

PARTICIPACION VOLUNTARIA EN POLITICAS INTERNACIONALES DE CAMBIO CLIMATICO: IMPLICANCIAS PARA CHILE*

JUAN-PABLO MONTERO
LUIS CIFUENTES
FELIPE SOTO

Abstract

International efforts to curb greenhouse gas emissions by 2008-2012 can have implications on Chile's economy. Although less developed countries are not asked to limit their emissions yet, they have the possibility to participate with voluntary emission reduction efforts through the clean development mechanism (CDM) and eventually other mechanisms under consideration such as voluntary country commitments (VCC). In this paper, we discuss the costs and benefits from voluntary opt-in for the case of Chile. We compare the CDM and VCC under different economic and policy scenarios, and discuss the long-term implications of today's voluntary opt-in in the country's future eventual obligations when its GDP per capita approaches that of some industrialized countries.

* Nuestros agradecimientos a Eduardo Bitrán, Pablo González, Raúl O'Ryan, John Reilly, José Miguel Sánchez (Editor), Rolando Stein, Tom Stoker y participantes en seminarios en la Universidad de Chile, Fundación Chile y PUC por comentarios y conversaciones; Mustafa Babiker, Annalene Decaux y Mort Webster por acceso a los datos del MIT's EPPA Model; Ruth Judson por su base de datos en crecimiento y emisiones; Ariel Mosnaim y David Noe por excelente asistencia de investigación; y a la Fundación Ford, a través del Fondo para el Estudio de las Políticas Públicas del Depto. de Ingeniería Industrial de la U. de Chile, por el financiamiento otorgado. Comentarios, errores y omisiones son de exclusiva responsabilidad de los autores.

Enviar toda correspondencia a J.P. Montero (autor correspondiente), P. Universidad Católica de Chile, Casilla 306, Correo 22, Santiago, Chile. Tel 686-4613, fax: 552-1608 y e-mail: jpmonter@ing.puc.cl

□ Montero es Ingeniero Civil de la P. Universidad Católica (PUC) y PhD en Economía Industrial del Massachusetts Institute of Technology (MIT). Es profesor del Depto. de Ingeniería Industrial de la PUC e investigador asociado al Center for Energy and Environmental Policy Research del MIT. Además es miembro del Comité Nacional Asesor sobre Cambio Climático. Cifuentes es Ingeniero Civil de la PUC y PhD en Ingeniería y Políticas Públicas de Carnegie Mellon University (CMU). Es profesor del Depto. de Ingeniería Industrial de la PUC. Soto es Ingeniero Civil Industrial de la PUC e investigador asociado al Centro de Medio Ambiente de la PUC.

Resumen

Políticas internacionales de limitación de emisiones de gases efecto invernadero en el período 2008-2012 pueden tener importantes efectos en la economía chilena. Durante este período, los países menos desarrollados no están sujetos a ningún tipo de control sobre estas emisiones, pero pueden participar en forma voluntaria, ya sea a nivel de proyectos en el mecanismo de desarrollo limpio (MDL), o, eventualmente, a nivel de país adquiriendo compromisos voluntarios de limitación de emisiones (CV). En este trabajo discutimos los costos y beneficios de una participación voluntaria de Chile, para lo cual se estiman los beneficios económicos de ambos mecanismos de participación, MDL y CV, bajo distintos escenarios, y considerando sus implicancias de más largo plazo cuando el PIB per cápita del país se aproxime al de países más industrializados que hoy día deben controlar sus emisiones.

JEL Classification: *Q28, Q48, L50.*

Keywords: *Gas emissions, Chile.*

1. INTRODUCCIÓN

El aumento de las emisiones de gases efecto invernadero (GEI), que se piensa puede inducir a importantes cambios en el clima de la tierra, ha adquirido gran atención en la agenda internacional.¹ En la Primera Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático en 1995, las naciones del mundo alcanzaron un acuerdo en los términos para negociar un protocolo para el control de las emisiones de GEI, principalmente dióxido de carbono (de aquí en adelante simplemente carbono). El resultado fue el Mandato de Berlín, el cual establece que los límites y plazos para el control de las emisiones deben ser aplicados solamente a los países incluidos en el Anexo 1 de la Convención, que incluye básicamente a países industrializados.² No existe, al menos todavía, ningún tipo de compromiso de establecer límites y plazos sobre países menos desarrollados, tales como Chile.

En la tercera Conferencia de las Partes celebrada en Kyoto, Japón, en diciembre de 1997, los países Anexo 1 acordaron obligaciones de reducción “legalmente vinculantes” que en agregado significa disminuir el total de emisiones de GEI de estos países en poco más de 5% por debajo del nivel de 1990, en el período de compromiso comprendido entre los años 2008 y 2012.³ Para la implementación de estos objetivos de reducción, el Protocolo de Kyoto contempla el uso de instrumentos flexibles (costo-efectivos) como permisos

¹ Para una discusión general sobre el problema del cambio climático ver Nordhaus (1994) y Schelling (1992).

² Países Anexo 1 incluyen miembros de la OECD y “Economías en Transición”; estos últimos comprenden a países que formaron la ex Unión Soviética y países de Europa del Este.

³ La reducción de emisiones de GEI puede ser en cualquiera de los siguientes gases: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆). El Protocolo también considera como créditos de reducción proyectos forestales que aumenten la capacidad de captura de carbono.

transables de emisión entre países Anexo 1 y la participación de países menos desarrollados a través de esfuerzos voluntarios de reducción de emisiones.⁴

La participación voluntaria de países menos desarrollados, formalizada en el Protocolo de Kyoto en el mecanismo de desarrollo limpio (MDL), consiste en la implementación conjunta de proyectos de *reducción* de emisiones de GEI entre un agente de un país Anexo 1 y otro de un país no-Anexo 1. Desafortunadamente, tal como está definido este mecanismo, hoy día la alternativa de implementar proyectos forestales de captura de carbono no es factible. Un segundo mecanismo de participación voluntaria, impulsado principalmente por Argentina y Kazajastán y que cuenta con el respaldo de la Administración Clinton⁵ pero que aún carece de una definición y figura formal, consiste en los llamados compromisos voluntarios (CVs) de limitación de emisiones al nivel de país. En principio, un país no-Anexo 1 que adquiere un CV de limitar sus emisiones de GEI en el período 2008-2012, pasa a formar parte del “grupo Anexo 1”, con lo cual se abre la posibilidad de implementar proyectos forestales de captura de carbono, y se obtiene acceso directo al mercado internacional de permisos transables, evitándose los altos costos de transacción asociados a la negociación uno-a-uno del MDL.

En este trabajo se discuten los costos y beneficios económicos para Chile derivados de una participación voluntaria bajo estos dos mecanismos durante el primer período de compromiso, 2008-2012, incluyendo además un análisis de sus posibles efectos de más largo plazo cuando el país esté eventualmente sujeto a limitaciones obligadas de sus emisiones al alcanzar un PIB per cápita similar al de países más industrializados, que hoy día ven limitadas sus emisiones. Nuestro objetivo no es derivar una estrategia óptima (en el tiempo) de participación voluntaria, lo que requeriría un análisis complejo usando teoría de opciones reales, dado el nivel de incertidumbre e irreversibilidad del problema, sino más bien ayudar a la formulación de políticas públicas hacia el problema del cambio climático a través de una mejor comprensión de las ventajas y desventajas asociadas a cada una de las alternativas de participación.

Nuestros resultados indican que los beneficios netos bajo un CV son bastante mayores (llegando bajo ciertas circunstancias a 0,8% del PIB) que bajo el MDL debido a la poca factibilidad de incluir proyectos forestales de captura de carbono dentro de este último mecanismo y a los altos costos de transacción propios de la negociación uno-a-uno de un sistema de créditos de reducción como el MDL. Junto a estos beneficios, nuestros resultados también indican que cualquier discusión en torno a una posible participación voluntaria en el período 2008-2012, ya sea a través del MDL o un CV, debe hacerse con una perspectiva de más largo plazo que considere posibles obligaciones de reducción en el futuro cuando el PIB per cápita alcance niveles de países industrializados, que hoy día ven limitadas sus emisiones. Puede resultar incluso óptimo restringir en casi

⁴ Tal como explica Montero (1999) para el caso del Programa de la Lluvia Acida en EE.UU., un sistema de acceso voluntario no siempre trae aumentos de bienestar por problemas de selección adversa.

⁵ Ver “Statement of Stuart E. Eizenstat under Secretary of State for Economic, Business and Agricultural Affairs before the House International Relations Committee (May 13, 1998).”

40% la participación voluntaria hoy si esto significa obtener obligaciones menos exigentes mañana.

El resto del trabajo está organizado de la siguiente manera. En la Sección 2 se presentan las implicancias para Chile del actual debate internacional en torno al problema del cambio climático, con especial énfasis en el Protocolo de Kyoto. En la Sección 3 se desarrolla un modelo conceptual que ilustra los beneficios económicos netos de participación voluntaria para Chile, ya sea a través del MDL o del CVs. En la Sección 4 se describe la fuente de datos y la implementación numérica del modelo conceptual. En la Sección 5 se comparan los beneficios netos bajo los distintos mecanismos para el período 2008-2012. En la Sección 6 se discuten las eventuales obligaciones de reducción de emisiones en el largo plazo que Chile pudiera enfrentar y su relación con la participación voluntaria de más corto plazo. Conclusiones y líneas de investigación a futuro se encuentran en la Sección 7.

2. EL CAMBIO CLIMÁTICO EN CHILE

Aun cuando la implementación del Protocolo de Kyoto en su actual forma cada día aparece más incierta, en parte por la negativa del Congreso de los EE.UU. de ratificar Kyoto sin antes observar un compromiso cuantitativo razonable por parte de países menos desarrollados o no-Anexo 1, es importante entender los distintos efectos que tendría en la economía nacional su eventual implementación o la implementación de un esquema similar que intente limitar las emisiones de GEI a nivel internacional.

En primer lugar, al limitar emisiones de GEI en un conjunto de países se producen cambios en el comercio internacional que afectan indirectamente a muchos otros países. Jacoby *et al.* (1997), Donovan *et al.* (1997) y Babiker *et al.* (1999) muestran para distintos límites de emisiones en regiones Anexo 1 que, en general, el bienestar de todas las regiones no-Anexo 1 se ve afectado tanto positiva como negativamente. La explicación es muy simple. Cuando se impone una restricción a las emisiones en algunas regiones del mundo, el sistema mundial de producción, consumo y comercio internacional se adaptan, y los efectos son sentidos tanto por las regiones afectadas directamente por los límites de emisión (países Anexo 1) como por aquellas no afectadas (países no-Anexo 1).

Las consecuencias son variadas y van a depender de los instrumentos que se utilicen para cumplir con los límites establecidos, pero, en general, los países exportadores de petróleo como Venezuela y del Medio Oriente se ven negativamente muy afectados con la caída internacional del precio del petróleo,⁶ mientras que aquellos importadores del crudo ven aumentado su bienestar levemente. En el caso particular de Chile, Babiker *et al.* (1999) encuentran que la implementación de Kyoto puede significar un aumento de 0,3% en el bienestar

⁶ De acuerdo a Babiker *et al.* (1999), en el caso de Venezuela la pérdida de bienestar (medido como disminución en el consumo) puede llegar a 2,9 % (equivalente a una pérdida del 2,6% del PIB), y en el caso de países del Medio Oriente a 3,8% (3,1% en términos del PIB).

(medido en términos de consumo), lo que es equivalente a un aumento de 0,5% del PIB.⁷

Un segundo aspecto, y que es el objetivo central de este trabajo, son los posibles beneficios netos de participación voluntaria en los esfuerzos de reducción por parte de países no-Anexo 1 durante el período 2008-2012. Aunque el Protocolo de Kyoto puede ser insuficiente para resolver el problema del cambio climático en el largo plazo si así fuese requerido (Jacoby *et al.*, 1998), éste se encamina en la dirección correcta al considerar instrumentos flexibles para su implementación, tales como la transacción de emisiones (permisos transables de emisión), Implementación Conjunta (IC), y el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL).

Aunque la aprobación y posterior aplicación de estos instrumentos pueda estar sujeta a varias restricciones, en principio su utilización busca reducir emisiones en forma costo efectiva. En otras palabras, busca reducir emisiones en aquellos lugares donde es más barato hacerlo. Por ejemplo, a través de la transacción de emisiones se crearía un mercado mundial de permisos de emisión de GEI donde los países Anexo 1 podrían comercializar libremente una porción de sus cuotas o límites de emisión.⁸ IC, por otro lado, permite a países Anexo 1 desarrollar proyectos conjuntos de reducción de emisiones y repartirse los créditos de reducción que se obtengan.⁹ Finalmente, MDL permite a países no-Anexo 1 suscribir proyectos en conjunto con países Anexo 1 y obtener créditos de reducción, los cuales son vendidos (transferidos) al país Anexo 1 para cumplir con sus límites de emisión. Mientras la IC está abierta a todo tipo de proyectos por incluir solamente países Anexo 1, el MDL sólo permite la participación de proyectos energéticos de reducción de emisiones, dejando incierta la posibilidad de implementar proyectos forestales de captura de carbono.

Chile y varios otros países menos desarrollados están participando de distintas iniciativas como preparación a la eventual implementación del MDL.¹⁰ Por otro lado, existen otros países menos desarrollados, particularmente Argentina y Kazajastán,¹¹ que están impulsando nuevas iniciativas de participación voluntaria dentro del Protocolo de Kyoto. Aun cuando carecen de una definición y figura formal, estas iniciativas consisten en los llamados compromisos voluntarios (CVs) de limitación de emisiones a nivel de país.

En principio, un país no-Anexo 1 que adquiere un CV de limitar sus emisiones de GEI en el período 2008-2012, recibe una cuota de permisos de emisión equivalente al límite de emisiones y pasa a formar parte del “grupo Anexo 1”,

⁷ Es importante notar que todos estos efectos disminuyen si los países Anexo 1 pueden transar emisiones entre ellos y se permite el acceso voluntario de países no-Anexo 1.

⁸ La Comunidad Europea ha planteado la necesidad de restringir el volumen de transacción de permisos para forzar a todos los países Anexo 1 a cumplir parte de sus obligaciones con la reducción “física” de emisiones y no simplemente con la compra de permisos.

⁹ En principio, a menos de existir restricciones financieras, IC no sería necesaria porque ambos países formarían parte del sistema internacional de transacción de emisiones.

¹⁰ En el caso de Chile, existen 5 proyectos en etapa de preparación que cuentan con el patrocinio de Conama (Conama, 1999, p. 78), 2 de los cuales son proyectos forestales, y por lo tanto, está incierta su aprobación dentro del MDL.

¹¹ Ver Barros y Conte Grand (1999) para una discusión de la propuesta argentina.

con lo cual obtiene acceso directo al mercado internacional de permisos transables, donde puede vender directamente los permisos generados no sólo de proyectos energéticos de reducción de emisiones, sino también de proyectos forestales de captura de carbono. Con esto se elimina la negociación uno-a-uno del MDL, que tal como muestra la actual experiencia en los EE.UU. (Hahn, 1989; Hahn and Hester, 1989; and Schmalensee *et al.* 1998b), comúnmente se traduce en altos costos de transacción y una pérdida en la costo-efectividad del sistema (Montero, 1998a). Más aún, los problemas en la implementación del MDL como monitoreo y verificación se van a difundir hacia todos los países que lo utilicen, a diferencia de los CVs donde cada país es responsable de sus propias acciones.

El gran problema con cualquier tipo de CV, sin embargo, es la incertidumbre que existe respecto del crecimiento del PIB y el consecuente aumento de las emisiones y su relación con la cuota de emisión pactada en el CV. La propuesta argentina trata de aminorar esta incertidumbre proponiendo una cuota de emisión indexada al PIB (Barros y Conte Grand, 1999), pero esto parece poco factible de prosperar pensando que el Protocolo de Kyoto establece límites agregados de emisión bien específicos.

Finalmente, la participación voluntaria en el período 2008-2012, ya sea a través del MDL o del CVs, puede tener implicancias de más largo plazo en la eventualidad que Chile adquiera compromisos obligatorios de limitación de emisiones en el futuro, cuando su PIB per cápita alcance niveles cercanos al de países industrializados que hoy día ven limitadas sus emisiones. Si las negociaciones internacionales prosperan hacia el cumplimiento del objetivo último de la Convención del Cambio Climático, que es la estabilización de las emisiones en el largo plazo bajo un cierto umbral,¹² será indudablemente necesario diseñar un criterio de acceso de los países no-Anexo 1 a los esfuerzos de reducción de emisiones (Jacoby *et al.*, 1998).¹³

El criterio de acceso debe incluir el momento de acceso del país no-Anexo 1 y la cuota o límite a sus emisiones en ese momento y posiblemente en períodos posteriores. Dados los constantes cambios en las economías del mundo, es poco realista pensar que se puede continuar utilizando las emisiones del año 1990 (o cualquier año cercano) como base para el cálculo de la cuota de emisiones, por los problemas de equidad que pudieran surgir. Tal como plantean Jacoby *et al.* (1999), lo más razonable es pensar en un año base más cercano al período de compromiso, lo cual naturalmente sugiere que reducciones voluntarias de hoy (e.g., 2010) pueden afectar la base con que se calculen las obligaciones de reducción de mañana (e.g., 2030).¹⁴

¹² Comúnmente se habla de estabilizar la concentración de CO₂ en la atmósfera en algún nivel dentro del rango 450 a 650 ppmv.

¹³ En una serie de ejercicios de simulación, Jacoby *et al.* (1999) muestran, por ejemplo, que países como China debieran asumir compromisos obligatorios en algún momento entre el 2030 y 2050 para alcanzar estabilización de emisiones en el largo plazo.

¹⁴ Llama la atención que la actual política nacional en torno al problema del cambio climático se ha enfocado principalmente en los posibles beneficios económicos que pudieran obtenerse a través del MDL en el período 2008-2012, y no ha considerado las implicancias que resultan de tomar una perspectiva de más largo plazo en un problema que puede resultar ser de muy largo plazo. Ver, por ejemplo, Conama (1999).

3. UN MODELO DE PARTICIPACIÓN VOLUNTARIA

¿Cuál debe ser la política nacional frente a la posibilidad de participar en forma voluntaria? Esta sección presenta un modelo conceptual de equilibrio parcial que permite centrar la discusión en torno a los parámetros económicos más relevantes.¹⁵ Los costos y beneficios económicos para Chile de participar en forma voluntaria, ya sea a través del MDL o del CVs, son ilustrados con el modelo de un período de la Figura 1. Expliquemos el modelo pensando en CVs para luego pasar al caso del MDL. Para facilitar la explicación, considere que el período mostrado en la Figura 1 es el año 2010, que es el año representativo del primer período de compromiso. En el eje horizontal se incluyen emisiones de carbono (e), y en el eje vertical, pesos por unidad de carbono reducida ($\$/e$). La curva $CMg(q)$ es la curva de costo marginal de reducción de emisiones de carbono del país para el año 2010, y la cual se obtiene a partir de la curva de costo total $C(q)$, donde q es la cantidad de reducción de emisiones.¹⁶ El nivel de reducción puede ser expresado como $q = e_0 - e$ donde e es emisión (después de la reducción) y e_0 es la línea base de emisiones.¹⁷ Esta última es el nivel de emisiones que se hubiese observado en el año 2010 en ausencia de cualquier medida relacionada al cambio climático. La variable z es el “techo” de emisiones o cuota de permisos asignados a Chile de participar bajo un CV.

Los beneficios económicos netos de una *participación voluntaria* bajo CVs van a depender de p , z , e_0 y $C(q)$, y de la conducta de los distintos agentes económicos participantes en el país. Suponiendo que Chile como un todo maximiza los beneficios netos (por ejemplo, a través un mecanismo descentralizado como es la implementación interna de un mercado de transacción de permisos de emisión cuyo número total de permisos sería z y un precio de equilibrio de p por una simple condición de arbitraje),¹⁸ la solución óptima de control y venta de permisos se obtiene a partir de la maximización de la siguiente función de ingresos

$$(1) \quad \pi = pz - C(q) - pe$$

donde pz es el ingreso proveniente de z permisos, $C(q)$ es el costo de reducción y pe es el gasto incurrido en permisos para cubrir la emisión remanente $e = e_0 - q$. La cantidad óptima de emisiones e^* que resuelve la maximización de (1) ocurre exactamente cuando $CMg(q^*) = p$, donde $q^* = e_0 - e^*$. Entonces, el costo de reducir q^* viene dado por el área $A + B$, mientras que el beneficio por la venta de

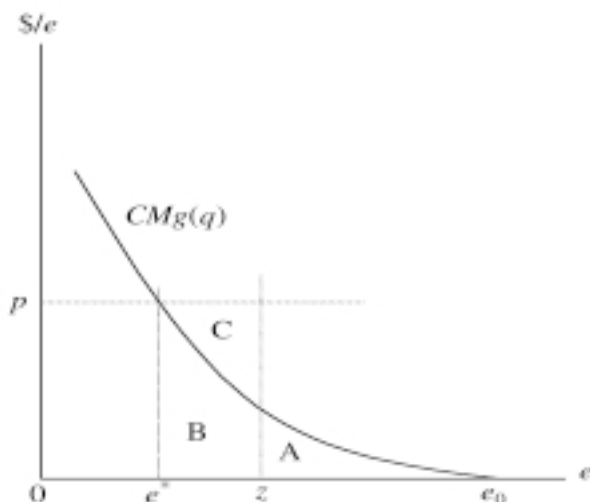
¹⁵ Hemos relegado para la sección 5 las implicancias de largo plazo.

¹⁶ Esta formulación lleva un supuesto implícito de implementación interna costo-efectiva que permite reducir carbono en los lugares más baratos. En teoría, esto puede ser conseguido a través de impuestos o permisos transables. Si no se pudiera contar con una implementación interna costo-efectiva, la curva $CMg(q)$ sería más parada.

¹⁷ Algunos usan el término “emisiones de referencia” para evitar confusión con emisiones en “año base” que es el nivel que se utiliza para fijar los límites de reducción en el futuro. En el caso de Kyoto, se utiliza 1990 como año base para fijar los límites del período 2008-2012.

¹⁸ Actualmente no existe en Chile una ley que permita la implementación de tal mercado.

FIGURA 1
COSTOS Y BENEFICIOS ECONOMICOS DE PARTICIPACION VOLUNTARIA



$z - e^*$ permisos a precio p viene dado por el área $B + C$ (notar que si $z < e^*$, Chile debe comprar permisos $e^* - z$ para cumplir con su compromiso). Por lo tanto, el beneficio neto máximo, π^* , que se obtiene al aceptar voluntariamente un techo “ z ” es el área $C - A$, cuyo valor puede ser positivo o negativo y va a depender de los valores de p , e_0 , $CMg(q)$, y z .

Es difícil estimar con algún grado de precisión el valor de π^* ya que estas cuatro variables están sujetas a un importante nivel de incertidumbre. El precio p depende de un equilibrio del mercado internacional que todavía no se ha desarrollado y cuya extensión y profundidad son aún muy inciertas. Por otro lado, las variables e_0 y $CMg(q)$ son endógenas a nuestra economía y dependen principalmente de nuestro patrón de crecimiento, el cual es difícil de proyectar incluso año a año. A diferencia de estas tres variables, z aparece como la única “variable de control” del problema, ya que es fijada en común acuerdo entre las partes involucradas. Sin embargo, como no existen criterios establecidos para su determinación, también pasa a ser una variable incierta en nuestro estudio.

En la próxima sección veremos en detalle la estimación de cada una de estas variables. Ahora explicamos el efecto de un cambio en cada una de estas variables sobre el beneficio neto máximo π^* . Si el precio p sube, el área C crece mientras que A se mantiene constante, con lo cual π^* aumenta. Si p cae, π^* disminuye y puede llegar a ser negativo. Para explicar el efecto de e_0 en π^* es importante comprender que lo más probable es que z sea fijado en relación al valor esperado de e_0 . Si resulta que e_0 es mucho mayor que z , el área A puede ser mayor que C con la consecuente pérdida de bienestar para el país. Si, por el contrario, resulta que e_0 es mucho menor a lo esperado y eventualmente a z , los beneficios netos pueden ser importantes.

Finalmente, el efecto de $CMg(q)$ es bastante simple de visualizar. Cuando los costos marginales aumentan tal que la curva $CMg(q)$ gira en torno al punto

e_0 en el sentido de los punteros del reloj, el área C disminuye, A crece y, por lo tanto, $C - A$ disminuye. Finalmente, z también afecta el beneficio neto. Si Chile recibe una cantidad de permisos igual a su línea base ($z = e_0$), el área A se reduce a cero con lo cual π^* es siempre positivo. En el caso hipotético que a Chile no le convenga reducir emisiones por tener costos muy altos de reducción, el país contaría con los permisos necesarios para cubrir sus emisiones. Nótese además para un rango donde $z < e_0$, π^* todavía pueden ser positivo.

El esquema presentado en la Figura 1 también puede ser utilizado con algunos pequeños cambios para explicar los beneficios económicos netos de una *participación voluntaria* bajo el MDL. Las dos grandes diferencias con los CVs son la forma de interpretar el número de permisos a recibir z y la curva de costo marginal $CMg(q)$. Como el MDL funciona en base a proyectos, cada proyecto i recibe una cantidad de permisos (créditos) exactamente igual a la reducción resultante de la implementación del proyecto $e_{0i} - e_i^*$, los cuales pueden ser posteriormente vendidos. Por otro lado, en nuestro esquema, la cantidad total de permisos a vender es $z - e^*$. Por lo tanto, debe cumplirse que $z = e_0$ en todo momento para el MDL.

La curva agregada de costo marginal, $CMg(q)$, también se ve afectada porque el número de proyectos de reducción de emisiones a realizar bajo el MDL en ningún caso puede ser superior al número de proyectos bajo los CVs. De hecho, existe una serie de medidas administrativas, regulatorias y/o de planificación (e.g. formulación de estándares para mejorar aislación térmica en las construcciones) que no podrían ser incluidas en el MDL por la incertidumbre en el número de reducciones que se obtendrían. En otras palabras, no existe manera de estimar en forma más o menos precisa la “adicionalidad” a la reducción de emisiones de dichas medidas. Si a esto sumamos los altos costos de transacción asociados a un sistema de créditos de reducción, tenemos que la curva de costo marginal en el MDL tiene mayor pendiente que en el caso de CVs. Esta curva la escribimos como $\delta \cdot CMg(q)$, donde $\delta > 1$ es un parámetro multiplicativo que aumenta con los costos de transacción y/o menor disponibilidad de proyectos factibles a implementar dentro del MDL.

Las diferencias en z y $CMg(q)$ dentro del esquema de la Figura 1 para ambos mecanismos de participación voluntaria plantean un claro e interesante *trade-off* entre beneficios netos e incertidumbre. Mientras el MDL puede presentar menores beneficios netos por tener costos relativamente más elevados, el hecho de que z sea igual a e_0 en todo momento, implica que los beneficios netos son siempre positivos. En el caso de los CVs, en cambio, existen situaciones en que los beneficios netos son negativos, por ejemplo, si z es bastante menor que e_0 .

4. IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA

Hemos argumentado que el beneficio neto de participación voluntaria ya sea a través del MDL o del CVs puede ser explicado en base a cuatro “variables económicas”: p , e_0 , $CMg(q)$ y z ;¹⁹ variables que están sujetas a bastante

¹⁹ Pueden existir ciertamente otras variables políticas que pueden tener un efecto importante al momento de tomar alguna decisión. Otros beneficios indirectos de reducir emisiones de GEI son discutidos por Cifuentes *et al.* (1999).

incertidumbre tal como veremos a continuación. Nuestro análisis numérico sólo considera emisiones de carbono provenientes del sector energía y se concentra en el año 2010, que es representativo del período de 5 años del Protocolo de Kyoto.²⁰ Todos los valores están expresados en US\$ de 1995.

4.1. Estimación de precios de venta de permisos

Como no existe un mercado de permisos de carbono todavía, utilizamos datos de varias fuentes para construir una estimación del precio de equilibrio p que se observaría durante el período 2008-2012. En primer lugar, utilizamos los resultados de la simulación de un mercado de permisos de carbono para el año 2010 entregados por el modelo EPPA (Emissions Prediction and Policy Analysis Model) del MIT.²¹ EPPA es un modelo de equilibrio general de la actividad económica, uso de energía y emisiones del mundo dividido en 45 regiones (o países) incluyendo países Anexo 1 y no-Anexo 1. Los resultados indican que para el objetivo de reducción establecido en el Protocolo de Kyoto, cuando se considera un mercado de permisos de emisiones de carbono solamente y con participación completa de países Anexo 1 (cuota inicial de permisos igual al techo fijado en el Protocolo de Kyoto) y sin ningún tipo de participación voluntaria de países no-Anexo 1, el precio de equilibrio es de 92 US\$ por tonelada de carbono (US\$/tonC).^{22,23} En el otro extremo, si se considera un mercado con participación de todos los países del mundo donde regiones no-Anexo 1 reciben una cantidad de permisos igual a su línea base esperada para el año 2010, el precio de equilibrio puede caer a 25 US\$/tonC debido a los menores costos de reducción en países no-Anexo 1.

Estos precios contrastan fuertemente con los actuales precios entre 5 y 10 US\$/tonC que algunas compañías eléctricas y petroleras de países Anexo 1 están pagando por proyectos energéticos y forestales en países no-Anexo 1 que eventualmente pudieran ser incluidos dentro del MDL.²⁴ Aunque “relaciones públicas” puede ser un factor importante para estas compañías, la diferencia de precios también refleja la poca factibilidad de implementar Kyoto en su actual diseño y la incertidumbre de que los proyectos ya acordados sean aceptados dentro del MDL.

Ante tal incertidumbre en la evolución del mercado, hemos supuesto para p una distribución triangular con un valor mínimo, medio y máximo de 5, 50 y 95 US\$/tonC respectivamente. Este amplio rango de precios intenta reflejar las

²⁰ No hemos considerado otros GEI incluidos en el Protocolo de Kyoto, como CH₄ y N₂O, por tener una participación bastante menor dentro del total de emisiones de GEI para Chile. Ver Conama (1999).

²¹ El modelo se describe ampliamente en Yang *et al.* (1996).

²² Equivalente a 25 (=92/3.67) US\$ por tonelada de CO₂.

²³ Este precio sube si uno incluye otros GEI además del CO₂ y la posibilidad de secuestrar emisiones por parte de países Anexo 1 (Reilly *et al.* 1999). Esto se debe a que gran parte de los permisos disponibles a cero costo (conocido como “aire caliente”) por parte de los países de la ex Unión Soviética se reduce substancialmente.

²⁴ Ver, por ejemplo, *The Economist* (Octubre 30, 1999, p. 73) y *El Mercurio* (Enero 29, 2000, p. D1).

distintas direcciones que el mercado puede tomar incluyendo un Protocolo de Kyoto con un cumplimiento parcial y/o con una participación voluntaria de algunos países no-Anexo 1.

4.2. Estimación de la línea base de emisiones

Por razones de flexibilidad frente a distintas trayectorias de crecimiento y precisión en la estimación de la incertidumbre, la proyección de la línea base e_0 fue hecha utilizando técnicas econométricas a partir de un panel de 4.508 datos anuales con consumo energético, producto interno bruto (PIB), emisiones de carbono, y población de más de 150 países en el período 1950-1995, y escenarios de crecimiento del PIB y población para el período 1990-2050 del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Nuestro panel de datos fue formado a partir de Schmalensee *et al.* (1998a) para el período 1950-1990 (4.018 datos) y expandido hasta 1995 utilizando los datos de IEA (1997).

La especificación econométrica utilizada para entender la relación entre emisiones históricas, crecimiento y población es la misma de Schmalensee *et al.* (1998). Usando i para referirse a países y t para referirse a años, la forma general de la especificación es

$$(2) \quad \ln(c_{it}) = \alpha_i + \beta_t + F[\ln(y_{it})] + \varepsilon_{it}$$

donde c son emisiones per cápita de carbono, y es PIB per cápita, α y β son efectos fijos para el país y año respectivamente, F es una función flexible (a explicar), y ε es el término de error. Los valores α_i en ecuación (2) reflejan diferencias permanentes entre países en disponibilidad de combustibles fósiles, tipos de producción, marcos regulatorios, políticas de impuestos y subsidios y preferencias. Los valores β_t reflejan cambios en el tiempo en precios (por ejemplo, impactos de subidas repentinas del precio del petróleo), tecnologías, políticas ambientales, y cambios en preferencias no relacionados a cambios en el ingreso. La función F , tal como en Schmalensee *et al.* (1998a), fue asumida como una función continua y lineal por tramos. Para formar F se consideraron 10 segmentos de ingreso, cada uno con el mismo número de observaciones. La estimación de los parámetros se hizo usando mínimos cuadrados generalizados para controlar por heterocedasticidad y autocorrelación de primer grado en los errores.²⁵

A partir de las relaciones históricas entregadas por los análisis econométricos se procedió a proyectar las emisiones para Chile desde al año 2000 hasta el 2050, utilizando la misma metodología desarrollada por Schmalensee *et al.* (1998) para proyectar la evolución del parámetro β . El parámetro α se mantuvo fijo para cada país. Para obtener datos sobre la evolución del PIB y población se utilizaron los 6 escenarios (de A a F) de crecimiento y emisiones entregados por el IPCC para el período 1990-2050.²⁶ Como estos escenarios son contruados al

²⁵ Se utilizó un parámetro de autocorrelación común, que resultó ser igual 0.82 y muy similar al individual de Chile, para no perder tanta eficiencia en la estimación de los parámetros.

²⁶ La base completa de datos fue obtenida directamente del IPCC.

nivel de la región, utilizamos las proyecciones de crecimiento del PIB y crecimiento de población correspondientes a América Latina, pero con algún grado de corrección en los primeros años (1990-2000), para reflejar la situación actual de Chile. Aunque idealmente nos hubiera gustado contar con escenarios específicos para Chile, el uso de estos escenarios permite capturar de una forma sistemática la amplia gama de posibilidades de desarrollo que se pueden observar en el país en las próximas décadas.

Los resultados de las proyecciones de emisiones de carbono para Chile bajo los distintos supuestos de crecimiento del IPCC se encuentran resumidos en la Tabla 1. Con respecto a las proyecciones de las emisiones de carbono se entrega el valor del modelo econométrico (Modelo) y el intervalo de confianza de 95% del Modelo. En las últimas líneas se entrega el resultado para el multiescenario que es una ponderación en partes iguales de “todos” los escenarios individuales.²⁷ Entre los resultados más importantes hay que destacar la gran incertidumbre asociada a la proyección de la línea base aun conocida con exactitud la trayectoria del PIB y población.²⁸ Cuando se consideran distintas trayectorias de PIB y población las proyecciones de línea base se distancian, particularmente con el pasar del tiempo.²⁹

4.3. Estimación de costos de abatimiento y secuestro de carbono

Para implementar numéricamente el modelo conceptual es necesario además estimar una curva marginal de abatimiento y secuestro de carbono en el sector energía y forestal, respectivamente, que sea representativa de Chile para el año 2010. Aparte de algunas estimaciones aisladas, no existen a la fecha estudios de costos de abatimiento y secuestro de carbono para Chile que puedan ser utilizados. La única excepción en el caso de estimaciones de costos de abatimiento (o reducción) de emisiones es PRIEN (1999), que más que estimar una curva de costo marginal, simplemente identifica opciones de abatimiento que se pueden realizar a “costo cero.” De hecho, PRIEN (1999) encuentra que para el año 2010, alrededor del 11% de las emisiones de carbono podrían ser reducidas sin incurrir en costos, sino por el contrario, significaría beneficios netos.

Económicamente es difícil justificar que existan posibilidades de reducción a costo negativo que no vayan a ser implementadas a menos que se establezcan

²⁷ Para el cálculo del intervalo de confianza de la línea base en el multiescenario (o “todos”) se procedió de la siguiente forma. Suponga que hay $j=1,2,..,J$ escenarios, cada uno con una probabilidad de ocurrencia de ϕ_j y que la línea base del escenario j , Y_j , se distribuye normalmente con media P_j y desviación estándar η_j . Entonces si Φ es la función de distribución normal, la probabilidad que Y sea menor que K sujeto a que el escenario j ocurra es $\Phi[(K-P_j)/\eta_j]$. Por lo tanto, la probabilidad incondicional que Y sea menor que K es $\Psi(K) = \sum_j \{\phi_j \Phi[(K-P_j)/\eta_j]\}$. Finalmente, los valores bajo (Y_l) y alto (Y_h) del intervalo de confianza se obtuvieron a partir de una solución numérica para $\Psi(Y_l) = 0.025$ y $\Psi(Y_h) = 0.975$. En nuestro caso, cada escenario tiene una probabilidad de ocurrencia de 1/6.

²⁸ Intervalos de confianza muy similares para el año 2010 se obtienen usando resultados de regresiones simples que incluyen sólo datos de Chile.

²⁹ Aproximadamente 11% $(=(18.349-16.433)/17.525)$ en el año 2010 y 41% en el 2050.

TABLA 1
PROYECCION DE POBLACION, PIB Y EMISIONES DE CARBONO

Escenario IPCC	Año	Población (mm)	PIB (bill. 95US\$)	Emisiones de Carbono (mm ton)		
				Esperado	Intervalo 95%	
a	1995	14,21	61,93	11,49	9,81	13,46
AB ^b	2010	17,52	97,82	17,48	14,82	20,62
AB ^b	2025	20,66	164,17	24,74	20,81	29,40
AB ^b	2050	23,81	326,42	32,42	26,95	38,99
C	2010	17,25	86,38	16,43	13,96	19,35
C	2025	20,12	129,15	23,11	19,46	27,46
C	2050	22,63	207,43	32,66	27,03	39,47
D	2010	17,25	97,96	17,34	14,70	20,46
D	2025	20,12	163,47	24,20	20,36	28,77
D	2050	22,63	320,63	30,67	25,49	36,90
E	2010	17,52	110,43	18,06	15,31	21,30
E	2025	20,66	207,57	24,70	20,81	29,32
E	2050	23,81	487,92	30,58	25,17	37,17
F	2010	18,76	99,96	18,35	15,57	21,63
F	2025	23,53	175,62	27,84	23,43	33,07
F	2050	32,05	374,62	44,65	37,12	53,71
Todos	2010	17,64	98,40	17,52	14,21	20,92
Todos	2025	20,96	167,36	24,89	19,77	30,82
Todos	2050	24,79	340,58	33,90	25,26	49,44

^a Población, PIB Emisiones de Carbono (esperado) para 1995 corresponden a valores observados.

^b Escenarios A y B son equivalentes en las dimensiones presentadas aquí.

políticas relacionadas al cambio climático. A pesar de esto, utilizamos los antecedentes de PRIEN (1999) como referencia y asumimos que el 11% de reducciones se puede lograr a costo cero. A partir de ese punto procedimos a incluir otras posibilidades de abatimiento de distintos sectores (residencial y comercial, industria y minería, centros de transformación, industria del acero, generación eléctrica, industria del cemento y transporte público) apoyados con antecedentes de la literatura internacional y considerando la factibilidad en la disponibilidad de las nuevas tecnologías.³⁰ Aunque se consideraron opciones de reducción de emisiones dentro de un universo del 70% del total de emisiones de carbono en Chile en 1995, no se excluye la posibilidad de que existan varias

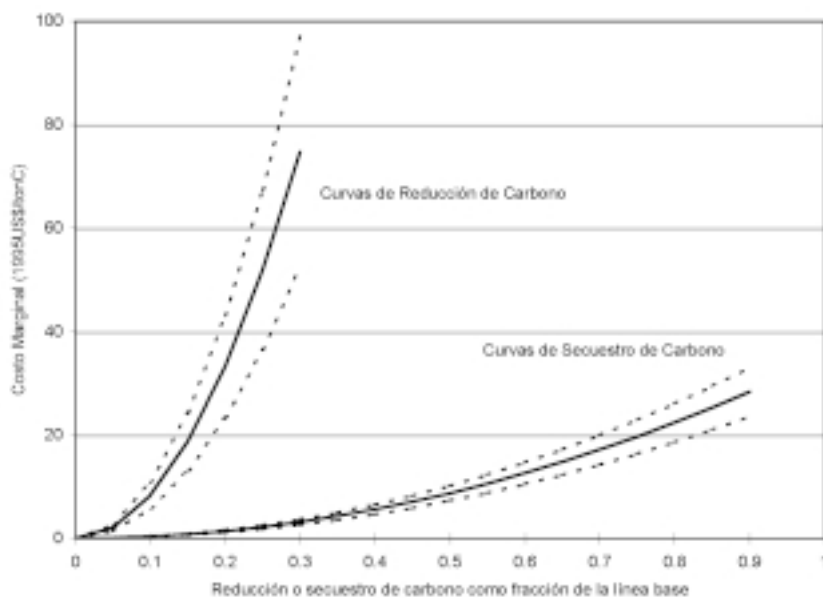
³⁰ Para más detalle ver Mosnaim y Noe (1999).

de otras medidas de mitigación tanto o más baratas que las consideradas por nuestro estudio.³¹

Con esto se conformó una serie de estimaciones puntuales que fueron ajustadas por un polinomio simple de segundo orden de la forma $CMg(q) = \gamma q^2$, tal como lo sugieren los resultados de Ellerman *et al.* (1998). El resultado del ajuste está en la Figura 2, y para la estimación de los beneficios netos se asumió que γ sigue una distribución triangular de acuerdo a valor medio e intervalo de confianza obtenidos para el mismo.³² La Figura 2 indica, por ejemplo, que si el precio de los permisos de carbono es cercano a 20 US\$/tonC, es óptimo reducir el 15% de las emisiones que Chile tendría en 2010, que en promedio corresponde a 2,63 mmtonC dado que la línea base esperada para Chile fue estimada en 17,53 mmtonC.

En el caso del sector forestal, la curva de costo marginal de secuestro para Chile en el 2010 fue estimada a partir de un programa de forestación con pino radiata en terrenos que no estaban originalmente destinados para aquello (se excluyen las Regiones V y Metropolitana) y de la optimización de las longitudes óptimas de las rotaciones en las plantaciones de pino. En el caso del programa de forestación, el costo marginal de secuestro se calcula como el

FIGURA 2
COSTOS MARGINALES DE ABATIMIENTO Y SECUESTRO EN EL 2010



³¹ Por ejemplo, medidas de manejo de transporte urbano no fueron consideradas.

³² La ecuación ajustada es $CMg(q)=829,7q^2$ con $R^2=0.67$ y $\#obs.=25$. El intervalo de confianza para el parámetro γ es [582,6; 1.076,8]. Para obtener la cantidad de reducción en millones de toneladas de carbono (mmtonC) se multiplica q por el valor de la línea base que resulte en ese momento.

cuociente entre el valor presente de los costos de forestación y el valor presente de capturas de carbono. Para este caso también se consideraron distintos escenarios de costos de terrenos.³³ Tal como en el caso anterior, se ajustó un polinomio de segundo orden a los datos de costos y secuestro. Por comodidad, los resultados se presentan en la Figura 2.³⁴ Hay que precisar que, a diferencia del sector energético, el potencial de secuestro es independiente de la línea base de emisiones, pero también puede estar sujeto a cierta incertidumbre dependiendo del crecimiento del sector forestal y la consecuente disponibilidad de terrenos “marginales.” De acuerdo a Conama (1999, p. 31), sin embargo, esta incertidumbre no parece tan importante,³⁵ por lo tanto no se considera en este estudio.

Aun cuando no se han considerado todas las posibilidades de mitigación en el sector energético, los resultados resumidos en la Figura 2 muestran que a diferencia de muchos países Anexo 1 (ver Reilly *et al.*, 1999), en el caso de Chile el sector forestal presenta oportunidades bastante mayores que el sector energético. Por ejemplo, para un precio de permisos de 20 US\$/tonC, es óptimo capturar aproximadamente 13,15 mmtonC ($=0,75*17,53$), lo que es significativamente mayor a la reducción obtenida en el sector energético. Si, por el contrario, el precio sube a 50 US\$/tonC (no se muestra en la figura), es óptimo capturar hasta 21,04 mmtonC que sería mayor que la línea base de emisiones promedio de 17,53 que se esperara para el 2010.³⁶

4.4. Criterio para fijar la cuota de permisos

El criterio para fijar la cuota de permisos que Chile recibiría en el año 2010 si eventualmente aceptara un CV es totalmente incierto, ya que no existe ningún acuerdo formal (ni informal) con respecto al posible funcionamiento de un “mecanismo de participación” de este tipo. Por lo tanto, en este trabajo hemos considerado cinco criterios distintos para estimar los beneficios netos bajo un CV (recordar que la cuota de permisos en el caso del MDL es la línea base por definición).³⁷

³³ Para más detalle ver Mosnaim y Noe (1999).

³⁴ La ecuación ajustada es $CMg(q)=35,0q^2$ con $R^2=0.79$ y #obs.=42. El intervalo de confianza para el parámetro γ es [29,1; 40,8]. Finalmente, para estimación de los beneficios netos se asumió que γ sigue una distribución triangular de acuerdo a valor medio e intervalo de confianza obtenidos para γ . Para obtener la cantidad de captura mmtonC se multiplica q por el valor promedio de la línea base de emisiones, que es 17,53 mmtonC.

³⁵ Menos de 1% si se compara la captura proyectada para el año 2020 bajo los dos escenarios de la Tabla 1.13.

³⁶ Ambas curvas en la Figura 2 representan costos marginales de largo plazo donde los costos fijos fueron anualizados usando tasas de vida útil de sobre 20 años. Esto no representa un problema para las estimaciones si los límites a las emisiones sobre los países industrializados se extienden por varios períodos más allá del 2012, lo cual parece lo más probable. Si, por el contrario, los beneficios de participación voluntaria sólo se pueden capturar durante los 5 años que dura el primer período de compromiso, ambas curvas deberían tener mayor pendiente, dependiendo también de la posibilidad de ahorro de permisos de los países industrializados.

³⁷ Estos criterios de entrada voluntaria no tienen que ser óptimos desde un punto social global (Montero, 1998b).

El primer criterio consiste simplemente en tomar la línea base esperada para Chile en el 2010, que de acuerdo a los valores de la Tabla 1 corresponde a $z(1) = 17,53$ mmtonC. El segundo criterio es similar al anterior e intenta capturar (muy aproximadamente) la línea base de emisiones promedio que el IPCC hubiese proyectado para Chile en el año 2010. Utilizando los datos de la región de América Latina para los seis escenarios del IPCC, obtenemos una línea base promedio para Chile en el 2010 de 16,70 mmtonC, la cual es 5% inferior a la línea base promedio que obtuvimos con nuestro modelo econométrico de 17,53 mmtonC. Así, $z(2) = 16,70$ mmtonC.

La definición de los siguientes tres criterios está basada en la distribución de “cuotas de emisión” establecida en el Protocolo de Kyoto. Tal como muestra la Figura 3, esta distribución es bastante heterogénea y más aún después de la redistribución interna de cuotas que realizó la Comunidad Europea.³⁸ Hay países como EE.UU. que tienen una cuota equivalente al 93% de sus emisiones en 1990, mientras otros como Australia tienen una cuota por sobre las emisiones de 1990 equivalente al 108%. El país más favorecido es Portugal quien tiene una cuota equivalente al 127% de sus emisiones en 1990. El claro patrón que se observa en la figura puede ser resumido con una regresión simple entre la cuota de emisión recibida por estos 23 países Anexo 1 (x) y su PIB per cápita (PIBPC) en 1990 de la siguiente manera

$$(3) \quad x = 159,15 - 4,42 * \text{PIBPC} + 0,07 * \text{PIBPC}^2$$

donde x está en porcentajes de reducción (con respecto al año 1990) y PIBPC en miles de US\$ de 1995.³⁹

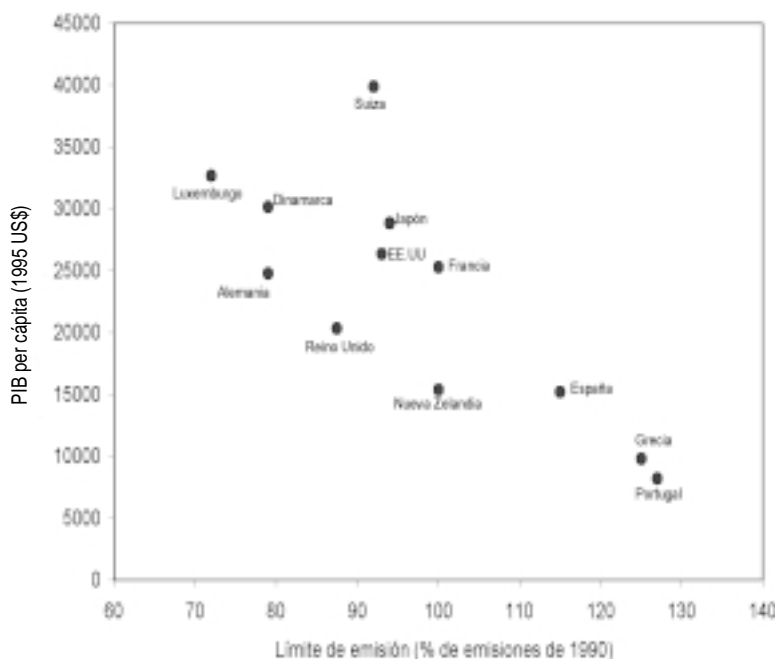
Utilizando este análisis de la distribución de cuotas de emisión bajo el Protocolo de Kyoto, el tercer criterio considera una cuota equivalente al 127% (distribución más favorable) de las emisiones que Chile tuvo en 1994, ya que a diferencia de los países Anexo 1, 1994 es el año que los países no-Anexo 1 deben considerar para estimar el inventario de emisiones de GEI en sus Comunicaciones Nacionales (Conama, 1999). Como el total de emisiones de carbono en Chile en 1994 es 10,72 mmtonC (EIA, 1997), la cuota con este tercer criterio es de $z(3) = 13,61$ mmtonC.

Finalmente, el cuarto y quinto criterio utilizan la ecuación (3) para estimar el factor x , y lo aplican sobre las emisiones de los años 1990 y 1994, respectivamente. Como en 1990 el PIBPC es de 3,41 (miles de 1995 US\$) y las emisiones de carbono de 8,95 mmtonC, se tiene que $x = 145$, $z(4) = 12,98$ y $z(5) = 15,54$ mmtonC. Aunque uno puede pensar en muchos otros criterios para definir la cuota de emisión de un país no-Anexo 1 que eventual y voluntariamente accede al grupo de países Anexo 1, los criterios aquí utilizados pretenden capturar de algún modo las realidades de las actuales negociaciones, y la intención de

³⁸ La figura incluye los países Anexo 2 (que dentro del Anexo 1 son los más ricos ya que excluye a las economías de Europa del Este y aquellas en transición) y considera la distribución de la Comunidad Europea.

³⁹ Todos los coeficientes son significativos al 95%. Los errores estándar de la constante y coeficientes de PIBPC y PIBPC² son 14,82, 1,30 y 0,03 respectivamente. Además $R^2 = 0,54$ y #obs. = 23.

FIGURA 3
RELACION ENTRE LAS OBLIGACIONES DE KYOTO Y PIB PER CAPITA



evitar el *hot air* o la entrega de un número innecesario de permisos muy por sobre la línea base del país participante.

5. BENEFICIOS DE PARTICIPACIÓN VOLUNTARIA

Utilizando simulaciones de Monte-Carlo se procedió a comparar los distintos mecanismos de participación voluntaria. Se asumió que no existía correlación entre las distintas variables. Todos los resultados del modelo son para el año 2010, por lo tanto, los beneficios totales de participación voluntaria durante los 5 años del primer período de compromiso son aproximadamente 5 veces los resultados mostrados, esto sin considerar la posibilidad de ahorro de permisos antes del 2008. Además, como el PIB esperado para el 2010 es aproximadamente de 100 billones de 1995US\$, de acuerdo a los escenarios del IPCC (ver primera línea de “todos” en Tabla 1), los resultados de beneficios netos se pueden interpretar como porcentajes del PIB.

Como la factibilidad de incorporar proyectos forestales de captura de carbono en el MDL es muy incierta, en la primera parte de esta sección se estiman los beneficios netos bajo CVs y MDL solamente considerando el sector energía. Luego se estudia el efecto en los beneficios netos de usar una cuota de emisión variable indexada al PIB en vez de una cuota fija. Finalmente, se analiza el

efecto de la incorporación de los proyectos forestales de captura de carbono en los beneficios netos bajo un CV.

5.1. Beneficios netos de MDL y CVs

En las primeras 5 líneas de la Tabla 2 se presentan, para el sector energía, los resultados de reducciones esperadas de emisiones, volumen de venta esperada de permisos y beneficios netos bajo el “mecanismo” de CV con distintas cuotas de emisión. Debido a la alta incertidumbre y moderado nivel de reducciones, los resultados son favorables solamente cuando la cuota z es cercana a la línea base e_0 esperada. Hay casos, como el mostrado en la línea 4, en que puede ser incluso necesario comprar permisos en el mercado internacional para cubrir emisiones después de una muy desfavorable asignación de z . Aun cuando z es cercano al 90% de la línea base esperada, tal como ocurre con el criterio 5 (ver línea 5), existe una alta probabilidad de que los beneficios netos sean negativos. Es importante destacar además la sensibilidad de los beneficios netos a cambios en z . Por ejemplo, si z se reduce en 5%, como ocurre al pasar de la línea 1 a la 2, los beneficios netos caen en casi 28%.

A menos que z sea muy cercano o superior a la línea base esperada, los beneficios netos de un CV no se comparan favorablemente con los obtenidos bajo el MDL, aun para altos niveles de costos de transacción o menor disponibilidad de proyectos que sean aceptados bajo este mecanismo. Esto último está representado en los distintos valores que toma el parámetro $\delta > 1$ entre las líneas 6 y 9, y que representa un choque al parámetro γ de la curva $CMg(q)$, lo que aumenta su pendiente.⁴⁰ Tal como se explicó anteriormente, independiente del valor de δ , los beneficios netos bajo el MDL son siempre positivos y la reducción y la venta coinciden exactamente por definición.

TABLA 2
BENEFICIOS NETOS PARA MDL Y CVS EN AÑO 2010

Línea	Mecanismo	z/δ	Reducción (mmtonC)	Venta (mmton C)	Beneficios netos (mm 1995US\$)			
					esperado	desv. est.	intervalo 95%	
1	CV	$z = 17,53$	4,25	4,22	149,54	96,27	18,60	327,90
2	CV	$z = 16,70$	4,25	3,40	108,25	84,73	-4,06	267,47
3	CV	$z = 13,61$	4,25	0,31	-46,21	60,45	-145,23	53,82
4	CV	$z = 12,98$	4,25	-0,32	-77,71	60,97	-182,73	15,75
5	CV	$z = 15,54$	4,25	2,24	50,29	71,61	-49,23	186,63
6	MDL	$\delta = 1$	4,25	4,25	152,21	81,16	34,59	299,94
7	MDL	$\delta = 1,25$	3,79	3,79	136,14	72,59	30,94	268,27
8	MDL	$\delta = 1,5$	3,47	3,47	124,28	66,27	28,25	244,90
9	MDL	$\delta = 2$	3,00	3,00	107,23	56,89	24,62	213,91

⁴⁰ Es más fácil interpretar δ como una tasa de descuento por concepto de costo de transacción. Por ejemplo, si $\delta = 1,5$, el agente que implementa un proyecto bajo el MDL recibe solamente $p/1,5$ en vez de p por cada ton reducida

Estos resultados muestran que al sólo considerar el sector energético, los CVs son el mecanismo menos favorable de participación, a menos que la asignación de la cuota de emisión z sea igual o mayor a la línea base esperada, lo cual se observa en la actual asignación de cuotas de los países Anexo 1 con menor PIB per cápita.

5.2. Cuota indexada al PIB

Una de las mayores preocupaciones de adquirir un CV hoy es la posibilidad de que debido a un crecimiento de la actividad económica mayor de lo esperado la línea base de emisiones (e_0) resulte estar por encima de la cuota de limitación de emisiones (z), tal como ocurre con los escenarios 3, 4 y 5 de la Tabla 2. Para disminuir tal incertidumbre, en su propuesta de participación voluntaria, Argentina, por ejemplo, plantea indexar z a la trayectoria del PIB (ver Barros y Conte Grand, 1999). Así, una trayectoria de PIB mayor daría lugar a una cuota z , ex-post, mayor.

Aunque esta propuesta tiene poca probabilidad de prosperar ya que el Protocolo de Kyoto está basado en límites ex-ante y específicos a las emisiones, es interesante explorar su relevancia para el contexto particular de Chile. Esto se puede ver fácilmente utilizando los 6 escenarios del IPCC como las únicas posibles trayectorias de crecimiento (PIB y población) de Chile, y asumiendo que la cuota z para una trayectoria determinada es igual a la línea base (esperada) de emisiones para esa trayectoria. Cuando z no está indexada al crecimiento pero es igual a la línea base esperada, los beneficios netos bajo un CV son los indicados en la línea 1 de la Tabla 3 (que naturalmente son iguales a los de la línea 1 de la Tabla 2). Cuando z está indexada a cada escenario de crecimiento, los resultados entre las líneas 2 y 6 muestran que la incertidumbre en los beneficios netos continúa siendo muy importante. Tal como indican los resultados econométricos de la Tabla 1, esto se debe a que no existe una relación perfecta entre trayectoria de crecimiento y emisiones de carbono.

Finalmente, el resumen de los beneficios netos de usar una cuota indexada para los distintos escenarios de crecimiento posibles se muestra en la

TABLA 3
BENEFICIOS NETOS CON CV INDEXADO AL PIB

Línea	Mecanismo	Esc. y z	Reducción (mmtonC)	Venta (mmton C)	Beneficios netos (mm 1995US\$)			
					esperado	desv. est.	intervalo 95%	
1	CV	Todos - $z(1)$	4,25	4,22	149,54	96,27	18,60	327,90
2	CV	AB - $z(1)$	4,27	4,11	144,20	91,88	19,60	317,72
3	CV	C - $z(1)$	4,01	3,87	136,08	86,85	15,81	295,67
4	CV	D - $z(1)$	4,24	4,08	143,61	92,09	19,98	316,62
5	CV	E - $z(1)$	4,41	4,25	149,28	95,29	20,08	321,58
6	CV	F - $z(1)$	4,48	4,32	152,31	97,29	18,16	334,12
7	CV	Promedio	4,28	4,12	144,95	92,79		

línea 7.⁴¹ La desviación estándar es sólo un poco menor a la desviación estándar en el caso sin indexación (línea 1), lo que indica la poca ganancia en certidumbre de la indexación de z al PIB y población.⁴² Estos resultados y el principio del Protocolo de Kyoto de usar límites específicos a las emisiones sugieren que más allá de insistir en el uso de cuotas variables indexadas al crecimiento, lo importante es contar con adecuados escenarios de crecimiento que permitan comparar líneas bases esperadas con cuotas fijas.

5.3. Incorporación de proyectos forestales de captura de carbono

Tal como vimos en la sección de estimación de costos, en Chile existe un gran potencial de secuestro de emisiones en el sector forestal. A diferencia de los países Anexo 1, hoy en día los países no-Anexo 1 no pueden explotar este potencial dentro del MDL. La firma de un CV y consecuente acceso al grupo Anexo 1, sin embargo, permitiría a Chile utilizar con más propiedad el potencial forestal con grandes beneficios para el país, tal como se muestra en la Tabla 4. Independiente de la cuota de emisión, los beneficios netos son siempre positivos (ver líneas 1 a 5 en Tabla 4) y muy superiores a los que se obtendría bajo el MDL. Naturalmente, si el MDL permitiera la implementación de proyectos forestales en países no-Anexo 1, los resultados anteriores no serían tan favorables frente al MDL (línea 6) a menos que los costos de transacción asociados a este mecanismo fueran suficientemente altos (línea 7).

TABLA 4
BENEFICIOS NETOS CON PROYECTOS FORESTALES DE SECUESTRO

Línea	Mecanismo	z/δ	Reducción (mmtonC)	Venta (mmton C)	Beneficios netos (mm 1995US\$)		
					esperado	desv. est.	intervalo 95%
1	CV	$z = 17,53$	24,84	24,81	885,84	396,45	307,39 1609,17
2	CV	$z = 16,70$	24,84	23,99	844,55	393,80	269,81 1563,85
3	CV	$z = 13,61$	24,84	20,90	690,09	389,29	118,40 1402,42
4	CV	$z = 12,98$	24,84	20,27	658,59	389,38	93,80 1379,94
5	CV	$z = 15,54$	24,84	22,83	786,59	391,19	210,19 1500,22
6	MDL	$d = 1$	24,84	24,84	888,51	393,05	309,13 1603,49
7	MDL	$d = 2$	17,56	17,56	627,59	276,74	218,50 1135,89

6. OBLIGACIONES DE LARGO PLAZO

El análisis de las ventajas de algún tipo de participación voluntaria en el período 2008-2012 no puede realizarse sin incluir una perspectiva de más largo

⁴¹ La estimación de la desviación estándar se hizo en base a lo explicado en la nota 30.

⁴² Posiblemente una indexación considerando PIB sectoriales puede dar resultados mucho mejores.

plazo. Esto se debe a que la estabilización de emisiones para prevenir un posible problema climático pasa, necesariamente, por una participación “legalmente vinculante” de los países menos desarrollados en algún momento en el futuro (Jacoby *et al.*, 1998). Aunque no es claro el tipo de arquitectura para incorporar a estos países en esfuerzos de reducción en el más largo plazo (Jacoby *et al.*, 1999), es importante analizar posibles escenarios futuros de obligaciones de reducción y su relación (si hay alguna) con los esfuerzos voluntarios de reducción en el mediano plazo.

Cualquier acuerdo obligatorio de limitación de emisiones en el futuro tiene que definir el inicio del acuerdo T y la cuota de emisión $z(T)$. Tal como ocurre en el Protocolo de Kyoto, lo más probable es que $z(T)$ sea definida en base a emisiones históricas medianamente cercanas al comienzo del acuerdo (Jacoby *et al.*, 1999). Es difícil pensar, por ejemplo, que si Chile debe comenzar a limitar sus emisiones en forma obligatoria en $T = 2030$, se utilice 1990 como el año base. Lo más razonable es pensar en algo más cercano a T como año base, que tal como en el Protocolo de Kyoto podría ser al año $T - 20$. El problema de usar el 2010 o cualquier otro año posterior como año base para estimar $z(T)$, es que las emisiones en esos años van a estar afectadas por posibles iniciativas voluntarias de reducción, ya sea a través del MDL o del CV, lo cual va a mermar la cuota $z(T)$.

Entonces, a menos que $z(T)$ sea fijada de una forma completamente distinta a lo que ha sido en el Protocolo de Kyoto, lo que además de parecer difícil, es imposible de definir antes de que Chile o cualquier otro país no-Anexo 1 decida implementar esfuerzos voluntarios de reducción de emisiones, es importante estudiar los beneficios económicos de participación voluntaria con una perspectiva de más largo plazo. Con tal propósito, consideremos un modelo muy simple de dos períodos bajo el supuesto que Chile maximiza beneficios netos considerando ambos períodos simultáneamente. Sea $t = 1$ el período donde el país no-Anexo 1 toma el compromiso voluntario y $t = 2$ donde el mismo país debe cumplir con un compromiso obligatorio. La función a maximizar con respecto a e_1 y e_2 es la siguiente

$$(4) \quad \pi = \pi_1 + \frac{1}{1+r} \pi_2 = p_1 \cdot (z_1 - e_1) - C_1(q_1) + \frac{1}{1+r} (p_2 \cdot (z_2 - e_2) - C_2(q_2))$$

donde π_t es el ingreso en el período t , r es la tasa de descuento, p_t es el precio en t y $e_t = e_{0t} - q_t$ son las emisiones en t . Para estimar la cuota en el segundo período, z_2 , se considera una ponderación de emisiones históricas de la siguiente forma

$$(5) \quad z_2 = x(\theta e_1 + (1 - \theta)\hat{e})$$

donde $0 < \theta < 1$ es un coeficiente de ponderación,⁴³ x es la tasa de reducción porcentual (tal como la entregada por la ecuación (3)), y \hat{e} es algún índice de emisiones históricas no afecto por la participación voluntaria que podría ser, por ejemplo, igual a la estimación de la línea base en el primer período, e_{01} .

⁴³ También puede interpretarse como la probabilidad de que se va utilizar e_1 en vez de \hat{e} como base de cálculo.

Incluyendo (5) en (4), las condiciones de primer orden que solucionan el problema de maximización son

$$(6) \quad CMg_1(q_1^*) = p_1 - \frac{1}{1+r} x \theta p_2$$

$$(7) \quad CMg_2(q_2^*) = p_2$$

La ecuación (7) indica que en el segundo período es óptimo reducir emisiones, hasta el punto en donde el costo de reducir una unidad más de emisiones es igual al precio de los permisos en ese momento (p_2). La ecuación (6), en cambio, dice que en el primer período es óptimo reducir hasta un punto en donde el costo de reducir una unidad más de emisiones es inferior al precio de los permisos en ese momento (p_1), lo que indica que es conveniente restringir la participación voluntaria en el primer período. Obviamente, la restricción no es aleatoria, sino que recae sobre aquellos esfuerzos de reducción menos rentables, i.e., los con costo marginal más cercanos a p_1 .

La restricción óptima a esfuerzos voluntarios de reducción de emisiones (y posiblemente de secuestro de emisiones),⁴⁴ ya sea a través del MDL o del CVs, va a depender de varios factores, tal como muestra la ecuación (6). A mayor tasa de interés, menor debiera ser la restricción ya que los costos futuros de una menor cuota z_2 aparecen más fuertemente descontados. Si el límite a las emisiones es muy fuerte (x pequeño), la restricción también debiera ser menor ya que los beneficios de tener una base más alta para el cálculo de la cuota z_2 disminuyen. Finalmente, si se piensa que lo más probable es que se utilicen emisiones observadas cercanas al período de compromiso T como base para el cálculo de z_2 (θ cercano a 1), la restricción debiera ser mayor con el objeto de aumentar dicha base.

Con el objeto de ilustrar la magnitud de estos resultados teóricos, consideramos la situación en que Chile ve limitadas sus emisiones de carbono en el año 2030 (i.e., $t = 2$), y donde x se estima de acuerdo a la “regla de Kyoto”, resumida en la ecuación (3), y las emisiones observadas 20 años antes, esto es en 2010 (i.e., $t = 1$), sirven como base de cálculo. Como el PIB per cápita (esperado) de Chile en 2010 es de 5.580 (1995US\$), el factor x entregado por la “regla de Kyoto” es de 137%. Si además asumimos que el precio p_2 es similar al precio p_1 , y que la tasa anual de descuento es de 4% (Weitzman, 1999), el factor $(1/1+r)x\theta$ es de 0,63, con lo cual la restricción óptima a la participación voluntaria de proyectos alcanza el 39%.⁴⁵ Esto significa, por ejemplo, que la

⁴⁴ Aunque Kyoto usa emisiones de 1990 como base para el cálculo de las obligaciones del 2010, a medida que los bosques se incluyan con más propiedad dentro de las posibilidades de mitigación, es razonable esperar que también se van a utilizar dentro de la base para el cálculo de las futuras obligaciones.

⁴⁵ Esto se obtiene de comparar q^* y q^{**} que son las reducciones que resuelven, respectivamente, las condiciones de primer orden $CMg(q^*) = p_1$ y $CMg(q^{**}) = (1-0,62)p_1$, y donde $CMg(q) = \gamma q^2$. Otros resultados indican que si $\theta = 0,5$, la restricción óptima es de 16,9%, y si la tasa anual es de 7%, la restricción óptima es de 19,6%.

reducción óptima de emisiones bajo CV debiera ser solamente de 2,59 mtonC en vez de 4,25 mtonC, eliminando así, 1,66 mtonC de reducción de proyectos con costos relativamente altos pero aún bajo p_1 .

7. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Hemos mostrado que las actuales políticas internacionales de estabilización de emisiones de gases efecto invernadero en países industrializados pueden tener importantes efectos en la economía chilena. Además de los aparentes beneficios por cambios en el comercio internacional (principalmente la caída del precio del petróleo), existen beneficios de participar en forma voluntaria con esfuerzos de reducción, ya sea a nivel de proyectos a través del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) o a nivel de país adquiriendo un compromiso voluntario (CV) de limitación de emisiones. Nuestros resultados indican que los beneficios netos bajo un CV son bastante mayores (llegando bajo ciertas circunstancias a 0,8% del PIB) que bajo el MDL, debido a la poca factibilidad de incluir proyectos forestales de captura de carbono dentro de este último mecanismo, y a los altos costos de transacción propios de la negociación uno-a-uno de un sistema de créditos de reducción como el MDL.

Nuestros resultados también indican que cualquier discusión en torno a una posible participación voluntaria, ya sea a través del MDL o del CVs, debe hacerse con una perspectiva de más largo plazo, que considere posibles obligaciones de reducción en el futuro cuando el PIB per cápita alcance niveles de países industrializados que hoy ven limitadas sus emisiones. Independiente si se trata de proyectos energéticos o forestales, reducciones/capturas de hoy pueden disminuir la base de cálculo para la estimaciones de las obligaciones de mañana. Usando un modelo muy simple, nuestros resultados indican que puede ser óptimo restringir en hasta un 39% la participación voluntaria durante el primer período de compromiso, 2008-2012.

Finalmente, hay varias áreas de trabajo futuro que vale la pena explorar. En primer lugar, mejorar la estimación de costos de abatimiento y secuestro para Chile; especialmente la relación entre el momento en que se comienzan a reducir (o secuestrar) las emisiones y su relación con el costo total. Segundo, mejorar los distintos escenarios de crecimiento de Chile y las proyecciones del sector forestal. Tercero, analizar la política interna que el gobierno de Chile debiera desarrollar para llevar a cabo cualquier acción internacional de participación voluntaria. En general, Chile ha avanzado en materia del uso de instrumentos económicos para la protección ambiental comparado a otros países desarrollados y menos desarrollados (Montero *et al.*, 2000), lo cual debiera facilitar, en teoría, la implementación de dichas políticas. Finalmente, a nivel teórico sería interesante explorar el diseño de sistemas dinámicos de permisos transables con participación voluntaria, que están sujetos a problemas de “inconsistencia temporal”, en que el regulador no se puede comprometer con una regla de distribución de permisos ex-ante, ya que lo que es óptimo ex-ante no es necesariamente óptimo ex-post.

REFERENCIAS

- Barros, V. y M. Conte Grand (1999). El significado de una meta dinámica de reducción de emisiones de gases efecto invernadero: el caso argentino, documento de trabajo, Universidad del CEMA, Buenos Aires, Argentina.
- Cifuentes, L.A., E. Sauma, H. Jorquera y F. Soto (1999). Co-controls benefits analysis for Chile: Preliminary estimation of the potential co-control benefits for Chile, COP-5 Progress Report, Dept. of Industrial Engineering, Catholic University of Chile.
- Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) (1999). Primera Comunicación Nacional de Chile bajo la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, Santiago, Chile.
- Donovan, D., K. Schneider, G.A. Tessema, and B.S. Fisher (1997). *International Climate Change Policy: Impacts on Developing Countries*, ABARE Research Report 97.8, Canberra, Australia.
- Ellerman, D., H. Jacoby and A. Decaux (1998). The effects on developing countries of the Kyoto Protocol and CO₂ emissions trading, Report N° 41, MIT Joint Program, Cambridge, Massachusetts.
- Hahn, R.W. (1989). Economic prescription for environmental problems: How the patient followed the doctor's orders, *Journal of Economic Perspectives* 3, 95-114.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (1996). *Climate Change 1995. Economic and Social Dimensions of Climate Change: Contribution of Working Group III to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, J. Bruce, H.P. Lee, and E.F. Haites, eds., Cambridge University Press.
- International Energy Agency (IEA) (1997). *CO₂ Emissions from fuel combustion: A new basis for comparing emissions of a major greenhouse gas 1972-1995*, IEA/OECD Publications, Paris.
- Jacoby, H.D., R. Eckaus, A.D. Ellerman, R.G. Prinn, D.M. Reiner and Z. Yang (1997). CO₂ emissions limits: Economic adjustments and the distribution of burdens, *The Energy Journal* 18, 31-58.
- Jacoby, H.D., R.G. Prinn and R. Schmalensee (1998). Kyoto's unfinished business, *Foreign Affairs* 77, 54-66.
- Jacoby, H.D., R. Schmalensee and Ian S. Wing (1999). Toward a useful architecture for climate change negotiations, Report N° 49, MIT Joint Program, Cambridge, Massachusetts.
- Montero, J.-P. (1998a). Marketable pollution permits with uncertainty and transaction costs, *Resource and Energy Economics* 20, 27-50.
- Montero, J.-P. (1998b). Optimal opt-in "climate" contracts, *Journal of Applied Economics* 1, 363-384.
- Montero, J.-P. (1999). Voluntary compliance with market-based environmental policy: Evidence from the U.S. acid rain program, *Journal of Political Economy* 107, 998-1033.
- Montero, J.-P., J.M. Sánchez and R. Katz (2000). A market-based environmental policy experiment in Chile, Documento trabajo N° 92, Instituto de Economía, Pontificia Universidad Católica de Chile.

- Mosnaim, A. y D. Noe (1999). Estimating carbon abatement and sequestration costs for Chile, LACEA, 1999, Santiago, Chile.
- Nordhaus, W.D. (1994). *Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- PRIEN (1999). Mitigación de Gases Efecto Invernadero en Chile: 1994-2020, Programa Investigación en Energía, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Reilly, J. *et al.* (1999). Multi-gas assessment of the Kyoto Protocol, Report N° 45, MIT Joint Program, Cambridge, Massachusetts.
- Schmalensee, R., T. Stoker and R. Judson (1998a). World carbon dioxide emissions, *Review of Economics and Statistics* 80, 15-27.
- Schmalensee, R., P. Joskow, A.D. Ellerman, J.-P. Montero, E.M. Bailey (1998b). An Interim Evaluation of Sulfur Dioxide Emissions Trading, *Journal of Economics Perspectives* 12, 53-68.
- Schelling, T (1992). Some economics of global warming, *American Economic Review* 82, 1-14.
- Weitzman, M. (1999). Gama discounting for global warming, mimeo, Dept. of Economics, Harvard University.
- Yang, Z., R.S. Eckaus, A.D. Ellerman and H.D. Jacoby (1996). The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model, Report N° 6, MIT Joint Program, Cambridge, Massachusetts.