

Estudio del aumento de la concentración de CO₂ atmosférico en cursos universitarios de energías renovables y sostenibilidad

R. Valdés¹, L. R. Rodríguez¹, J. H. Lucio¹ y V. Tricio²

¹ Dpto. de Física. Universidad de Burgos. EPS. Calle Villadiego s/n. 09001 Burgos.

² Dpto. de Física. Universidad de Burgos. Facultad de Ciencias. Plaza Misael Bañuelos s/n. 09001 Burgos.

E-mail: rvaldes@ubu.es

Resumen

El trabajo centra la atención en la construcción de un modelo matemático sencillo y en los cálculos numéricos realizados para estimar las fechas críticas a partir de las cuales la humanidad, de seguir consumiendo tal y como lo ha hecho durante los últimos 50-60 años, superaría las concentraciones de 450 y 550 ppm de CO₂ atmosférico. Las magnitudes que conforman el modelo están directamente relacionadas con el poder de emisión de dióxido de carbono debido al consumo humano, la capacidad de consumo per cápita de la población mundial, la capacidad del ecosistema para capturar el gas y el número de habitantes del planeta. No obstante su sencillez, el modelo permite obtener resultados que concuerdan con las últimas previsiones del IPCC. Por otra parte, el trabajo describe brevemente la metodología utilizada en el proceso de enseñanza-aprendizaje. Consideramos que un sistema de actividades de aprendizaje similar al que proponemos puede situarse al inicio de cursos universitarios sobre energías renovables y sostenibilidad, al fundamentar por qué no solamente es necesario sino impostergable que la sociedad intervenga firme y decididamente en el enfrentamiento del cambio climático.

Palabras clave: concentración de CO₂ atmosférico, cambio climático, sostenibilidad, enseñanza de las ciencias.

I. Introducción

El cambio climático es hoy una realidad sobre la que se investiga y divulga desde diferentes perspectivas. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), en su último informe de evaluación expone que para evitar una elevación de la temperatura media del planeta por encima de 2°C en relación con los niveles preindustriales (1850-1900), la concentración de gases de efecto invernadero no debe superar el valor aproximado de 450 ppm de CO₂ equivalente. Si se superara la barrera de 550 ppm el suceso sería prácticamente inevitable y existiría la posibilidad de que la temperatura se elevara 3°C por encima de los niveles preindustriales (IPCC 2014: 23).

Por otra parte, el Grupo Intergubernamental de Expertos considera (con un elevado o muy elevado nivel de confianza) que el aumento de la temperatura global en torno a 4°C o más por encima de los niveles del siglo XX, tendría consecuencias como las siguientes en la actual centuria (IPCC 2014, pp. 8-17):

- Seguridad alimentaria en situación de alto riesgo a nivel mundial, incluidos los países industrializados.
- Reducción de los recursos de aguas superficiales y subterráneas renovables e intensificación de la competencia por el acceso a ese bien.
- Empeoramiento de la salud en muchas regiones y particularmente en aquellas con menores ingresos per cápita.
- Dificultad significativa para realizar las actividades humanas normales al aire libre.
- Incremento de las migraciones no planificadas.
- Aumento de los riesgos de conflictos violentos debidos a la pobreza y las crisis económicas.

Mantener la proporción de gases de efecto invernadero por debajo de 450-550 ppm de CO₂ equivalente sería un primer paso para detener el calentamiento global y propiciar que el clima evolucione en favor del desarrollo humano sostenible. No obstante, si ello se lograra, de todas formas una parte considerable de la población mundial (particularmente de las regiones con bajos ingresos) padecería agravados los hoy perceptibles efectos del cambio climático.

El desarrollo de modelos matemáticos del calentamiento global ha permitido argumentar que la influencia humana es la causa dominante de ese fenómeno desde mediados del siglo XX. Ninguno de los modelos que consideran solamente factores naturales del proceso sirve para explicarlo. Tal explicación es posible únicamente cuando la actividad humana es incluida en los análisis (IPCC 2013: 74).

¿Por qué es no solamente necesario sino impostergable que la sociedad intervenga firme y decididamente en el enfrentamiento al cambio climático? ¿Sobre cuáles de los factores del cambio climático se debe centrar especialmente la atención? Para responder los interrogantes anteriores conviene reflexionar sobre lo que pasaría si la humanidad continuara actuando tal y como la ha hecho durante las últimas 5 o 6 décadas. Así pues, proponemos a los estudiantes solucionar el siguiente problema guiados por el profesor (Valdés y Valdés 2014):

A partir de la idea del origen antrópico del crecimiento acelerado de la concentración de CO₂ atmosférico desde el siglo XX:

- Construir un modelo matemático del aumento de dicha magnitud, suponiendo que la humanidad continuaría comportándose tal y como lo ha hecho durante los últimos 50-60 años.
- Utilizar el modelo para estimar las fechas críticas a partir de las que, de no tomar las medidas pertinentes, se superarían las concentraciones de 450 y 550 ppm de dióxido de carbono.

- Analizar la influencia que tienen diversos aspectos de la actividad humana sobre el incremento de la proporción de CO₂ en el aire.

El enunciado del problema se restringe al aumento de la concentración de dióxido de carbono, el agente con mayor repercusión en el forzamiento radiativo de la atmósfera. No se considera el resto de las sustancias de efecto invernadero, para lo cual sería necesario hacer estimaciones de la proporción de CO₂ equivalente. Indudablemente, tal simplificación del análisis (necesaria para el proceso docente) está asociada a cierto error en la estimación de las fechas críticas mencionadas. Al tener en cuenta solamente la sustancia más influyente en el calentamiento global, es de esperar que el error sea por exceso y optimistas las previsiones sobre el tiempo que pudiéramos demorar en sobrepasar los 2-3°C por encima de la temperatura media de la época preindustrial.

Con la finalidad de exponer cómo solucionar en el proceso de enseñanza-aprendizaje el problema planteado, abordaremos los apartados siguientes:

- Factores del crecimiento de la concentración de CO₂ atmosférico y representación matemática de los mismos.
- Construcción del modelo matemático básico.
- Análisis de los parámetros del modelo y adecuación de este a los datos estadísticos disponibles.
- Validación del modelo, pronóstico y análisis de los factores que determinan el crecimiento de la concentración de CO₂ en la atmósfera.
- Metodología utilizada durante la enseñanza-aprendizaje de la temática.

II. Factores del crecimiento de la concentración de CO₂ atmosférico

El primer paso para la construcción del modelo matemático es precisar los factores que pueden estar determinando el crecimiento de la proporción del CO₂ atmosférico y expresarlos como parámetros cuantificables. Estos factores se pueden suponer ligados al nivel de consumo (individual y productivo) de la población del planeta y a la capacidad del ecosistema para capturar dióxido de carbono. Consideremos los factores siguientes:

- Número N de habitantes del planeta. Somos precisamente los humanos quienes con nuestras actuales formas de actuar generamos la mayor cantidad de gases de efecto invernadero.
- Poder de emisión de CO₂ debido al consumo humano. Es un factor ligado fundamentalmente a las características de las tecnologías utilizadas. En nuestros días las principales actividades que incrementan el dióxido de carbono antropogénico son el quemado de combustibles fósiles (durante la producción de energía y la fabricación de cemento) y determinadas formas de utilizar la tierra (quema de biomasa para la producción de energía y la obtención de espacio para la agricultura, la minería y la ganadería).

Sea G el producto interior bruto mundial dado en dólares internacionales de un año determinado, el cual puede ser considerado un indicador del consumo anual de toda la población del planeta (Common y Stagl 2008: 125-160). Denotemos como v_e a la masa de dióxido de carbono expulsado a la atmósfera en un año, a consecuencia de las actividades anteriormente mencionadas. Entonces el poder de emisión de esa sustancia debido al consumo humano puede estimarse mediante la relación

$$X = \frac{v_e}{G} \quad (1)$$

- Capacidad de consumo medio per cápita de la población del planeta. Es un factor principalmente económico. Habitualmente se utiliza como indicador de esta característica el producto interior bruto per cápita de la sociedad, dado en dólares internacionales de un año determinado

$$P = \frac{G}{N} \quad (2)$$

- Capacidad del ecosistema para absorber CO_2 . Esta magnitud se puede definir como la razón entre la masa v_e de dióxido de carbono emitido y la masa v_{ab} de esa sustancia absorbida por el ecosistema en un año

$$Y = \frac{v_{ab}}{v_e} \quad (3)$$

Conforme a la expresión anterior, la fracción del dióxido de carbono emitido que se incorpora anualmente a la atmósfera es

$$\eta = 1 - Y = \frac{v_i}{v_e} \quad (4)$$

donde $v_i = v_e - v_{ab}$ es la masa de CO_2 incorporado a la atmósfera en un año. Las fórmulas (3) y (4) expresan lo que es de sentido común: aumentar la capacidad para absorber CO_2 , disminuye la proporción del gas emitido que se incorpora a la atmósfera.

III. Construcción del modelo matemático básico

La concentración de dióxido de carbono (fracción molar) en la atmósfera es

$$C = \frac{n_{\text{CO}_2}}{n_a} 10^6 \text{ ppm} \quad (5)$$

donde n_{CO_2} y n_a son el número de moles de CO_2 y de moléculas de aire en la atmósfera respectivamente.

La concentración máxima de dióxido de carbono que consideramos en la resolución del problema es 550 ppm y representa solamente el 0,055% de esa sustancia en el aire. Así pues, las emisiones antropogénicas de CO_2 no afectan prácticamente la cantidad total de sustancia que compone la atmósfera terrestre. En consecuencia, es razonable suponer que permanece constante el número de moles n_a de moléculas de aire. De este modo el incremento de la fracción molar de CO_2 en el intervalo de tiempo Δt resulta

$$\Delta C = \frac{\Delta n_{CO_2}}{n_a} 10^6 \text{ ppm} \quad (6)$$

Con la finalidad de expresar ΔC en términos de los factores anteriormente precisados, analicemos por separado las cantidades de sustancia Δn_{CO_2} y n_a de la fórmula (6).

El crecimiento del número de moles de CO_2 en la atmósfera en el lapso de tiempo Δt (dado en años) es

$$\Delta n_{CO_2} = \frac{v_i}{\mu_{CO_2}} \Delta t \quad (7)$$

donde μ_{CO_2} es la masa molar del dióxido de carbono

A su vez, según la relación (4)

$$v_i = \eta v_e \quad (8)$$

De conformidad con las expresiones (1) y (2)

$$v_e = XPN \quad (9)$$

La fórmula anterior expresa la relación entre una magnitud física que resulta de la actividad humana y tres factores de naturaleza socioeconómica que caracterizan dicha actividad.

El producto

$$\gamma = XP = \frac{v_e}{N} \quad (10)$$

constituye la rapidez media anual de emisión per cápita de CO₂ a la atmósfera

Considerando (7), (8) y (10) tenemos

$$\Delta n_{\text{CO}_2} = \frac{\gamma\eta}{\mu_{\text{CO}_2}} N\Delta t \quad (11)$$

Examinemos ahora el segundo término (la cantidad n_a de moléculas del aire) que aparece en la fórmula (6):

$$n_a = \frac{m_a}{\mu_a} \quad (12)$$

donde m_a es la masa de la atmósfera y μ_a es la masa molar del aire.

La masa estimada de la atmósfera es

$$m_a = 4\pi \frac{P_{\text{atm}} R_T^2}{g} \quad (13)$$

donde P_{atm} es la presión atmosférica en condiciones normales, R_T es el radio medio de la Tierra y g la aceleración de caída libre.

De este modo

$$n_a = 4\pi \frac{P_{\text{atm}} R_T^2}{g\mu_a} \quad (14)$$

Sustituyendo (11) y (14) en (6) obtenemos

$$\Delta C = \lambda\gamma\eta N\Delta t \cdot 10^6 \quad (15)$$

donde

$$\lambda = \frac{g}{4\pi P_{\text{atm}} R_T^2} \frac{\mu_a}{\mu_{\text{CO}_2}} = 1,25 \cdot 10^{-19} \text{ kg}^{-1} \quad (16)$$

Expresando (15) en forma diferencial e integrando, se obtiene la concentración C de dióxido de carbono en ppm en el momento t

$$C = \lambda \int_{t_0}^t \gamma \eta N dt \cdot 10^6 + C_0 \quad (17)$$

donde C_0 es la concentración en un instante inicial arbitrario t_0 .

Es de esperar que los parámetros γ , η , y N cambien aleatoriamente conformando series temporales. En tal circunstancia son posibles dos situaciones para cada uno de los parámetros:

- Variaciones relativamente pequeñas en torno a una tendencia estrictamente determinista. En este caso, para hallar la integral (17) el parámetro analizado se puede representar a través de una relación funcional ajustada a los datos empíricos disponibles.
- Variaciones estocásticas significativas. En tal caso, para calcular la integral es posible suponer que el parámetro considerado conserva sus características estadísticas en el tiempo y las estimaciones se hacen con el valor promedio.

Si se conoce cómo se comportan las magnitudes η , γ y N , la fórmula (17) permite estimar mediante aproximaciones sucesivas la fecha en que la fracción molar C alcanza un determinado valor.

IV. Análisis de parámetros y adecuación del modelo a los datos estadísticos

Al analizar la serie temporal de valores de la rapidez γ de emisiones per cápita de CO₂ (Anexo I), se obtiene el promedio $\bar{\gamma} = 5,20 \cdot 10^3$ kg/(hab·año), con desviación típica $0,24 \cdot 10^3$ kg/(hab·año), a lo que corresponde una desviación relativa del 4.6%. Es razonable suponer que esta magnitud ha permanecido prácticamente constante durante los últimos 55 años. Esta aproximación puede ser utilizada para determinar los valores de la fracción η .

De la relación (15) se obtiene la expresión para hallar la fracción de dióxido de carbono emitido que es incorporado a la atmósfera cada año

$$\eta_i = \frac{1}{\lambda \bar{\gamma} N_i} \frac{\Delta C_i}{\Delta t} 10^{-6} \quad (18)$$

donde η_i y N_i son los valores de dicha fracción y de la población del planeta en el año t_i respectivamente, ΔC_i es la variación de la concentración de dióxido de carbono en el intervalo de tiempo $[t_i, t_{i+1}]$ y $\Delta t = t_{i+1} - t_i = 1$ año.

A diferencia de la rapidez γ de emisión per cápita de CO_2 , los valores anuales η_i han tenido un comportamiento aleatorio en el que, a primera vista, no se distingue ninguna tendencia estrictamente determinista. El promedio de valores η_i para los últimos 55 años es $\bar{\eta} = 0.46$, con desviación estándar $\sigma = 0.14$ y desviación relativa de 31%. En adelante supondremos que las características estadísticas de η seguirán siendo las mismas y hacemos las estimaciones de concentración C utilizando el promedio $\bar{\eta}$.

La siguiente magnitud que debe ser considerada al utilizar la fórmula (17) es la cantidad N de habitantes del planeta. Uno de los modelos que describe satisfactoriamente el incremento de la población mundial desde tiempos prehistóricos hasta la actualidad, es el de S. P. Kapitsa (Kapitsa 2014).

La función matemática que representa el modelo de Kapitsa es

$$N = \frac{C_k}{\tau} \operatorname{arccot} \left[\frac{t_k - t}{\tau} \right] \tag{19}$$

Ajustando la expresión (19) a los registros de población desde el año 0 hasta la actualidad (Anexo II) se obtiene $C_k = 1.56 \cdot 10^5 \text{ año}^{-1}$, $\tau = 41.7 \text{ año}$ y la fecha de referencia $t_k = 1997$. En la Tabla 2 se presentan los valores de la cantidad de habitantes estimados mediante el modelo de Kapitsa (indicados con las siglas MK) y los que reportan distintas instituciones (UN 2013; ERI-RAS y ACRF 2014; EIA 2013). El parámetro ε representa las desviaciones relativas absolutas que los valores calculados con el modelo tienen respecto de los proyectados por las instituciones de referencia.

Fecha	Población $N(\cdot 10^6)$						
	MK	ONU	ε (%)	ERI-RAS	ε (%)	EIA	ε (%)
2020	7742	7717	0.32	7721	0.27	7624	1.5
2025	8067	8083	0.20	8090	0.28	7958	1.4
2030	8359	8425	0.78	8433	0.88	8260	1.2
2035	8618	8743	1.4	8754	1.6	8533	1.0
2040	8849	9039	2.1	9051	2.2	8777	0.82

Tabla 1. Comparación de pronósticos sobre la población mundial.

De conformidad con los parámetros anteriormente definidos, para realizar las estimaciones se transforma la fórmula (17) en la relación

$$C = \lambda \bar{\gamma} \bar{\eta} \int_{t_0}^t N dt \cdot 10^6 + C_0 \tag{20}$$

donde la concentración es dada en ppm.

V. Validación del modelo, pronóstico y análisis de la influencia de los factores que determinan el crecimiento de la cantidad de CO₂ en la atmósfera.

Utilizar la expresión (20) para estimar la fecha en que la concentración C de dióxido de carbono alcanzaría determinada cifra, si la humanidad continuara actuando como lo ha hecho en los últimos 50-60 años, requiere:

- Contrastar con las estadísticas disponibles, los valores de C obtenidos mediante la fórmula (20).
- Determinar un año de referencia $t = t_{ref}$ que sirva de límite superior inicial para calcular la integral de la expresión (20) y poder estimar por aproximaciones sucesivas la fecha en que se podría alcanzar un valor dado concentración C (en nuestro caso 450 y 550 ppm).

t (años)	C (ppm)	C_m (ppm)	E_r (%)
1965	320,04	321,8	0,56
1970	325,68	327,2	0,47
1975	332,05	333,0	0,59
1980	338,68	339,4	0,21
1985	346,04	346,3	0,08
1990	354,35	353,9	-0,14
1995	360,80	362,1	0,34
2000	369,52	370,9	0,38
2005	379,80	380,5	0,17
2010	389,85	390,6	0,20
2015	400,83	401,4	0,15

Tabla 2. Comparación de los registros de Mauna Loa y las estimaciones hechas según el modelo.

La Tabla 2 contiene los valores de la fracción molar C de dióxido de carbono registrados en Mauna Loa y los de concentración C_m hallados con el modelo para el intervalo de tiempo 1965-2015. La integración fue realizada con el método de los trapecios, utilizando la condición inicial $t_0 = 1960$, $C_0 = 316,91$ ppm conforme a los datos del Anexo I. En la Figura 1 se comparan los valores de C_m y los registros de C . Los errores relativos E_r de los resultados obtenidos con el modelo en ningún caso superan el 0.6% (en promedio están en torno al 0.3%).

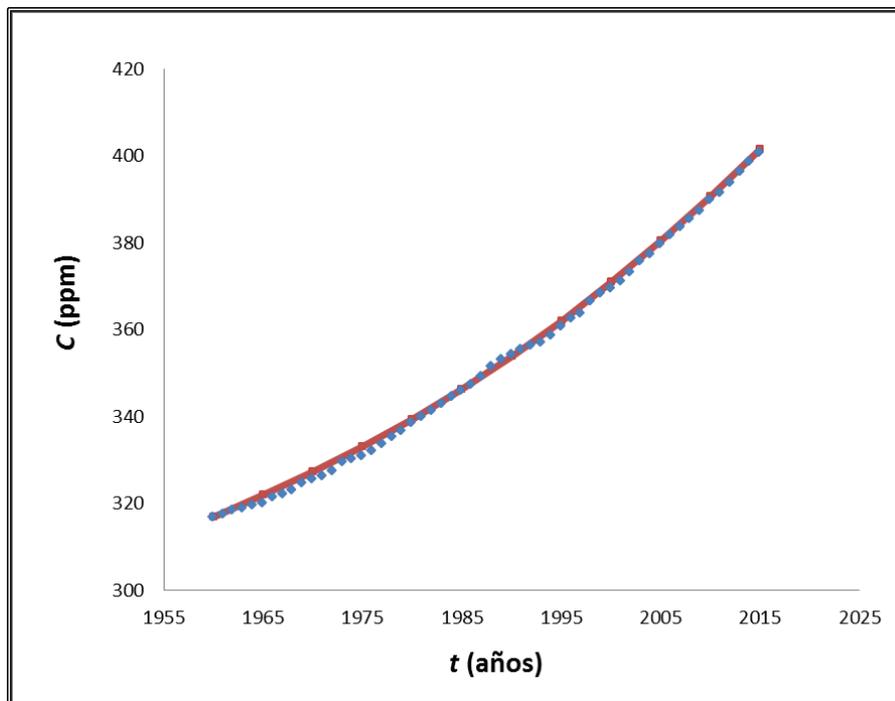


Figura 1. Comparación de los registros de Mauna Loa y las estimaciones hechas según el modelo.

La contrastación realizada permite considerar que el modelo construido funciona razonablemente, puede ser empleado para solucionar la problemática planteada y para valorar la influencia de los distintos factores del calentamiento global actual.

Con la finalidad de determinar el año de referencia t_{ref} que sirve de límite superior inicial para el cálculo de la integral (20) y de estimar por aproximaciones sucesivas la fecha en que se podrían alcanzar las 450 y 550 ppm de dióxido de carbono, conviene ajustar un polinomio de segundo grado a los datos de concentración dados en el Anexo I. Los resultados del ajuste se presentan en la Figura 2 y tienen un elevado coeficiente de correlación R^2 . Solucionando la ecuación de segundo grado correspondiente se definen los años de referencia $t_{ref_1} = 2040$ para las 450 ppm y $t_{ref_2} = 2071$ para las 550 ppm.

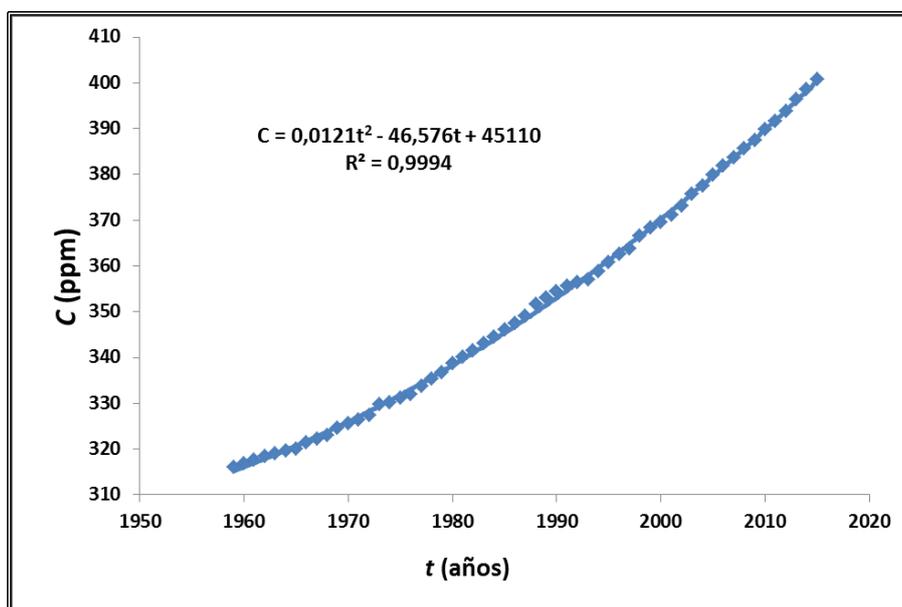


Figura 2. Ajuste de polinomio de segundo grado a datos de concentración de CO₂.

Utilizando la condición inicial $t_0 = 1960$, $C_0 = 316,91$ ppm resulta que hacia 2036 se superaría la proporción de 450 ppm. Con el modelo se estima que en ese año la fracción molar de CO₂ atmosférico llegaría a 452 ppm aproximadamente. Este resultado concuerda razonablemente con las previsiones presentadas en el quinto informe del IPCC sobre el cambio climático (IPCC 2013: 64). En relación con la otra cifra crítica de concentración (550 ppm) se calcula que podría ser alcanzada hacia el año 2071.

Sin embargo, más que para predecir el momento en que la humanidad pudiera encontrarse al borde de una catástrofe, el modelo construido tiene valor para analizar la influencia de los diversos factores del crecimiento de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera: la cantidad de habitantes N , la fracción η y la emisión per cápita γ .

Supongamos que a partir del año 2015 la población no se hubiera incrementado más, pero que en adelante mantuviera el mismo nivel medio $\bar{\gamma}$ de emisión per cápita anual de CO₂ y que la fracción media $\bar{\eta}$ de gas incorporado anualmente a la atmósfera permaneciera invariante. En tal caso, haciendo los cálculos pertinentes con la relación (20), el valor crítico de 450 ppm se alcanzaría en 2038, solamente dos años después de lo previsto al considerar el crecimiento de la población mundial. Análogamente se halla que la cifra de 550 ppm se alcanzaría hacia 2082, once años después de lo estimado si se considera el aumento del número de habitantes.

De los razonamientos anteriores se infiere que el incremento de la población es influyente a plazos relativamente largos, pero no decisivo en el aumento de la proporción de dióxido de carbono en el aire. Si el crecimiento del número N de habitantes cesara repentinamente, de todas maneras y en muy poco tiempo se alcanzarían las cifras críticas de concentración. Así pues, centraremos la atención en los factores η y γ . No

obstante, atender al aumento de la población tiene especial importancia para analizar las consecuencias del cambio climático, sobre todo en las regiones con más bajos ingresos per cápita.

La fracción η de CO_2 que se incorpora a la atmósfera disminuiría si aumentara la capacidad Y del ecosistema para absorber esa sustancia. Entre los factores que pueden contribuir a ello se encuentran los siguientes:

- La limitación de los procesos de urbanización y deforestación.
- La reforestación de amplias zonas del planeta.

Ante la urgencia de enfrentar el cambio climático, un complemento de las acciones anteriores parece ser el empleo de tecnologías para la captura y almacenamiento de CO_2 , las cuales se agregarían a la capacidad natural del ecosistema.

Pero en las actuales circunstancias parece que el nivel γ de las emisiones per cápita de dióxido de carbono es el factor que ofrece mayores posibilidades para enfrentar la presente situación de emergencia planetaria. De conformidad con la relación (10) ese nivel depende del poder X de emisión del consumo humano y de la capacidad media P de consumo per cápita de la población mundial.

En las condiciones actuales disminuir el poder X de emisión de CO_2 a causa del consumo contempla, entre otros aspectos, los siguientes:

- Sustituir con fuentes renovables de energía la utilización de combustibles fósiles y el uso de biomasa y biocombustibles cuyos ciclos completos de producción representan un aumento neto de las emisiones de dióxido de carbono (Crutzen et al 2008).
- Potenciar el desarrollo de tecnologías de construcción civil con nuevos materiales que contribuyan a disminuir las emisiones debidas a la fabricación de cemento.
- Fomentar el ahorro de energía, entre cuyas vías se encuentran el aumento de la eficiencia energética y exergética y el desarrollo de la arquitectura bioclimática que incorpora los sistemas pasivos de climatización e iluminación.
- Establecer condiciones socioeconómicas que permiten intensificar la investigación e innovación en torno a la disminución del poder de emisión de CO_2 e impulsar la amplia difusión y puesta en práctica de los resultados obtenidos.

La otra magnitud que determina el nivel de la emisión per cápita anual de CO_2 es la capacidad media de consumo P de la población del planeta, la cual es relativamente elevada en la actualidad. El producto interior bruto per cápita mundial P en 2013 era de 13 958\$ (aquí siempre dado en dólares internacionales de 2011). Las Figuras 3 y 4 (que hemos actualizado hasta 2013 y consideran 185 países) ponen de manifiesto que, rebasando la barrera de los 12 000\$ de ingreso nacional bruto per cápita (INBp), en nuestros días es posible alcanzar esperanzas de vida al nacer (EVN) cercanas a 80 años e índices de desarrollo humano (IDH) altos, según se distribuyan equitativamente los recursos (PNUD 2014; Common y Stagl 2008: 196-200). En las figuras también se aprecia que al superar la frontera de los 40 000\$, no hay mejoras ostensibles en la esperanza de vida e índice de desarrollo humano, sino más bien una disminución de esos indicadores. Las diferencias existentes de EVN e IDH entre países con el mismo INBp

ponen de manifiesto que es posible mejorar significativamente estos indicadores mediante la optimización de la distribución de los recursos disponibles. En conclusión, asistimos a un nivel de consumo per cápita medio que no necesita ser significativamente aumentado. Lo verdaderamente necesario es mejorar su calidad.

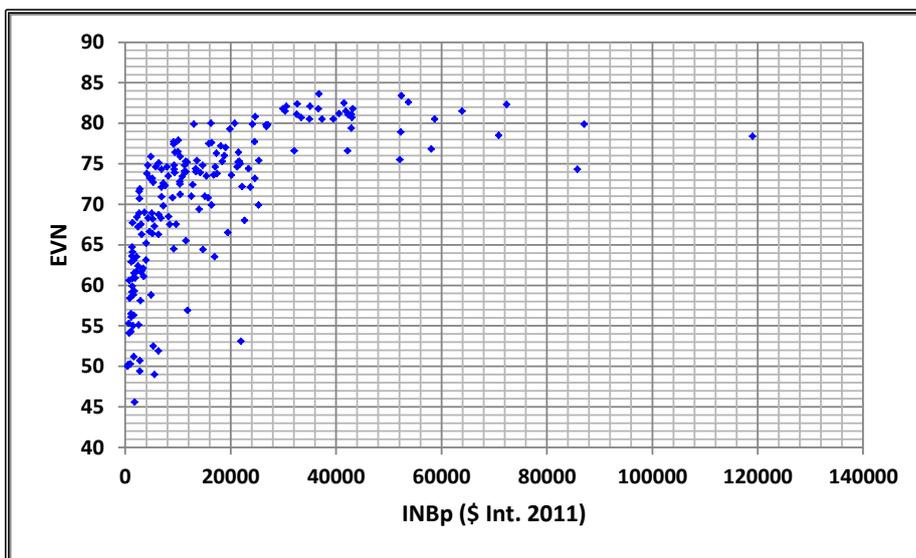


Figura 3. Esperanza de vida al nacer respecto del INB per cápita en 2013.

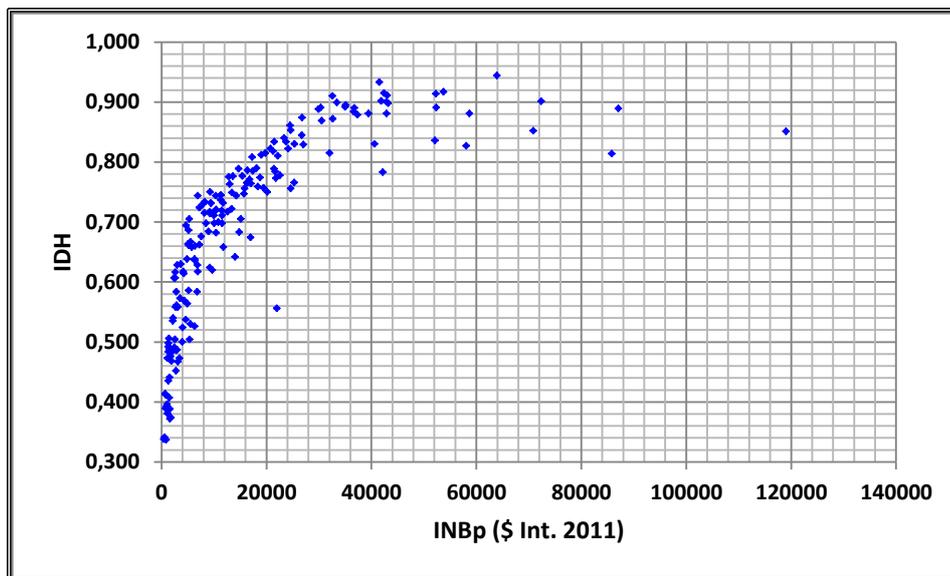


Figura 4. IDH respecto de INB per cápita en 2013.

Por todo ello resulta claro que ajustar la capacidad del consumo humano a la del planeta, para mantener el equilibrio entre contaminación y regeneración ambiental, contribuiría

significativamente a frenar el calentamiento global. Ello supone optimizar el consumo atendiendo a criterios de calidad e invertir suficiente capital en el desarrollo, difusión y puesta en práctica de tecnologías limpias para la conservación del ambiente.

El análisis pormenorizado de los costes económicos de las consecuencias del cambio climático y de los costes de las acciones para mitigarlo, permiten concluir que son muy superiores los beneficios de una decidida intervención. La humanidad se encuentra ante la impostergable tarea de evitar un desastre ecológico a fines de este siglo, que algunos han comparado con el de guerras mundiales o grandes depresiones económicas (Stern 2006). El Informe Stern sugiere que, de no actuar a tiempo, en adelante los efectos económicos del cambio climático podrían representar pérdidas de al menos 5% del PIB global cada año y en el peor de los casos del 20%. En cambio, las intervenciones para contrarrestarlo se limitarían a aproximadamente el 1% del PIB anual, evitando múltiples efectos negativos sobre la salud humana, la biodiversidad y los medios de vida.

Con independencia de la vigencia y de la mayor o menor exactitud de los pronósticos realizados en el Informe Stern, es indispensable actuar para oponerse al cambio climático y mitigar sus efectos. De cualquier manera, debido al retraso o a la pertinencia de las medidas adoptadas, el impacto de la actividad humana sobre el planeta llevará a la disminución de las velocidades de crecimiento de la economía mundial, del consumo de combustibles y, lamentablemente, quizás de la población mundial a causa del empeoramiento de las condiciones de vida, principalmente en las regiones con economías más débiles.

VI. Metodología utilizada durante la enseñanza-aprendizaje de la temática

El problema cuya resolución hemos descrito, ha sido planteado a estudiantes de un curso de Energías Renovables y Sostenibilidad, desarrollado por profesores de la Universidad de Burgos dentro del programa de una maestría en educación organizada en la Universidad Nacional de Asunción (Paraguay). Considerando ideas básicas de la didáctica de las ciencias, la asignatura presta especial atención al carácter activo de la enseñanza-aprendizaje, a su orientación investigadora, a la unidad entre el estudio de la teoría y la realización de actividades prácticas de cálculo y, en particular, a la necesidad de que los alumnos se enfrenten al planteamiento y la resolución de situaciones problemáticas de interés para la ciencia, la tecnología y la sociedad actual.

El análisis del tema *Estudio del aumento de la concentración de CO₂ atmosférico* se inicia argumentando, a partir de los datos que aporta el quinto informe del IPCC, que el cambio climático antropogénico es ya una realidad. Al propio tiempo se exponen sus posibles consecuencias a lo largo del presente siglo. Por otra parte, se justifica la relevancia que para el calentamiento global tiene el aumento de la proporción de dióxido de carbono en la atmósfera. En particular, se presenta la relación entre la masa de CO₂ emitido anualmente a la atmósfera (a causa de la utilización de combustibles fósiles, la producción de cemento y el cambio de uso de la Tierra) y el incremento de la temperatura media del planeta entre 1959 y 2014. El gráfico de la Figura 5, construido a partir de los datos del Anexo I, representa dicha relación. El elevado coeficiente de correlación positiva R entre las magnitudes indicadas es una expresión del papel que desempeñan

las emisiones de CO₂ en el calentamiento global. Así pues, se crea el contexto adecuado para enunciar el problema que encabeza este trabajo y los alumnos deben solucionar orientados por el profesor.

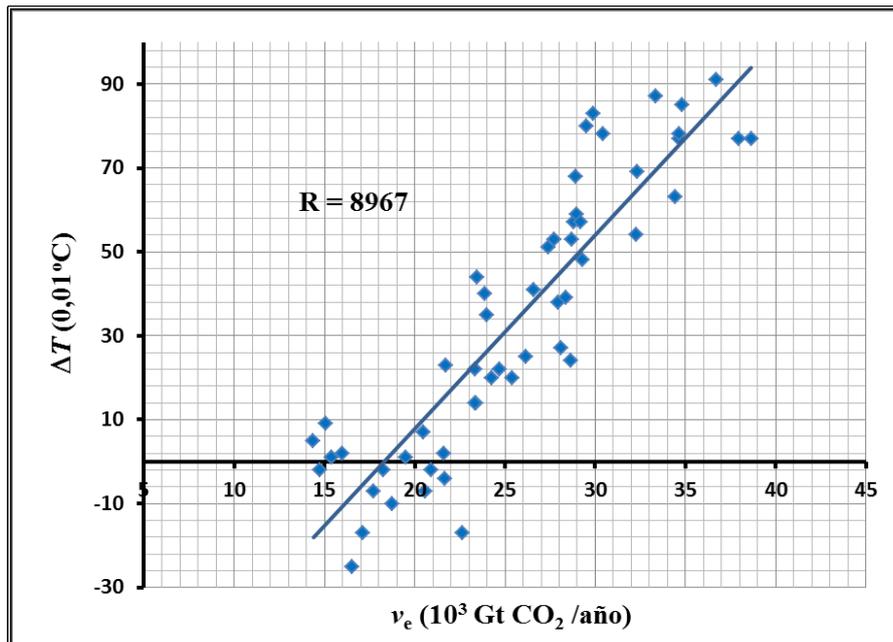


Figura 5. Variación de la temperatura respecto de la rapidez de las emisiones de CO₂.

Conociendo la solución del problema expuesta en los apartados anteriores, el profesor prepara con suficiente antelación a las clases un sistema de tareas de aprendizaje con los objetivos fundamentales siguientes:

- Orientar la actividad de los alumnos.
- Centrar la atención de los estudiantes en determinados aspectos de la resolución del problema y, como resultado, crear un clima de tensión intelectual.

La práctica muestra que se agiliza la labor si, además de recibir la ayuda del profesor, los alumnos realizan las tareas en colaboración, una de cuyas formas es, distribuir convenientemente las actividades de aprendizaje.

A continuación se presentan los enunciados de las principales tareas planteadas (denominadas con la letra T seguida de un número) y algunos comentarios derivados de nuestra experiencia:

T1. Definir los factores que determinan el crecimiento de la concentración de CO₂ atmosférico. Expresarlos con lenguaje matemático.

Entre los factores que indican los estudiantes se encuentran el número de habitantes del planeta, las formas de consumo vigentes y las características de las tecnologías actualmente utilizadas. Sin embargo, como es comprensible, no logran expresar dichos factores con lenguaje matemático. El profesor debe profundizar y ampliar las ideas expuestas por los alumnos y culminar la tarea justificando las relaciones (1) – (4).

T2. Construir un modelo matemático del aumento de la proporción de CO₂ en la atmósfera, entendiendo a los factores que determinan tal incremento.

Debido a la complejidad que tiene esta actividad, dialogando con los alumnos el profesor expone la secuencia necesaria de razonamientos que conducen a la expresión (17).

T3. Analizar estadísticamente los parámetros del modelo (17) y adecuarlo a los datos disponibles para realizar los cálculos.

La solución de esta tarea se descompone en varias actividades de aprendizaje cuya realización es distribuida entre grupos de alumnos:

1. Dados los datos del Anexo I, hallar el promedio de los valores de la rapidez γ de emisión de CO₂ y la desviación estándar correspondiente. Determinar si γ podría ser considerada constante.
2. Estimar los valores anuales de η a partir de la fórmula (18)

$$\eta_i = \frac{1}{\lambda \bar{\gamma} N_i} \frac{\Delta C_i}{\Delta t} 10^{-6}$$

y de los datos del Anexo I.

3. Hallar el promedio de η y la desviación estándar correspondiente.
4. Dados los datos del Anexo II, comprobar que el modelo de Kapitsa (19)

$$N = \frac{C_k}{\tau} \operatorname{arccot} \left[\frac{t_k - t}{\tau} \right]$$

describe adecuadamente el crecimiento de la población mundial desde la Antigüedad hasta el presente. Determinar las constantes características C_k , t_k y τ utilizando el método de mínimos cuadrados.

Al desarrollar esta actividad puede ser indispensable realizar los cálculos mediante la expresión equivalente

$$N = \frac{C_k}{\tau} \left[\arctan \left[\frac{t - t_k}{\tau} \right] + \frac{\pi}{2} \right]$$

que es la adecuada para operar con la mayoría del *software* de cálculo disponible. *Matlab* es un programa informático apropiado para determinar los coeficientes característicos C_k , t_k y τ .

- Comprobar que las previsiones del modelo de Kaptisa corresponden a las hechas por la ONU para el año 2040.

Las actividades 1, 2 y 3 pueden ser realizadas por un grupo de estudiantes, mientras las actividades 4 y 5, por otro. Ambos colectivos ponen en común los resultados obtenidos. Para finalizar la tarea el profesor argumenta la necesidad de adecuar a los datos estadísticos el modelo construido de crecimiento de la concentración de CO₂, utilizando la fórmula (20)

$$C = \lambda \bar{\gamma} \bar{\eta} \int_{t_0}^t N dt \cdot 10^6 + C_0$$

T4. Comprobar que el modelo matemático construido, representado por la fórmula (20), se adecua a las estadísticas de concentración de CO₂ disponibles.

Al solucionar esta tarea los alumnos realizan las actividades siguientes:

- Hallar con la expresión (20) la concentración C_m de dióxido de carbono a intervalos de 5 años a partir de 1965. Utilizar el método de integración por trapecios.
- Comparar las estimaciones C_m hechas mediante el modelo construido y las estadísticas de concentración C de dióxido de carbono del Anexo I. Determinar las desviaciones relativas correspondientes.
- Representar gráficamente los valores C de las mediciones y las estimaciones C_m obtenidas con el modelo.

El resultado de la realización de esta tarea es la Tabla 2 y la Figura 1.

T5. Determinar los años de referencia t_{ref} que sirven de límite superior inicial para calcular la integral de la expresión (20)

$$C = \lambda \bar{\gamma} \bar{\eta} \int_{t_0}^t N dt \cdot 10^6 + C_0$$

al estimar por aproximaciones sucesivas las fechas en que se podrían alcanzar las concentraciones de 450 y 550 ppm de dióxido de carbono en la atmósfera.

Ello supone:

- Ajustar un polinomio de segundo grado a las estadísticas de C dadas en el Anexo I.
- Resolver las ecuaciones de segundo grado que permiten determinar las fechas de referencia t_{ref} correspondientes a las concentraciones de 450 y 550 ppm.

De este modo se obtienen el año $t_{ref,1} = 2040$ para las 450 ppm y el año $t_{ref,2} = 2071$ para las 550 ppm.

T6. Estimar con el modelo construido las fechas a partir de las cuales se superarían los valores críticos de concentración 450 y 550 ppm de dióxido de carbono en la atmósfera terrestre.

T7. Precisar la influencia que actualmente tiene el crecimiento de la población en el aumento de la proporción de CO_2 en la atmósfera, respondiendo las preguntas siguientes: ¿cuánto se desplazaría el momento crítico en que se alcanzaría la concentración $C = 450$ ppm si la población del planeta permaneciera igual a la de 2015?, ¿cuánto se desplazaría el momento crítico en que se alcanzaría la concentración $C = 550$ ppm si la población actual cesara repentinamente su crecimiento?

T8. Indicar algunos factores que pueden contribuir a disminuir la fracción η del CO_2 emitido que se incorpora anualmente a la atmósfera.

Entre los factores que correctamente señalan los estudiantes se encuentran las dos siguientes:

- Limitación de los procesos de urbanización y deforestación.
- Reforestación de zonas del planeta.

A los que conviene añadir un tercero:

- Utilización de tecnologías para la captura y almacenamiento de CO_2 .

T9. Indicar los factores que podrían contribuir a la disminución del nivel γ de las emisiones per cápita de dióxido de carbono. Considerar la relación de γ con el poder de emisión X del consumo humano y con la capacidad media P de consumo per cápita anual, representada por la fórmula (10)

$$\gamma = XP = \frac{v_e}{N}$$

La solución de esta tarea posibilita discutir en torno a cuestiones sociales de actualidad como las características de las relaciones sociales en cuanto al consumo, la distribución y el intercambio de bienes y analizar el papel de la ciudadanía en la toma de decisiones políticas.

T10. Responder las preguntas siguientes: ¿por qué no solamente es necesario, sino impostergable que la sociedad intervenga firme y decididamente en el enfrentamiento del cambio climático? ¿Sobre qué factores del cambio climático centrar especialmente la atención?

La solución de esta tarea puede concluir la resolución del problema enunciado y sirve para plantear nuevas cuestiones de interés que dan paso al estudio del tema Energías renovables. Por ejemplo:

- ¿Cómo diseñar instalaciones fotovoltaicas para la producción de electricidad?
- ¿Cómo diseñar instalaciones eólicas para la producción de electricidad?
- ¿Qué medios existen para almacenar la energía y qué principio de funcionamiento tienen?

VII. Conclusiones

A la pregunta de por qué no solamente es necesario sino impostergable que la sociedad intervenga firme y decididamente en el enfrentamiento del cambio climático se puede responder:

Si la humanidad continuara su actividad con la tecnología y el sistema actual de relaciones sociales de producción, al cabo de aproximadamente dos décadas provocaría que se sobrepasara la concentración crítica de 450 ppm de CO₂ en la atmósfera y que la temperatura media del planeta pudiera superar en 2°C o más la que había en el período preindustrial. El calentamiento global nos situaría en un ambiente muy próximo al que haría imposible el desarrollo sostenible y en el que los efectos del cambio climático serían trágicos para una buena parte de la población mundial (incluidos los países industrializados).

A la pregunta de, sobre qué factores del cambio climático centrar especialmente la atención respondemos:

A la luz de las estimaciones anteriormente realizadas se infiere que la clave para mitigar el cambio climático es potenciar una profunda transformación de la tecnología energética y de las relaciones socioeconómicas. Ello supone, entre otros aspectos:

- *Intensificar la investigación e innovación en todas las áreas que puedan contribuir a frenar el cambio climático y estimular firmemente la aplicación de los resultados obtenidos.* Desarrollar las tecnologías basadas en fuentes renovables de energía, elevar la eficiencia energética y exergética de los medios de producción, diseñar nuevos materiales para la construcción civil con menores emisiones de dióxido de carbono, potenciar la arquitectura bioclimática y las tecnologías para la captura y el almacenamiento de CO₂ entre otras posibles contribuciones.
- *Fomentar la economía ecológica.* Esto significa priorizar el consumo y amplia distribución de tecnologías respetuosas con el ambiente. Favorecer las acciones de conservación y restauración del ecosistema y de mitigación de los efectos del cambio climático. Utilizar convenientemente mecanismos económicos como seguros, pago de servicios ecológicos, impuestos, penalizaciones y subvenciones en las relaciones de mercado. Orientar la producción predominantemente hacia un desarrollo humano que contemple las auténticas necesidades de la población y los límites de la naturaleza.

Como ya se ha señalado, las acciones para contrarrestar el cambio climático y mitigar sus efectos podrían representar, si se planifican y realizan a tiempo, una reducción del PIB mundial en torno al 1% anual. En cambio, de no hacerlo, los costes serían muy superiores. El crecimiento económico indefinido y sin control comienza a perder sentido en las actuales circunstancias.

Las transformaciones mencionadas responden a una situación objetiva: las ya perceptibles consecuencias del cambio climático sobre los ecosistemas. Los efectos del aumento de la temperatura global no son solamente cuestión de futuro, algo que deben enfrentar las próximas generaciones, por cuya suerte estamos moralmente obligados a preocuparnos en la actualidad. Son un problema real para las generaciones presentes, personas que tienen hoy menos de 40 años y esperanza de vida suficiente para experimentarlos. No hablamos de peligros ficticios. Son múltiples los obstáculos a superar y muy poco el tiempo disponible. Urgen las ideas fundamentadas y la acción trepidante y firme.

Los actuales problemas ecológicos deben ser solucionados desde múltiples perspectivas: científico-tecnológica, económica, política, jurídica, filosófica, etc. Pero es indudable que la educación debe desempeñar un papel esencial. De ahí la importancia de prestarle especial atención, considerando algunas ideas fundamentadas y coherentes que en las últimas décadas han aportado las ciencias pedagógicas.

VIII. Referencias

1. CDIAAC. Carbon Dioxide Information Analysis Center: <http://cdiac.ornl.gov/> [Consulta: octubre 2016].
2. Common, M. y Stagl, S. (2008): Introducción a la Economía Ecológica. Editorial Reverté. Barcelona.
3. Crutzen, P. J., Mosier, A. R., Smith, K. A. y Winiwarter, W. (2008): N₂O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 389-395.
4. EIA. (2013): International Energy Outlook. With Projections to 2040. Washington D.C.
5. ERI-RAS and ACRF. (2014): Global and Russian Energy Outlook to 2040, Moscow.
6. IPCC (2013): Cambio Climático 2013. Bases Físicas. Resumen para responsables de políticas, resumen técnico y preguntas frecuentes. OMM, PNUMA.
7. IPCC (2014): Cambio Climático 2014. Informe de síntesis. Resumen para responsables de políticas. https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_SPM_es.pdf [Consulta: octubre 2016].
8. Kapitsa, S. P. (2014). Ensayo de la Teoría del Crecimiento de la Humanidad. La revolución demográfica y la sociedad de la información. URSS. Moscú (en ruso).
9. Maddison A. (2013): *Contours of the World Economy, 1 – 2030 AD*. Assays in Macro-Economic History. Oxford, Oxford University Press.
10. NASA: <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/> [Consulta: mayo 2016].

11. NOAA: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html> [Consulta: mayo 2016].
12. PNUD (2014): Informe sobre Desarrollo Humano 2014. <http://www.undp.org/content/dam/undp/library/corporate/HDR/2014HDR/HDR-2014-Spanish.pdf> [Consulta: octubre 2016].
13. Stern, N. (2006): Stern Review: The Economics of Climate Change. http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20100407172811/http://www.hm-treasury.gov.uk/stern_review_report.htm [Consulta: octubre 2016].
14. UN. (2013): World Population Prospects: The 2012 Revision, <http://esa.un.org/unpd/wpp/index.htm>. [Consulta: mayo 2016].
15. Valdés, P. y Valdés, R. (2014): Estudio del aumento de la concentración de CO₂ atmosférico en un curso universitario inicial de ciencias. Revista Iberoamericana de Educación 65, 2. http://rieoei.org/rie_contenedor.php?numero=6410&titulo=Estudio%20del%20aument%20de%20la%20concentraci%C3%B3n%20del%20CO2%20atmosf%C3%A9rico%20en%20un%20curso%20universitario%20inicial%20de%20ciencias [Consulta: octubre 2016].

Anexo I

Datos de concentración C de CO₂ registrados en Mauna Loa, cantidad de habitantes N , emisiones anuales de dióxido de carbono v_e , incremento ΔT de la temperatura y emisiones per cápita anuales γ

Año	C (ppm)	N ($\cdot 10^6$)	v_e ($\cdot 10^3$ Gt/año)	ΔT ($\cdot 0,01^\circ\text{C}$)	γ ($\cdot 10^3$ kg/año)
1959	315,97	2963,216	14,4	5	4,86
1960	316,91	3018,344	14,8	-2	4,90
1961	317,64	3075,073	15,1	9	4,91
1962	318,45	3133,554	15,4	1	4,91
1963	318,99	3194,075	16,0	2	5,01
1964	319,62	3256,989	16,5	-25	5,07
1965	320,04	3322,495	17,1	-17	5,15
1966	321,38	3390,686	17,7	-7	5,22
1967	322,16	3461,343	18,3	-2	5,29
1968	323,04	3533,967	18,7	-10	5,29
1969	324,62	3607,866	19,5	1	5,40
1970	325,68	3682,488	20,5	7	5,57
1971	326,32	3757,735	20,6	-7	5,48
1972	327,45	3833,595	20,9	-2	5,45
1973	329,68	3909,722	21,7	23	5,55
1974	330,18	3985,734	21,7	-4	5,44
1975	331,08	4061,399	21,6	2	5,32
1976	332,05	4136,542	22,7	-17	5,49
1977	333,78	4211,322	23,4	22	5,56
1978	335,41	4286,282	23,4	14	5,46
1979	336,78	4362,190	24,3	20	5,57
1980	338,68	4439,632	24,0	35	5,41
1981	340,10	4518,602	23,5	44	5,20
1982	341,44	4599,003	23,3	14	5,07
1983	343,03	4681,211	23,9	40	5,11
1984	344,58	4765,658	24,7	22	5,18
1985	346,04	4852,541	25,4	20	5,23
1986	347,39	4942,056	26,1	25	5,28
1987	349,16	5033,805	26,6	41	5,28
1988	351,56	5126,633	27,4	51	5,34
1989	353,07	5218,978	27,9	38	5,35

1990	354,35	5309,668	27,7	53	5,22
1991	355,57	5398,329	28,7	53	5,32
1992	356,38	5485,115	28,6	24	5,21
1993	357,07	5570,045	28,1	27	5,04
1994	358,82	5653,316	28,4	39	5,02
1995	360,80	5735,123	28,8	57	5,02
1996	362,59	5815,392	29,3	48	5,04
1997	363,71	5894,155	32,3	54	5,48
1998	366,65	5971,883	29,9	83	5,01
1999	368,33	6049,205	29,0	59	4,79
2000	369,52	6126,622	29,2	57	4,77
2001	371,13	6204,311	28,9	68	4,66
2002	373,22	6282,302	29,5	80	4,70
2003	375,77	6360,765	30,4	78	4,78
2004	377,49	6439,842	32,3	69	5,02
2005	379,80	6519,636	33,3	87	5,11
2006	381,90	6600,220	34,6	77	5,24
2007	383,76	6681,607	34,8	85	5,21
2008	385,59	6763,733	34,5	63	5,10
2009	387,37	6846,480	34,6	78	5,05
2010	389,85	6929,725	36,7	91	5,30
2011	391,63	7013,427	38,0	77	5,42
2012	393,82	7097,500	38,6	77	5,44
2013	396,48	7181,715	39,0		5,43
2014	398,61	7265,786	39,9		5,49
2015	400,83	7349,472			

Fuentes utilizadas:

1. CDIAC. <http://cdiac.ornl.gov/> [Consulta: octubre 2016].
2. NASA. <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/> [Consulta: mayo 2016].
3. NOAA. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html> [Consulta: mayo 2016].
4. UN. (2013): World Population Prospects: The 2012 Revision, <http://esa.un.org/unpd/wpp/index.htm>. [Consulta: mayo 2016].

Anexo II

Estimados de la población mundial desde el año 0 hasta 2013

<i>t</i> (año)	<i>N</i> (10 ⁶)	<i>t</i> (año)	<i>N</i> (10 ⁶)
0	231	1965	3329
1000	268	1970	3691
1500	438	1975	4071
1600	556	1980	4449
1700	603	1985	4864
1820	1041	1990	5321
1870	1270	1995	5742
1913	1791	2000	6128
1950	2526	2005	6514
1955	2762	2010	6916
1960	3026	2013	7162

Fuentes utilizadas:

1. Maddison A. (2013): *Contours of the World Economy, 1 – 2030 AD. Assays in Macro-Economic History*. Oxford, Oxford University Press.
2. UN. (2013): *World Population Prospects: The 2012 Revision*, <http://esa.un.org/unpd/wpp/index.htm>. [Consulta: mayo 2016].