

Costos y políticas eficientes de control de emisiones de fertilización nitrogenada en la agricultura mexicana

Adrián González-Estrada^{1§}
Maricela Camacho-Amador²

¹Programa Nacional de Economía-Campo Experimental Valle de México-INIFAP. Carretera Los Reyes- Texcoco km 13.5, Texcoco, Estado de México. CP. 56250. ²Posgrado de Economía Agrícola y de los Recursos Naturales-Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Texcoco, Estado de México, México. CP. 56230. (mcamacho@hotmail.com).

§Autor para correspondencia: adrglez@prodigy.net.mx.

Resumen

De 2000 a 2010, las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial no solo han disminuido, sino que han crecido a niveles sin precedentes, aumentando con ello la posibilidad de cambios climáticos catastróficos. En el año 2012 la actividad productiva y social de la humanidad produjo 52.76 millones de giga toneladas de bióxido de carbono equivalente (Gt CO₂eq); México emitió 663 425 giga toneladas, 1.3% del total. La agricultura y la ganadería mexicanas contribuyeron con 12.3% al total nacional. No obstante, la relevancia de este problema, se ha descuidado la investigación de los costos ambientales que implican esas emisiones. Los objetivos de esta investigación fueron: 1) estimar los costos económicos de las emisiones de óxido nitroso producidas por la fertilización nitrogenada en la agricultura mexicana; y 2) proponer, con base en ellos, una política fiscal para el control eficiente de esas emisiones. El método aplicado fue el del equilibrio general de la economía mundial con emisiones. Se concluyó que tanto el uso de fertilizantes químicos en la agricultura mexicana como la política agrícola son ineficientes, por lo que se proponen dos políticas alternativas y eficientes para el control de esas emisiones. El gobierno mexicano debe suspender los subsidios a los fertilizantes. Esto tendría un impacto negativo en la producción, por lo que las políticas eficientes de control de las emisiones deben estar acompañadas de políticas visionarias de ciencia y tecnología que desarrollen la producción, manteniendo las emisiones dentro de los niveles no-catastróficos del cambio climático.

Palabras clave: costos ambientales, equilibrio general de la economía, política fiscal ambiental.

Recibido: mayo de 2018
Aceptado: septiembre de 2018

Introducción

Al inicio de la revolución industrial, en 1750, la concentración de bióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera era de 280 partes por millón (ppm); en 1960 era de 315 y en 2010 de 380 (Sachs, 2008), 40% por encima de los valores medios registrados en el último medio millón de años (Lüthi, *et al.*, 2008). Esto significa que la mitad de las emisiones acumuladas de CO₂ entre 1750 y 2012 se ha producido en los últimos 42 años, y que ese proceso continúa acelerándose. De 1970 a 1999, las emisiones de esos gases, medidas en giga toneladas de bióxido de carbono equivalente (Gt CO₂eq), crecieron a una tasa anual de 1.64%, mientras que del año 2000 al 2012 crecieron a una tasa media de 2.69% (IPCC, 2014). En el año 2012 la actividad productiva y social de la humanidad produjo 52.76 millones de giga toneladas de bióxido de carbono equivalente (Gt CO₂eq):

Cuadro 1. Países con mayores emisiones de bióxido de carbono equivalente (CO₂e) en 2012.
(Giga toneladas métricas, Gt CO₂eq).

China	EE.UU.	India	Brasil	Fed. Rusa	Arabia	Japón	Alemania	México	G. Bretaña	Francia	Italia	Sub-total	Resto	Total
12 454 710.6	6 343 840.5	3 002 894.9	2 989 418	2 803 398.5	2 577 646.7	1 478 858.9	951 716.7	663 425	585 779.8	499 146.6	482 634	34 833 470.2	17 929 963.1	52 763 433.2

Fuente: cálculos con base a los datos de World Greenhouse Gas Emissions 1970-2012 (Oak Ridge National Laboratory, 2015).

De acuerdo con el Cuadro 1, China produce casi una cuarta parte de las emisiones mundiales. Además, China, India, Brasil, la Federación Rusa, Arabia y México contribuyen con 46.4% y contaminan más que todos los países desarrollados en conjunto. La razón de este hecho paradójico es que en los países en desarrollo las regulaciones ambientales son menores y que muchas industrias de los países más avanzados han emigrado a los países en desarrollo.

De acuerdo con el reporte del panel intergubernamental del cambio climático (IPCC, 2014), entre los años 2000 y 2010 las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a nivel mundial no solo no han disminuido, sino que han crecido a niveles sin precedentes, no obstante el creciente número de declaraciones y de políticas encaminadas a la reducción de tales emisiones. Del total de emisiones anuales, 52.76 Gt CO₂eq, la mitad, 26.38 Gt, se va a la atmósfera y la otra mitad es absorbida por los ‘sumideros’ de la tierra y de los océanos. Cada 7 800 millones de toneladas adicionales hacen aumentar en 2 partes por millón (ppm) la concentración de bióxido de carbono en la atmósfera, por lo que en el año 2012 se añadieron 3.38 ppm a la atmósfera (Sachs, 2008).

De acuerdo con nuestros cálculos, si la humanidad continuase añadiendo cada año 3.38 ppm de CO₂eq a la atmósfera, la concentración de esos gases pasaría de 380 en el 2010 a 515.3 en el año 2050 y a 684.4 ppm en el año 2100, lo cual superaría, con mucho, el punto crítico tolerable para la sociedad, que según cita Sachs (2008), es de 560 ppm. Si se mantienen las tasas actuales de crecimiento de las emisiones, entonces la humanidad alcanzará ese nivel crítico más pronto de lo

esperado, para el año 2050. Y si eso sucediera, las catástrofes ambientales, ecológicas, económicas y sociales nos obligarían a tomar las medidas que estén a la altura de las circunstancias. Por ello, la comunidad científica internacional recomienda que todos los países reduzcan, de manera conjunta y decidida, las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero, de 52.73 giga toneladas a 32 para el año 2050.

En particular para México, este desafío conlleva problemas sociales, económicos y ambientales que ya afectan a su población, infraestructura, sistemas productivos y ecosistemas (SEMARNAT, 2013). En el año 2012 México emitió a la atmósfera 663 425 giga toneladas en unidades de bióxido de carbono equivalente (CO_2eq) de gases de efecto invernadero (GEI). La agricultura y la ganadería mexicanas contribuyeron con 12.3%. Las emisiones de la agricultura son producidas principalmente por la fertilización nitrogenada, la cual emite un importante gas de efecto invernadero: el óxido nitroso (N_2O), el cual aporta 50.4% de todas las emisiones del sector agrícola. González-Estrada y Camacho-Amador (2017) estimaron las emisiones de óxido nitroso producidas por la fertilización química nitrogenada en México y las transformaron en unidades de bióxido de carbono equivalente (CO_2eq).

No obstante, la relevancia de este problema, se ha descuidado la investigación para estimar los costos ambientales por emisiones que ocasionan las diferentes actividades económicas y en específico, las que se generan por diferentes prácticas agrícolas, como la fertilización. La investigación se ha enfocado más en pronosticar las repercusiones del cambio climático y la vulnerabilidad de los sectores económicos. Por esa razón y considerando a una de las directrices del programa especial para el cambio climático (PECC) en relación con la agricultura, que es el de lograr un uso eficiente de fertilizantes, los objetivos de la presente investigación fueron: 1) estimar los costos económicos o sociales de las emisiones de óxido nitroso producidas por la fertilización nitrogenada en la agricultura mexicana; y 2) proponer, con base a ellos, una política fiscal-ambiental eficiente para el control de emisiones.

Materiales y métodos

Precios del bióxido de carbono y de los permisos de emisión en equilibrio general

La definición de un precio por tonelada equivalente de bióxido de carbono significa establecer un precio de mercado para las políticas de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. La definición de un precio por tonelada equivalente de bióxido de carbono es una herramienta o mecanismo financiero que debe reflejar los costos económicos, sociales y ecológicos del cambio climático. Existen tres enfoques para la definición corporativa de precios del carbón: los precios sombra, los impuestos internos o cuotas y los precios implícitos (UNFCCC, 2015). Los dos instrumentos de la política de control de emisiones más usados son: la definición de los precios del bióxido de carbono y el otorgamiento de permisos de emisión.

En los dos últimos años el número de instrumentos para la definición de precios del bióxido de carbono casi se ha duplicado, pues se incrementó de 20 a 38. Actualmente, cuarenta países y veinte ciudades, que en conjunto representan 25% del total de emisiones a nivel mundial, han impuesto un precio a las emisiones. El control de emisiones por ese medio representa 12% de las emisiones globales (IBRD, 2015). Por ejemplo, este instrumento de precios del bióxido de carbono cubre 1

Gt CO₂eq en EE.UU., 0.5 en China y 2 en la Unión Europea. Hoy, el valor total de todos los instrumentos de precios del bióxido de carbono es de 50 000 millones de dólares, de los cuales 70% corresponde a los sistemas de compra-venta de emisiones y 30% a los impuestos al carbono. Los precios a las emisiones en unidades equivalentes de bióxido de carbono fluctúan entre 1 y 130 dólares.

Esos instrumentos de política, tan variables y caóticos, no han sido efectivos para inducir un control efectivo de los niveles de gases de efecto invernadero acumulados en la atmósfera, pues los niveles acumulados de CO₂eq no solo no se han reducido, sino que han crecido considerablemente a niveles peligrosos. De ahí la necesidad de definir un método para cuantificar sus niveles eficientes. El enfoque adecuado es, obviamente, el del equilibrio general, pues las emisiones de GEI tienen efectos no solo generales dentro de cada país sino también tienen consecuencias a nivel global o planetario. Sin embargo, a nivel mundial los mercados de carbono (CO₂eq) son incompletos, por lo que las asignaciones del equilibrio general están muy lejos de ser eficientes. En consecuencia, la creación de mercados en los que se oferten y demanden permisos de contaminación puede dar como resultado asignaciones óptimas en el sentido paretiano, solo si las asignaciones ahí obtenidas son factibles y si los agentes económicos que producen las externalidades pagasen el costo correspondiente a las consecuencias económicas negativas que tienen sus decisiones y actividades productivas (González-Estrada, 2003 y 2004).

El equilibrio general de la economía con permisos de emisión

La creación y organización de mercados internacionales de permisos de emisiones es una de las medidas de política para el control de las emisiones de gases de efecto invernadero que más atención ha recibido por parte de los expertos (Tientenberg, 1992), debido a sus ventajas, la más importante de las cuales es su habilidad para instrumentarse y llevarse a cabo con un aparato burocrático mínimo y con bajos costos de transacción (Larsen y Shah, 1994). Además, son los instrumentos de la política ambiental más promisorios en las condiciones actuales (Grubb, 1989 y 1990); además, son flexibles, efectivos y eficientes para reducir los niveles de CO₂Eq, en la atmósfera.

El modelo de equilibrio general aquí propuesto es una adaptación del modelo de una economía global con emisiones de gases de efecto invernadero y con permisos de emisión, inicialmente construido por Uzawa (2010). Sea θ_φ la emisión anual de gases de efecto invernadero (GEI) medidos en unidades de bióxido de carbono equivalente, CO₂eq, en el país $\varphi=1, 2, \dots, n$ y sea θ el total de emisiones de esos gases a nivel global: $\theta = \theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_n$. Para cada país, sus emisiones: θ_φ , más las del resto del mundo: θ , suman la emisión total: Θ . Es decir: $\Theta = \theta + \theta_\varphi$. El conjunto de posibilidades de producción de cada país φ es: T_φ , $\forall \varphi = 1, 2, \dots, n$. En cada país existen L factores productivos: $k_\varphi = (k_{\varphi 1}, k_{\varphi 2}, \dots, k_{\varphi L})$, los cuales tienen las siguientes propiedades: $k_\varphi \geq 0$; es decir: $k_{\varphi l} \geq 0 \forall l = 1, 2, \dots, L$ y $k_{\varphi l} > 0$, para algún l . En esta economía existen k mercancías: $j=1, 2, \dots, k$. La mínima cantidad de factores de la producción requerida para producir el vector de mercancías o productos en cada país es: $x_\varphi = (x_{\varphi 1}, x_{\varphi 2}, \dots, x_{\varphi L})$. El ingreso nacional del país φ , cuyas emisiones son θ_φ , es: $y_\varphi = f_\varphi(k_\varphi, \theta_\varphi)$. Las tecnologías exhiben rendimientos constantes a escala y el conjunto de posibilidades de producción para esta economía, T_φ , es cerrado y convexo para los vectores $(k_\varphi, \theta_\varphi) \in \mathbb{R}^{1+n+c}$. Existen k mercancías y el vector de precios es: $p = (p_1, p_2, \dots, p_k) \in \mathbb{R}_+^k$ (Uzawa, 1991 y 1992).

La función que representa los ordenamientos parciales para el consumo c_φ y para la cantidad total, global, a nivel planetario, de las emisiones anuales de gases con efecto invernadero, θ , expresadas en unidades equivalentes de bióxido de carbono, CO_2eq , donde: $\theta = \theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_n$, es la función $u_\varphi = u(c_\varphi, \theta)$ (Uzawa, 1991 y 1992).

Sea $\psi(\theta)$ el grado en que las unidades familiares del país φ son afectados por las emisiones θ . Como es obvio, $\psi(\theta)$ puede ser llamado índice de calentamiento global, idéntico para todos los países, y, además: $\psi(\theta) > 0, \psi'(\theta) < 0; \psi''(\theta) < 0, \forall \theta \in (0, \hat{\theta})$, donde $\hat{\theta}$ es un nivel crítico de emisiones y significa que si θ sigue creciendo más allá de $\hat{\theta}$ se producirán daños irrevocables para la humanidad. Uzawa (1991 y 1992a) postuló el siguiente índice de calentamiento global: $\psi(\theta) = (\hat{\theta} - \theta)^\beta, \theta \in (0, \hat{\theta}) \wedge \beta \in (0, 1)$. La tasa marginal de cambio del índice de impacto ambiental debido a un incremento marginal en las emisiones de CO_2 equivalente es:

$$r_\varphi(\theta) = \frac{\psi'_\varphi(\theta)}{\psi_\varphi(\theta)}, \forall \varphi = 1, 2, \dots, n$$

Esta tasa marginal también es conocida con el nombre de coeficiente de impacto del calentamiento global. El vector de las tasas de impuesto sobre las emisiones es: $\tau_\varphi = (\tau_{\varphi 1}, \tau_{\varphi 2}, \dots, \tau_{\varphi k})$ y el vector del costo de los factores de la producción es: $\omega_\varphi = (\omega_{\varphi 1}, \dots, \omega_{\varphi L})$.

¿Cómo se debe definir el equilibrio general de esta economía con emisiones de gases de efecto invernadero e impuestos? ¿Cuáles son las condiciones necesarias y suficientes para la existencia de un equilibrio general con asignaciones eficientes de permisos de contaminación?

Con el fin de responder esas preguntas, se asume que existe un mercado internacional de permisos de emisión, en el cual los países compran y venden permiso para emitir CO_2Eq . Sea θ_φ la cantidad de CO_2Eq emitida por el país $\varphi = 1, 2, \dots, n$ y sea b_φ , el monto de los permisos de emisión para ese país. Si $\theta_\varphi > b_\varphi$, el país tendría que comprar $(\theta_\varphi - b_\varphi)$ permisos de emisión, pero si $\theta_\varphi < b_\varphi$, entonces podría vender $(b_\varphi - \theta_\varphi)$ permisos. Desde un punto de vista institucional, el problema central es cómo llegar a un acuerdo con respecto a la definición de la cantidad inicial de permisos ofertados (Rose y Stevens, 1993; Bertram, 1992, y Larson y Shah, 1994, 1992). Se parte del supuesto de que tanto θ como b ya fueron determinados y que, como ya se dijo: $b = \sum_{\varphi=1}^n b_\varphi, \theta = \sum_{\varphi=1}^n \theta_\varphi$. La condición de la balanza de pagos para el país φ es: $p c_\varphi = p x_\varphi - q(\theta_\varphi - b_\varphi)$, donde $p = (p_1, p_2, \dots, p_k)$ es el vector de precios de los k mercancías producidas y q es el precio de los permisos de emisión en el mercado internacional. Además, c_φ es el vector de consumos y x_φ es el vector de bienes producidos en el país $\varphi = 1, 2, \dots, n$.

El equilibrio general de la economía mundial con permisos de emisión es la matriz de asignaciones de producción, la de consumo y la de precios: $(p^*, q^*, \omega_\varphi^*, p_{em}^*; x_\varphi^*, c_\varphi^*, k_\varphi^*, \theta_\varphi^*)$, tales que: a) en cada país, las empresas maximizan ganancias: $\pi_\varphi = p \cdot f_\varphi(k_\varphi, \theta_\varphi) - w_\varphi k_\varphi - q \theta_\varphi$; b) se resuelven los problemas de $\text{Max}(u_\varphi(c_\varphi, \theta) = \psi(\theta) u_\varphi(c_\varphi))$, sujetos a $p \cdot c_\varphi = p x_\varphi - q(\theta_\varphi - b_\varphi)$; c) a nivel mundial, los mercados de

mercancías se equilibran: $\sum_{\varphi=1}^n c_{\varphi} = \sum_{\varphi=1}^n x_{\varphi}$, y, finalmente, d) la suma de las emisiones de CO₂Eq de todos los países es igual a la cantidad autorizada de permisos de emisiones: $\sum_{\varphi=1}^n \theta_{\varphi} = \theta = \sum_{\varphi=1}^n b_{\varphi} = b$. Las condiciones del equilibrio general, necesarias y suficientes, dadas las condiciones de concavidad, son:

$$p \frac{\partial f_{\varphi}}{\partial k_{\varphi}} - w = 0 \quad 1) \quad \wedge \quad -p \frac{\partial f_{\varphi}}{\partial \theta_{\varphi}} - q = 0 \quad 2)$$

$$p \cdot f_{\varphi}(k_{\varphi}, \theta_{\varphi}) - w k_{\varphi} - q \theta_{\varphi} = 0 \quad 3)$$

$$\alpha_{\varphi} \psi(\theta) u'_{\varphi}(c_{\varphi}) - p = 0 \quad 4)$$

$$\psi'(\theta) u_{\varphi}(c_{\varphi}) - \lambda_{\varphi} q = 0 \quad 5)$$

$$p \cdot c_{\varphi} = p \cdot x_{\varphi} - q(\theta_{\varphi} - b_{\varphi}) \quad 6)$$

$$\sum_{\varphi=1}^n x_{\varphi} = \sum_{\varphi=1}^n c_{\varphi} = 0 \quad \wedge \quad \sum_{\varphi=1}^n \theta_{\varphi} = \sum_{\varphi=1}^n b_{\varphi} \quad 7-8)$$

Si se multiplican (1) y (2) por k y θ_{φ} , si se suman y si se aplica el teorema de Eüler, se obtiene:

$$w k + q \theta_{\varphi} = p \left(\frac{\partial f_{\varphi}}{\partial k_{\varphi}} k_{\varphi} + \frac{\partial f_{\varphi}}{\partial \theta_{\varphi}} \theta_{\varphi} \right) = p f_{\varphi}(k_{\varphi}, \theta_{\varphi}) = y_{\varphi}$$

Es decir, $y_{\varphi} = w k + q \theta_{\varphi} = p \cdot c_{\varphi}$. Esto significa que el ingreso nacional o el valor total de la producción es igual a la suma de los pagos a los factores de la producción: capital y fuerza de trabajo. Dado que $q \theta_{\varphi}$ es el valor de la asignación de permisos de emisiones a precios de mercado, entonces: $y_{\varphi} = w k + q b_{\varphi} = (p x_{\varphi} - q \theta_{\varphi}) + q b_{\varphi} = p x_{\varphi} - q(\theta_{\varphi} - b_{\varphi}) \equiv p \cdot c_{\varphi}$. Claramente: $p x_{\varphi} - q \theta_{\varphi} \equiv w k$. También si multiplican ambos lados de la condición (4) por c_{φ} y se aplica el Teorema de Eüler se obtiene:

$$\alpha_{\varphi} \psi(\theta) u_{\varphi}(c_{\varphi}) = y_{\varphi} \quad (p c_{\varphi} = y_{\varphi}) \quad 8)$$

El equilibrio general requiere que: a) los vectores (p^*, q^*) cumplen las condiciones (1)-(8); b) en cada país los impuestos a las emisiones sean iguales al precio de mercado de las mismas, q^* , y c) se equilibre la balanza de pagos, definida como: $p c_{\varphi} = p x_{\varphi} - q(\theta_{\varphi} - b_{\varphi})$. El equilibrio general del país φ para $\varphi = 1, 2, \dots, n$, caracterizado por las condiciones (1)-(8) será eficiente en el sentido paretiano, si $\theta = b$ y, desde luego, si: $\theta_{\varphi} = b_{\varphi}, \forall \varphi = 1, 2, \dots, n$. La condición (4) implica que:

$$\alpha_{\varphi} \psi(\theta) u'_{\varphi}(c_{\varphi}) = p \quad 9)$$

Donde: $\alpha_\varphi = (1/\lambda_\varphi^*) > 0$, \forall_φ y λ_φ es el costo de oportunidad del dinero o la utilidad marginal del ingreso. Finalmente, de las condiciones de del equilibrio general, de la ecuación de definición: $y = pc$ y del teorema de Eüler, se obtiene: $r_\varphi(\theta) = (\tau_\varphi(\theta)/y_\varphi)$, por lo que:

$$\tau_\varphi(\theta) = \hat{q} = r_\varphi(\theta)y_\varphi \tag{10}$$

Por lo tanto, la tasa impositiva que el país φ deben pagar por sus emisiones de gases de efecto invernadero es: $\tau_\varphi^*(\theta) = r_\varphi(\theta)y_\varphi$, donde $\tau_\varphi^*(\theta)$ es el impuesto a las emisiones de CO₂eq en el país φ , $r_\varphi(\theta)$ es el coeficiente de impacto ambiental y y_φ es el ingreso nacional del país φ . Dado que $p \cdot c = p \cdot x = y$, entonces el impuesto óptimo correspondiente al sector j en el país φ está dado por la siguiente expresión: $\tau_{\varphi j}^*(\theta) = r_{\varphi j}(\theta)y_{\varphi j}$, en la que $r_{\varphi j}(\theta)$ es la tasa impositiva que el sector j del país φ debe pagar por sus emisiones de gases de efecto invernadero y $y_{\varphi j}$ es el ingreso nacional producido por el sector j en el país φ .

Resultados

El costo de las emisiones de la fertilización nitrogenada en la agricultura mexicana

El cambio climático es una realidad inexorable, cuyos efectos, a lo mucho, sólo pueden ser mitigados. De acuerdo con Sachs (2008), los impactos más severos y catastróficos se podrían evitar si la temperatura global de la atmósfera aumenta menos de 2 grados centígrados en relación con la temperatura media prevaleciente en el período de referencia: los inicios de la revolución industrial a mediados del siglo XVIII. Para lograrlo, se requiere reducir las 52.76 Giga-toneladas de CO₂eq producidas en 2012 a tan solo 32 para el año 2050. En la actualidad, los costos globales asociados a la mitigación y adaptación al cambio climático suman un monto entre 385 mil millones de dólares por año; las inversiones que se espera realizar para el año 2030 deben ser de 400 mil millones de dólares por año y para el 2050, 2 billones anuales (IBRD, 2015). Hoy, los precios del carbón están fragmentados por países y, dentro de ellos, por sectores de la economía (IBRD, 2015). Además, son fijados en un rango muy amplio: desde 1 hasta 130 dólares. Es obvio que esos precios están muy lejos de ser eficientes, socialmente hablando. Esa dispersión refleja el hecho de que los países más ricos trasladan las actividades más contaminadoras a los países más pobres, quienes con tal de atraer inversiones rebajan las normas ambientales. También explica por qué las diez economías en desarrollo más grandes contaminan más que los diez países más desarrollados y ricos.

Uzawa (2010) demuestra que si $b^* = \theta$; es decir, si los permisos de emisión igualan al monto total de emisiones, entonces la solución del equilibrio general con permisos de emisión es igual a la del equilibrio general con impuestos a las emisiones, por lo que el costo total a nivel planetario de las emisiones de CO₂eq es: $q^* = r(\theta)y$. En consecuencia, el costo de una tonelada de CO₂eq es:

$$\pi^* = \frac{q^*}{b^*} = \frac{q^*}{\theta} = \frac{r(\theta)y}{\theta} = \frac{53 \times 10^{12} \text{ dólares}}{52.76 \times 10^6 \text{ Gt de CO}_2\text{eq}} \cong 100 \text{ dólares t}^{-1} \text{ de CO}_2\text{eq}$$

Este estimador es consistente con los resultados obtenidos por Golosov *et al.* (2014), quienes, con un modelo dinámico-estocástico de equilibrio general, estimaron un costo eficiente de las emisiones de 56.9 dólares por tonelada si la tasa de descuento fuese 0.5% y de 496 dólares si esa tasa fuese 1.5%. Si se quiere evitar que la temperatura global de la atmósfera aumente menos de 2 grados centígrados en relación con la temperatura media prevaeciente a mediados del siglo XVIII y que los efectos económicos, sociales y ambientales del cambio climático alcancen niveles catastróficos e inevitables para el año 2050, el precio que debe tener cada permiso de emisión es de \$100.00 dólares por tonelada de CO₂eq. Algo similar reporta el Banco Internacional para la Reconstrucción y el Desarrollo (IBRD, 2015). Este es el costo para mantener la producción de la humanidad dentro del conjunto de factibilidad no-catastrófico. En consecuencia, los costos de las emisiones producidas por la fertilización química en la agricultura mexicana son los siguientes.

Políticas eficientes de control de emisiones

Las emisiones de óxido nitroso producidas por la aplicación de fertilizantes químico-nitrogenados representan 50.4% de las emisiones del sector agropecuario (SEMARNAT, 2013). De acuerdo con el Cuadro 2, se estima que en 2014 las emisiones de ese sector fueron 11.617 millones de toneladas de CO₂eq, las cuales representan un costo de 19 982.2 millones de pesos de 2017. En ese año, el PIB agrícola fue de 280 mil millones de pesos, por lo que el impuesto *ad valorem* por emisiones de gases de efecto invernadero debería ser 7.14%. Con el fin de entender este resultado como parte de un todo, González-Estrada *et al.* (2011) citan que en 2004 los costos totales por agotamiento y degradación ambiental (CTADA) en México representaron 9.2% del PIB; es decir, 712 344 millones de pesos, monto que refleja la cantidad de capital natural que se apropiaron como excedentes o ganancias extraordinarias de los agentes económicos beneficiados sin pagar nada a cambio.

Cuadro 2. Costo de emisiones de CO₂eq producidas por la fertilización química en la agricultura mexicana.

Año	Consumo aparente de fertilizantes con N (t)	Emisiones totales (t)	Costo total (pesos de 2017)
2000	1 342 000	8 689 886	14 946.6
2001	1 374 100	7 456 403	12 825
2002	1 176 400	7 939 211	13 655.4
2003	886 124	7 700 389	13 244.7
2004	907 137	7 631 970	13 127
2005	915 801	6 770 920	11 646
2006	1 057 564	7 793 336	13 404.5
2007	1 141 863	7 726 208	13 289.1
2008	939 477	8 604 039	14 798.9
2009	856 546	8 391 036	14 432.6
2010	823 145	8 662 131	14 898.9
2011	837 502	8 869 325	15 255.2
2012	989 000	7 593 242	13 060.4
2013	1 001 838	5 719 614	9 837.7
2014	1 097 914	5 855 245	10 071

Fuente: cálculos con base a las emisiones totales de CO₂eq producidas por la fertilización química en la agricultura mexicana, estimadas por González-Estrada y Camacho-Amador (2017).

González-Estrada *et al.* (2011) estimaron el impuesto ambiental eficiente para cada sector económico de México. El sector agropecuario, silvícola y de pesca produjo una degradación ambiental equivalente a 49 226 millones de pesos, por lo que el impuesto ambiental eficiente que debería pagar es 13.15%. Ese impuesto *ad valorem* de 7.14%, aquí obtenido, aunque eficiente en términos de Pareto, resultaría poco efectivo, por los altos niveles de evasión fiscal y, además, tendría altos costos de transacción, debido a que su instrumentación sería onerosa.

Con el auxilio de modelos de equilibrio dinámico general de la economía mundial se estimó que el costo eficiente de un permiso para emitir una tonelada de C_2O eq debería ser de \$100.00 dólares (IBRD, 2015), y que ese es el precio eficiente, en términos de Pareto, de un permiso de emisión por una tonelada de C_2O eq. De acuerdo con Uzawa (2010), si $b=\theta$, el equilibrio general con permisos de emisión se corresponde con el equilibrio diferencial con impuestos a las emisiones.

Por lo tanto, una política equivalente e igualmente eficiente que la anterior, sería la de establecer un impuesto pigouviano a los fertilizantes químicos, de acuerdo con el contenido relativo de nitrógeno, usando el mismo método seguido para obtener el costo total de las emisiones en el Cuadro 3 y en concordancia con el procedimiento propuesto por González-Estrada (2003 y 2004).

Cuadro 3. Emisiones e impuesto eficiente por una tonelada de cada tipo de fertilizante.

Fertilizante (1 t)	Contenido (t de N)	Emisiones CO_2 eq		Emisiones totales CO_2 eq		Impuesto (pesos kg^{-1})
		Directas	Indirectas	(Gg)	(t)	
Nitrogenados						
Urea	0.46	0.00224086	0.00072828	0.00296914	2.9691	5.11
Nitrato amónico	0.335	0.00163193	0.00053038	0.00216231	2.1623	3.72
Sulfato amónico	0.205	0.00099864	0.00032456	0.0013232	1.3232	2.28
Fosfato amónico	0.21	0.001023	0.00033248	0.00135548	1.3555	2.33
Fosfatados						
Superfosfato simple	0.195	0.00094993	0.00030873	0.00125866	1.2587	2.16
Superfosfato concentrado	0.46	0.00224086	0.00072828	0.00296914	2.9691	5.11
Fosfato amónico	0.5	0.00243571	0.00079161	0.00322732	3.2273	5.55
Potásicos						
Sulfato potásico	0.5	0.00243571	0.00079161	0.00322732	3.2273	5.55
Cloruro potásico, sup. 45%	0.53	0.00258186	0.0008391	0.00342096	3.421	5.88

Fuente: cálculos con el método seguido por González-Estrada y Camacho-Amador (2017).

Discusión

Irracionalidad del uso de fertilizantes en la agricultura mexicana

La fertilización química en la agricultura mexicana es ineficiente económica y socialmente, en el sentido en que definen eficiencia MasColell, *et al.* (1995); Varian (1992); Jehle y Reny (2011), debido a que ni los productores ni las autoridades ni la sociedad toman en cuenta los costos de las emisiones de óxido nitroso que tienen las aplicaciones de fertilizantes. Más aún, en el cálculo de

las dosis óptimo-económicas de fertilización no se han tomado en cuenta los costos por emisiones y por ello, las prácticas de fertilización en México tampoco son eficientes económica ni socialmente.

La actual política de subsidios a los fertilizantes, que promueve un uso mayor al de las dosis óptimo-económicas y que tampoco toma en cuenta los costos de las emisiones de fertilizantes químicos que contienen nitrógeno, es también ineficiente, en primer lugar, porque los subsidios son ineficientes por sí mismos y, en segundo lugar, porque incentiva el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados y por consiguiente, estimula las emisiones de óxido nitroso, que tiene un potencial de calentamiento 310 veces mayor que el bióxido de carbono, como lo reporta la SEMARNAT (2013).

Conclusiones

El uso de fertilizantes químicos en la agricultura mexicana es ineficiente y por lo tanto, irracional, y también lo es la actual política de subsidios a los fertilizantes, ya que incentiva un uso irracional e ineficiente desde los puntos de vista económico, social y ambiental. Se deben volver a definir las dosis óptimo-económicas de fertilización tomando en cuenta las prácticas vigentes, los precios de los productos y de los fertilizantes, además de los costos de las emisiones.

El gobierno de México debe dejar de subsidiar el uso indiscriminado de fertilizantes y aplicar una política óptima y eficiente de control de las emisiones en la agricultura, en la economía en general y en la sociedad mexicana en su conjunto. Esta política implicará disminuciones significativas de la producción, por lo que debe ir acompañada de políticas visionarias de ciencia y tecnología (González-Estrada, 2003) que impulsen la generación de innovaciones y técnicas de producción para el desarrollo de la economía, manteniendo las emisiones dentro de los niveles no-catastróficos del cambio climático.

Literatura citada

- Bertram, G. 1992. Tradable emission permits and the control of greenhouse gases. *J. Development Studies*. 28(3):423-446.
- DOF. 2013. Diario Oficial de la Federación. Programa especial de cambio climático 2014-2018. Lunes 28 de abril, segunda sección vespertina. México, DF. 96 p.
- Golosov, M.; Hassler, J.; Krusell, P. and Tsyvinski, A. 2014. Optimal taxes on fossil fuel in general equilibrium. *Econometrica*. 82(1):41-88.
- González, E. A. 2003. Economía de la contaminación en la teoría del equilibrio general competitivo: Parte I. Reformulación del modelo y efectos Stolper-Samuelson. *Agrociencia* 37(1):45-55.
- González, E. A. 2004. Economía de la contaminación en la teoría del equilibrio general competitivo: Parte II. efectos Rybczynski y políticas eficientes y óptimas de control. *Agrociencia* 38(3):313-324.
- González, E. A. y Camacho, A. M. 2017. Emisión de gases de efecto invernadero de la fertilización nitrogenada en México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 8(8):1733-1745.
- González, E. A.; Camacho, A. M. y Sangermán, J. D. M. 2011. Incorporación de cuentas ecológicas y servicios ambientales en las matrices de contabilidad social. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 2(5):715-731.

- Grubb, M. J. 1989. Greenhouse effects: negotiating targets. Royal Institute of International Affairs. London. 12 p.
- Grubb, M. J. 1990. International marketable emission permits: key issues. IPCC/OECD Workshop on financial and economic measures as a response to climate change. Paris. 25 p.
- IBRD. 2015. International Bank for Reconstruction and Development. State and trends of carbon pricing. The World Bank. Washington, DC. 85 p.
- IPCC. 2014. Intergovernmental Panel on Climate Change. Greenhouse gas emissions accelerate despite reduction efforts. IPCC press released on April 13, 2014. Berlin. 3 p.
- Jehle, G. A. and Reny, P. J. 2011. Advanced microeconomic theory. Prentice Hall. NY. 656 p.
- Larsen, B. and Shah, A. 1994. Combating greenhouse effect. Finance & Development. 46(4):842-856.
- Lüthi, D.; LeFloch, M.; Bereiter, B.; Blunier, T.; Barnola, J. M.; Siegenthaler, U.; Raynaud, D.; Jouzel, J.; Fischer, H.; Kawamura, K. and Stocker, T. F. 2008. High-resolution carbon dioxide concentration record 650 000-800 000 years before present. Nature, May 15. 453(15):379-382.
- MasColell, A.; Whinston, M. D. and Green, J. R. 1995. Microeconomic theory. Oxford University Press. Cambridge, England. 981p.
- Oak Ridge National Laboratory. 2015. Global, regional, and national fossil-fuel CO₂ emissions, 1970-2012. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Environmental Sciences Division. U.S. Department of Energy. Oak Ridge, Tennessee. United States. (Excel data base). <http://cdiac.ornl.gov/CO2-emission/timeseries/global>.
- Rose, A. and Steven, B. 1993. The efficiency and equity of marketable permits for CO₂ emissions. Resources and Energy Economics. 15(1):117-146.
- Sachs, J. 2008. Common wealth: economics for a crowded planet. The Penguin Press. New York. 400 p.
- SEMARNAT. 2013. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Inventario nacional de emisiones de gases efecto invernadero 1990-2010. México DF. 384 p.
- SEMARNAT-INE. 2006. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología. Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero, 1990-2002. México, DF. 32 p.
- Tietenberg, T. 1992. Relevant evidence with tradable entitlements. In: Dornbusch, R. and Poterba, J. M. (Eds.). Combating global warming: Study on a global system of tradable carbon emission entitlements. MIT Press. Cambridge, MA. 267 p.
- UNFCCC. 2015. United Nations Framework Convention on Climate Change Executive guide for carbon pricing leadership: a caring for climate report. UN Global Compact, the secretariat of the UN Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), United Nations Environment Program (UNEP), World Resources Institute (WRI) UN Global Compact, the secretariat of the UN Framework Convention on Climate Change. New York. 34 p.
- Uzawa, H. 1991. Global warming initiatives: the pacific rim. In: Dornbusch, R. and Poterba, J. M. (Eds.). Global warming: economic policy responses. MIT Press. Cambridge, MA. 411 p.
- Uzawa, H. 1992. Imputed prices of greenhouse gases and land forests. Renewable energy 3(4-5):499-511.
- Uzawa, H. 2010. Global warming, carbon taxes, and international fund for atmospheric stabilization. Initiative for policy dialogue's. Climate Task Force Meeting, University of Manchester. Manchester, UK. 31 p.
- Varian, H. R. 1992. Microeconomic Analysis. W.W. Norton & Company. New York. 563 p.