

# **Una introducción a los presupuestos conservativos**

**Mat. Sigríd Morett  
Dr. Eduardo Herrera  
Facultad de Ciencias  
Universidad Nacional Autónoma de México**

## Resumen

En el siguiente trabajo se exponen algunas conexiones derivadas del concepto de presupuesto desde una visión económica simple doméstica hasta llegar al presupuesto de energía en Física y su relación con la conservación, tocando el tema del presupuesto energético global de la Tierra.

## Palabras clave

Presupuesto, Conservación, Energía, Clima.

## Abstract

This paper presents links between the concept of Budget from Economics to Physics, from a simple domestic view to the energy budget in Physics, and shows its relationship with conservation. We address the issue of Earth's energy budget.

## Keywords

Budget, Conservation, Energy, Climate.

## 1. Introducción

El presente trabajo está dirigido tanto a estudiantes y profesores de ciencias e ingeniería, como a cualquiera que use presupuestos, buscando generar un pensamiento crítico sobre la aparición de conceptos físicos en varias ramas del saber, siendo posible que el principio de conservación de la energía tenga el mismo comportamiento que un presupuesto económico. Es sorprendente donde más pueden aparecer los presupuestos conservativos.

El tema de los presupuestos toca a muchos ámbitos, pero generalmente al hablar de ellos la mayoría piensa en algo relativo a la economía. Uno se puede imaginar a una estudiante que cuente con una cantidad fija de dinero de  $X$  pesos para vivir por un mes, tal que con esa cantidad  $X$ , la estudiante pueda pagar los gastos que ella determine

de importancia como: renta de vivienda ( $x_1$ ), gastos domésticos como pago de agua, electricidad, red de internet inalámbrica o Wi-Fi ( $x_2$ ), comida ( $x_3$ ), transporte ( $x_4$ ) y por último reservar una cantidad para algún gasto imprevisto ( $z$ ). Lo expresado se puede representar por la ecuación (1):

$$X = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + z \quad (1)$$

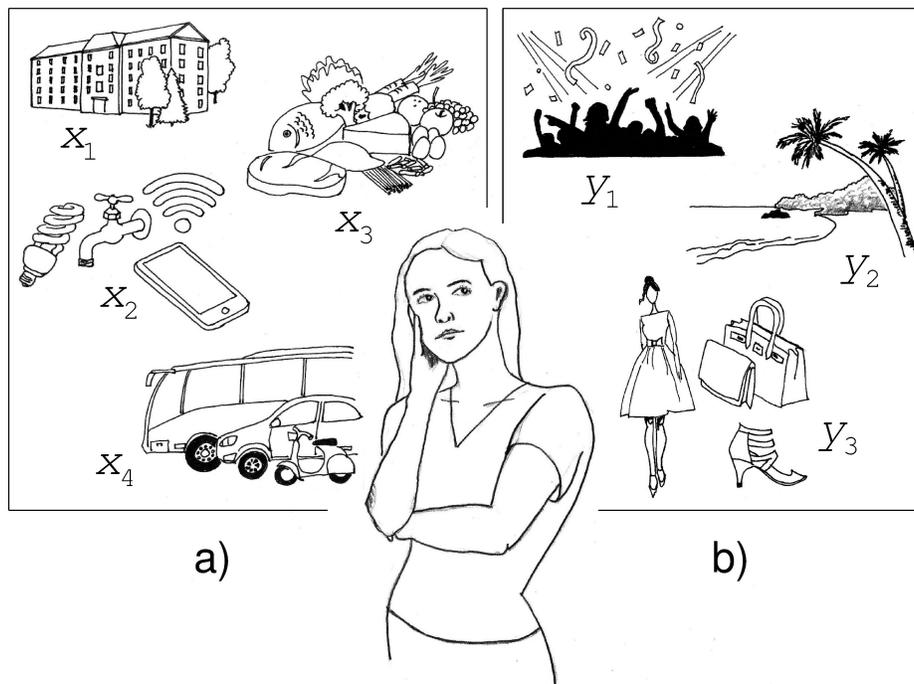
Pero, esos gastos asignados no son inalterables, la estudiante también podría pensar en gastar la cantidad  $X$  de otra manera y en otros rubros como: fiesta ( $y_1$ ), viaje ( $y_2$ ) y compras ( $y_3$ ), de tal forma que ahora la ecuación de presupuesto quede como:

$$X = y_1 + y_2 + y_3 \quad (2)$$

Como se puede observar, el hecho es que la cantidad de dinero  $X$  se puede gastar de varias formas diferentes (Fig. 1), pero en cualquier caso permanece igual, es decir, sólo contamos con esa cantidad para gastar o en otras palabras  $X$  se conserva.

Por otra parte, hay otro asunto importante en la construcción de los presupuestos, generalmente los componentes del gasto no son exactos, los gastos del primer ejemplo  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_4$ , tienen incertidumbres asociadas que se supone están incluidas en la cantidad  $z$ , pero puede ocurrir que las incertidumbres estén subestimadas y el balance total de gastos no concuerde con la cantidad  $X$ , de lo que se concluirá que no se tiene el conocimiento suficiente de alguno(s) de los gastos  $x_n$ .

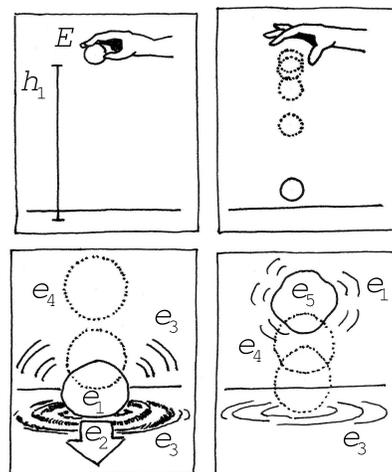
Lo anterior se puede aplicar al ámbito de la física clásica, considerando un caso sencillo, como dejar caer una pelota desde una altura inicial  $h_1$  y ver lo que sucede justo después del primer rebote, hasta que alcance otra altura.



**Fig. 1** Ejemplos de posibles gastos que puede hacer una estudiante: **a)** renta de vivienda ( $x_1$ ), gastos relativos a la vivienda como agua, electricidad, Wi-Fi ( $x_2$ ), comida ( $x_3$ ), transporte ( $x_4$ ); **b)** fiesta ( $y_1$ ), viaje ( $y_2$ ) y compras ( $y_3$ ).

En la altura  $h_1$  la pelota de masa ( $m$ ) tendrá asociada una energía potencial ( $E = mgh_1$ ) y al dejar caer la bola (con aceleración de la gravedad,  $g$ ) llegará al suelo casi con esa cantidad de energía pero ahora cinética y justo por la interacción con el piso y el aire se repartirá (Fig. 2) en otras como: la energía asociada a la deformación de la pelota por el choque ( $e_1$ ), la energía asociada al calentamiento del piso por vibración ( $e_2$ ), la energía asociada al sonido producido también por el choque ( $e_3$ ), la energía asociada a la fricción del aire con la pelota ( $e_4$ ) y la energía cinética de ascenso ( $e_5$ ), de tal forma que lo anterior se puede escribir con una ecuación de la siguiente forma:

$$E = e_1 + e_2 + e_3 + e_4 + e_5 \quad (3)$$



**Fig. 2** Transferencia de Energía potencial ( $E$ ) de una pelota que se deja caer desde una altura  $h_1$ , toca el suelo y rebota: a energía asociada a la deformación de la pelota por el choque ( $e_1$ ), energía asociada al calentamiento del piso por vibración ( $e_2$ ), energía asociada al sonido producido por el choque ( $e_3$ ), energía asociada a la fricción del aire con la pelota ( $e_4$ ) y energía cinética de ascenso ( $e_5$ ).

Además, la ecuación (3) nos recuerda a la ley de la Termodinámica relacionada con la conservación de la energía, donde la energía inicial está siendo convertida en otras que se pueden agrupar como las destinadas a realizar un trabajo y las de calor o de disipación [1, 2].

De la misma forma que se han tratado los dos ejemplos anteriores, se puede reflexionar sobre la energía disponible en nuestra casa, el planeta Tierra.

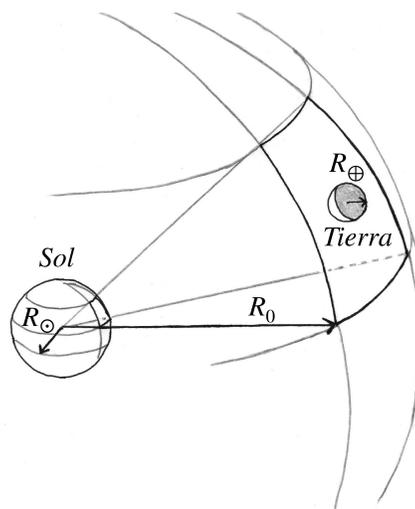
## 2. Presupuesto energético global de la Tierra

Consideremos ahora un caso más complejo, saber qué cantidad de energía dispone nuestro planeta proveniente del Sol y qué se puede hacer con ella. Primero, se obtiene la potencia total emitida por nuestra estrella ( $P_{\odot}$ ), con ayuda de la ley de Stefan-Boltzmann y tomando en cuenta que el Sol se comporta como un cuerpo negro ( $P_{\odot} = \sigma T^4 A_{\odot}$ ), donde  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma \approx 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-4}$ ),  $A_{\odot}$  es el área superficial de la estrella ( $A_{\odot} = 4\pi R_{\odot}^2$ , donde  $R_{\odot}$  es el radio del Sol  $\approx 6.96 \times 10^8 \text{ m}$ ),  $T$  es la temperatura superficial de la estrella, que la obtenemos por medio de la ley de desplazamiento de Wien ( $T \approx 2.9 \times 10^{-3} \lambda^{-1} [\text{m K}]$ ). Tomando la longitud de onda del máximo de emisión ( $\lambda$ ), en nuestro caso  $\lambda = 5 \times 10^{-7} \text{ m}$ , se obtiene una temperatura de  $T = 5800 \text{ K}$ . Entonces, con los datos anteriores se obtiene la potencia total emitida por el Sol igual a  $P_{\odot} \approx 3.906 \times 10^{26} \text{ W}$  [3, 4].

Pero el planeta Tierra sólo recibe una minúscula fracción de esa potencia emitida, que se puede calcular considerando que el flujo de energía que sale del Sol desde toda su superficie es el mismo que cruza por toda el área de la esfera que tiene como radio

a la distancia media orbital de la Tierra alrededor del Sol ( $R_O \approx 1.496 \times 10^{11} \text{ m}$ ), esta es una aplicación de lo que se conoce como ley de Gauss (Fig. 3). Si tomamos el área de la sección esférica correspondiente a la Tierra en su órbita como el área plana de un círculo con radio igual al ecuatorial del planeta ( $R_{\oplus} \approx 6.371 \times 10^6 \text{ m}$ ), la proporción ( $f$ ) que le tocará al planeta será:

$$f = \frac{\pi R_{\oplus}^2}{4\pi R_O^2} = \left(\frac{R_{\oplus}}{2R_O}\right)^2 \quad (4)$$



**Fig. 3** Esquema de la fracción de energía solar recibida por una cara de la Tierra, donde  $R_{\odot}$  es el radio del Sol,  $R_O$  es la distancia media entre el Sol y la Tierra y  $R_{\oplus}$  es el radio ecuatorial terrestre.

Así, se obtiene que el flujo medio de energía que le llega a la Tierra es la potencia emitida por el Sol multiplicada por la fracción que le toca al planeta, dividido entre el área del planeta expuesta, es decir,  $S = (P_{\odot} \cdot f) / (\pi R_{\oplus}^2) = (P_{\odot}) / (4\pi R_O^2) \approx 1389 \text{ W m}^{-2}$ , a la cantidad  $S$  se le llama *constante solar* (Irradiancia solar). Por otro lado, la cantidad de energía que recibe un lugar determinado de la Tierra llamada *insolación*, varía con el transcurso del año [5].

Ahora, considerando que desde los tiempos en que se formó la Tierra, el planeta ha estado recibiendo energía proveniente del Sol, al principio absorbiendo más de lo que emitía, hasta llegar al equilibrio y emitir la misma cantidad de radiación que absorbe [6], pero la emisión de radiación no sólo es por una cara del planeta sino por toda el área superficial (como lo hace el Sol). Por lo que se llega a una ecuación de balance de radiación:

*Radiación emitida = Radiación absorbida*

$$4\pi R_{\oplus}^2 \sigma T_{\oplus}^4 = S(1 - a)\pi R_{\oplus}^2 \quad (5)$$

donde  $T_{\oplus}$  es la temperatura en el planeta,  $a$  es el albedo (se discute al final de la sección), que si se considera igual a cero ( $a = 0$ ) y moviendo los factores para obtener la potencia para una sección en el tope de la atmósfera de área de  $1 \text{ m}^2$ , tendremos que:

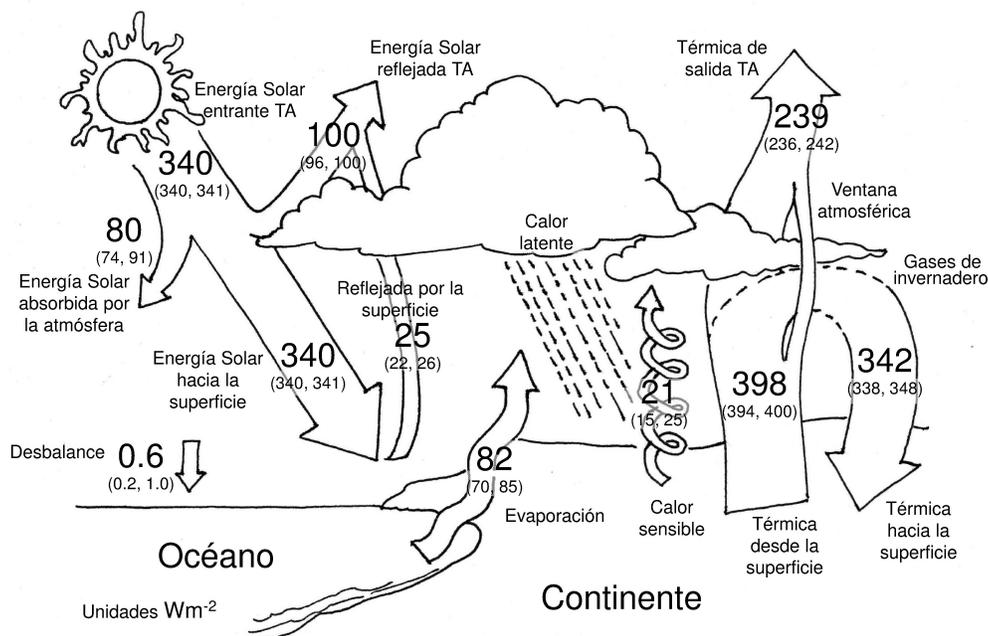
$$\sigma T_{\oplus}^4 = \frac{S}{4} \approx 347 \text{ Wm}^{-2} \quad (6)$$

Al tener la potencia por unidad de área expuesta en la ecuación (6), el reto es averiguar y asignar qué procesos se pueden hacer con esa energía en la columna atmosférica por debajo e integrarla para todo el planeta. En las últimas dos décadas desde finales de los 90, se ha dado un auge en la investigación relacionada al balance energético global y se ha enfocado a encontrar la asignación de cuánto flujo energético toma cada proceso en la atmósfera, de la manera más precisa hasta el momento de hacer la investigación, se puede decir que es un tema científico de frontera y no sólo se ha hecho de forma global [7, 8], también se ha realizado para regiones y países como México y Brasil [9, 10].

El asunto no es nada sencillo porque involucra a muchos flujos de energía (Fig. 4), desde el flujo de energía que reflejan las nubes y la atmósfera, el flujo reflejado por la superficie de la Tierra, el flujo de energía convertido en corrientes termale, flujos de calor latente y calor sensible, los flujos de energía absorbidos por la superficie y la atmósfera, etc.

Cuantificar a todos esos flujos energéticos lo más exacto posible es algo que importa, porque dependiendo de esas cantidades se puede determinar cuánta energía queda almacenada en el océano o cuánta energía está disponible para procesos convectivos entre otros, pero se ha establecido que incluso pequeños desequilibrios en el presupuesto energético global pueden conducir a cambios lentos pero perceptibles en el clima conforme se vaya ajustando al nuevo equilibrio, que son por supuesto, una de las principales preocupaciones de los informes de evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) [11].

Es de interés climático acoplar el balance energético global sabiendo sus valores medios, desviaciones y anomalías con los fenómenos dinámicos y termodinámicos de la atmósfera, asociados a cada una de las escalas atmosféricas (gran escala, escala sinóptica, mesoescala y microescala), como las ondas planetarias asociadas a frentes fríos, los ciclones tropicales, los vientos persistentes del oeste y del este, la convección, las lluvias y las tormentas eléctricas, además de oscilaciones que ocurren en tiempos más largos a un año como *El Niño*. Teniendo mayor conocimiento sobre ese balance energético, será posible estimar cómo y cuáles procesos dinámicos y termodinámicos se pueden realizar en



**Fig. 4** Esquema del balance de energía media global para la Tierra. Los números indican las mejores estimaciones de las magnitudes de las componentes del balance de flujo de energía ( $\text{Wm}^{-2}$ ), junto con sus rangos de incertidumbre entre paréntesis. Las siglas TA corresponden a Tope de la Atmósfera. Adaptado de [8].

un periodo de un año o mayor dentro de la visión de cambio climático y decir por ejemplo, si tienen o no sentido frases como que “bajo cambio climático se espera que aumenten los ciclones tropicales”, y en dado caso que lo tuvieran, también decir entre qué procesos se darán los intercambios energéticos para lograrlo. Lo que nos lleva a concluir que hace falta mayor entendimiento sobre los procesos atmosféricos de intercambio de energía, sus interrelaciones y sus teleconexiones [12].

Las variaciones de la insolación no rigen mecánicamente y directamente las fluctuaciones del clima, pero lo tratado anteriormente sirve como punto de partida para su estudio [13]. La cantidad y complejidad de factores que están involucrados conforman un reto para los climatólogos. Están desde los factores que tienen que ver con cambios

del clima en escalas de tiempo de miles de años, como la precesión de los equinoccios, las variaciones de la excentricidad de la órbita terrestre, y otros como la cantidad de gases de efecto invernadero en la atmósfera, la superficie emergente y la posición de los continentes en el globo, el albedo, etc. El albedo tiene un papel muy importante en el sistema clima, de tal forma que cambios muy pequeños de albedo pueden tener como respuesta una glaciación. El albedo se define como la proporción de radiación de onda corta reflejada entre la incidente en el tope de la atmósfera. Es función de las propiedades ópticas de los objetos en la atmósfera (nubes, vapor de agua y aerosoles) y objetos que constituyen la superficie planetaria (hielo, océano, vegetación, otros). Cambios en el albedo asociados con procesos relativos a nubes y a superficie son entre otros los de ma-

por importancia en el sistema climático en respuesta al forzamiento antropogénico [14].

### 3. Discusión y conclusiones

En base a los cálculos de Wild *et al.* 2017 [8], existe un desbalance que aumenta la cantidad de energía disponible en el sistema climático lo que conlleva a investigar qué procesos lo utilizan, puede ser calentando la superficie polar y derritiendo el hielo, transfiriendo energía a la atmósfera o al océano, etc. Por lo que, aseveraciones para predecir el futuro bajo cambio climático basadas en estadística, sin tomar en cuenta a la física, resultan insuficientes.

Los presupuestos son importantes en muchos ámbitos humanos en los que se tiene una cantidad que se conserva, no sólo en la física sino también en la agricultura, el turismo, las energías renovables, el manejo del agua, el área utilizable, etc.

Podemos abordar un último ejemplo, para vislumbrar cuán importantes son los presupuestos y que se pueden encontrar en todas las materias. El tema del área planetaria utilizable casi no se discute porque toca tópicos como el de la propiedad privada y el de la política, pero dejando por un momento estos últimos aspectos de lado, se puede reflexionar sobre la necesidad de un cambio en el manejo de adquisición de área planetaria. Es un hecho que el área planetaria ( $A$ ) disponible es finita y que es deseable que con ella se haga una repartición por prioridad humana y planetaria, teniendo por ejemplo una parte para la agricultura y alimentación ( $A_{agro}$ ), otra área destinada a la industria ( $A_{ind}$ ), otra para energía ( $A_{en}$ ), otra para vivienda ( $A_{casa}$ ), otra para reservas naturales ( $A_{natur}$ ), etc. Y llegaríamos a una ecuación muy similar a las del inicio:

$$A = A_{agro} + A_{ind} + A_{en} + A_{casa} + A_{natur} \quad (7)$$

En el balance de área anterior, según el enfoque que se tome se pueden asignar porcentajes a cada uno de los rubros, pero quedando claro que al tomar más para uno de ellos se quita participación a alguno o algunos otros. Por lo que, al crecer la población humana, el balance de área tendrá menor holgura para cambios y se avista la necesidad de limitar el poder de adquisición de área que tienen los sistemas económicos.

### Agradecimientos

Agradecemos los comentarios de los revisores anónimos y la revisión del profesor René Garduño (CCA-UNAM).

### Referencias

1. Hecht, E., Energy Conservation Simplified, *Phys. Teach.* **46**, 77, 2008. doi: 10.1119/1.2834526
2. Moreno, J., Can mechanical energy vanish into thin air?, *American Journal of Physics* **86**, 220, 2018. doi: 10.1119/1.5019022
3. Rodríguez Gómez, J.M., F. Carlesso, L.E. Vieira, L. Da Silva, A irradiância solar: conceitos básicos, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. **40**, nº 3, e3312, 2018. DOI: dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2017-0342
4. Khavrus V., and I. Shelevytsky, Geometry and the physics of seasons, *Phys. Educ.* **47**, 680, 2012. doi:10.1088/0031-9120/47/6/680
5. Karabanov, O., J.C. St. John, and

- W. Chameides, Planets on the table: A laboratory experiment on radiation and planetary effective-temperature concepts, *American Journal of Physics*, **76**, 692, 2008. doi: 10.1119/1.2894524
6. Ribeiro, C.I., Blackbody Radiation from an Incandescent Lamp, *The Physics Teacher* **52**, 371, 2014. doi: 10.1119/1.4893096
7. Trenberth, K.E., J.T. Fasullo, and J. Kiehl, EARTH'S GLOBAL ENERGY BUDGET, *Bulletin of the American Meteorological Society*, March, 1-13, 2009. DOI:10.1175/2008BAMS2634.1
8. Wild, M., A. Ohmura, C. Schär, G. Müller, D. Folini, M. Schwarz, M. Z. Hakuba, and A. Sanchez-Lorenzo, The Global Energy Balance Archive (GEBA) version 2017: a database for worldwide measured surface energy fluxes, *Earth Syst. Sci. Data*, **9**, 601–613, 2017. doi.org/10.5194/essd-9-601-2017
9. García-Cueto, R., N. Santillán-Soto, Z. Haro-Rincón and S. Ojeda-Benítez, Parameterization of net radiation in an arid city of northwestern Mexico. *Atmósfera* **28** (2), 71-82, 2015. doi: 10.20937/ATM.2015.28.02.01
10. Zuluaga, C.F., A. Avila-Diaz, F.B. Justino, A.B. Wilson, Climatology and trends of downward shortwave radiation over Brazil, *Atmospheric Research*, 250, 2021. doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105347
11. Read, P.L., J. Barstow, B. Charnay, S. Chelvanithhilan, P.G.J. Irwin, S. Knight, S. Lebonnois, S.R. Lewis, J. Mendonc, and L. Montaboneb, Global energy budgets and 'Trenberth diagrams' for the climates of terrestrial and gas giant planets, *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **142**: 703–720, 2016. DOI:10.1002/qj.2704
12. Schwartz, S.E., Resource Letter GECC-2: The Greenhouse Effect and Climate Change: The Intensified Greenhouse Effect, *American Journal of Physics* **86**, 565, 2018. doi: 10.1119/1.5045574
13. Garduño, R., *El veleidoso clima* (Fondo de Cultura Económica, Colección la ciencia para todos no. 127, México D.F., 1998), p. 21-80.
14. Donohoe, A., & Battisti, D.S., Atmospheric and Surface Contributions to Planetary Albedo, *Journal of Climate*, **24** (16), 4402-4418, 2011. doi.org/10.1175/2011JCLI3946.1