

MODELO DE EQUILIBRIO GENERAL PARA EL ANÁLISIS DE POLÍTICAS CLIMÁTICAS: UNA APLICACIÓN PARA URUGUAY

Francisco Rosas

Universidad ORT Uruguay & Centro de Investigaciones Económica (cinve)

1. INTRODUCCION

La Estrategia Climática de Largo Plazo (ECLP) de Uruguay cumple con el compromiso del país ante la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC por su sigla en inglés) de elaborar y presentar una estrategia de desarrollo a largo plazo baja en emisiones y resiliente al clima. La estrategia es consistente con las metas climáticas a nivel global y con las establecidas en las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (CND), y se compone de un escenario tendencial de emisiones y de un escenario aspiracional de neutralidad de CO₂ al 2050, así como también escenarios en metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O).

Este trabajo realiza al menos dos aportes. Primero, se propone un modelo económico de análisis calibrado para Uruguay para evaluar diversas acciones y políticas climáticas. Segundo, se responde la pregunta de qué impactos macroeconómicos tiene el escenario aspiracional de neutralidad de CO₂ de la ECLP.

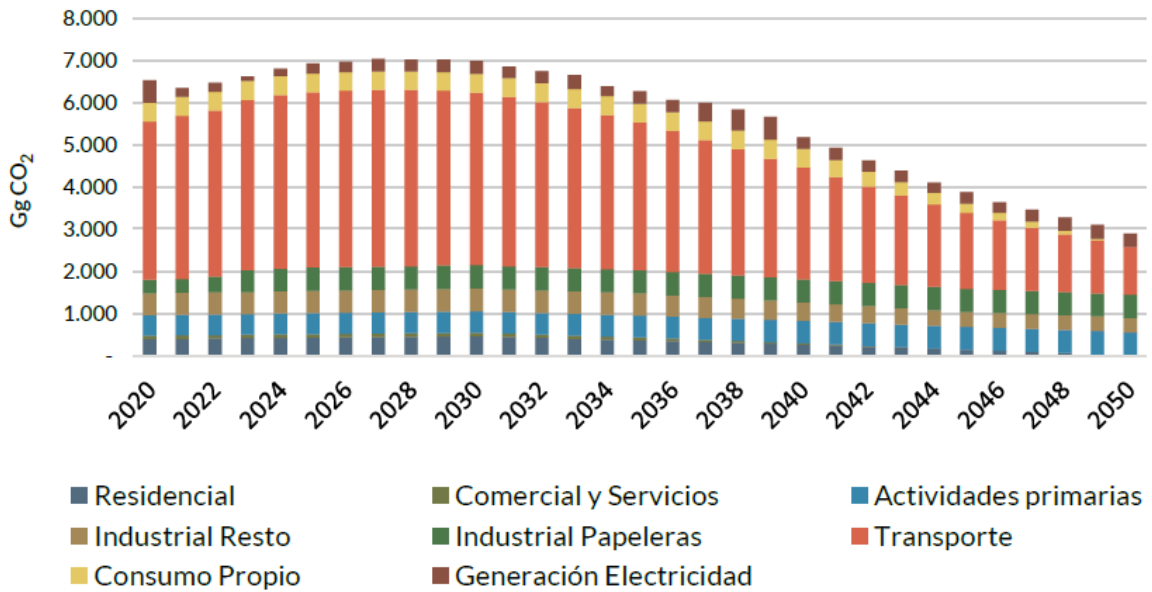
El escenario aspiracional propone alcanzar la neutralidad de emisiones de CO₂ al 2050, requiriendo un esfuerzo importante de mitigación y aumento de remociones, pero que es diferente por sector del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI). Los sectores de Energía y Agricultura (AFOLU) son los más relevantes en este contexto por tratarse de aquellos con mayor peso en el total de emisiones. Según muestra la Tabla 1, en el sector energía, el escenario Aspiracional supone un cambio importante al 2050 en los pesos relativos de las distintas fuentes de energía. En particular, se proyecta un crecimiento del 83% en el uso de energía eléctrica y una reducción del 50% en el uso de combustibles fósiles. Las emisiones resultantes y su proyección al 2050 por rubro se muestran en la figura siguiente que surge directamente de la ECLP.

Tabla 1. Escenarios de la ECLP de los sectores de Energía y AFOLU

INGEI	Escenario	Variable	2050	
			Unidad	% de cambio
Energía	Aspiracional	Total electricidad	ktep	83%
	Aspiracional	Total combustibles fósiles	ktep	-50%
AFOLU	Aspiracional Fmad	Tierras forestales	ha	14%
	Aspiracional	Productividad ganadería	Kg/ha	8%

Fuente: Estrategia Climática de Largo Plazo de Uruguay

Figura 1. Proyección de emisiones de CO2 del escenario aspiracional a 2050.
Fuente: ECLP



En agricultura se propone un incremento de 14% en el área de tierras forestales, implicando un aumento en igual porcentaje en el secuestro de CO₂. El área de bosque nativo se mantiene relativamente constante, pero se reduce el área de pastizales naturales (Figuras 2 y 3). Por otro lado, a pesar de esta reducción del área de pastizales, la producción de la ganadería de carne que es una de las principales usuarias de este uso, no se ve reducida debido a un aumento en su productividad al 2050 del 8%, lo que genera a su vez, una reducción en sus emisiones por unidad de producto.

Figura 2. Evolución de área de tierras forestales (ha, escenario Fmad). Fuente: ECLP

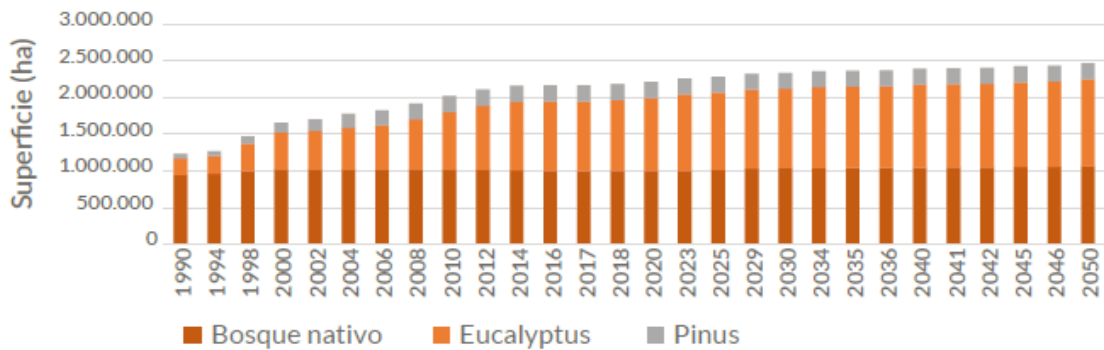
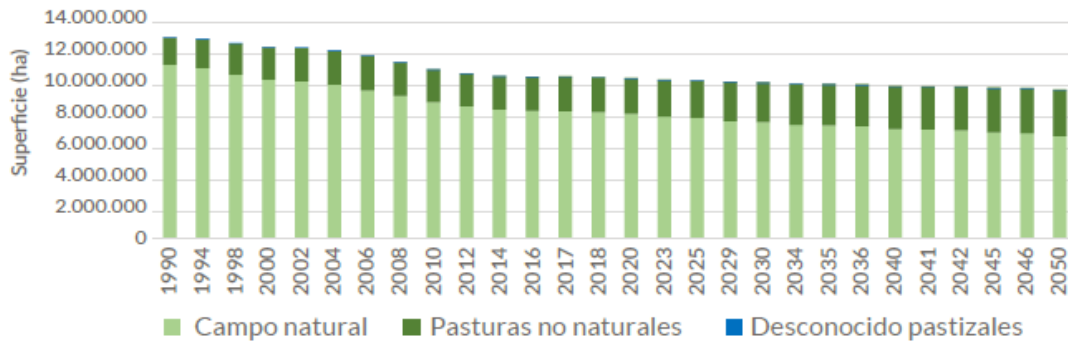
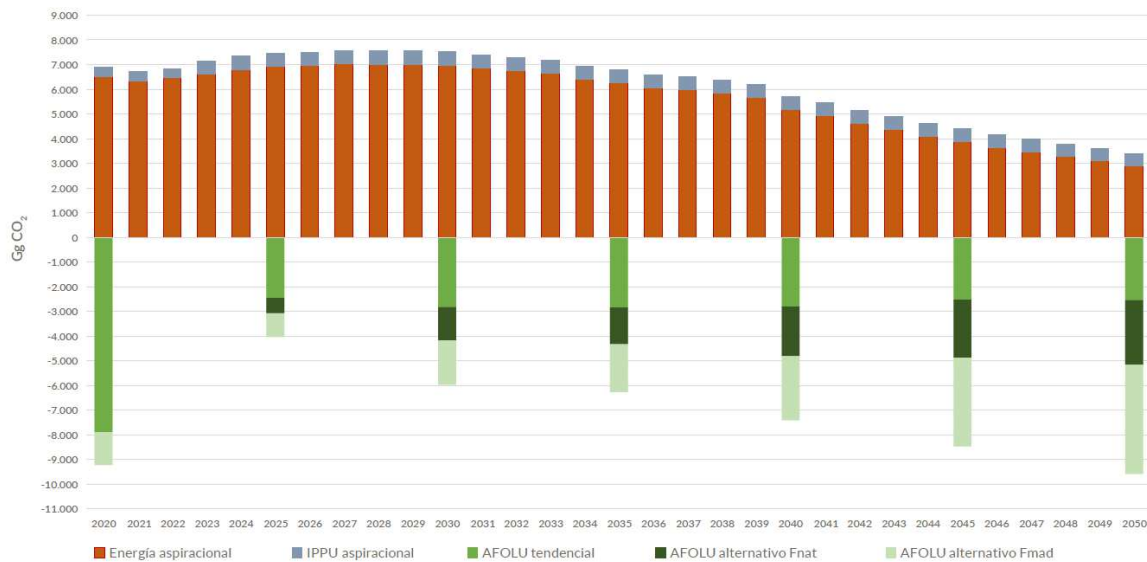


Figura 3. Evolución de área de pastizales naturales (ha, escenario Fmad). Fuente: ECLP



La trayectoria de emisiones de CO2 al 2050 por sector de actividad del INGEI se muestra en la Figura 4, en la que se aprecia que se necesita el incremento del secuestro proveniente de las tierras forestales en el escenario Fmad para más que compensar las emisiones provenientes de Energía y de Procesos Industriales (IPPU).

Figura 4. Trayectoria de emisiones y remociones de CO2 por sector del INGEI en el período 2020-2050. Fuente: ECLP.



2. MODELO DE ANÁLISIS

El modelo de análisis es de equilibrio general con 4 sectores productivos, 3 insumos primarios y 3 insumos intermedios, hogares y gobierno. Está basado en funciones de utilidad y de producción Cobb-Douglas y permite resolver analíticamente para los valores de equilibrio un conjunto de agregados macroeconómicos como son precios y cantidades de los insumos y productos, PBI, precios y cantidades del mercado de trabajo, emisiones de CO₂ por sector, etc. El modelo es una extensión al trabajo de Fullerton y Ta (2019) que demuestran, para una aplicación a Estados Unidos, que un modelo de equilibrio general simple, con pocos sectores e insumos, cerrado y estático, puede replicar con una aproximación considerable los resultados proporcionados por un modelo de equilibrio general computable a gran escala. A su vez, esta solución analítica y sencilla, permite visualizar fácilmente las relaciones de causalidad, y tiene la ventaja de requerir menor cantidad de recursos humanos y económicos para desarrollarlo, mantenerlo, y correr escenarios.

Se supone una economía cerrada compuesta por hogares maximizadores de utilidad (H) que poseen una dotación inicial de factores de producción como capital, trabajo y tierra o área agrícola (\bar{K} , \bar{L} , \bar{A} respectivamente). Los bienes producidos son combustibles fósiles (F), electricidad (E), madera (T) y un bien compuesto (X) que resume el resto de los bienes y servicios de la economía. Estos sectores emplean tanto factores productivos que emplea tanto factores productivos como insumos intermedios. El gobierno impone impuestos y subsidios a los agentes económicos y sus ingresos netos (R) se devuelven a los hogares como una transferencia directa fija (*lump-sum*). Los precios son exógenos para los hogares y los sectores productivos, existe competencia perfecta en todos los mercados, no hay incertidumbre, ni sector externo. La productividad total de los factores (PTF) y los parámetros de las funciones de utilidad y producción Cobb-Douglas son calibrados para replicar los valores observados en la economía objeto de estudio.

Los hogares son tomadores de precios y derivan utilidad U del consumo del bien compuesto X , electricidad E_H , combustibles fósiles F_H y tiempo libre o trabajo no ofrecido en el mercado de trabajo L_H . Maximizan la función de utilidad (1) sujeta a la restricción presupuestaria que explicaremos más abajo. Los precios del bien compuesto P_X , electricidad P_E , combustibles fósiles P_F y trabajo P_L son exógenos y están dados para los hogares.

$$U = X^a E_H^b F_H^c L_H^{1-a-b-c} \quad (1)$$

Donde X es un bien compuesto, E_H es la electricidad consumida por los hogares, F_H son los combustibles fósiles consumidos por los hogares, L_H es ocio o trabajo no ofrecido en el mercado de trabajo.

La producción de combustibles fósiles F maximiza los beneficios dada la función de producción (2) y dados los precios de su producción y de su único insumo (P_F y P_L), y elige la demanda óptima de trabajo L_F

$$F = B_F L_F \quad (2)$$

La electricidad se produce utilizando capital K_E , trabajo L_E y combustibles fósiles F_E ; maximiza beneficios con la función de producción (3) que tiene B_E como PTF, y dados el precio de la electricidad P_E y los precios de los insumos (P_K , P_L y P_F).

$$E = B_E K_E^{\alpha_1} L_E^{\alpha_2} F_E^{1-\alpha_1-\alpha_2} \quad (3)$$

La producción de madera T utiliza capital K_T , trabajo L_T , tierra agrícola dedicada a la producción de madera A_T (o tierras forestales) y combustibles fósiles F_T . Los beneficios se maximizan sujetos a la función de producción (4) con PTF dada por B_T , y tomando los precios del output y de insumos como dados (P_T ; P_K , P_L , P_A y P_F).

$$T = B_T K_T^{\beta_1} L_T^{\beta_2} A_T^{\beta_3} F_T^{1-\alpha_1-\alpha_2-\alpha_3} \quad (4)$$

El bien compuesto X, que representa a los restantes bienes y servicios en la economía, maximiza beneficios dada la función de producción (5) y los precios del producto P_X , y los insumos P_K , P_L , P_A , P_T , P_E , P_F . Este es el único sector que utiliza la producción de madera producida en tierras forestales como insumo, y a su vez, su producción X es consumido en su totalidad por los hogares.

$$X = B_X K_X^{\gamma_1} L_X^{\gamma_2} A_X^{\gamma_3} E_X^{\gamma_4} T_X^{\gamma_5} F_X^{1-\gamma_1-\gamma_2-\gamma_3-\gamma_4-\gamma_5} \quad (5)$$

Las emisiones netas de CO₂ provienen del uso de combustibles fósiles en los diferentes sectores y del uso de la tierra agrícola (es decir, tierras forestales) en el sector maderero A_T . Las emisiones de los combustibles fósiles C_F son proporcionales según una tasa de emisiones ρ a las compras realizadas por los diferentes sectores (6). En la producción de madera, las emisiones (C_A , es decir, secuestro) son proporcionales a las compras de tierra forestal de acuerdo a una tasa de emisiones (negativa) de σ (7). Establecemos en cero las emisiones netas de CO₂ provenientes de los demás usos de la tierra agrícola (A_X) debido a que su principal contribución a los gases de efecto invernadero (GEI) es a través de otros gases como el Metano y el Óxido Nitroso.

$$C_F = \rho F \quad (6)$$

$$C_A = \sigma A_T \quad (7)$$

Los ingresos netos del gobierno (R) provienen de impuestos y subsidios sobre el trabajo, sobre las emisiones de combustibles fósiles, las compras de electricidad y las compras de tierra en el sector maderero. Suponemos que todos esos ingresos netos se transfieren a los hogares como un reembolso de suma fija. La restricción presupuestaria del gobierno es la siguiente:

$$R = \rho\tau_C(F_E + F_T + F_X + F_H) + \tau_E P_E E + \tau_L P_L L + \tau_A P_A A \quad (8)$$

donde τ_C es un impuesto sobre las compras de combustibles fósiles (es decir, un impuesto al carbono), τ_E es un impuesto (negativo) sobre compras de electricidad, τ_L es un impuesto al trabajo y τ_A es un impuesto (negativo) sobre compras de tierra forestales para la producción maderera. El impuesto al carbono se recauda de las compras de combustibles fósiles en la producción de electricidad (τ_{CE}) y de otros usos de combustibles fósiles (τ_{CO}) como en los hogares, en la producción de madera y en la producción del bien compuesto, pero en este trabajo asumimos que la tasa es uniforme para todos los sectores. Dado que la tasa de emisión de gases a partir de combustibles fósiles es fija ρ , el impuesto es equivalente a una tasa fija $\rho\tau_C$ proporcional al uso de combustibles fósiles en todos los sectores que lo usan (F).

Hay un impuesto sobre las compras de electricidad (τ_E) pagado por los hogares y el sector del bien compuesto. Existe un impuesto sobre el trabajo, τ_L , definido como una proporción del precio del trabajo (P_L), lo que implica que el precio bruto del trabajo o salario nominal es $P_L(1 + \tau_L)$. Finalmente, hay un impuesto (τ_A) sobre las compras de tierra forestales en el sector maderero, A_T . Tener en cuenta que las compras de tierra en la producción del bien compuesto, es decir, el otro sector que compite por la tierra, no están gravadas por dicho impuesto. Esta es una especificación importante para nuestro objetivo porque permite afectar la demanda de tierras forestales que son las determinantes de las emisiones (secuestro en este caso) de CO_2 .

Estos instrumentos económicos cumplen un rol clave en análisis de estática comparativa porque son los instrumentos económicos a través de los cuales generamos los cambios en la producción y los insumos necesarios para implementar los escenarios en nuestro modelo de equilibrio general. Es importante destacar que los llamamos impuestos de manera genérica, pero algunos de ellos se implementarán como subsidios estableciendo tasas impositivas negativas, y que buscan incentivar positivamente la demanda del insumo en cuestión.

El problema de los hogares H es maximizar la función de utilidad (1) sujeta a una restricción presupuestaria (10). En la restricción presupuestaria, los ingresos (I) provienen de las rentas recibidas por los hogares por su dotación inicial de factores productivos y la transferencia fija proveniente del gobierno (R). Los gastos o egresos de los hogares consisten en el costo del consumo del bien compuesto, electricidad, combustibles fósiles y ocio, notando que cada bien se paga al precio bruto correspondiente, o sea luego de impuestos. Suponiendo que no hay ahorro en la economía (es decir, los ingresos son iguales al gasto total), podemos escribir:

$$I = P_K \bar{K} + P_L \bar{L} + P_A \bar{A} + R \quad (9)$$

$$I = P_X X + P_E (1 + \tau_E) E_H + (P_F + \rho\tau_C) F_H + P_L L_H \quad (10)$$

Donde la ecuación (9) refleja las fuentes de ingresos totales y la ecuación (10) refleja cómo se asignan esos ingresos.

El modelo supone además que existen tres condiciones para el equilibrio general:

- Balance de ingresos: Igualdad en las restricciones presupuestales de hogares (ecuación 10) e igualdad de la restricción presupuestal del gobierno (ecuación 8).
- Cero ganancias: El valor de la producción en cada sector es igual al valor de los insumos.
- Los mercados se cierran (*market clearing condition*): La cantidad ofertada por las empresas (sectores E, T y F) es igual a su correspondiente demanda. Además, en los factores de producción capital, trabajo y tierras agrícolas, la utilización que hace cada sector debe ser igual a la dotación total de los hogares de dicho factor, esto es:

$$F = F_E + F_T + F_X + F_H \quad (11)$$

$$E = E_X + H_H \quad (12)$$

$$T = T_X \quad (13)$$

$$\bar{K} = K_E + K_T + K_X \quad (14)$$

$$\bar{L} = L_F + L_E + L_T + L_X + L_H \quad (15)$$

$$\bar{A} = A_X + A_T \quad (16)$$

El conjunto de ecuaciones arriba presentadas debe cumplirse en equilibrio. Luego, se resuelve analíticamente el modelo y se encuentra una ecuación (forma cerrada) para el valor de equilibrio general de las variables endógenas del modelo, dado parámetros y demás variables exógenas. La exposición detallada de la solución se encuentra en Rosas (2024).

3. CALIBRACIÓN DEL MODELO

El modelo se calibró para los datos de la economía uruguaya de 2019, para evitando así los efectos de la pandemia de COVID-19 en los resultados del modelo. La calibración del modelo de la función de producción se sintetiza en el Tabla 1.

El producto energético E son los ingresos totales de la empresa estatal UTE en 2019 según sus estados de resultados (UTE 2019). Este sector utiliza como insumos capital, combustibles fósiles y trabajo para su producción, cuya información surge de los rubros amortizaciones de capital, materiales energéticos y lubricantes, y personal de dichos estados. Se utilizan las proporciones de cada uno de estos insumos en los ingresos totales, y el supuesto de cero beneficios, para determinar los parámetros de su función de producción α_j así como K_E , F_E , L_E , respectivamente. El producto total de combustibles fósiles F surge de los ingresos totales de la empresa estatal de combustibles ANCAP considerando las líneas de negocios de combustibles, lubricantes y gas natural, pero excluyendo cemento (MIEM 2020). Este sector utiliza solamente

trabajo para su producción, por lo que todo el producto se le atribuye al uso de este insumo (L_F).

La producción de madera T proviene del total de valor bruto de producción de 2019 del eslabón primario de la cadena forestal, es decir, excluyendo la manufactura (Ex-Ante 2020). Este informe también reporta la demanda neta de trabajo después de impuestos (L_T) y la demanda de combustibles fósiles (F_T). La demanda de tierras forestales se explica a continuación, y la demanda de capital (K_T) se calcula por diferencia.

Los hogares gastan su ingreso en energía eléctrica, combustibles fósiles y el bien compuesto, (E_H , F_H , X_H , respectivamente). El Balance Energético Nacional (BEN 2019) reporta la proporción del consumo residencial de energía eléctrica (E_H) en la demanda total (E), por lo que el resto corresponde al uso del sector del bien compuesto, E_X . Similarmente, el consumo de combustibles fósiles de los hogares F_H es el 50% del uso total de combustibles (F). Luego, la demanda de combustibles del bien compuesto F_X se obtiene por diferencia dado que ya tenemos los valores de F_E y F_T .

El valor de capital \bar{K} es exógeno al modelo y surge de la Formación Bruta de Capital Físico proveniente de Cuentas Nacionales de 2019 del BCU. Como ya computamos K_E y K_T , el uso de capital por el sector del bien compuesto K_X se obtiene como residuo. La tierra agrícola \bar{A} es demandada por los sectores de madera (A_T) y el bien compuesto (A_X). El primero se calcula multiplicando el área forestal comercial (eucaliptos y pinos) por el valor de la rentada esa actividad específica (DIEA 2020). Similarmente, A_X se calcula considerando el área y la renta para la producción ganadera y de cultivos.

El total de ingreso de los hogares I , que es fijo y exógeno al modelo, proviene del PIB del sector privado más el valor del ocio o valor del trabajo no ofrecido en el mercado (L_H). El PIB privado surge de las Cuentas Nacionales como la suma de los componentes del PIB excluyendo el Gasto del Gobierno. El trabajo no ofrecido en el mercado (L_H) surge de asignarle un valor a la proporción del tiempo que los hogares podrían ofrecer como trabajo, pero no lo hacen (h). El tiempo total que los hogares podrían ofrecer es de 60 horas semanales, de los cuales según datos de las ENGI de 2019 se trabajan 38 horas, por lo tanto, $h = 38/60 = 0.6333$. La valoración del ocio surge de tomar el componente del PIB de consumo de los hogares más la parte del componente del gasto del gobierno que se financia con impuestos a los hogares; los dividimos por la tasa de impuestos al trabajo para obtener los ingresos libres de impuestos al trabajo, y siguiendo el criterio de Fullerton y Ta (2019) obtenemos L_H multiplicando esos ingresos netos por el factor $(1-h)/h$. Una vez obtenido el ingreso fijo de los hogares I , el consumo de los hogares del bien compuesto X_H surge como residuo ($X_H = I - L_H - E_H - F_H$).

Tabla 2. Parámetros para la calibración del modelo. Valores de 2019 en millones de dólares.

	Sectores Productivos								Sector Hogares			
Inputs	X		E		F		T		Hogares			Suma
Capital	K_X	8099	K_E	727			K_T	139			K=	8965
Trabajo	L_X	24682	L_E	527	L_F	1113	L_T	195	L_H	15352	L=	41869
Tierra	A_X	1088					A_T	317			A=	1404
Energía eléctrica	E_X	759							E_H	814	E=	1573
Madera (Timber)	T_X	767	---	---			---	---			T=	767
Combust. Fósiles	F_X	749	F_E	61			F_T	20	F_H	830	F=	1659
Bien compuesto	---								X	48273		
τ_L	$\tau_L L_X$	12113	$\tau_L L_E$	258	$\tau_L L_F$	546	$\tau_L L_T$	96			R=	13014
Total	X=	48257	E=	1573	F=	1659	T=	767	I=	65269		
Parámetros de las funciones												
K	γ_1	0.1678	α_1	0.4622		---	β_1	0.1818	---	---		
L	γ_2	0.7625	α_2	0.4991		1.0000	β_2	0.3792	(1-a-b-c)	0.2352		
A	γ_3	0.0225	---	---		---	β_3	0.4129	---	---		
E	γ_4	0.0157	---	---		---	---	---	b	0.0125		
T	γ_5	0.0159	---	---		---	---	---	---	---		
F	(1- γ_1 - γ_2 - γ_3 - γ_4 - γ_5)	0.0155	(1- α_1 - α_2)	0.0388		---	(1- β_1 - β_2 - β_3)	0.0261	c	0.0127		
X		---		---		---			a	0.7396		
Total		1.0000		1.0000		1.0000		1.0000		1.0000		
TFP	BX	2.9803	BE	2.7978	BF	1.4908	BT	3.6307				

Fuente: Elaboración propia. Nota. ρ = Tasa de conversión de las emisiones de combustibles fósiles. σ = Tasa de conversión de las emisiones de tierras forestales. τ_L = Impuesto al trabajo como proporción de los salarios netos. h = Fracción del tiempo de los hogares gastada en el trabajo.

La dotación total de trabajo de los hogares (\bar{L}) surge de sumar la oferta laboral ($L_X + L_E + L_F$) más el ocio L_H . La tasa de impuestos al trabajo τ_L (pagados por el trabajador y por el empleador y expresada como porcentaje del salario líquido) surgen de tomar el salario medio de la economía en 2019 y aplicarle las tasas de impuestos a la seguridad social, seguro nacional de salud, e impuesto a la renta de las personas físicas. La alternativa de considerar la recaudación de DGI y BPS por estos impuestos y dividirlos por la masa salarial nominal puede ser apropiada pero no contamos con los datos de dichas recaudaciones.

Los parámetros de las funciones de producción y de utilidad Cobb-Douglas (1)-(5) se computan dividiendo la demanda de cada factor o consumo de cada bien por los ingresos totales. La productividad total de los factores (TFP) de cada sector (B_j) se obtienen sustituyendo los parámetros, el valor de los insumos, y el valor del producto o ingreso total en la ecuación de la función de producción de cada sector, y despejando la TFP de cada una.

La tasa de emisiones de combustibles fósiles ρ se calcula como la suma de las emisiones totales de CO₂ en 2019 procedentes de los sectores de Energía y Procesos Industriales (IPPUU) del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero de Uruguay (INGEI 2019), dividido por la producción total F . De manera similar, la tasa de emisiones de CO₂ provenientes de las tierras forestales σ se calcula como el cociente entre las emisiones netas totales de CO₂ en 2019 de Tierras Forestales y el área forestal demandada por el sector maderero A_T . Las emisiones de CO₂ de las actividades restantes del inventario nacional no se consideran, ya que representan menos del 0.3%, y principalmente consisten en emisiones provenientes del sector Residuos.

La Tablas 2 resume los valores adoptados para cada una de las variables exógenas y parámetros del modelo. El superíndice “0” indica que refiere al valor de línea de base de la variable.

4. CALIBRACIÓN DE ESCENARIOS

El análisis se concentra en una serie de escenarios pertenecientes a la ECLP, en particular aquellos de los sectores Energía y AFOLU del INGEI, los cuales requieren un esfuerzo significativo de mitigación y aumento de remociones, pero que es diferente por categorías dentro de estos sectores del INGEI. Para implementar este escenario se considera que el modelo asume que los mercados se cierran (*market clearing condition*), esto es, que el valor de la producción por sector es igual al valor de su demanda, y que los precios son unitarios implicando que el valor y las unidades físicas de la producción son iguales.

El escenario de 2050 de neutralidad de CO₂ requiere que, para lograr los objetivos de mitigación y secuestro de CO₂ por sector se deben lograr los siguientes cambios al 2050 con respecto a los valores de la línea de base: i) una reducción del 50% en la demanda de combustibles fósiles, ii) un aumento del 83% en la demanda de electricidad, iii) un aumento

del 14% en el área forestal utilizada en el sector maderero, y iv) un aumento del 8% en la productividad del sector ganadero (ver Tabla 1).

Dichos escenarios se implementan mediante shocks a los siguientes parámetros del modelo:

- Un impuesto uniforme al carbono $\tau_C = 280$ \$/ton de CO₂ que grava las compras de combustibles fósiles en los distintos sectores que lo utilizan. Esto implica que el impuesto que se cobra en el sector de electricidad es el mismo que en los otros usos de los combustibles fósiles ($\tau_C = \tau_{CE} = \tau_{CO}$).
 - Dado que la razón de emisiones a combustibles fósiles está fija (ρ), el impuesto es equivalente a una tasa igual a $\rho\tau_C$ por unidad de combustible fósil utilizado en cada sector (F_E, F_X, F_T y F_H).
- Un impuesto a las compras de energía eléctrica a una tasa $\tau_E = -48.5\%$ (subsidio) que afecta el precio que enfrentan los sectores demandantes de electricidad.
 - Los impuestos están definidos de manera general, implicando que un subsidio se implementa como un impuesto a tasa negativa. En electricidad, que el escenario implica aumentar la demanda al 2050, se logra con un subsidio sobre las compras de energía eléctrica (E_X y E_H) a la tasa mencionada.
- Un impuesto $\tau_A = -16\%$ (subsidio) en las compras de tierras destinadas únicamente a usos forestales L_A . Esto genera un aumento del 14% en el área de tierras forestales y consecuentemente un aumento de la misma proporción en los sumideros de carbono.
- Un shock positivo de productividad en el sector X, a través de un aumento de 0.36% en la PTF G_X , proveniente de una mejora en la productividad de la ganadería en pastizales del 8%.
 - La producción ganadera sobre pastizales naturales pierde área debido al incremento de tierras forestales (mencionado en el escenario anterior), sin embargo, su producto no cae a raíz de un aumento de productividad, que en la ECLP se expresa como un aumento de la producción de kilos de carne por hectárea en dicha superficie.

Cabe destacar que en este modelo, no se especifican los mecanismos tecnológicos que generan los cambios en la producción de estos energéticos y la consecuente mitigación de CO₂ al horizonte temporal establecido, ni tampoco se debe entender que la forma que el país alcanza los objetivos de mitigación sea mediante la aplicación de los instrumentos económicos mencionados. Por el contrario, éstos deben ser interpretados como aquellos instrumentos que resumen el conjunto de políticas y acciones climáticas a implementarse para lograr los objetivos de mitigación establecidos. Esto sigue la misma lógica que la aplicada en el “NGFS Climate Scenarios for Central Banks and Supervisors” elaborado por el Network for Greening the Financial System, (NGFS 2021).

5. RESULTADOS

Los impactos combinados de estática comparativa derivados de la reducción del 50% en la producción de combustibles fósiles, el aumento del 83% en la producción de electricidad, el incremento del 14% en el área de tierras forestales y el aumento del 8% en la productividad de la ganadería en pastizales naturales, generan un cambio en el valor del PIB agregado de solamente 0.01% en relación con el valor de línea de base, equivalente a aproximadamente USD 5.5 millones. Es importante señalar que los escenarios de la ECLP al 2050 abarcan un período de alrededor de 30 años, por lo que ese es el horizonte temporal en el que se manifiesta este cambio porcentual. Si consideramos la proyección oficial según la Rendición de Cuentas de 2022 de la tasa de crecimiento del PIB del 2.3% y asumimos una distribución uniforme a lo largo de 2050 del cambio total del 0.01%, implica que la tasa de crecimiento anual del PIB permanece prácticamente sin cambios.

Tabla 3. Resultados agregados de los impactos de los escenarios de la ECLP de Energía y AFOLU. Valores en millones de dólares de 2019.

Escenario	Situación inicial	ECLP 2050	Porcentaje de cambio
PIB (X+E+T+F)	52,261	52,267	0.01%
Producto de X (X)	48,262	47,781	-1.00%
Producto de E (E)	1,573	2,872	82.60%
Producto de T (T)	767	784	2.31%
Producto de F (F)	1,659	829	-50.01%
Valor Fun. de Utilidad (U)	33,269	32,977	-0.88%
Precio de X (P_X)	1.000	1.010	1.01%
Precio de E (P_E)	1.000	1.064	6.34%
Precio de T (P_T)	1.000	0.978	-2.26%
Precio de F (P_F)	1.000	0.999	-0.15%
Precio del capital (P_K)	1.000	1.077	7.64%
Precio del trabajo (P_L)	1.000	0.999	-0.15%
Precio de la tierra (P_A)	1.000	1.043	4.29%
CO2 de combustibles	6.349	3.174	-50.01%
CO2 de tierras forestales	-13.964	-15.939	14.15%

Nota: Los porcentajes de cambio de las variables son porcentajes de cambio del nivel de la variable en el escenario con respecto al nivel de dicha variable en la situación inicial. Por lo tanto, no deben interpretarse como cambios de la tasa de crecimiento.

Naturalmente, dado que el PIB se calcula como la suma de las cantidades de equilibrio por sector, se espera que los impactos por sector sean diferentes. En el sector de electricidad, la mayor demanda (83%) impulsa mayores compras de insumos como capital y de trabajo, pero sus compras de combustibles fósiles se reducen debido a su mayor precio luego de impuestos. La producción de madera aumenta en un 2.3% debido al mayor uso de las

tierras forestales subsidiadas. Notar que dicha producción no se reduce a pesar de la menor demanda de capital y combustibles fósiles cuyo precio aumenta. Es importante destacar que el precio del capital aumenta debido a la demanda en el sector de electricidad, y como tiene un stock fijo, los sectores restantes ajustan a la baja sus compras del factor productivo.

El sector del bien compuesto reduce ligeramente su producción en un 1% debido a una caída en la demanda de combustibles fósiles más costosos y de tierras agrícolas. Esta última cae porque su precio aumenta fruto de tener un endowment fijo y enfrentar la mayor competencia del sector maderero para quien el precio está subsidiado. Es importante destacar que el mayor uso de la electricidad, que es menos costosa, no compensa el menor uso de los otros insumos, y el sector X ve reducida su producción.

Tabla 4. Resultados desagregados por sector de los impactos de los escenarios de la ECLP de Energía y AFOLU. Valores en millones de dólares de 2019.

Escenario	Situación inicial	ECLP 2050	Porcentaje de cambio
Producto de X (X)	48,262	47,781	-1.00%
Demanda de capital (K_X)	8,099	7,524	-7.09%
Demanda de trabajo (L_X)	24,685	24,722	0.15%
Demanda de tierra (T_X)	1,088	1,043	-4.12%
Demanda de electricidad (E_X)	760	1,387	82.60%
Demanda de timber (T_X)	767	784	2.31%
Demanda de combustibles (F_X)	749	362	-51.68%
Producto de E (E)	1,573	2,872	82.60%
Demanda de capital (K_E)	727	1,311	80.40%
Demanda de trabajo (L_E)	527	1,024	94.46%
Demanda de combustible (F_E)	61	57	-6.18%
Producto de T (T)	767	784	2.31%
Demanda de capital (K_T)	139	130	-7.09%
Demanda de trabajo (L_T)	195	195	0.15%
Demanda de tierra (A_T)	317	361	14.15%
Demanda de combustible (F_T)	20	10	-51.68%
Producto de F (F)	1,659	829	-50.01%
Demanda de trabajo (L_F)	1,113	556	-50.01%
Valor Fun. de Utilidad (U)	33,269	32,977	-0.88%
Demanda de ocio (L_H)	15,349	15,371	0.15%
Demanda de electricidad (E_H)	813	1,485	82.60%
Demanda de combustibles (F_H)	829	401	-51.68%
Demanda de bien compuesto (X)	48,262	47,781	-1.00%

Nota: Los porcentajes de cambio de las variables son porcentajes de cambio del nivel de la variable en el escenario con respecto al nivel de dicha variable en la situación inicial. Por lo tanto, no deben interpretarse como cambios de la tasa de crecimiento

El valor de la función de utilidad de los hogares disminuye un 0.9% debido a que demandan menos combustibles fósiles y bienes del sector X porque sus precios aumentan en el equilibrio general. La demanda de ocio permanece prácticamente sin cambios, y el mayor consumo de electricidad subsidiada no es suficiente para compensar la caída de aquellos. Los resultados en el mercado laboral, considerando una dotación de trabajo fija, implican que la mayor demanda de trabajo por parte del sector eléctrico proviene, casi en su totalidad, de la fuerza laboral que abandona el sector de combustibles fósiles. Dado que el trabajo es el único insumo en la producción de combustibles fósiles, ambos disminuyen al mismo ritmo, es decir, -50%. El precio del trabajo después de impuestos permanece prácticamente sin cambios y, como se mencionó más arriba, los hogares no reducen su demanda de ocio.

Finalmente, las emisiones netas de CO₂ procedentes de los combustibles fósiles también disminuyen en un 50% porque son proporcionales a la producción de combustibles fósiles; pasan de 6350 Gg a 3175 Gg. En el sector maderero, las emisiones netas son negativas debido a los sumideros resultantes del uso del área forestal (A_T). Las emisiones netas pasan de -13965 Gg a -15940 Gg, lo que implica una tasa de cambio del 14%, que es igual a la tasa de cambio de la demanda de tierras forestales en el sector maderero. En términos agregados, las emisiones netas de CO₂ cambian de -7615 a -12765 Gg, lo que es coherente con los compromisos de mitigación en la ECLP de Uruguay, que establecen que los sumideros del área forestal más que compensan las emisiones del sector energético.

6. CONCLUSIONES

Este trabajo busca aportar insumos para la evaluación de impactos de la ECLP al 2050 de Uruguay y contribuye con un modelo económico que permite analizar escenarios relevantes de trayectorias de emisiones de CO₂, y su impacto en variables macroeconómicas de interés. El modelo amplía el trabajo de Fullerton y Ta (2019), quienes proponen un modelo de equilibrio general simple basado en funciones de utilidad y producción de Cobb-Douglas, capaz de replicar de manera bastante precisa los resultados de modelos generales de equilibrio computable, pero a través de una solución analítica que es a la vez más simple y permite identificar mejor las relaciones causales de los impactos.

Nuestro modelo puede resolver analíticamente los valores de equilibrio general de un conjunto de variables macroeconómicas relevantes, como precios y cantidades de insumos y productos tanto por sector como en agregado, resultados del mercado laboral y emisiones de CO₂. Ampliamos el modelo original para representar de manera más precisa algunos sectores y factores relevantes en las emisiones de CO₂, como las tierras agropecuarias (forestales y otros usos) y el sector maderero.

El modelo original de Fullerton y Ta (2019) contiene hogares maximizadores de utilidad, que son propietarios de las dotaciones de capital y trabajo, agentes maximizadores de beneficios que producen electricidad, combustibles fósiles y un bien compuesto, y gobierno

que grava las compras de trabajo y combustibles fósiles. Este último consiste en un impuesto al carbono con el objetivo de reducir las emisiones de CO₂.

Como parte de nuestras extensiones, incluimos las tierras agropecuarias como otro factor productivo que propiedad de los hogares y que es demandado tanto por el sector del bien compuesto como por el sector forestal. La inclusión de este último es también una extensión del modelo original y, además de demandar tierras forestales, también utiliza capital, trabajo y combustibles fósiles. En este trabajo presentamos la nueva solución analítica del equilibrio general que consiste en soluciones en forma cerrada de todas las variables endógenas.

Luego, para mostrar una aplicación de este modelo, implementamos los escenarios de la Estrategia Climática a Largo Plazo de Uruguay al 2050, en particular, el escenario aspiracional de neutralidad de CO₂ que consiste en lograr una economía neutra en CO₂ al 2050, en el cual el sector forestal es especialmente importante como fuente de sumideros de CO₂. Calibramos el modelo a la economía uruguaya de 2019, el año más en el que las variables macroeconómicas no están afectadas por la pandemia de COVID-19. Las variables y parámetros se calibran utilizando información públicamente disponible de varias instituciones y agencias gubernamentales, y ninguna variable o parámetro está calibrado con los valores predeterminados del modelo original.

Uruguay resulta un caso especialmente interesante para analizar debido a que la necesaria sustitución de la demanda de combustibles fósiles se espera que se realice principalmente con electricidad, la que proviene casi en su totalidad de fuentes renovables. Esto se establece en el escenario de neutralidad de CO₂ para 2050, y aunque implica un cambio estructural que requiere un esfuerzo significativo por parte de los agentes económicos, prácticamente asegura impactos ambientales positivos al tener emisiones de CO₂ prácticamente nulas en el proceso de producción de electricidad.

El escenario de neutralidad de CO₂ para 2050 requiere que, para lograr la mitigación y eliminación de CO₂ por sector objetivo, se obtengan los siguientes cambios con respecto a los valores de base: i) una reducción del 50% en la demanda de combustibles fósiles, ii) un aumento del 83% en la demanda de electricidad, iii) un aumento del 14% en el área de tierras forestales (sector maderero) y iv) un aumento del 8% en la productividad del sector ganadero.

Este escenario se implementa en el modelo mediante la modificación de los parámetros relevantes del modelo de manera que generen los cambios deseados. En los combustibles fósiles establecemos un impuesto uniforme al carbono, τ_C de 280 USD/ton, que grava las compras de combustibles fósiles de todas las actividades (bien compuesto, electricidad, sector maderero y hogares) y busca reducir la demanda agregada de combustibles fósiles en un 50%. De manera similar, logramos el aumento del 80% en la demanda de electricidad implementando un subsidio del 48.5% en las compras de electricidad, lo que aumenta la demanda por parte del sector del bien compuesto y los hogares. En el sector agrícola, el aumento del 14% en el área forestal, que a su vez impulsa un aumento en los secuestros de carbono, se logra mediante un subsidio $\tau_A = 16\%$ en las compras de tierras pero solo para

usos forestales. Destacamos que este es un subsidio dirigido únicamente a tierras forestales, por lo que el precio de la tierra para otros usos agrícolas (ganadería y cultivos resumidos en el sector X) permanece sin cambios. Finalmente, un shock exógeno en la productividad total de los factores del sector del bien compuesto de 0.36% generado por el aumento esperado del 8% en la productividad de la ganadería. Aunque hay una reducción en el área de pastizales naturales dedicados a la producción ganadera debido a que se destinan a la producción forestal, la LTS afirma que la producción ganadera no disminuye porque es más que compensada por la mencionada ganancia en productividad. La implementación de los escenarios mediante impuestos, subsidios y shocks de productividad total de los factores no puede interpretarse como nuestra recomendación a los tomadores de decisiones de política respecto a los instrumentos económicos necesarios para alcanzar los objetivos de la ECLP, sino como un resumen de las políticas y acciones climáticas necesarias para lograr los objetivos de mitigación.

Encontramos que los efectos combinados del escenario implementado generan solo un leve cambio en el PIB agregado del 0.01% con respecto a los valores iniciales del equilibrio general, equivalente a aproximadamente 5.5 millones de USD. Dado que se trata de escenarios con un horizonte a aproximadamente 30 años, este es el período de tiempo en el que ocurre este cambio porcentual. En otras palabras, si consideramos la proyección oficial de la tasa de crecimiento del PIB del 2.3% y asumimos una distribución uniforme del cambio de 0.01% hasta el 2050, implica que la tasa de crecimiento anual del PBI permanece prácticamente sin modificaciones. Este es un resultado relevante para los tomadores de decisiones involucrados en las políticas climáticas porque arroja luz sobre los impactos económicos agregados de los cambios estructurales y ambiciosos requeridos para cumplir los objetivos de neutralidad de CO₂ del escenario aspiracional de la ECLP de Uruguay.

Este modelo puede aplicarse de manera directa a otras economías con una matriz de productos y emisiones similar, siempre y cuando se pueda calibrar a datos observados de la economía objeto de estudio. Además, con algunos cambios menores en la especificación y en la resolución del equilibrio general, también se puede aplicar a otras economías cuyos sectores y factores determinantes de las emisiones netas de CO₂ sean otros. Por ejemplo, en una economía donde la producción de madera no es tan relevante, se puede especificar y calibrar en su lugar, otra actividad como por ejemplo el transporte.

REFERENCIAS

- Banco Central del Uruguay. 2016. Cuentas Nacionales. Cuadros de Oferta y utilización (COU).
- Banco Central del Uruguay. 2019. Cuentas Nacionales. Formación Bruta de Capital Físico.
- BUR3 Uruguay. 2019. Tercer Informe Bienal de actualización a la Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero.
- Fullerton, D. y C.L. Ta (2019), Environmental policy on the back of the envelopment: A Cobb-Douglas model is not just a teaching tool. *Energy Economics*, 84, 104477.
- Instituto Nacional de Estadística. 2016. Encuesta Nacional de Gastos e Ingresos de los Hogares.
- Ministerio de Industria, Energía y Minería. 2020. El mercado del petróleo crudo y sus derivados en Uruguay. Tomo I. Enfoque en las actividades de ANCAP. En Propuesta de Revisión del sector de combustibles líquidos de Uruguay.
- Ministerio de Industria, Energía y Minería - Dirección Nacional de Energía. 2019. Balance Energético Nacional.
- UTE 2019. Memoria Anual de UTE 2019.