

Cclinch: plataforma iterativa para conocer los impactos del cambio climático**Cclinch: iterative platform to know the impacts of climate change**

Ignacio Sánchez Cohen ^{1*}, Ricardo Trejo Calzada ², Aurelio Pedroza Sandoval ², Sergio I. Jiménez Jiménez ¹
y Gabriel Díaz Padilla ³

¹ Centro Nacional de Investigación en Relación, Agua, Suelo Planta, Atmosfera del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (CENID RASPA INIFAP). Canal Sacramento Km 6.5 margen derecha, Gómez Palacio, Dgo. CP 35140.

² Universidad Autónoma Chapingo, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas Km. 40 Carr. Gómez Palacio Chihuahua Bermejillo, Durango, México C.P. 35230.

³ INIFAP. CIRGOC. Campo Experimental Cotaxtla. Veracruz, México

*Autor para correspondencia: sanchez.ignacio@inifap.gob.mx

RESUMEN

El impacto del cambio en patrones de clima, comúnmente se aborda de manera somera en actividades académicas y de difusión restándole importancia a los procesos físico-químicos que se llevan a cabo en la atmósfera. En tal virtud, se ha desarrollado una plataforma computacional para ejemplificar los impactos en forzamientos radiativos y temperatura al considerar variables físicas y químicas en la atmósfera. La aplicación es amigable con el usuario al proveer de ayudas en la interface para introducir datos iniciales de gases efectos de invernadero y modificaciones en la constante solar. Para el cálculo de forzamientos radiativos y temperaturas, la aplicación usa las ecuaciones del Panel Inter Gubernamental de Cambio Climático (IPCC). También la aplicación calcula los impactos en la temperatura del suelo por conducción (ley de Fourier) y por convección (ley de enfriamiento de Newton). Para el cálculo de la variación de la temperatura con la altitud y albedo, la aplicación considera el modelo unidimensional de Sellers y McGuffie al dividir los hemisferios en capas y calcular el transporte de calor en capas consecutivas. La plataforma provee de salidas gráficas para ejemplificar los impactos debido a las variaciones físico – químicas. Se considera que la plataforma es útil en los procesos de enseñanza de climatología física y también como ejemplo del impacto del cambio climático.

Palabras clave: Cambio Climático, Física, Variabilidad

ABSTRACT

The impact of climate change is commonly approached in a light way in academic endeavors neglecting physical and chemical processes that the phenomenon involves. Therefore, a computational platform has

been developed to show the impact on radiative forcing's and temperature when considering the physical – chemical characteristics of the atmosphere. The platform is user-friendly providing help within the interface when asking for inputs on greenhouse gases and solar constant modifications. For the computations of radiative forcing's and temperatures, the application utilizes the equations of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). The computer program also computes soil temperatures by conduction (Fourier's law) and convection (Newton's law of cooling). For the computation of temperature variation with altitude and albedo, the program considers the one-dimensional model of Sellers and McGuffie dividing the hemispheres in bands computing the heat transport within two consecutive bands. The platform provides of graphical outputs to show the impacts due to physical - chemical variations within the atmosphere. We consider that the computer program is useful in physical climatology teaching and to show the impacts of climate change.

Keywords: Climate change, physics, variability.

INTRODUCCIÓN

El clima obedece a fenómenos físicos complejos y a una interacción de variables difíciles de dilucidar, de ahí que la capacidad predictiva de los modelos climáticos sea mejor cuanto mejor se describan matemáticamente estas variables, así como sus interacciones (Held, 2005). Los modelos climáticos han impulsado de manera notable la ciencia del clima ayudando a científicos a entender de qué manera las actividades antropogénicas han afectado el clima en la tierra (Sánchez, et al 2011).

Para dilucidar el impacto del cambio en patrones climáticos, es necesario conocer los fundamentos físicos del fenómeno; en esta tesitura, el balance de energía es de crucial importancia. La transferencia de calor es la transmisión de energía térmica ocasionada por un gradiente de temperatura. Así, cuando existe

gradiente de temperatura en un medio estacionario (sólido o fluido), la transferencia de calor se le conoce como conducción; cuando este gradiente de energía o calor ocurre entre una superficie y un fluido (que puede ser aire), se le conoce como convección. A diferencia de estos dos mecanismos de transferencia de energía, la transferencia por radiación no requiere de un medio físico y se propaga por ondas electromagnéticas. (Holman, 2010).

El objetivo del presente trabajo es mostrar una plataforma computacional iterativa (CCLINCH: Cambio Climático INIFAP – CHAPINGO) para conocer los impactos en variables climáticas por concepto del cambio en variables físicas y químicas de la atmósfera. Se fundamenta en el balance energético entre la superficie del suelo y la atmósfera (Ley de Enfriamiento de Newton) y

entre la superficie del suelo y las capas más profundas (Ley de Fourier).

MATERIALES Y METODOS

El programa computacional se ha desarrollado en la plataforma PYTHON. Uno de los componentes del software es el cálculo de los forzamientos radiativos (y las consecuentes temperaturas) cuando se varía la concentración de los gases efecto de invernadero (CO₂, NH₄ y NO₂), ver Figura 1. El segundo componente calcula el impacto del cambio en la constante solar (y la fracción considerada de ésta), en la temperatura promedio de los trópicos. Divide el hemisferio en 9 bandas. El usuario puede modificar las variables de entrada para obtener

la radiación entrante y saliente en una determinada banda.

Gases efecto de invernadero

El forzamiento radiativo (FR) debido a los cambios en las concentraciones de gases en la atmósfera es el componente mayor del FR consecuencia de las actividades humanas. Estos gases atrapan calor que de otra manera regresaría a la atmósfera provocando calentamiento del planeta. Los modelos climáticos han demostrado que estos gases son necesarios para mantener la temperatura “habitable” en la tierra; sin embargo, el incremento en sus concentraciones ha exacerbado el incremento en temperatura en las últimas décadas (Cassia, et al 2018). El software calcula el impacto en FM de los principales gases mediante las ecuaciones que señala la Tabla 1 (Etminan, 2016).

Tabla 1: Expresiones simplificadas para los forzamientos radiativos de CO₂, CH₄ y N₂O, concentraciones en ppm. M es la concentración de CH₄ en ppb y N es la concentración de N₂O en ppb ^a

GAS	EXPRESION SIMPLIFICADA	COEFICIENTES	ERROR
CO ₂	$[a_1(C-Co)^2 + b_1 C-Co + c_1 + 5.36] \times \ln(C/Co)$	$a_1 = -2.4 \times 10^{-7} \text{ Wm}^{-2} \text{ ppm}^{-1}$	3.6 (0.15)
		$b_1 = 7.2 \times 10^{-4} \text{ Wm}^{-2} \text{ ppm}^{-1}$	
		$c_1 = -2.1 \times 10^{-4} \text{ Wm}^{-2} \text{ ppm}^{-1}$	
N ₂ O	$[a_2\bar{C} + b_2\bar{N} + c_2\bar{M} + 0.117] (\sqrt{\bar{N}} - \sqrt{N_o})$	$a_2 = -8.0 \times 10^{-6} \text{ Wm}^{-2} \text{ ppm}^{-1}$	0.64 (0.003)
		$b_2 = 4.2 \times 10^{-6} \text{ Wm}^{-2} \text{ ppb}^{-1}$	
		$c_2 = -4.9 \times 10^{-6} \text{ Wm}^{-2} \text{ ppb}^{-1}$	
CH ₄	$[a_3\bar{M} + b_3\bar{N} + 0.043] (\sqrt{\bar{M}} - \sqrt{M_o})$	$a_3 = -1.3 \times 10^{-6} \text{ Wm}^{-2} \text{ ppb}^{-1}$	2.7 (0.016)
		$b_3 = -8.2 \times 10^{-6} \text{ Wm}^{-2} \text{ ppb}^{-1}$	

^a C, M y N son las concentraciones al tiempo al cual se necesita conocer el forzamiento, Co, Mo y No son las concentraciones iniciales; los términos entre corchetes las concentraciones son el valor medio entre la concentración inicial y final, por ejemplo $\bar{M} = 0.5(M + M_o)$ para metano. Las expresiones son válidas para los rangos 180 a 2000 ppm para CO₂, 200 a 525 ppb para N₂O y 340 a 3500 ppb para CH₄. El error se muestra en la última columna en porcentaje y en Wm⁻² entre paréntesis.

Transferencia de calor en la atmósfera

Para el cálculo de la transferencia de calor en la atmósfera, la aplicación considera el algoritmo propuesto por Sellers y McGuffie (1987).

Si se considera que el flujo solar (S) y el albedo (α) dependen de la latitud, entonces si una banda latitudinal es más caliente o más fría que la banda vecina se provocará un flujo (P) de

calor entre bandas contiguas (Figura 1). En el modelo unidimensional se asume que este flujo tiene una dependencia lineal de la diferencia de temperaturas entre la región (banda, Ti) y la temperatura promedio global (Ta); es decir:



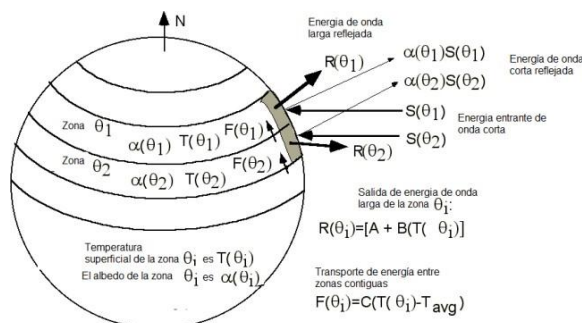


Figura 1. Modelo unidimensional del transporte de energía para analizar la sensibilidad del clima a cambios en la constante solar (S), el albedo (α), transporte de calor (energía, C) y gases efecto de invernadero (A , B) (Sellers, 1969, Budyko, 1969).

$$P = F(T_{\theta i} - T_{avg})$$

Considerando el modelo conceptual de la Figura 1, la ecuación describe que la energía que entra (o ganada) está dada por:

$$S_i = \frac{1 - \alpha_i}{4} \quad 2$$

y la energía que sale está dada por la ecuación de Stefan Boltzman como:

$$I = \sigma T^4 \quad 3$$

Información de satélites muestran que la variación de la radiación saliente (Stefan Boltzman) puede ser representada como una función lineal con la temperatura como:

$$F(T) = A + BT \quad 5$$

La ecuación 5 fue propuesta originalmente por Budyko (1969) y Sellers (1969), Widiastih (2011) mucho antes de que existieran los satélites actuales. Los coeficientes A y B expresan la pérdida de radiación infrarroja y están relacionados con la presencia de gases efecto de invernadero ($A=204 \text{ W m}^{-2}$ y $B=2.17 \text{ W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$). De hecho, estos parámetros (empíricos) consideran el impacto de las nubes, vapor de agua, CO_2 , CH_4 , CFCs , N_2O y otros en menor medida, (Lacis, et al 2013). El significado físico es: A = emisión de onda larga a 0°C y B = incremento en emisión por cada $^\circ\text{C}$.

En el equilibrio entonces la temperatura que tendría una banda (comprendida entre dos latitudes contiguas) sería:

$$T_{\theta i} = \frac{[S_{\theta i}(1 - \alpha_{\theta i}) + FT_{avg} - A]}{B + F} \quad 6$$

Donde:

$S_{\theta i}$ = Flujo solar en latitud (banda) i . Este valor es el producto de $\frac{S}{4}$ (constante solar promedio) con la insolación; S_i = Insolación (Fracción de la luz solar incidente en cada banda latitudinal, fracción de la constante solar)

$\alpha_{\theta i}$ = Albedo en la latitud i . Se pueden usar aproximaciones para la dependencia del albedo de la temperatura (T) y la Latitud. Por ejemplo, Sellers (1969) propuso:

$$\begin{aligned} \alpha(Lat, T) &= b - 0.009T \text{ para } T < 283.16^\circ\text{K} (10.01^\circ\text{C}) \\ \alpha(Lat, T) &= b - 2.548 \text{ para } T > 283.16 \end{aligned} \quad 7$$

Donde “ b ” es un coeficiente empírico dependiente de la latitud según se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Coeficiente empírico de Sellers para considerar el efecto de la latitud en el albedo.

Latitud Norte	Coeficiente empírico “b”
80-90	2.924
70-80	2.927
60-70	2.878
50-60	2.891
40-50	2.908
30-40	2.87
20-30	2.826
10-20	2.809
0-10	2.808
Latitud Sur	Coeficiente empírico “b”
0-10	2.808
10-20	2.801
20-30	2.798
30-40	2.865
40-50	2.922
60-70	2.937
70-80	2.992
80-90	2.9

$T_c = -10^\circ\text{C}$ (por debajo de esta temperatura se asume la existencia de hielo)

F = Coeficiente de transporte de calor ($3.80 \text{ W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)

T_{avg} = Temperatura global ponderada

A y B = coeficientes que expresan la pérdida de radiación infrarroja ($A=204 \text{ W m}^{-2}$ y $B=2.17 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)

Transferencia de calor en el suelo

Adicionalmente el software realiza el balance de energía en el suelo considerando la textura de este, el contenido de humedad y la profundidad. A este respecto, para el flujo de calor por convección, utiliza la Ley de Enfriamiento de Newton:

$$q''_x = hA(T_s - T_{\infty}) \rightarrow W \quad 8$$

T_s y T_{∞} son las temperaturas del suelo y del aire y h conductividad.

Para el flujo de calor por conducción en el suelo, la aplicación utiliza la ecuación de Fourier:

$$q''_x = -k \left(\frac{dT}{dx} \right) \rightarrow W m^2 \quad 9$$

“ k ” es conductividad térmica y “ x ” es la profundidad del suelo (cm); “ dT ” es el gradiente de temperatura entre dos capas consecutivas de suelo.

Diagrama de flujo para la simulación de procesos

Previo al proceso de la programación computacional, se desarrolló un diagrama de flujo operacional como guía del orden de los procesos involucrados. La Figura 2 señala el seguimiento.

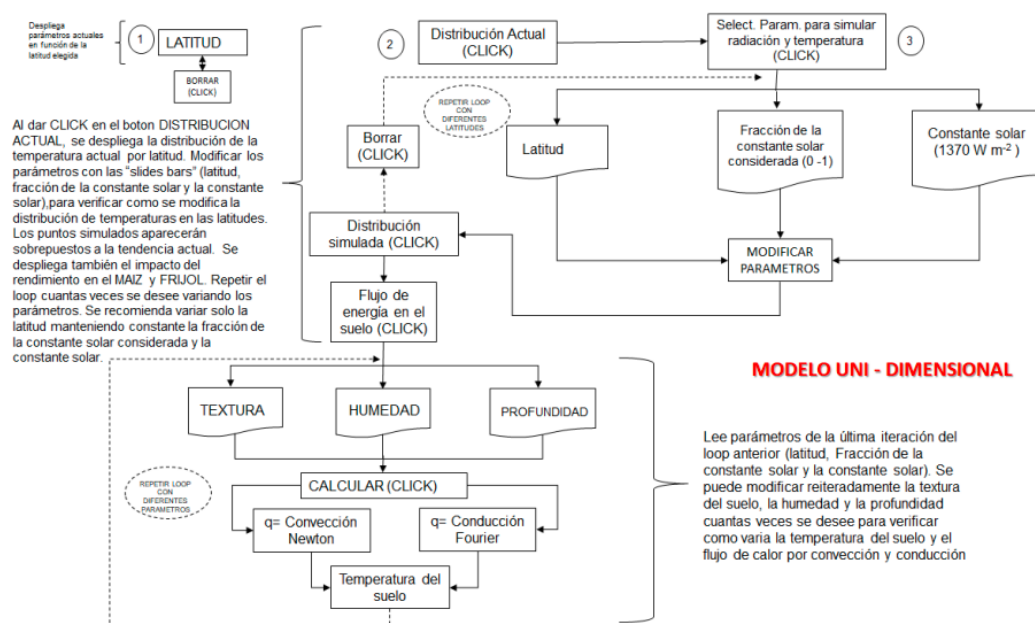


Figura 2. Diagrama de flujo para la aplicación computacional. La secuencia numérica señalada en los círculos indica el orden para los cálculos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las Figuras abajo muestran las interfaces en la plataforma para variar iterativamente los parámetros físicos y químicos (en la atmósfera)

que impactan el flujo de calor y la temperatura en la atmósfera y el suelo. La plataforma utiliza barras deslizantes para introducir los parámetros para las simulaciones de impacto. Se puede borrar y hacer iteraciones cuantas veces se desee. Al realizar el cambio en latitud, el



software calcula el cambio de temperatura y lo gráfica para apreciar el impacto con respecto a la temperatura actual. En cada paso, se ofrecen documentos y pestañas de ayuda.

La Figura 3, en la porción izquierda, se muestra el diagrama de flujo parcial para el cálculo de los forzamientos radiativos por gases de efecto de invernadero (CO_2 , N_2O y NH_4). En la misma figura, en la porción derecha, aparecen las barras deslizantes para ubicar los parámetros de estos gases para el cálculo de los forzamientos. En el ejemplo mostrado, si la concentración de

N_2O se incrementara a 380 ppb (actualmente es de 330 ppb) con una concentración de CH_4 de 2020 ppb (actualmente es de 1860 ppb) y con una concentración de 700 ppm de CO_2 (actualmente es de 380 ppm), entonces los forzamientos radiativos sería como lo señala el texto en rojo de la figura 3 ocasionando un incremento en la temperatura global de 2.4°C , lo cual es un valor muy cercano al que pronostica el IPCC si se incrementa la cantidad de CO_2 al doble de la concentración actual.

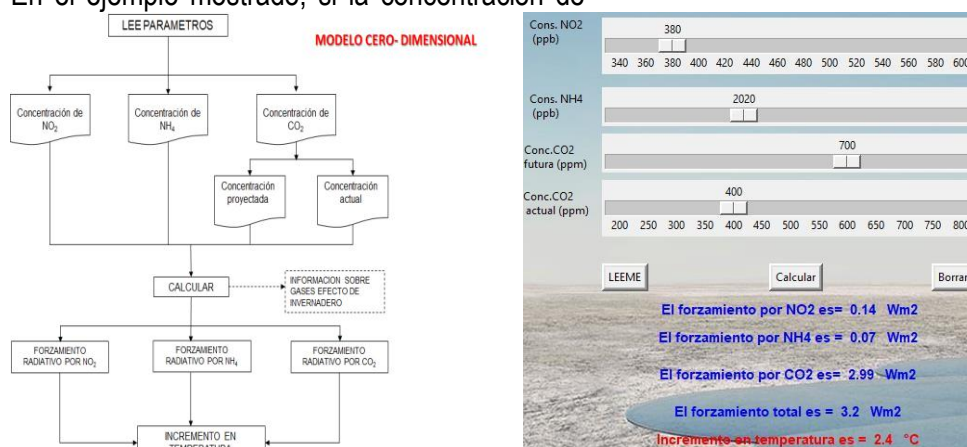


Figura 3. Izquierda diagrama de flujo y derecha interface para el cálculo de los forzamientos radiativos y las temperaturas al variar las concentraciones de gases efecto de invernadero.

La Figura 4 muestra la interface para el cálculo de las temperaturas en diferentes paralelos al variar la constante solar. Si se incrementara la constante solar en un 20% (ejemplo de la figura), el umbral de congelamiento se reduciría en aproximadamente a los 75° de latitud. Esta

situación evidentemente provocaría la pérdida de hielo hacia los polos con el consecuente calentamiento de la superficie al carecer de superficie que reflejase los rayos solares.

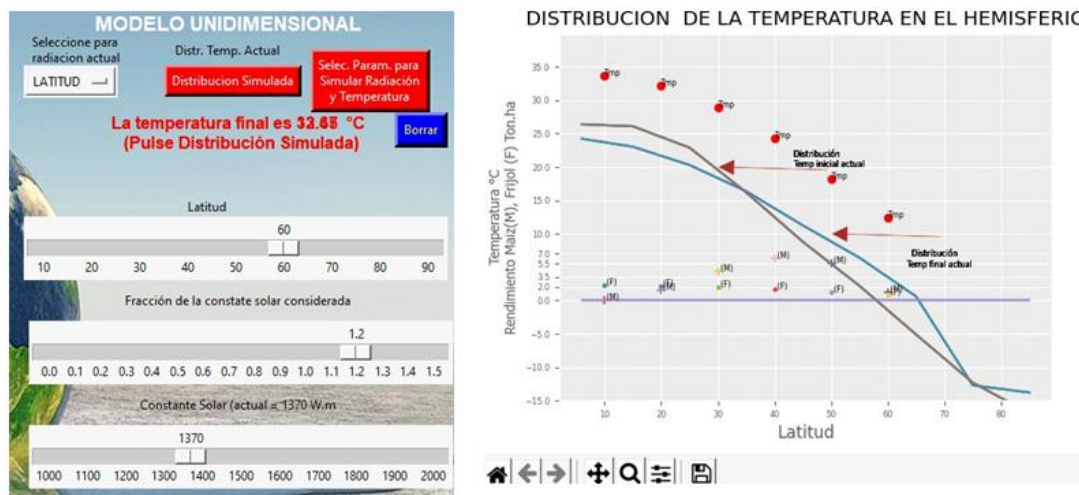


Figura 4. Izquierda, interface para calcular el impacto en la temperatura de las bandas al variar la constante solar y la fracción considerada de ésta. Derecha, resultados gráficos. También el software estima el impacto en el rendimiento de los cultivos maíz y frijol. Cada punto rojo en la gráfica es la modificación a la temperatura en la latitud mostrada en el eje de las “x” al variar los parámetros de entrada.

Respecto al impacto en la temperatura del suelo, la Figura 5 señala un ejemplo de los valores para esta variable cuando se considera un suelo seco de textura arcillosa; así en la capa de 0 – 5 cm el suelo se está enfriando (ver flecha en color rojo, resultado de resolver la ecuación de convección

de Newton); así también, a la profundidad de 10 cm el suelo se estaría calentando al igual que en la capa de 20 cm de profundidad resultado de la ecuación de Fourier para conducción de calor en el suelo.

SIMULACION DE VARIACIONES EN TEMPERATURAS Y RADICACIÓN ACORDE A EL MODELO CERO DIMENSIONAL Y UNI DIMENSIONAL DE CAMBIO CLIMÁTICO. Dr. Ignacio Sánchez Cohen

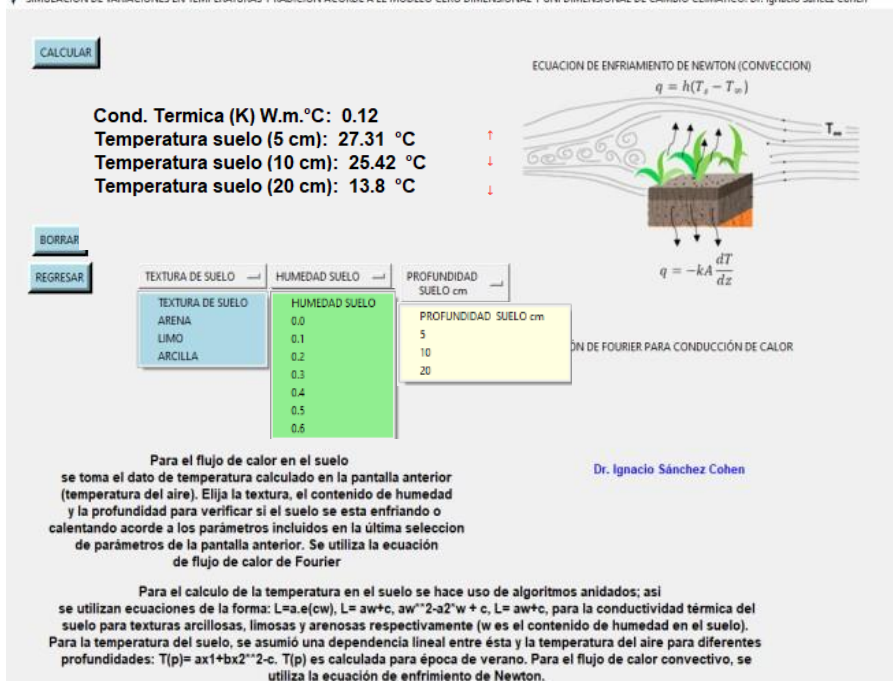


Figura 5. Interface para calcular el impacto en la temperatura del suelo por convección (ley de enfriamiento de Newton) y conducción (ley de Fourier) acorde a la textura, el contenido de humedad y temperatura del ambiente.

CONCLUSIONES

Los modelos de balance de energía, explican de manera muy aceptable, la complejidad climática y se focalizan en la predicción de la temperatura dada una serie de condicionantes atmosféricas como altura, latitud, estado de superficie y características del medio físico. La aplicación es útil para tener una apreciación del impacto en las temperaturas y flujo de calor ante cambios en variables físicas y de la química de la atmósfera. También ofrece una aproximación didáctica de los procesos del cambio climático. El método se fundamenta en procesos físicos e incluye las ecuaciones utilizadas por el IPCC para gases efectos de invernadero. El modelo de rendimiento considera unas relaciones lineales y cuadráticas entre éste y la temperatura. La aproximación puede servir como guía para el análisis de situaciones donde la pérdida o ganancia de calor es necesaria como es el caso de prácticas de manejo en agricultura donde el suelo es el dominio de aplicación. Se proveen los fundamentos teóricos para concluir que, las modificaciones al medio físico (suelo) tales como los residuos orgánicos, afectan de manera notable la temperatura que cataliza otros procesos bioquímicos importantes. Las estimaciones de rendimiento son meramente ilustrativas de impacto. El ejecutable de la aplicación puede solicitarse con los autores del artículo.

LITERATURA CITADA

- Budyko, M. I. 1969. The effect of solar radiation on the climate of the earth, *Tellus*, 21 (1969), pp. 611–619.
- Cassia R, Nocioni M, Correa-Aragunde N and Lamattina L (2018) Climate Change and the Impact of Greenhouse Gasses: CO₂ and NO, Friends and Foes of Plant
- Oxidative Stress. *Front. Plant Sci.* 9:273. doi: 10.3389/fpls.2018.00273
- Etminan, M., G. Myhre, E. J. Highwood and K. P. Shine. 2016. Radiative forcing of carbon dioxide, methane and nitrous oxide: A significant revision of the methane radiative forcing. *Geophysical Research Letters*. Vol. 43 No. 24.
- Held, Isaac M. 2005. The gap between simulation and understanding in climate modeling. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(11), 1609-1614.
- Holman, J. P. 2010. Heat Transfer. Tenth Edition. McGraw-Hill series in mechanical engineering. 725 pp. Disponible en: https://www.academia.edu/38166004/Heat_Transfer_10thEdition_by_JP_Holman.pdf. Última vez visitado: marzo, 2020.
- Lacis, A. A., James E. Hansen, Gary L. Russell, Valdar Oinas & Jeffrey Jonas. 2013. The role of long-lived greenhouse gases as principal LW control knob that governs the global surface temperature for past and future climate change, *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 65:1, 19734, DOI: 10.3402/tellusb.v65i0.19734
- Sanchez – Cohen, I., G. Díaz Padilla, M.T. Cavazos Pérez, G. R. Granados Ramírez y E. Gómez Reyes. 2011. Elementos para entender el cambio climático y sus impactos. Ed. Porrúa. 167 pp.
- Sellers, W. 1969. A climate Model Based on the Energy Balance of the Earth – Atmosphere System. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 8. Pp 392 – 400.
- Sellers, H. A. y K. McGuffie. 1987. A Climate Modeling Premier. John Wiley and Sons. 217 pp.
- Widiasih, E. 2011. Dynamics of the Budyko Energy Balance Model..*Journal on*

