

## **ESTIMACIÓN DE LAS EMISIONES ANTRÓPICAS DE CARBONO A PARTIR DE UN MODELO BASADO EN AGENTES, CON CAPITAL FÍSICO Y CAPITAL HUMANO**

Ing. Paula Castesana, Dr. Enrique Puliafito<sup>1</sup>  
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires  
Medrano 951, Ciudad de Buenos Aires. Tel.: (011 4867 7562) pcastesana@gmail.com

**RESUMEN:** Un tema relevante en la investigación sobre cambio climático es el efecto que producen los cambios en la economía y en la población sobre el consumo de energía y las emisiones de carbono, modificando la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Este trabajo simula la evolución de dichas variables a partir de un modelo de crecimiento económico endógeno con capital físico y humano, agregando además una restricción al consumo fundada en la capacidad física limitada del medio. Se utiliza para ello el paradigma de simulación de Modelado Basado en Agentes, con el fin de incluir variabilidades en los parámetros, y el concepto de elección de comportamiento o toma de decisiones de los individuos, que de otra manera hubiesen resultado de un gran costo computacional. Se observa que los resultados están en buen acuerdo con los datos históricos y las proyecciones realizadas por diversas agencias.

**Palabras clave:** modelado basado en agentes, crecimiento económico, emisiones de carbono.

### **INTRODUCCIÓN**

El aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, debido a emisiones antrópicas generadas por consumo de energía de fuentes fósiles está incrementando el efecto invernadero adicional, generando, entre otras probables modificaciones climáticas, cambios en la temperatura global, variación de los patrones de lluvia, aumento del nivel del mar, modificaciones en la salinización del mar, reducción de los glaciares cordilleranos y polares, huracanes de gran magnitud, incendios forestales. Actualmente, el análisis de la influencia de variables demográficas sobre dichas emisiones ha cobrado relevancia en el debate sobre el cambio climático, dado que el impacto de las mismas sobre el crecimiento económico, influye directamente sobre el consumo de bienes, energía primaria, y por consiguiente, sobre las emisiones de carbono.

La pregunta de fondo es la siguiente: ¿por qué algunos países han tenido un crecimiento sostenido en los últimos cincuenta o cien años, y otros no? O en otras palabras, ¿cuál es el “motor” de la economía para estos países? Si se considera al crecimiento económico como el aumento de bienes por habitante (bienes per cápita), esto implica una relación inversa del producto bruto (en adelante GDP<sup>2</sup>) y la población. Pero si el aumento de la población produce a su vez un aumento en el GDP a una tasa mayor, entonces el GDP/capita aumentará. En efecto, los datos empíricos de distintas regiones no establecen en forma taxativa una u otra variante, pero sí afirman su indudable influencia. Mientras algunos ven un aumento de la población como un impedimento al crecimiento económico, otros la estiman como el mayor contribuyente. La solución propuesta por la literatura neoclásica de crecimiento económico a esta dualidad, es asumir que la economía crece a través de un progreso técnico exógeno, con una tasa de ahorro constante (Solow, 1956; Swan, 1956). Sin embargo, los modelos de crecimiento neoclásico no explican el crecimiento económico sostenido a largo plazo. Para otros, el crecimiento poblacional aumenta el número de consumidores y el número de trabajadores destinados a la actividad productiva y a la investigación, lo que genera un aumento en la escala de la economía. De esta forma los “modelos de crecimiento endógeno”, los cuales determinan las tasas de crecimiento a largo plazo desde adentro del modelo, predicen el crecimiento GDP basándose ya no en el progreso técnico exógeno, sino en la existencia de inversión en investigación y desarrollo (I+D) que generan crecimiento por sí mismos (Romer, 1986; Lucas, 1988; Ramsey, 1928). Otro elemento clave en estos modelos es la creación de tecnología e innovación para mantener un crecimiento sostenido (Romer, 1990; Kremer, 1993; Galor y Weil, 2000). Estos modelos permiten que tanto el consumo como la tasa de ahorro sean determinados por los hogares maximizando su utilidad (Ramsey, 1928; Cass, 1965; Koopmans, 1965), y considerando además al capital en forma amplia, contemplando al capital físico y al capital humano. Este último está relacionado con el grado de formación y de productividad de los individuos que participan de la producción.

Tanto el crecimiento poblacional y económico, como el nivel tecnológico alcanzado, son aspectos relevantes en la determinación del consumo energético y las emisiones de dióxido de carbono provenientes del consumo de combustibles fósiles (Huang, 2007; Richmond y Kaufmann, 2006). Este trabajo simula la evolución de dichas variables a partir de un modelo de crecimiento económico endógeno con capital físico y humano, agregando además una restricción al consumo fundada en la capacidad física limitada del medio. Se utiliza para ello el paradigma de simulación de Modelado Basado en Agentes (MBA), con el fin de incluir variabilidades en los parámetros, y el concepto de elección de comportamiento o toma de decisiones de los individuos.

<sup>1</sup> CONICET. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza/Facultad Regional Buenos Aires.

<sup>2</sup> Por sus siglas en inglés: Gross Domestic Product.

El MBA (Jennings et al., 1998; Wooldridge y Jennings, 1999) es un paradigma de simulación, a partir del cual un sistema se modela como un conjunto de entidades llamadas agentes, que son capaces de tomar decisiones en forma autónoma. Lo que distingue al MBA de otras técnicas de modelado es la forma en que se construye la primera abstracción del sistema real y, consecuentemente, el modelo formal (Izquierdo et al., 2008). En el MBA los componentes básicos del sistema real se representan explícita e individualmente en el modelo. Cada agente individual actúa y toma decisiones sobre la base de un conjunto de reglas impuestas por el modelador. Los mismos pueden ejecutar varias acciones de manera autónoma e independiente, interactuando a su vez con otros agentes y con su entorno. Asimismo, los agentes pueden evolucionar y adaptarse, lo que resulta muchas veces en el surgimiento de patrones emergentes como consecuencia de la interacción de componentes individuales (Edmonds, 2000; Bonabeau, 2002). La flexibilidad presentada para describir los componentes básicos del sistema y sus interacciones, junto con el concepto de emergencia, son los mayores beneficios a la hora de utilizar este paradigma, aplicado ampliamente para simular sistemas sociales.

## METODOLOGÍA

### *Modelo económico:*

Se construyó un modelo basado en agentes para el período que abarca desde 1950 hasta 2050, utilizando el programa Netlogo<sup>3</sup> 4.1 (Wilensky, 1999). Dicho software permite definir distintos tipos de agentes. Cada agente individual se crea con un conjunto de valores iniciales. Con cada paso de tiempo (tick) cada agente ejecuta una serie de instrucciones (impuestas por el modelador) actualizando sus variables, por ejemplo, consumo, capital físico, humano, entre otros. En el modelo presentado se crean agentes que simulan individuos pertenecientes a diferentes familias o dinastías, en las cuales existe la transferencia intergeneracional de capital (herencia). Cada agente posee su propio capital físico, capital humano, nivel de producción y de consumo. Los individuos creados en el modelo tienen la capacidad de reproducirse creando un nuevo individuo perteneciente a su propia familia, con una probabilidad igual a la tasa de natalidad  $n$ , que corresponde al número de nacimientos cada 100 personas. El individuo que se reproduce cede la mitad de su capital físico al nuevo agente, al cual además se le asigna un nivel de consumo y de capital humano proporcional al de su familia. Con una probabilidad igual a la tasa de mortalidad  $m$  (número de muertes cada 100 personas) los individuos dejan de existir, dejando como herencia su capital físico, que es repartido en partes iguales entre los sujetos restantes de su misma familia. El número de dinastías se mantiene constante, mientras que el número de individuos pertenecientes a cada una varía de acuerdo a la cantidad de agentes que nacen o mueren a lo largo del período. De esta manera, el número de habitantes  $p$  será equivalente al número de agentes vivos.

La producción de los agentes,  $y = \text{producción/cápita}$ , puede ser descrita a partir de una función de tipo Cobb-Douglas (Cobb y Douglas, 1928) con capital físico  $k$  y capital humano  $h$ . Dado un capital inicial, cada agente obtendrá un nivel de producción  $y$ , que dedicará al consumo, a la inversión en capital físico  $y_o$  a la inversión en capital humano ( $\text{consumo}$ ,  $i_k$  e  $i_h$  respectivamente):

$$y = k^\alpha \cdot h^{1-\alpha} = \text{consumo} + i_k + i_h \quad (1)$$

Donde  $\alpha$  es la participación de capital físico en la producción<sup>4</sup>. Considerando un modelo económico de crecimiento endógeno, con capital físico y humano, la tasa de crecimiento del consumo está dada por la siguiente expresión (Ramsey, 1928; Barro y Sala-I-Martin, 2009):

$$\frac{1}{\text{consumo}} \cdot \frac{d(\text{consumo})}{dt} = \frac{1}{\theta} \cdot \left[ \alpha \left( \frac{k}{h} \right)^{(1-\alpha)} - \delta - \rho \right] \quad (2)$$

Donde  $\theta$  es una constante mayor que cero, y está relacionada con la sensibilidad de la tasa del crecimiento del consumo a cambios en los niveles de los distintos tipos de capital. La tasa de preferencia temporal  $\rho$  se refiere al grado de altruismo de los agentes: una tasa de preferencia temporal igual a cero implica que los mismos son enteramente altruistas, mientras que una tasa mayor que cero está relacionada con un comportamiento más egoísta, ya que las generaciones actuales *prefieren* su propio consumo al consumo de las generaciones futuras (Barro y Sala-I-Martin, 2009).

### *Restricción del consumo:*

El modelo económico presentado muestra que la producción y el consumo de los agentes podrían crecer indefinidamente si no se imponen restricciones. Un crecimiento duradero del consumo está acompañado del crecimiento del capital, tanto físico como humano con su consecuente acumulación creciente. Pero considerando que los agentes se desarrollan en un mundo con capacidad física finita, es desacertado suponer que el capital físico puede crecer y ser acumulado en el medio indefinidamente. Una manera de frenar dicho crecimiento, es imponiendo a los agentes una medida de “toma de conciencia”

<sup>3</sup> Cabe aclarar que el software Netlogo es una plataforma de simulación por agentes, y si bien incluye una amplia galería de modelos demostrativos de acceso libre para los usuarios, todo lo referido al diseño y construcción del modelo presentado en este trabajo es aporte exclusivo de los autores.

<sup>4</sup> Si bien la función de producción de Cobb-Douglas se expresa como  $y = A \cdot k^\alpha \cdot h^{1-\alpha}$ , donde  $A$  es el nivel de tecnología, a fines prácticos en este trabajo se tomó un valor de  $A$  constante e igual a 1, lo cual es usual en la literatura económica.

a través de un comportamiento de consumo limitado. De esta manera, los individuos pueden generar, a lo sumo, tanto capital físico como el medio sea capaz de contener u ofrecer. Este concepto se podría plantear también desde el punto de vista del “stock de recursos” o de la “capacidad de carga”<sup>5</sup>, utilizados ampliamente en modelos maltusianos de tipo presa predador (Brander y Taylor, 1998) o en modelos de crecimiento logístico (Puliafito y Castesana, 2009). Esto significa que a medida que el nivel global de capital físico ( $K_{global} = \text{suma del capital físico de todos los individuos}$ ) se acerca al valor máximo permitido por el medio ( $K_{m\acute{a}x}$ ), los agentes irán frenando la tasa de crecimiento del consumo, y consecuentemente los valores de inversión en capital y de producción. A partir de esta idea, el crecimiento del consumo de los agentes queda expresado de la siguiente manera, donde la constante  $b$  es un factor de escala:

$$\frac{1}{\text{consumo}} \cdot \frac{d(\text{consumo})}{dt} = \frac{1}{\theta} \cdot \left[ \alpha \left( \frac{k}{h} \right)^{(1-\alpha)} - \delta - \rho \right] - b \cdot \left( \frac{K_{global}}{K_{m\acute{a}x}} \right) \quad (3)$$

Dadas las condiciones iniciales para cada agente, los mismos consumirán a una tasa dada por la expresión (3). Imponiendo a los agentes la condición de invertir en capital físico a una tasa proporcional a la tasa de crecimiento del consumo, la inversión en capital humano estará dada por la diferencia entre la producción y la suma del consumo y de la inversión en capital físico. Además, los individuos buscarán mantener un equilibrio entre los dos tipos de capital, y lo harán invirtiendo una proporción entre el capital físico y humano, relacionada con el rendimiento de cada tipo de capital. Esto significa que si la proporción de capitales de un agente se aleja de dicho equilibrio, el mismo elegirá no invertir en el tipo de capital que se encuentre en exceso, e invertir todo lo que tiene, o lo que no consumió, en el otro tipo de capital. Para el caso del capital físico, eventualmente, los agentes podrán percibir un aumento del mismo por herencia familiar, y se verán obligados a invertir entonces en capital humano hasta recuperar el equilibrio. Suponiendo que los niveles de capital físico y humano se deprecian a la misma tasa  $\delta = 0.05$ , sus niveles para un dado  $t+1$  quedan definidos por los valores en  $t$ , más lo invertido, menos lo perdido por la depreciación del capital:

$$k_{t+1} = i_k + k_t - \delta \cdot k_t = i_k + (1 - \delta) \cdot k_t \quad h_{t+1} = i_h + (1 - \delta) \cdot h_t \quad (4)$$

Una vez obtenidos los valores para ambos tipos de capital, a través de la ecuación (1) cada agente obtiene su nuevo nivel de producción  $y$ , que utiliza nuevamente para consumir e invertir. La suma de los niveles de producción de los agentes representa el GDP de la población obtenida, y el promedio de los mismos el GDP/cápita.

#### Modelo de las emisiones:

Como consecuencia de su actividad, los agentes consumen energía, generan emisiones, y agotan recursos. Tanto el consumo de energía primaria como las emisiones de carbono muestran un comportamiento vinculado al GDP/cápita y al crecimiento de la población, como así también a distintos indicadores tecnológicos. Estas relaciones pueden ser expresadas en forma multiplicativa de la siguiente manera (Canadell et al., 2007; Raupach et al., 2008; Puliafito et al., 2008; Puliafito y Castesana, 2009; Puliafito, 2011):

$$e = p \cdot x \cdot (e/g) \quad (5)$$

Donde  $e$  es el consumo anual global de combustibles fósiles, y  $e/g$  es el factor de intensidad energética, es decir, cantidad de energía consumida por cada dólar del producto bruto generado. De manera análoga, las emisiones de carbono  $c$  producidas por el consumo de energía pueden ser expresadas como:

$$c = p \cdot y \cdot (c/g) = p \cdot y \cdot (e/g) \cdot (c/e) \quad (6)$$

Donde  $c/g$  representa la intensidad de las emisiones, es decir, kilogramos de dióxido de carbono (o simplemente de carbono) emitidos a la atmósfera por cada dólar del producto bruto producido. El factor  $c/e$  representa el índice de carbonización, o la cantidad de carbón emitido por cada unidad de energía consumida. Esta forma multiplicativa, también conocida como identidad de Kaya (1990), permite identificar los principales indicadores. De esta manera las emisiones de carbono se expresan como el producto de la población, el GDP/cápita, un factor de intensidad energética, y otro de intensidad de carbonización.

En las expresiones (5) y (6), la población ( $p$ ) y el GDP/cápita ( $y$ ) surgen como resultado del modelo de agentes, por lo que es necesario entonces estimar la variación temporal de  $e/g$  a partir de los datos históricos de  $y$  y de  $p$ , de manera endógena, mediante una regresión lineal múltiple de la siguiente manera:

<sup>5</sup> Seidl y Tisdell (1999) presentan un enfoque interesante acerca del concepto y los valores de la capacidad de carga.

$$(e/g) = a - b \cdot p - c \cdot y \quad (7)$$

Por su parte, el índice de carbonización  $c/e$  está fuertemente relacionado a las fuentes de energía utilizadas y al factor de emisión de cada una. Dado que la tendencia mundial fluctúa alrededor de 0.95 en las últimas décadas, en este trabajo se tomó dicho valor como valor medio. Sin embargo este índice se puede reducir por mejoras en la tecnología utilizada, o bien aumentar, como es el caso mundial actual, por el simple hecho de que a nivel global la producción de energía eléctrica está dominada por las grandes centrales de carbón usadas en China e India con eficiencias tecnológicas muy pobres (Castesana y Puliafito 2011).

*Valores iniciales:*

Con el fin de generar una población de individuos con diferentes tendencias al consumo, inversión, fertilidad, mortalidad, y altruismo, los valores iniciales utilizados por los agentes fueron asignados en forma aleatoria a partir de una distribución normal alrededor de los valores medios  $\mu$  detallados en la Tabla 1 (Barro y Sala-I-Martin, 2009), con un desvío estándar  $\sigma$ . Los mismos son expresados en forma adimensional debido a que en este trabajo los valores informados de población  $p$ , GDP/cápita  $y$ , intensidad energética  $e/g$ , consumo de energía  $e$  y emisiones de carbono  $c$ , han sido normalizados al año 1950. Los valores medios de las tasas de natalidad  $n$  y de mortalidad  $m$  (variables a lo largo del tiempo) fueron asignados de manera exógena, en forma aleatoria a partir de una distribución normal alrededor de los datos históricos y proyecciones de la ONU (United Nations, [www.un.org/esa/population/unpop.htm](http://www.un.org/esa/population/unpop.htm)) para el período en estudio, con un desvío estándar del 10% de cada valor.

$y$	1	$i_h$	$\mu = 0.125 \quad \sigma = 0.023$	$e$	1
<i>consumo</i>	$\mu = 0.5 \quad \sigma = 0.05$	$\rho$	$\mu = 0.02 \quad \sigma = 0.001$	$c$	1
$\alpha$	$\mu = 0.75 \quad \sigma = 0.0375$	$\theta$	$\mu = 10.5 \quad \sigma = 0.525$	$e/g$	1
$k$	$\mu = 1.316 \quad \sigma = 0.0658$	$\delta$	0.05	$n$	$\mu = 3.69 \quad \sigma = 0.369$
$h$	$\mu = 0.439 \quad \sigma = 0.0219$	$K_{m\acute{a}x}$	40	$m$	$\mu = 1.96 \quad \sigma = 0.196$
$i_k$	$\mu = 0.375 \quad \sigma = 0.042$	$c/e$	0.95		

Tabla 1: Valores iniciales. Las tasas de natalidad y mortalidad están expresadas en número de nacimientos y muertes cada 100 personas, respectivamente.

**RESULTADOS**

Dado que los agentes creados “eligen” el valor de sus parámetros en forma aleatoria, para este trabajo se realizaron 40 corridas del modelo, con el objetivo de visualizar la variabilidad de los resultados ante diferentes inicializaciones. Para cada una de las variables analizadas, se presentan en esta sección los resultados máximos, mínimos y medios obtenidos a partir de las diferentes corridas. Dichos resultados han sido normalizados al año 1950 con el objetivo de prescindir de unidades y mostrar los aumentos relativos observados y proyectados en relación a dicho año.

La Figura 1 muestra los resultados del modelo para la población mundial, en comparación con datos históricos (Maddison, 2009) y proyecciones de la ONU. Se observa que los resultados obtenidos están en buen acuerdo con los datos y las proyecciones realizadas.

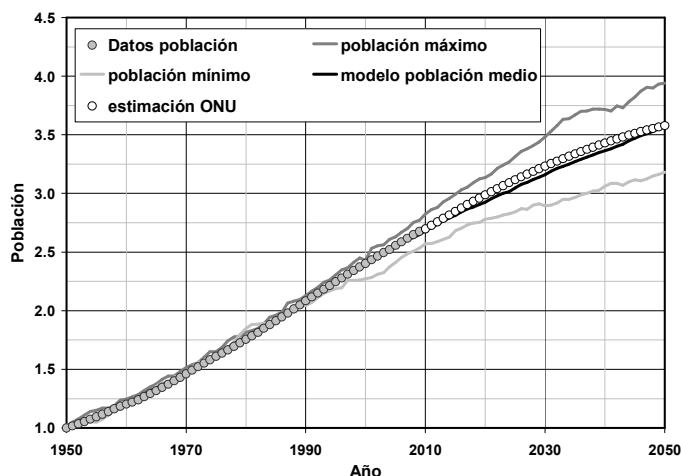


Figura 1: Resultado máximo, medio y mínimo de la evolución temporal de la población mundial en comparación con datos históricos y proyecciones de la ONU.

La evolución del consumo promedio de los agentes se muestra en la Figura 2, junto con la capacidad del medio respecto al valor de saturación asignado  $(1 - K_{global} / K_{m\acute{a}x})$ . Se puede observar que si bien al principio el consumo promedio de los individuos aumenta a una tasa creciente (curva convexa), dicha curva cambia su concavidad, o su tasa de crecimiento, a medida que se satura la capacidad del medio.

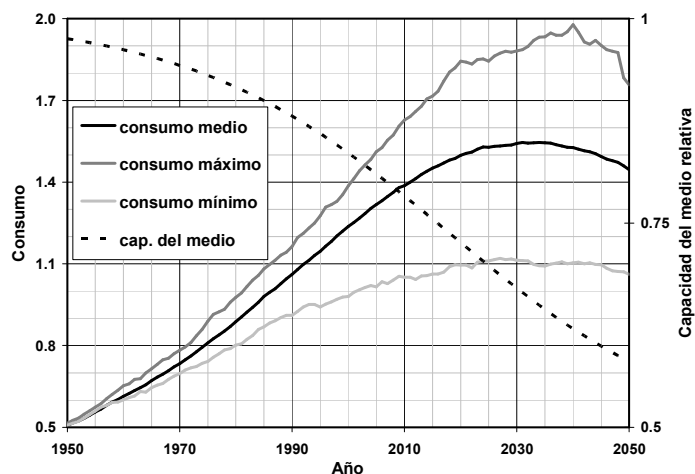


Figura 2: Resultado máximo, medio y mínimo de la evolución temporal del consumo de los agentes y la capacidad del medio respecto a la saturación.

Los valores obtenidos para el GDP/cápita se muestran en la Figura 3. En la misma se observa una estabilización en crecimiento de las curvas como consecuencia de la restricción del consumo de los agentes. Se muestran los resultados obtenidos junto a los valores históricos (Maddison, 2009), y a las estimaciones correspondientes a distintos escenarios de desarrollo económico propuestos por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2007). Dichos escenarios fueron desarrollados por el IPCC sobre líneas evolutivas o enfoques cualitativos (en inglés “story lines”) que describen distintas combinaciones de desarrollo económico, demográfico, social y tecnológico. Cada enfoque evolutivo constituye una “familia” de escenarios. En este trabajo se han contrastado los resultados obtenidos, con los correspondientes al Modelo Integrado Asia-Pacífico (AIM) para los escenarios A2, B1 y B2 (Jiang et al., 2000; Nakićenović et al., 2000). La familia de escenarios A2 representa un mundo muy heterogéneo, con un continuo crecimiento de la población y un crecimiento económico orientado regionalmente, más lento que en otras líneas evolutivas. La familia B1 representa un mundo con un lento crecimiento de la población, y un rápido crecimiento económico orientado a servicios e información, con reducciones en el consumo de recursos y la implementación de tecnologías limpias. Los escenarios B2 describen un mundo con una población en continuo aumento (menor que en A2) y con un desarrollo económico intermedio, enfocado a soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y ambiental (IPCC, 2000).

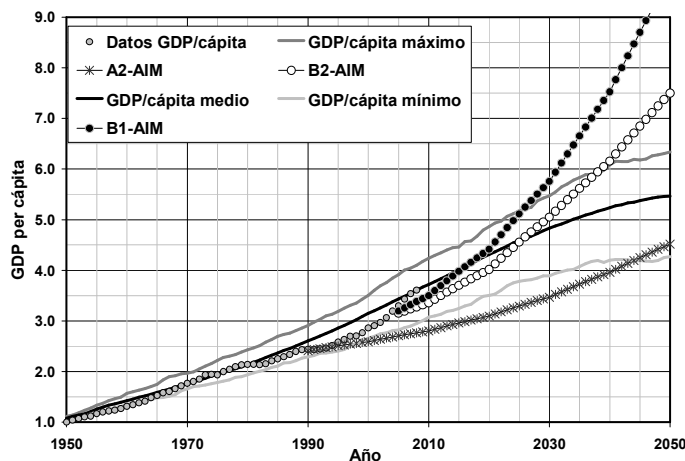


Figura 3: Resultado máximo, medio y mínimo de la evolución temporal del GDP/cápita en comparación con datos históricos y diferentes escenarios de crecimiento.

Si bien los valores crecientes observados en la producción de los agentes implican un mayor nivel de consumo de energía primaria y un consecuente aumento en el nivel de emisiones antrópicas hacia la atmósfera, dichos aumentos son compensados parcialmente por la disminución de los indicadores tecnológicos, los cuales muestran, en general, una tendencia decreciente en los últimos años (Castesana y Puliafito, 2011). Se muestran en la Figura 4 los resultados de la estimación propuesta en la expresión (7) para el factor de intensidad energética  $e/g$ , en comparación con los datos históricos de la Energy Information Administration (EIA, 2010). Es importante notar una mejora constante en dicho factor, que se puede traducir en un ahorro de energía por unidad de producción.

Las Figuras 5 y 6 grafican los valores arrojados por el modelo, para el consumo de energía y para las emisiones de carbono, respectivamente, ambos en comparación con datos históricos y escenarios de desarrollo propuestos por el IPCC. Se observa en todos los casos que los datos históricos y las proyecciones de los distintos escenarios están contenidos dentro del rango de variabilidad obtenido al asignar a los agentes comportamientos aleatorios. Los valores mínimos obtenidos con el modelo

presentado se acercan a las proyecciones del escenario B1, el cual, si bien presenta un rápido crecimiento económico (Figura 3), sus mejoras tecnológicas y su reducción en el consumo de recursos se traducen en una tendencia de reducción o estancamiento de las emisiones. Por su parte, hacia el 2050 los valores máximos del modelo se acercan a los correspondientes al escenario A2, que si bien presenta un menor crecimiento económico por habitante, su constante crecimiento de la población y su lento cambio tecnológico dan como resultado evoluciones crecientes de las emisiones antrópicas.

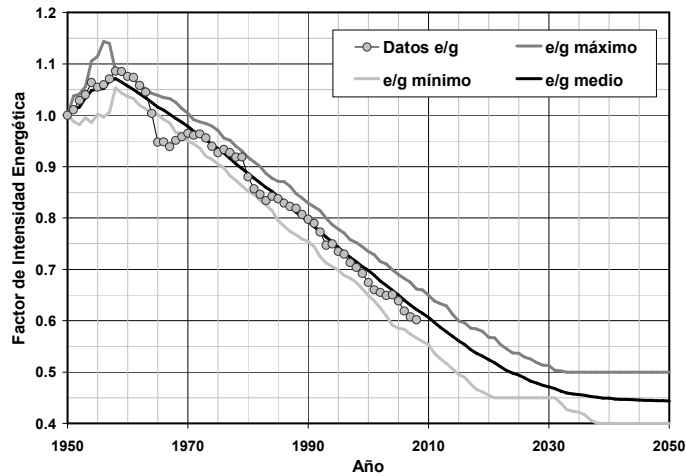


Figura 4: Resultado máximo, medio y mínimo de la estimación para el factor de intensidad energética, en comparación con datos históricos.

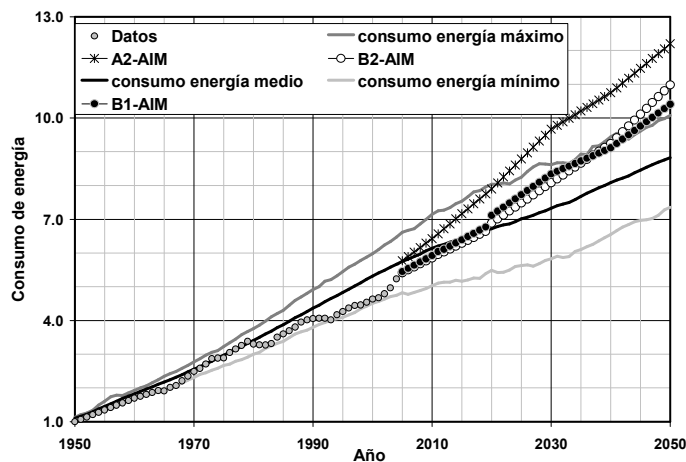


Figura 5: Resultado máximo, medio y mínimo de la evolución temporal del consumo de energía, en comparación con datos históricos y proyecciones realizadas por el IPCC (Modelos A2/B1/B2-AIM), para distintos escenarios de desarrollo y consumo.

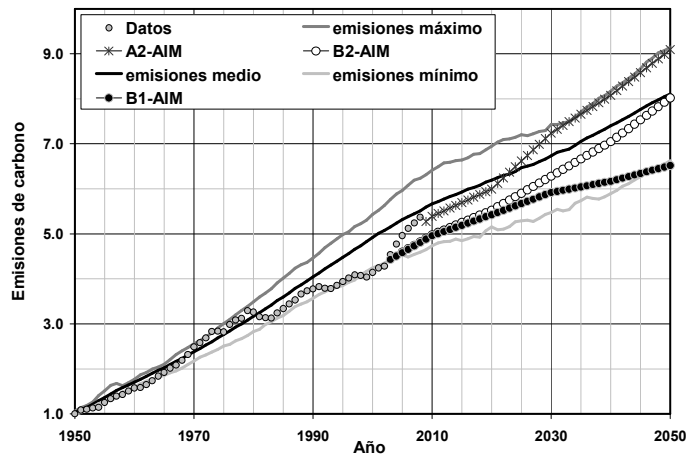


Figura 6: Resultado máximo, medio y mínimo de la evolución temporal de las emisiones de carbono, frente a datos históricos y proyecciones realizadas por el IPCC (Modelos A2/B1/B2-AIM), para distintos escenarios de desarrollo y consumo.

## CONCLUSIONES

Se presentó un trabajo que simula la evolución de las emisiones antrópicas de carbono, a partir de un modelo de crecimiento económico basado en una función de producción de tipo Cobb-Douglas con capital físico y capital humano. Se agregó además una restricción al consumo, fundada en la capacidad física limitada del medio. Para el modelo propuesto se utilizó el paradigma de simulación de Modelado Basado en Agentes, describiendo los cambios de la población y de su estructura de consumo como el resultado de la interacción de individuos con una determinada capacidad de reproducción, supervivencia, tendencia al consumo y a la inversión en distintos tipos de capital, incluyendo también la posibilidad de herencia del capital familiar. A partir de ello se obtuvieron escenarios altos, medios y bajos para la evolución de la producción (GDP), del consumo de energía primaria y de las emisiones de carbono, como así también, del factor de intensidad energética de manera endógena. Usar un modelo por agentes permitió incluir de forma sencilla el concepto de elección de comportamiento o toma de decisiones de los individuos y variabilidades en los parámetros, que de otra manera hubiesen resultado de un gran costo computacional. Se observa que los resultados están en buen acuerdo con los datos históricos y con las proyecciones realizadas por diversas agencias internacionales. Por otro lado, al incorporar una restricción del consumo, como resultado de la toma de conciencia de los agentes debida a la saturación de la capacidad física del medio (o al agotamiento de recursos), el modelo predice un efecto de estabilización sobre la producción y consecuentemente, sobre las emisiones de carbono, bajo la condición que los valores globales de intensidad energética y de las emisiones sigan manteniendo una tendencia decreciente. Este aspecto es muy interesante, pues permite dedicar las medidas y esfuerzos necesarios para producir una estabilización o reducción efectiva de las emisiones antrópicas de CO<sub>2</sub> que pueden afectar los cambios climáticos observados.

## NOMENCLATURA

$p$	población	$K_{global}$	nivel global de capital físico
$y$	producción de cada agente (GDP/cápita)	$K_{m\acute{a}x}$	nivel teórico máximo de capital físico
$k$	capital físico	$\delta$	tasa de depreciación de ambos tipos de capital
$h$	capital humano	$e$	consumo de energía primaria
$\alpha$	participación del capital físico en la producción	$c$	emisiones de carbono
$consumo$	consumo de cada agente	$e/g$	factor de intensidad energética
$i_k$	inversión en capital físico	$c/g$	intensidad de las emisiones
$i_h$	inversión en capital humano	$c/e$	índice de carbonización
$\rho$	tasa de preferencia temporal		

## REFERENCIAS

- Barro R. y Sala-I-Martin X. (2009). Crecimiento económico. Editorial Reverté, Barcelona, España.
- Bonabeau E. (2002). Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. PNAS 99, 3, 7280-7287.
- Brander J. y Taylor M. (1998). The simple economics of easter island: A Ricardo-Malthus model of renewable resource use. The American Economic Review, 88, 1, 119-138.
- Canadell J.; Le Quéré C.; Raupach M.; Field C.; Buitenhuis E.; Ciais P.; Conway T.; Gillett N.; Houghton R. y Marland G. (2007). Contributions to accelerating atmospheric CO<sub>2</sub> growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. PNAS, 104, 18866-18870.
- Cass D. (1965). Optimum growth in an aggregative model of capital accumulation. Review of Economic Studies, 32, 233-240.
- Castesana P. y Puliafito E. (2011). Influencia de la dinámica poblacional sobre las emisiones de carbono. Análisis de indicadores tecnológicos. Revista Proyecciones, 9, 1, 11-24.
- Cobb C. y Douglas P. (1928). A theory of production. American Economic Review, 18 (supplement), 139-165.
- EIA (2010) Energy Information Administration: International Energy Outlook 2010, [www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/index.html](http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/index.html).
- Edmonds B. (2000). The use of models: making MABS actually work. Center for Policy Modelling, Report 00-74.
- Galor O. y Weil D. (2000). Population, technology, and growth: from Malthusian stagnation to the demographic transition and beyond. American Economic Review, 90, 806-828.
- Huang B.; Hwang M. y Yang C. (2007). Causal relationship between energy consumption and GDP growth revisited: A dynamic panel data approach. Ecological Economics 67 (1), 41-54.
- IPCC (2000). Resumen para responsables de políticas escenarios de emisiones. Informe especial del grupo de trabajo III del IPCC. Publicado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, ISBN: 92-9169-413-4.
- IPCC (2007). Climate Change 2007. Synthesis Report. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III en el cuarto Assessment Report del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. En: Pachauri RK, Reisinger A (eds.) IPCC, Ginebra, Suiza.
- Jennings N.; Sycara K. y Wooldridge M. (1998). A roadmap of agent research and development. Int. Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 1 (1), 7-38.
- Jiang K.; Masui T.; Morita T. y Matsuoka Y. (2000). Long-term GHG emission scenarios for asia-pacific and the world. Technological Forecasting and Social Change, 63, 2-3, 207-229.
- Izquierdo L.; Galán J.; Santos J. y del Olmo R. (2008). Modelado de sistemas complejos mediante simulación basada en agentes y mediante dinámica de sistemas. EMPIRIA. Revista de Metodología de Ciencias Sociales, 16, 85-112.
- Kaya Y. (1990). Impact of carbon dioxide emission control on gnp growth: interpretation of proposed scenarios. IPCC Energy and Industry Subgroup, Response Strategies Working Group, Paris.

- Koopmans T. (1965). On the concept of optimal economic growth. En: *The econometric approach to development planning*. Amsterdam: North Holland.
- Kremer M. (1993). Population growth and technological change: One million B. C. to 1990. *Quarterly Journal Economics*, 108, 681-716.
- Lucas R. (1988). On the mechanics of economic development. *Journal of Monetary Economics*, 22, 1, 3-42.
- Maddison, A. (2009). *Historical statistics for the world Economy: 1-2008 AD*, [www.ggdc.net/maddison](http://www.ggdc.net/maddison).
- ONU. Organización de las Naciones Unidas: *World Population Prospects: The 2010 Revision*. [www.un.org/esa/population/unpop.htm](http://www.un.org/esa/population/unpop.htm).
- Nakićenović N. y Swart R. (eds.) (2000). *Special report on emissions scenarios. a special report of working group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 599.
- Puliafito E.; Puliafito J. y Conte Grand M. (2008). Modeling population dynamics and economic growth as competing species: An application to CO<sub>2</sub> global emissions. *Ecological Economics*, 65, 3, 602-615.
- Puliafito E. (2011). Influence of the population and economic growth on the carbon budget cycle. *International Journal for Ecology and Development*, 18 (W11), 91-121.
- Puliafito E. y Castesana P. (2009). Influencia del crecimiento económico y poblacional en el balance del ciclo de carbono. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 7, 25-32.
- Raupach M.; Canadell J. y Le Quéré C. (2008). Anthropogenic and biophysical contributions to increasing atmospheric CO<sub>2</sub> growth rate and airborne fraction. *Biogeoscience Discuss*, 5, 2867-2896.
- Ramsey F. (1928). A mathematical theory of saving. *Economic Journal*, 38, 543-559.
- Richmond A. y Kaufmann R. (2006). Is there a turning point in the relationship between income and energy use and/or carbon emissions?. *Ecological Economics* 56, 176-189.
- Romer P. (1986). Increasing returns and long-run growth. *Journal of Political Economy*, 94 (5), 1002-1037.
- Romer P. (1990). Endogenous technological change. *Journal of Political Economy*, 98, S71-S102.
- Seidl I. y Tisdell C. (1999). Carrying capacity reconsidered: from Malthus' population theory to cultural carrying capacity. *Ecological Economics*, 31, 395-408.
- Solow R. (1956). A contribution to the theory of economic growth. *Quarterly Journal of Economics*, 70, 65-94.
- Swan T. (1956). Economic growth and capital accumulation. *Economic Record*, 32, 334-361.
- Wilensky U. (1999). NetLogo. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL.
- Wooldridge M. y Jennings N. (1999). Software engineering with agents: pitfalls and pratfalls. *IEEE Internet Computing*, 3, 20-27.

#### **ABSTRACT:**

A key aspect on climate change research is the effect of the economic and population changes on energy consumption and carbon emissions, which influence the accumulation of greenhouse gases in the atmosphere. This study simulates the evolution of these variables from an endogenous economic growth model with physical and human capital. However we included an additional restriction of consumption based on the limited physical capacity of the medium. We used the agent-based model paradigm, which allows an easy inclusion of the concept of choice's behaviour and decision making of individuals, which otherwise would result in a large computational cost. The results are in good agreement with historical data and the projections made by various international agencies.

**Keywords:** agent-based modeling, economic growth, anthropogenic emissions.