 | 559 | 0 | 0 |
| F4-F5b | 0 | 14.504 | 806 | 806 | 77.809 | 14.697 |
| Total ^b | 425 | 14.638 | 1.366 | 806 | 77.809 | 14.697 |
| Nivel socio-económico | Escenario 4: Subsidio 50% F4 y 50% F5 | | | | | |
| | Sin norma | Con norma (k = 3-4) | Con norma (k = 10) | Sin norma | Con norma (k = 3-4) | Con norma (k = 10) |
| | F1-F3b | 425 | 135 | 559 | 0 | 0 |
| F4-F5b | 0 | 14.504 | 806 | 806 | 77.809 | 14.697 |
| Total ^b | 425 | 14.638 | 1.366 | 806 | 77.809 | 14.697 |

Fuente: Elaboración propia.

Notas:

^a Rango de ingresos anuales (F1-F5) en Tabla A-1 de Anexos.

^b Los cálculos para la reducción en consumo de leña consideran solo a los hogares que cambian su equipo de combustión a causa del subsidio, esto es, excluyendo a los hogares que cambiarían su equipo aun con subsidio igual a cero.

de las cocinas a leña y el supuesto del acceso al financiamiento, que implica recambios a subsidio nulo.

4.2. Impacto sobre las emisiones

Para el problema de contaminación estudiado el impacto más relevante no es sobre el consumo de leña, sino sobre las emisiones de material particulado. El impacto sobre las emisiones, para cada escenario y cada caso, fue calculado utilizando la expresión (8) a base de los factores de emisión de la Tabla A-3 del Anexo. Para simplificar la exposición se presentan y discuten solo los impactos totales y no los impactos desglosados por nivel socioeconómico.

Como puede observarse de la Tabla 3 se obtienen tendencias similares al caso de reducción del consumo de leña, pues el nivel de emisiones ciertamente se relaciona con la cantidad de leña usada. Por ejemplo, puede notarse que, en general, los Escenarios 2 y 4 logran el mayor impacto en reducción de emisiones. Estos Escenarios 2 y 4 (ver Tabla 1) son los que entregan subsidios relativamente altos a los hogares de mayores ingresos (F4-F5), por lo que puede concluirse una recomendación general de no excluir a los hogares de ingresos mayores de los programas de subsidios al recambio para reducir emisiones.

Las emisiones totales sin programa de subsidio ascienden a 4.115 toneladas anuales de MP10, por lo que el escenario más optimista alcanza a reducir las emisiones en 12%. Si excluimos del análisis los hogares que poseen solo una cocina a leña y que generan 46,2% de las emisiones totales (1.901 toneladas anuales), el escenario más optimista logra una reducción de 23% de las emisiones base.

Hay dos lecturas claras de estos resultados de emisiones para distintas situaciones base. Por una parte, se muestra obviamente la necesidad de buscar y ofrecer una alternativa de recambio eficiente a los hogares que utilizan solo una cocina a leña. Por la otra parte, se nota que el impacto de los subsidios sobre la reducción de emisiones puede ser muy significativo, y acrecentarse, sobre todo cuando se acompaña de una normativa de emisiones para los equipos a leña que contenga una prohibición a mediano plazo al uso de equipos antiguos.

4.3. Costos de los programas de subsidio

Los costos de los programas de recambio simulados son presentados siguiendo las metodologías propuestas en la sección 3.2, a saber: costos para el regulador (ecuación 9), costos privados (ecuación 10) y costos netos (ecuación 11).

Los costos netos tienen en general una magnitud inferior a los costos del regulador o privados. Esto se debe a que se sustraen los beneficios que reciben los hogares por adelantar el recambio.

Desde el punto de vista del regulador y también privado, el diseño de subsidio de los Escenarios 1 y 3 implican en general menores costos y el del Escenario 4 los costos más grandes. Los costos netos de los programas tienden a ser también mayores para diseños de subsidios más altos (Escenarios 3 y 4).

El comportamiento de los costos tanto del regulador como privados y netos para distintos marcos regulatorios dentro de un mismo escenario sigue prácticamente el mismo patrón. Por una parte, el costo en el caso sin norma es comparativamente moderado; y por la otra, el costo se explota al considerar una

TABLA 3
REDUCCIÓN DE EMISIONES EN TONELADAS POR AÑO^a

| Subsidios uniformes | | | | | | | | | |
|-------------------------|--|---------------------|--------------------|----------------------------------|-----------|---------------------|--|--------------------|--|
| Reducción de emisiones | Escenario 1: Subsidio del 20% | | | Escenario 2: Subsidio del 40% | | | | | |
| | Sin norma | Con norma (k = 3-4) | Con norma (k = 10) | Con norma (k = 15) | Sin norma | Con norma (k = 3-4) | Con norma (k = 10) | Con norma (k = 15) | |
| Atribuibles a subsidio | 1 | 106 | 71 | 21 | 21 | 264 | 122 | 119 | |
| Subsidios diferenciados | | | | | | | | | |
| Reducción de emisiones | Escenario 3: Subsidio 50% F1, 40% F2, 30% F3, 20% F4 y 10% F5 | | | | | | Escenario 4: Subsidio 50% F4 y 50% F5 | | |
| | Sin norma | Con norma (k = 3-4) | Con norma (k = 10) | Con norma (k = 15) | Sin norma | Con norma (k = 3-4) | Con norma (k = 10) | Con norma (k = 15) | |
| Atribuibles a subsidio | 17 | 106 | 26 | 26 | 4 | 508 | 102 | 99 | |

Fuente: Elaboración propia.

Nota:

^a Rango de ingresos anuales (F1-F5) en Tabla A-1 de Anexos. Los factores de emisión utilizados se muestran en la Tabla A-3 del Anexo.

TABLA 4
COSTOS INVOLUCRADOS EN EL PROGRAMA DE RECAMBIO EN MILLONES DE PESOS^a

| Subsidios uniformes | | | | | | | | |
|-------------------------|--|---------------------|--------------------|--|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Costos | Escenario 1: Subsidio del 20% | | | Escenario 2: Subsidio del 40% | | | | |
| | Sin norma | Con norma (k = 3-4) | Con norma (k = 10) | Sin norma | Con norma (k = 3-4) | Con norma (k = 10) | Con norma (k = 15) | Con norma (k = 15) |
| Regulador | 49 | 2.260 | 1.298 | 602 | 6.346 | 5.033 | 4.799 | 4.799 |
| Privados | 195 | 9.039 | 5.191 | 2.410 | 9.518 | 7.549 | 7.199 | 7.199 |
| Netos | 38 | 812 | 862 | 310 | 2.104 | 2.599 | 3.297 | 3.297 |
| Subsidios diferenciados | | | | | | | | |
| Costos | Escenario 3: Subsidio 50% F1, 4 0% F2, 30% F3, 20% F4 y 10% F5 | | | Escenario 4: Subsidio 50% F4 y 50% F5 | | | | |
| | Sin norma | Con norma (k = 3-4) | Con norma (k = 10) | Sin norma | Con norma (k = 3-4) | Con norma (k = 10) | Con norma (k = 15) | Con norma (k = 15) |
| Regulador | 381 | 1.634 | 866 | 1.073 | 12.195 | 5.643 | 5.604 | 5.604 |
| Privados | 464 | 9.665 | 2.654 | 1.073 | 12.162 | 5.643 | 5.604 | 5.604 |
| Netos | 176 | 812 | 294 | 515 | 5.918 | 2.492 | 3.376 | 3.376 |

Fuente: Elaboración propia.

Nota:

^a Rango de ingresos anuales (F1-F5) en Tabla A-1 de Anexos.

norma, especialmente con plazos cortos para el uso de equipos antiguos y se va amortiguando en tanto el tiempo de uso permitido de los equipos antiguos se incrementa.

4.4. Indicadores de Costo-efectividad

Los indicadores de costo-efectividad presentados en la Tabla 5 fueron contruidos a base de la metodología discutida en la sección 3.2, a saber: indicadores basados en costos para el regulador (ecuación 12), en costos privados (ecuación 13) y costos netos (ecuación 14).

Desde el punto de vista del regulador, los indicadores de costo-efectividad indican, en general, que la estrategia correcta es un subsidio uniforme bajo (“Escenario 1”) o diferenciado que favorezca a hogares de bajos ingresos (“Escenario 3”). Mirado desde la perspectiva privada, es favorable, en general, el Escenario 4. Finalmente, el análisis costo-efectividad basado en los costos netos indica claramente que el subsidio diferenciado del Escenario 3 es el diseño recomendado.

4.5. Análisis de Sensibilidad

En esta sección se presentan los resultados de las simulaciones del análisis de sensibilidad. Los parámetros principales sobre los que se basa el modelo y las simulaciones presentadas previamente son: (i) factores de emisión y eficiencia térmica de equipos a combustión considerados para el recambio, (ii) precios de equipos a combustión, (iii) tiempo de uso restante asignado por los hogares a sus equipos antiguos, (iv) precio de la leña, y (v) tasa de descuento.

Naturalmente, alteraciones en cada uno de los parámetros antes referidos pueden causar cambios en los resultados de los ejercicios de simulación numérica (así lo sugieren los resultados discutidos cuando, por ejemplo, alteramos el tiempo de uso restante asignado por los hogares a sus equipos antiguos). Sin embargo, el nivel de realismo de los parámetros puede variar dependiendo de la naturaleza de los mismos. Los parámetros asociados a las características técnicas de los equipos (emisión, eficiencia energética) son conocidos en el sentido que corresponde a información provista por los proveedores de los mismos. De manera similar, la información sobre precio de leña es también conocida, al estar la misma basada en observaciones de transacciones reales en la zona de estudio.

Existe un parámetro clave sobre el que tenemos mayor incertidumbre en cuanto a la capacidad del mismo de representar adecuadamente la realidad. El referido parámetro corresponde a la tasa de descuento de los hogares. Considerando esta incertidumbre, procedimos a realizar análisis de sensibilidad del efecto de variaciones del parámetro sobre los resultados. Los análisis numéricos implementados consideran dos posibilidades. Primero, tasas de descuento más altas que en el escenario base, de carácter uniforme entre hogares. Segundo, hemos considerado también tasas de descuento diferenciadas entre hogares, suponiendo niveles más altos para hogares pobres que para hogares de altos ingresos. Específicamente, mientras en el primer caso consideramos una tasa uniforme de 7%, en un segundo ejercicio consideramos una tasa diferenciada por nivel socioeconómico. Este ejercicio supone que los grupos de hogares de

TABLA 5
INDICADORES DE COSTO-EFECTIVIDAD^a
(MILLONES DE PESOS POR TONELADA DE MP10)

| Subsidios uniformes | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|---|---------------------|--------------------|--|-----------|---------------------|--|-----------|---------------------|--|--------------------|--|
| Costos | Escenario 1: Subsidio del 20% | | | Escenario 2: Subsidio del 40% | | | Escenario 3: Subsidio 50% F1, 4 0% F2, 30% F3, 20% F4 y 10% F5 | | | Escenario 4: Subsidio 50% F4 y 50% F5 | | |
| | Sin norma | Con norma (k = 3-4) | Con norma (k = 10) | Con norma (k = 15) | Sin norma | Con norma (k = 3-4) | Con norma (k = 10) | Sin norma | Con norma (k = 3-4) | Con norma (k = 10) | Con norma (k = 15) | |
| Regulador | 53,84 | 21,36 | 18,40 | 28,42 | 56,84 | 24,04 | 41,21 | 300,98 | 23,99 | 55,40 | 56,46 | |
| Privados | 215,38 | 85,43 | 73,59 | 113,69 | 85,27 | 36,06 | 61,82 | 300,98 | 23,92 | 55,40 | 56,46 | |
| Netos | 41,75 | 7,68 | 12,21 | 14,62 | 32,99 | 7,97 | 21,28 | 144,45 | 11,64 | 24,46 | 34,01 | |
| Subsidios diferenciados | | | | | | | | | | | | |
| Costos | Escenario 3: Subsidio 50% F1, 4 0% F2, 30% F3, 20% F4 y 10% F5 <td colspan="3">Escenario 4: Subsidio 50% F4 y 50% F5 <td colspan="3">Escenario 3: Subsidio 50% F1, 4 0% F2, 30% F3, 20% F4 y 10% F5 <td colspan="3">Escenario 4: Subsidio 50% F4 y 50% F5 </td></td></td> | | | Escenario 4: Subsidio 50% F4 y 50% F5 <td colspan="3">Escenario 3: Subsidio 50% F1, 4 0% F2, 30% F3, 20% F4 y 10% F5 <td colspan="3">Escenario 4: Subsidio 50% F4 y 50% F5 </td></td> | | | Escenario 3: Subsidio 50% F1, 4 0% F2, 30% F3, 20% F4 y 10% F5 <td colspan="3">Escenario 4: Subsidio 50% F4 y 50% F5 </td> | | | Escenario 4: Subsidio 50% F4 y 50% F5 | | |
| | Sin norma | Con norma (k = 3-4) | Con norma (k = 10) | Con norma (k = 15) | Sin norma | Con norma (k = 3-4) | Con norma (k = 10) | Sin norma | Con norma (k = 3-4) | Con norma (k = 10) | Con norma (k = 15) | |
| Regulador | 21,88 | 15,44 | 32,76 | 31,58 | 300,98 | 23,99 | 55,40 | 300,98 | 23,92 | 55,40 | 56,46 | |
| Privados | 26,68 | 91,35 | 100,45 | 84,97 | 300,98 | 23,92 | 55,40 | 300,98 | 23,92 | 55,40 | 56,46 | |
| Netos | 10,11 | 7,68 | 11,11 | 14,61 | 144,45 | 11,64 | 24,46 | 144,45 | 11,64 | 24,46 | 34,01 | |

Fuente: Elaboración propia.

Nota:

^a Rango de ingresos anuales (F1-F5) en Tabla A-1 de Anexos.

bajos ingresos (F1, F2, y F3) poseen una tasa de descuento de 12%, en tanto que los grupos de más altos ingresos poseen una tasa de descuento de 9%.¹⁰

Si consideramos primeramente una tasa de descuento uniforme de 7% para todos los niveles de ingreso obtenemos una reducción del consumo de leña agregado según ingreso presentada en la siguiente Tabla 6.

Las observaciones realizadas a base de la Tabla 2 (similar a la Tabla 6, pero con otra tasa de interés) sobre las tendencias relativas en la reducción del consumo de leña siguen siendo válidas para los resultados con una tasa de interés mayor. Para el grupo de hogares de menores ingresos (F1-F3) los montos de reducción neta del consumo presentan variaciones significativas en los escenarios con subsidios para estos grupos (Escenarios 1-3) respecto de los resultados con tasa de descuento de 5%.

En el caso de hogares con mayores ingresos (F4-F5) se siguen observando diferencias al considerar distintos diseños de subsidio, o al comparar los casos con y sin norma. Finalmente se destaca para este grupo (F4-F5) el impacto de considerar una tasa de descuento de 7% en vez de 5%, en tanto el monto de la reducción neta en el consumo de leña se reduce en general de manera notable.

En la Tabla 7 se presentan las reducciones en el consumo de leña para el caso de tasas de interés mayores y diferenciadas entre grupos de ingresos (12% para hogares de ingresos menores F1-F3, y 9% para hogares de mayores ingresos, F4-F5). Primeramente se destaca que las reducciones en el consumo de leña van rápidamente hacia cero para los grupos de mayores ingresos, a pesar que solo se incrementó el interés en 2 puntos porcentuales. Algo distinto ocurre con los hogares de ingresos más bajos, que mantienen niveles de reducción de consumo similares a los ya observados, a pesar de la alta tasa de descuento considerada (12%). En experimentos realizados, pero que no presentamos, se pudo observar que los montos de reducción de consumo de leña asociados a hogares de menores ingresos comienzan a decaer significativamente, o a diferenciarse de manera importante según el diseño del subsidio, a partir de un umbral para la tasa de descuento sumamente alto y superior al 30%.

La Tabla 8 detalla el impacto que tiene el aumento de las tasas de descuento sobre la reducción en las emisiones. Se nota que para tasas altas los impactos netos en reducción de emisiones disminuyen significativamente. La tendencia observada en la situación base que relaciona la introducción de la norma con una mayor reducción y una disminución paulatina de la reducción en tanto aumenta el tiempo restante para el recambio natural se mantiene intacta al aumentar la tasa de descuento. En tal sentido este resultado es estable respecto de la tasa de descuento considerada por los hogares.

La Tabla 9 muestra los indicadores de costo efectividad para mayores tasas de descuento concentrándose en el caso de costos netos. Se observa en general que excepto para el diseño del Escenario 3, los indicadores de costo-efectividad tienden a aumentar respecto de los resultados con una tasa de interés de 5% (Tabla 5). Sin embargo el resultado comparativo se mantiene idéntico, en tanto el subsidio diferenciado del Escenario 3 sigue siendo el diseño recomendable.

¹⁰ Experimentamos también con tasas de descuento razonablemente más altas para grupos de menores ingresos, sin embargo, no existen cambios significativos en los resultados.

TABLA 6
REDUCCIÓN EN EL CONSUMO DE LEÑA EN TONELADAS POR AÑO POR TIPO DE SUBSIDIO SEGÚN NIVEL SOCIOECONÓMICO^a
 (Tasa de interés uniforme 7%)

| Rango de nivel socio-económico | Subsidios uniformes | | | | | |
|--------------------------------|---|------------------------|-----------------------|----------------------------------|------------------------|-----------------------|
| | Escenario 1: Subsidio del 20% | | | Escenario 2: Subsidio del 40% | | |
| | Sin norma | Con norma (k = 3-4) | Con norma (k = 10) | Sin norma | Con norma (k = 3-4) | Con norma (k = 10) |
| F1-F3 ^b | 0 | 600 | 465 | 41 | 600 | 600 |
| F4-F5 ^b | 0 | 13.556 | 194 | 92 | 28.658 | 13.556 |
| Total ^b | 0 | 14.156 | 659 | 132 | 29.258 | 14.156 |
| Subsidios diferenciados | | | | | | |
| Rango de nivel socio-económico | Escenario 3: Subsidio 50% F1, 40% F2, 30% F3, 20% F4 y 10% F5 | | | | | |
| | Sin norma | Con norma (k = 3-4) | Con norma (k = 10) | Sin norma | Con norma (k = 3-4) | Con norma (k = 10) |
| | 255 | 600 | 473 | 0 | 0 | 0 |
| F1-F3 ^b | 0 | 4.122 | 0 | 806 | 78.003 | 14.434 |
| F4-F5 ^b | 255 | 4.722 | 473 | 806 | 78.003 | 14.434 |
| Total ^b | | | 465 | | | 5.272 |
| | | | 465 | | | 5.272 |

Fuente: Elaboración propia.

Notas:

^a Rango de ingresos anuales (F1-F5) en Tabla A-1 de Anexos.

^b Los cálculos para la reducción en consumo de leña en este caso consideran solo a los hogares que cambian su equipo de combustión a causa del subsidio, esto es, excluyendo a los hogares que cambiarían su equipo aun con subsidio igual a cero.

TABLA 7
REDUCCIÓN EN EL CONSUMO DE LEÑA EN TONELADAS POR AÑO POR TIPO DE SUBSIDIO SEGÚN NIVEL SOCIOECONÓMICO^a
 (Tasa de interés diferenciada 12%-9%)

| Rango de nivel socio-económico | Subsidios uniformes | | | | | | |
|--------------------------------|---|------------------------|-----------------------|--|-----------|-----------------------|-----------------------|
| | Escenario 1: Subsidio del 20% | | | Escenario 2: Subsidio del 40% | | | |
| | Sin norma | Con norma (k = 3-4) | Con norma (k = 10) | Con norma (k = 15) | Sin norma | Con norma (k = 10) | Con norma (k = 15) |
| F1-F3 ^b | 0 | 483 | 0 | 0 | 10 | 610 | 10 |
| F4-F5 ^b | 0 | 13.556 | 0 | 0 | 0 | 27.935 | 806 |
| Total ^b | 0 | 14.039 | 0 | 0 | 10 | 28.546 | 857 |
| | Subsidios diferenciados | | | | | | |
| Rango de nivel socio-económico | Escenario 3: Subsidio 50% F1, 40% F2, 30% F3, 20% F4 y 10% F5 | | | Escenario 4: Subsidio 50% F4 y 50% F5 | | | |
| | Sin norma | Con norma (k = 3-4) | Con norma (k = 10) | Con norma (k = 15) | Sin norma | Con norma (k = 10) | Con norma (k = 15) |
| | | | | | | | |
| F1-F3 ^b | 10 | 610 | 266 | 10 | 0 | 0 | 0 |
| F4-F5 ^b | 0 | 3.928 | 0 | 0 | 0 | 33.421 | 806 |
| Total ^b | 10 | 4.539 | 266 | 10 | 0 | 33.421 | 806 |

Fuente: Elaboración propia.

Notas:

^a Rango de ingresos anuales (F1-F5) en Tabla A-1 de Anexos.

^b Los cálculos para la reducción en consumo de leña en este caso consideran solo a los hogares que cambian su equipo de combustión a causa del subsidio, esto es, excluyendo a los hogares que cambiarían su equipo aun con subsidio igual a cero.

TABLA 8
REDUCCIÓN DE EMISIONES NETAS EN TONELADAS POR AÑO^a

| Subsidios uniformes | | | | | | | | |
|-------------------------|---|------------------------|-----------------------|--|-----------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Tasa de interés | Escenario 1: Subsidio del 20% | | | Escenario 2: Subsidio del 40% | | | | |
| | Sin norma | Con norma (k = 3-4) | Con norma (k = 10) | Con norma (k = 15) | Sin norma | Con norma (k = 3-4) | Con norma (k = 10) | Con norma (k = 15) |
| 7% (F1-F5) | 0 | 120 | 20 | 1 | 2 | 256 | 120 | 28 |
| 12% (F1-F3) | 0 | 116 | 0 | 0 | 0 | 254 | 5 | 2 |
| 9% (F4-F5) | | | | | | | | |
| Subsidios diferenciados | | | | | | | | |
| Tasa de interés | Escenario 3: Subsidio 50% F1, 40% F2, 30% F3, 20% F4 y 10% F5 | | | Escenario 4: Subsidio 50% F4 y 50% F5 | | | | |
| | Sin norma | Con norma (k = 3-4) | Con norma (k = 10) | Con norma (k = 15) | Sin norma | Con norma (k = 3-4) | Con norma (k = 10) | Con norma (k = 15) |
| 7% (F1-F5) | 10 | 47 | 19 | 19 | 4 | 510 | 99 | 48 |
| 12% (F1-F3) | 0 | 47 | 10 | 0 | 0 | 260 | 96 | 4 |
| 9% (F4-F5) | | | | | | | | |

Fuente: Elaboración propia.

Nota:

^a Rango de ingresos anuales (F1-F5) en Tabla A-1 de Anexos. Los factores de emisión utilizados se muestran en la Tabla A-3 del Anexo.

TABLA 9
INDICADORES DE COSTO-EFECTIVIDAD
 (Costos netos en millones de pesos por tonelada de MP10)^a

| Interés | Subsidios uniformes | | | | | | | |
|---------------------------|--|------------------------|-----------------------|--|-----------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Escenario 1: Subsidio del 20% | | | Escenario 2: Subsidio del 40% | | | | |
| | Sin norma | Con norma (k = 3-4) | Con norma (k = 10) | Con norma (k = 15) | Sin norma | Con norma (k = 3-4) | Con norma (k = 10) | Con norma (k = 15) |
| 7% (F1-F5) | - | 10,92 | 12,84 | 7,42 | 51,34 | 9,97 | 31,89 | 36,83 |
| 12% (F1-F3) 9% (F4-F5) | - | 16,25 | - | - | 9,17 | 12,98 | 131,19 | 100,49 |
| | Subsidios diferenciados | | | | | | | |
| Costos | Escenario 3: Subsidio 50% F1, 4 0% F2, 30% F3, 20% F4 y 10% F5 | | | Escenario 4: Subsidio 50% F4 y 50% F5 | | | | |
| | Sin norma | Con norma (k = 3-4) | Con norma (k = 10) | Con norma (k = 15) | Sin norma | Con norma (k = 3-4) | Con norma (k = 10) | Con norma (k = 15) |
| | 7% (F1-F5) | 19,63 | 11,73 | 9,11 | 12,12 | 268,94 | 13,92 | 38,18 |
| 12% (F1-F3) 9% (F4-F5) | 9,17 | 18,38 | 19,72 | 7,21 | - | 13,83 | 47,31 | 239,30 |

Fuente: Elaboración propia.

Nota:

^a Rango de ingresos anuales (F1-F5) en Tabla A-1 de Anexos.

Finalmente, mientras que en nuestro análisis las familias pueden elegir o ser inducidas a elegir un determinado tipo de tecnología mediante el subsidio, restricciones de liquidez pueden hacer tales decisiones difíciles o imposibles para algunas familias. En los estudios de Chávez *et al.* (2010 y 2011) se observó, mediante encuestas a hogares, que estos condicionaban fuertemente su aceptación del subsidio de recambio a la posibilidad de pagar los aportes propios en cuotas. Esto último se debió en lo principal a que el acceso al financiamiento del aporte propio del hogar era inexistente, o a tasas de endeudamiento altas provenientes de créditos de tiendas del retail, u otras fuentes.

Motivados por la evidencia antes referida, desarrollamos también ejercicios de simulación numérica incorporando de manera explícita en el análisis el problema de acceso al crédito con altos costos financieros. Con tal propósito, una versión modificada de la ecuación (2) fue considerada corrigiendo el primer término de la expresión por la tasa a la que se pueden endeudar por un año los hogares para financiar el costo del equipo no cubierto por el subsidio.¹¹ Las simulaciones realizadas consideraron tanto una tasa de interés por endeudamiento uniforme de 30% anual como también una tasa diferenciada por nivel socioeconómico, la que ascendió a 30% para grupos socioeconómicos F1, F2 y F3 y de 15% para grupos F4 y F5. Debido a que los resultados no muestran variaciones significativas respecto de aquellos obtenidos en las simulaciones que consideran tasas de descuento más altas que el escenario base, hemos decidido no presentar los resultados. El mensaje central que surge de estos análisis es que tasas de descuento más altas y/o restricciones de acceso al crédito que involucran tasa de endeudamiento altas para los hogares tienden a generar efectos relativamente similares.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó el uso de un subsidio orientado a incentivar el recambio de equipos de combustión de leña en las comunas de Temuco y Padre Las Casas, ubicadas en la Región de La Araucanía. El objetivo del recambio es controlar el problema de contaminación atmosférica, fenómeno relevante en varias ciudades del centro sur de Chile producto del uso de la leña como combustible en los hogares.

Un aspecto central de nuestro análisis es la modelación de la reacción de los hogares ante una oferta concreta de subsidio para recambiar su equipo de combustión a leña. A base del modelo propuesto se realizan simulaciones numéricas para distintos diseños del programa de subsidios y para diferentes marcos regulatorios, respecto de la existencia de normativas para el uso y comercio de

¹¹ La versión revisada de la ecuación (2) que incluye el costo de endeudarse es la siguiente:

$$BN_{r,j}^{i,k}(Sub_t) = - \left[(Inv_r^0 - Sub_t) - \frac{Inv_r^k}{(1+d)^k} \right] (1+w) + \sum_{t=0}^k \frac{\Delta CM_{r,j}^t}{(1+d)^t} + \sum_{t=0}^k \frac{\Delta CO_{r,j}^t}{(1+d)^t} \quad , \text{ donde } w \text{ es la tasa de}$$

interés que enfrentan los hogares. La tasa de interés de 30% utilizada corresponde de manera aproximada a tasas consideradas por tiendas de retail que venden equipos de combustión a leña para hogares.

combustión a leña en hogares. Se calcularon en las simulaciones los impactos sobre las emisiones generadas y los costos privados, sociales y del regulador. Finalmente se obtuvieron indicadores de costo-efectividad para cada escenario simulado.

Los resultados obtenidos muestran que mientras exista un “plazo máximo” o una intención de los hogares por cambiar su equipo actual de combustión a leña, incluso aunque no haya un subsidio de por medio, algunos hogares van a preferir la opción de cambiar de equipo ahora y beneficiarse del subsidio, a la opción alternativa de esperar a que se venza el plazo en el que pensaban cambiarse de equipo y hacerlo sin ayuda del subsidio. Se observa que con bajos porcentajes de subsidio los hogares de menores ingresos responden positivamente a la posibilidad de adelantar el recambio de su estufa a leña. Los hogares de mayores ingresos necesitan en general un porcentaje mayor de subsidio para reaccionar al incentivo y cambiar su equipo actual por el equipo sugerido (estufa a pellets).

Los escenarios propuestos obviamente pueden generar dificultades al momento de aplicarlos en la realidad. Por ejemplo, un subsidio diferenciado es mucho más complejo de instituir que un subsidio uniforme, debido a que la gestión y fiscalización es más difícil, además de que se pueden generar discusiones políticas y sociales por beneficiar más a un sector de la población que a otro. Un problema importante que no se abordó es el diseño de una oferta de recambio para hogares que tienen solamente una cocina a leña, para lo que aún no se tiene una estrategia real fiable.

Una hipótesis importante en nuestro modelo es que los hogares tienen liquidez suficiente para enfrentar el aporte propio involucrado en la adquisición de un equipo nuevo. Según nuestro modelo, si luego de evaluar la decisión de recambiar, el hogar obtiene un beneficio neto esperado positivo, entonces realiza el recambio, con lo que asumimos implícitamente que puede conseguir financiamiento para concretar el mismo. Ante la aplicación de este instrumento económico, podrían investigarse las opciones de financiamiento a disposición de los hogares.

Otro aspecto que no se limita en este trabajo es la inversión por parte del Estado en los subsidios. No es posible esperar que la aplicación de este instrumento económico cuente con fondos ilimitados, sino que anualmente el Estado destinará solo una parte de su presupuesto para el recambio. Como una alternativa para financiar la aplicación de subsidios, podría sugerirse la implementación de un impuesto a la leña de forma paralela, que generaría ingresos para el Estado y aliviaría el problema de fondos limitados.

A pesar de las limitaciones del modelo implementado, las simulaciones realizadas permiten hacer una lectura importante sobre el rol que juegan distintos aspectos regulatorios y de diseño sobre la efectividad de un programa de recambio. Un diseño como en el Escenario 3 (subsidio diferenciado que cubra todos los estratos y ofrece mayor porcentaje de subsidio para hogares de menores ingresos) parece ser la opción más costo-efectiva desde el punto de vista de los efectos netos del programa.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo brindado a esta investigación por Conicyt-Chile mediante el Proyecto Fondecyt Regular N° 1080287, y por la Iniciativa Científica Milenio a través del Núcleo de Investigación en Economía Ambiental y de Recursos Naturales, ICM NS 100007. Agradecemos también a un evaluador anónimo de Estudios de Economía por los detallados y útiles comentarios y sugerencias.

REFERENCIAS

- Ambiente Consultores - CONAMA (2006). “Análisis técnico-económico de la aplicación de una norma de emisión para artefactos de uso residencial que combustionan con leña y otros combustibles de biomasa”.
- Chávez, C., W. Gómez y S. Briceño (2009). “Costo-Efectividad de instrumentos económicos para el control de la contaminación por uso de leña: Análisis para Temuco y Padre Las Casas”, *Cuadernos de Economía*, Vol. 46 (Noviembre); 197-224.
- Chávez, C., W. Gómez, S. Suanes y S. Briceño (2008). “Diseño y Evaluación de Instrumentos Económicos para apoyar la producción, comercialización y uso de leña seca”, Informe Final. Proyecto/Adquisición N° 1285-34-A107.
- Chávez, C., W. Gómez, H. Salgado y F. Vásquez (2010). “Elasticidad precio-demanda de equipos que combustionan leña en las comunas de Temuco y Padre Las Casas”, Informe Final, Proyecto/Adquisición N° 1285-20-LE09.
- Chávez, C., Gómez, W., Salgado, H. y Vásquez, F. (2011) “Diseño, Implementación y Evaluación de un Programa Piloto de Recambio de Actuales Tecnologías Residenciales de Combustión a Leña por Tecnologías Mejoradas, en las Comunas de Temuco y Padre Las Casas”, Informe Final.
- Chávez, C., J. Stranlund y W. Gómez (2011). “Controlling Urban Air Pollution Caused by Households: Uncertainty, Prices, and Income”, *Journal of Environmental Management*, Vol. 92 (N° 10); 2746-2753.
- CONAMA (2007). “Anteproyecto de norma de emisión para artefactos de uso residencial que combustionen leña u otros combustibles de biomasa”, Resolución Exenta N° 1267, Comisión Nacional del Medio Ambiente.
- ECAN (2009). “Environment Canterbury Annual Report 2008/2009”, Christchurch, New Zealand.
- Gómez-Lobo, A. (2005). “El consumo de leña en el sur de Chile: ¿Por qué nos debe preocupar y qué se puede hacer?”, *Revista Ambiente y Desarrollo*, N° 21, (3); 43-47.
- Gómez, W., C. Chávez, Y. Mendoza, S. Briceño, R. Garcés (2009). “Diseño de un programa de recambio de artefactos existentes que combustionan leña por tecnología menos contaminante, en las comunas de Temuco y Padre Las Casas”, Informe Final. Proyecto/Adquisición N° 1285-11014-CO08.
- Shortle, J. y R. Horan (2001). “The economics of nonpoint pollution control”. *Journal of Economic Surveys* 115 (3). 255-289.
- Yep, S. (2010). “Análisis de instrumentos económicos para el control de la contaminación atmosférica producida por la combustión de leña: Una

simulación para el caso de Temuco y Padre Las Casas”, Tesis presentada en el programa Magíster en Economía de Recursos Naturales y del Medio Ambiente, Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas, Universidad de Concepción.

PDA (2009). “Plan de Descontaminación Atmosférica de Temuco y Padre Las Casas”, Decreto Supremo N° 78 / 2009 Minsegespres, publicado en el Diario Oficial en junio 2010.

Wittmann, T. (2008). *Agent-based models of energy investment decisions*, Physica Verlag, Heidelberg.

ANEXO

TABLA A-1
CLASIFICACIÓN DE LOS HOGARES SEGÚN SU NIVEL DE INGRESO ANUAL

| Clasificación | Rango de ingreso anual en UF* |
|---------------|-------------------------------|
| F1 | Menos de 13,31 UF |
| F2 | Entre 13,31 y 20,23 UF |
| F3 | Entre 20,23 y 34,60 UF |
| F4 | Entre 34,60 y 53, 23 UF |
| F5 | Más de 53, 23 UF |

Fuente: Elaboración Propia basada en la distribución de Gómez *et al.* (2009).

* Valor de UF: \$ 21.500.

TABLA A-2
CLASIFICACIÓN DE LOS HOGARES SEGÚN SU NIVEL DE
CONSUMO ANUAL DE LEÑA

| Clasificación | Rango de consumo anual de leña en kg |
|---------------|--------------------------------------|
| C1 | Menos de 900 kg |
| C2 | Entre 901 y 2700 kg |
| C3 | Entre 2701 y 5400 kg |
| C4 | Entre 5401 y 8100 kg |
| C5 | Más de 8100 kg |

Fuente: Elaboración propia basada en la distribución de Gómez *et al.* (2009).

TABLA A-3
PARÁMETROS TÉCNICOS PARA LOS EQUIPOS UTILIZADOS
EN LAS SIMULACIONES

| Equipo | Factor de emisión (g/kg) | Eficiencia térmica (%) |
|--------|--------------------------|------------------------|
| B | 0,25 | 0,9 |
| D | 1,0 | 0,8 |
| F | 3,5 | 0,65 |
| G | 6,0 | 0,6 |
| H | 10,0 | 0,55 |
| S | 16,0 | 0,5 |
| X | 17,0 | 0,5 |
| Cocina | 20,0 | 0,5 |

Fuente: Elaboración propia basada en Gómez *et al.* (2009).

TABLA A-4
DATOS USADOS EN LAS SIMULACIONES

| Poderes caloríficos de los combustibles | | | |
|--|------------|---------------|------------|
| 1 kg Leña: | 3.528 kcal | 1 kg Pellets: | 4.500 kcal |
| Precio de los combustibles | | | |
| 1 kg Leña: | \$ 56 | 1 kg Pellets: | \$ 150 |
| Precio de los equipos nuevos de combustión | | | |
| Equipo "D": | 16 UF | Equipo "B": | 57 UF |
| Valor UF: \$21.000 | | | |

Fuente: Elaboración propia basada en Gómez *et al.* (2009)