

Balance de Energía y (cuasi-) Ciclo Hidrológico en el Mundo de las Margaritas

Juan Fernando Salazar Villegas
Estudiante de Maestría
Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos
Universidad Nacional de Colombia sede Medellín
jfsalaza@unalmed.edu.co

Germán Poveda Jaramillo
Profesor Asociado
Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos
Universidad Nacional de Colombia sede Medellín
gpoveda@unalmed.edu.co

Preparado para presentación en el
XVI Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología
Sociedad Colombiana de Ingenieros
Sociedad de Ingenieros del Quindío
Universidad del Quindío
Corporación Autónoma Regional del Quindío
Armenia 29, 30 y 31 de octubre de 2004

Resumen. El clima de la Tierra es un sistema dinámico no lineal que opera a través de ciclos complejos de retroalimentación, y que funciona como un sistema único, autorregulado, compuesto por elementos físicos, químicos, biológicos y antrópicos. La teoría de Gaia ha propuesto la existencia de una retroalimentación de doble vía entre el clima y la biota de la Tierra, a través del "Mundo de las Margaritas". Se trata de un modelo climático propuesto por Watson y Lovelock en 1983, para representar el fuerte acoplamiento dinámico de la biota con el medio ambiente físico, el cual da lugar a la autorregulación del clima a escala global. En este trabajo se modifica el modelo del Mundo de las Margaritas, con el propósito de incorporar dos elementos importantes: (1) se considera la presencia de nubes y el efecto invernadero natural, y (2) se involucra de manera parcial el ciclo hidrológico (cuasi), con el propósito de acoplar la dinámica de las nubes, la biota y el clima, en un sistema gobernado por el balance energético. Se obtienen soluciones de la evolución temporal de la temperatura planetaria, de las poblaciones de Margaritas y de la cobertura de nubes, a partir de las cuales es posible describir acoplamientos fundamentales entre estos subsistemas, lo cual sugiere la validez del modelo. Estas soluciones pueden ser estables u oscilatorias dependiendo de valores umbrales de los parámetros del modelo (p. ej. el albedo de las nubes). El análisis de sensibilidad sugiere que las oscilaciones climáticas sólo se dan cuando hay diversidad biológica, por ejemplo cuando sobreviven las dos especies de Margaritas consideradas en el modelo. Estos resultados confirman los estrechos acoplamientos entre el clima y la biota, y apuntan a mejorar la comprensión del clima de la Tierra y de la relevancia de la biota como una componente fundamental de su dinámica.

1. Introducción

El clima de la Tierra es un sistema dinámico no lineal, y por lo tanto opera a través de complejos ciclos retroalimentativos (Nordstrom, 2002). El clima de la Tierra se ha mantenido relativamente constante durante miles de millones de años, a pesar de que la luminosidad del Sol se ha incrementado en aproximadamente un 30% desde que el planeta se formó (Lovelock, 2003); esto indica la predominancia de ciclos retroalimentativos negativos (Nordstrom, 2002). Además, el clima de la Tierra se comporta como un sistema único, autorregulado, compuesto por elementos físicos, químicos, biológicos y humanos (Lovelock, 2003).

El ciclo hidrológico es un componente altamente no lineal y pobremente comprendido del sistema climático. Es razonable asumir que juega un papel fundamental en los ciclos retroalimentativos positivos y negativos que regulan tal sistema (Nordstrom, 2002). El clima global varía entonces como resultado de complejos acoplamientos no lineales que involucran al ciclo hidrológico. En este sentido, Gupta, *et al.* (2000) afirman que estamos lejos de comprender cuantitativamente: (a) el papel del ciclo hidrológico y la biota en críticas relaciones que gobiernan la variabilidad climática natural cuasi-oscilatoria en las escalas interanual, interdecadal y mayores, (b) los efectos combinados de esas interacciones, y (c) la robustez del clima global ante los impactos antropogénicos.

Con el propósito de entender mejor el sistema climático terrestre, se han construido muchos modelos que van desde los más simples (orden 0 y 0 dimensiones, 0-D), pasando por los Modelos de Balance de Energía (MBE, 1-D), hasta los más complejos Modelos Generales de Circulación (MGC, 3-D). Modelos de diferente complejidad se usan generalmente para resolver diferentes problemas. Por ejemplo, los 3-D MGC permiten incluir una gran variedad de procesos físicos y sus interacciones, de forma espacialmente distribuida, y por lo tanto son útiles para hacer análisis en escalas de tiempo cortas (menos de 100 años típicamente). Los modelos más simples, aunque no incluyan las complejidades de un MGC, pueden servir mejor para entender las retroalimentaciones entre un grupo menor de procesos relevantes. (Nordstrom, 2002)

En 1983 Watson y Lovelock desarrollaron el modelo conocido como el Mundo de las Margaritas, con el propósito de ilustrar matemáticamente la idea de que en un planeta como la Tierra, la dinámica de la biota está estrechamente acoplada a la del medio ambiente físico, y tal acoplamiento da lugar a una autorregulación del clima planetario (Lovelock, 1988; Nevison *et al.*, 1999). A partir de El Mundo de las Margaritas se han desarrollado varios modelos mediante la inclusión de nuevas complejidades, que apuntan a acercar tales modelos a las condiciones del planeta Tierra. Ghil y Childress (1987) presentan un MBE donde se representa el clima global mediante la variable temperatura, y se incluyen retroalimentaciones entre la cobertura de hielo y el albedo planetario. También tienen en cuenta el efecto invernadero mediante un término incluido en el balance de energía que representa una desviación de la radiación de cuerpo negro. Nevison *et al.* (1999) modifican el Mundo de las Margaritas considerando que el balance entre la radiación incidente y saliente del planeta no es exacto. En la respuesta del nuevo modelo encuentran oscilaciones de temperatura autosostenidas, que examinan en comparación con oscilaciones climáticas conocidas en la Tierra como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), la oscilación milenar de temperatura en el hemisferio norte y los ciclos de glaciaciones. En sus conclusiones plantean como una nueva línea de investigación, en el

contexto de la emergente ciencia de la geofisiología, una pregunta sobre si es posible modificar el Mundo de las Margaritas para simular mejor las condiciones y comportamientos en la Tierra, incluyendo ciclos naturales y posible caos.

Se presentan en este artículo 3 modelaciones: 1. el modelo de Nevison *et al.* (1999), 2. el modelo de Nevison *et al.* (1999) considerando el efecto invernadero según la propuesta de Ghil y Childress (1987), 3. un modelo propuesto a partir del Mundo de las Margaritas incluyendo un cuasi-ciclo hidrológico.

2. Modelos Antecedentes

El punto de partida de los modelos que se presentan es el Mundo de las Margaritas de Watson y Lovelock (1983), cuya ecuación fundamental es la del balance radiativo expresado así:

$$SL(1 - A) = \sigma T_e^4 \quad (1)$$

donde: S [erg cm⁻² año⁻¹] = 2.89 x 10¹³ es el flujo constante de radiación solar que llega actualmente al planeta, L es una medida adimensional de la luminosidad del sol relativa a la época actual, A [adimensional] es el albedo medio del planeta, σ [erg cm⁻² año⁻¹ K⁻⁴] = 1789 es la constante de Stefan-Boltzmann para radiación de cuerpo negro, y T_e [K] es la temperatura efectiva a la cual el planeta emite radiación como un cuerpo negro (en adelante, la “temperatura”). Las ecuaciones restantes del modelo son:

$$\frac{da_i}{dt} = a_i (x\beta - \gamma) \quad , \quad i = w, b \quad (2)$$

$$x = p - a_w - a_b \quad (3)$$

$$A = xA_{gf} + (1 - p)A_{nf} + a_b A_b + a_w A_w \quad (4)$$

$$\beta_i = 1 - 0.003265(T_{opt} - T_{l,i})^2 \quad \text{para} \quad 278K < T_{l,i} < 313K \quad i = w, b \quad (5)$$

$$\beta_i = 0 \quad \text{para} \quad T_{l,i} \leq 278K \quad \text{o} \quad T_{l,i} \geq 313K$$

$$T_{l,i} = q'(A - A_i) + T_e \quad i = w, b \quad (6)$$

donde: x [adimensional] es la fracción del área total del planeta que es potencialmente fértil pero que no está poblada por margaritas, A_{gf} [adimensional] = 0.50 es el albedo de las áreas fértiles, A_{nf} [adimensional] = 0.5 es el albedo de las áreas no fértiles, A_w [adimensional] = 0.75 es el albedo de las margaritas blancas, A_b [adimensional] = 0.25 es el albedo de las margaritas negras, p [adimensional] = 1 es la fracción total del área del planeta que es potencialmente fértil, a_w [adimensional] es la fracción del área total del planeta cubierta por margaritas blancas, a_b [adimensional] es la fracción del área total del planeta cubierta por margaritas negras, β_i [año⁻¹] es la tasa de crecimiento de las margaritas, γ [año⁻¹] = 0.3 es la tasa de mortalidad de las margaritas, T_{opt} [K] = 295.5 (22.5°C) es la temperatura óptima para el crecimiento de ambos tipos de margaritas, $T_{l,i}$ [K] es la temperatura local que determina la tasa de crecimiento de cada especie de margarita, y q [K] = 20 es el coeficiente de conducción de energía solar entre diferentes tipos de superficie.

Nevison et al. (1999) propusieron un modelo similar al de Watson y Lovelock (1983), convirtiendo la ecuación 1 en una ecuación diferencial ordinaria (EDO) que da cuenta de que T_e no está necesariamente en un estado estacionario. La ecuación modificada es:

$$c_p \frac{dT_e}{dt} = S L(1 - A) - \sigma T_e^4 \quad (7)$$

donde c_p [erg cm⁻² K⁻¹] es el calor específico medio o inercia termal del planeta.

Las ecuaciones 2 a 6 completan el modelo.

El principal resultado de este modelo es que, bajo ciertas condiciones, se producen oscilaciones de temperatura autosostenidas, acopladas a oscilaciones en las poblaciones de margaritas blancas y negras. En la figura 1 se presentan tales oscilaciones reproducidas mediante el nuevo modelo (numeral 3) para una condición particular (ausencia total de nubes, $a_c=0$). Este resultado representa una diferencia significativa frente al Mundo de las Margaritas original, donde la temperatura y las poblaciones de margaritas se estabilizan en un valor constante para una cierta luminosidad y tras un tiempo suficientemente largo.

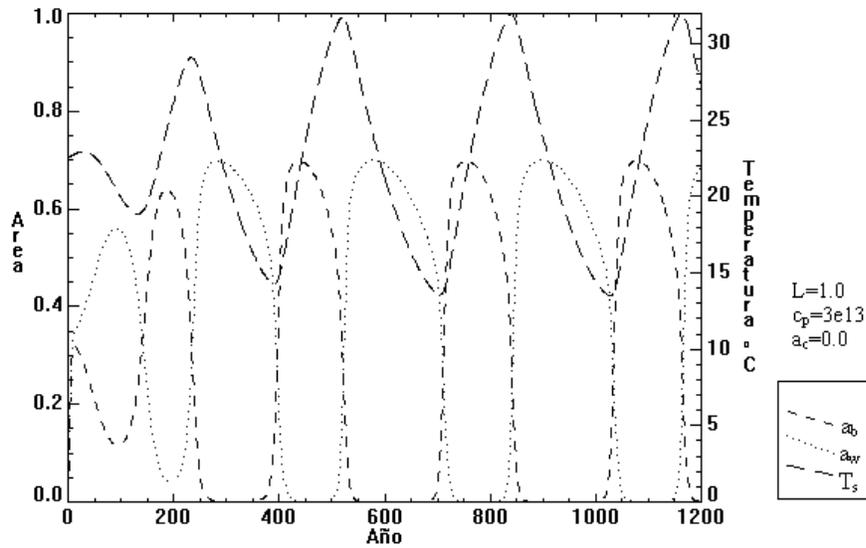


Figura 1. Oscilaciones de temperatura ($T_s = T_e$) acopladas a oscilaciones en las áreas de margaritas. Reproducción de los resultados de Nevison et al., (1999).

Nevison *et al.* sugieren que el efecto invernadero puede ser considerado en su modelo introduciendo en la ecuación 7 un factor que expresa una desviación de la radiación de cuerpo negro propuesto por Ghil y Childress (1987). De ese modo se obtiene,

$$c_p \frac{dT_e}{dt} = S L(1 - A) - \sigma g(T_e) T_e^4 \quad (8)$$

donde,

$$g(T_e) = 1 - m \tanh\left(\frac{T_e}{T_o}\right)^6 \quad (9)$$

con $m=0.5$, para una cobertura de nubes del 50%, y $T_o [K^{-6}] = 1.9 * 10^{-15}$, determinado empíricamente por Sellers (1969). Esta expresión indica que, a medida que la temperatura aumenta, g disminuye, o sea que el efecto invernadero se vuelve más fuerte.

El modelo con el balance radiativo definido mediante las ecuaciones 8 y 9, produce los resultados presentados en la figura 2.

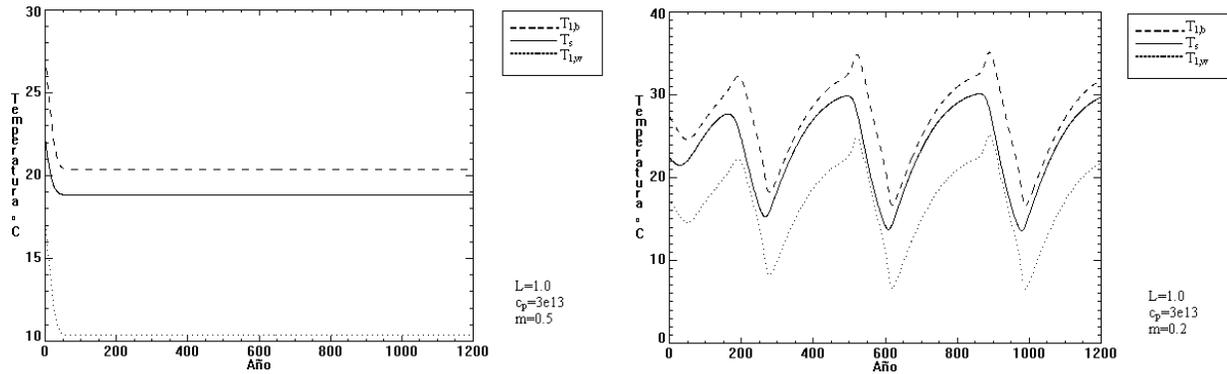


Figura 2. Resultados del modelo de Nevison et al. (1999) teniendo en cuenta el efecto invernadero según Ghil y Childress (1987).

En la figura 2 (izquierda), cuando $m = 0.5$ (m representa la cobertura de nubes) la temperatura se estabiliza en un valor constante. Cuando $m = 0.2$ (derecha) los resultados son similares a los de Nevison et al. (1999).

3. EL NUEVO MODELO

El nuevo modelo se basa en el de Nevison et al. (1999), con dos cambios fundamentales: (1) se hace el balance de energía en la superficie dada la presencia de nubes, y (2) se incluye un cuasi-ciclo hidrológico. En la figura 3 se presenta un esquema del balance radiativo considerado.

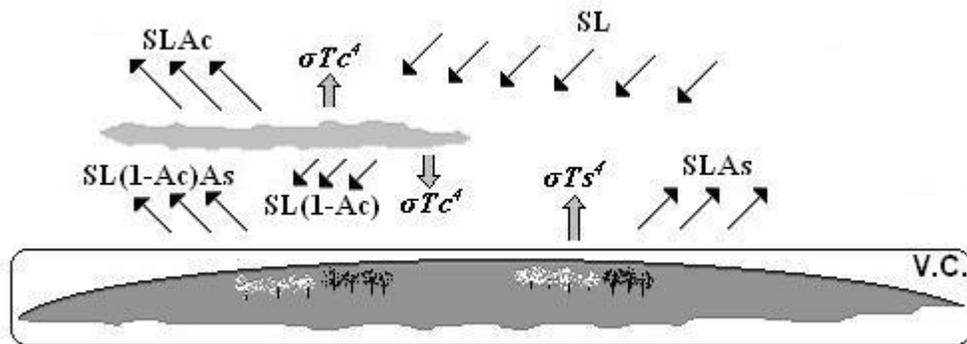


Figura 3. Componentes del balance radiativo en el Mundo de las Margaritas con nubes.

Se definen las siguientes variables: A_c [adimensional] es el albedo de la capa de nubes, A_s [adimensional] es el albedo de la superficie que se calcula como A en la ecuación 4, T_c [K] es la temperatura de las nubes, y T_s [K] es la temperatura de emisión de la superficie. S , L y σ tienen el mismo significado que

en el modelo original. Se considera a_c [adimensional] como la fracción de área cubierta por nubes, ε_c [adimensional] es la emisividad de las nubes y ε_s [adimensional] es la emisividad de la superficie. Luego, al plantear el balance de energía, dentro del volumen de control (V.C.) indicado, se obtiene:

$$c_p \frac{dT_s}{dt} = SL[(1 - A_c)a_c + (1 - a_c)](1 - A_s) + \sigma\varepsilon_c T_c^4 a_c - \sigma\varepsilon_s T_s^4 \quad (10)$$

La ecuación 10 expresa el hecho de que, en términos de la Tierra, la superficie no sólo recibe energía del Sol sino también de la atmósfera, representada en este caso por una capa de nubes, mediante el efecto invernadero. La temperatura de las nubes puede estimarse en función de la temperatura superficial considerando un gradiente vertical de temperatura, así:

$$T_c = T_s + z_c \frac{dT}{dz} \quad (11)$$

donde dT/dz [$K m^{-1}$] es el gradiente vertical de temperatura (igual a 0.01 en el modelo) y z_c [m] es la altura de las nubes.

Hasta aquí se ha introducido el efecto de las nubes sobre el balance radiativo. Lo que se presenta a continuación es una manera de acoplar la magnitud de la cobertura de nubes (a_c) a los cambios en la temperatura. Esto se hace mediante un cuasi-ciclo hidrológico expresado en términos de la evaporación y la precipitación. La ecuación 12 expresa el cambio en el tiempo de la cobertura de nubes como una función de su valor inicial, E y P .

$$\frac{da_c}{dt} = a_c (E - P) \quad (12)$$

donde E [año⁻¹] y P [año⁻¹] son fracciones entre 0 y 1 que expresan, respectivamente, la tasa de crecimiento y de decrecimiento de la cobertura de nubes. Puede entonces relacionarse E con la evaporación y P con la precipitación, dado que estos dos fenómenos dan lugar a la aparición o desaparición de nubes. En adelante se hablará de las variables E y P como evaporación y precipitación.

Para estimar E se introducen algunas ecuaciones relacionadas con el cálculo de la evaporación. La evaporación se puede estimar como un residual en el balance radiativo de acuerdo con Hartmann (1994) y V. T. Chow *et al.* (1994). La aplicación de esta idea para estimar E se encuentra todavía en estudio.

Se definió entonces una función de la temperatura para representar E con una curva que sigue la forma de la ecuación de Thornthwaite (ecuaciones 14 a 16) para el cálculo de la evaporación dentro del intervalo de 0°C a 100°C, y valores constantes por fuera de éste. De ese modo se obtiene:

$$E = \begin{matrix} 0 & T_s \leq 0^\circ C \\ \frac{EVP}{EVP_{\max}} & 0^\circ C \leq T_s \leq 100^\circ C \\ 1 & 100^\circ C \leq T_s \end{matrix} \quad (13)$$

con,

$$EVP = 1.6 \left(10 \frac{T}{I} \right)^a \quad (14)$$

$$I = 12 \left(\left(\frac{T_{anual}}{5} \right)^{1.514} \right) \quad (15)$$

$$a = (675 \cdot 10^{-9})I^3 - (771 \cdot 10^{-7})I^2 + (179 \cdot 10^{-4})I + 0.492 \quad (16)$$

Para calcular EVP se asume que $T = T_s$; EVP_{max} es la evaporación calculada para $T_s=100^\circ\text{C}$ y T_{anual} se definió como un parámetro del modelo igual a T_{opt} (295.5 K). En la figura 4 se presenta la función definida para E .

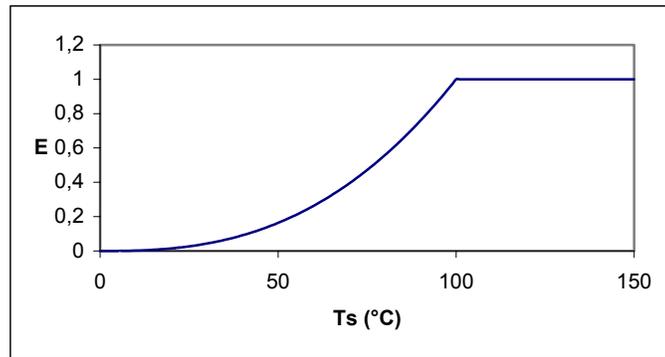


Figura 4. Curva asumida para la variación de E con la temperatura.

Con respecto a P , se ha explorado la posibilidad de definirla mediante funciones oscilatorias. Lo anterior se justifica en el comportamiento oscilatorio de las series hidrológicas de precipitación. No obstante, se prefiere dejar esta alternativa planteada para un futuro análisis y presentar sólo resultados donde no se hayan introducido ecuaciones de este tipo, de modo que las oscilaciones que se encuentran provengan de la respuesta propia del modelo y no de alguna señal oscilatoria introducida artificialmente. Luego, P se definió mediante una función de E y a_c así:

$$P = a_c E + 0.001 \quad (17)$$

En la ecuación anterior se ha considerado que la precipitación depende de la disponibilidad de vapor de agua que se genera mediante la evaporación, por eso está directamente relacionado con E , y de la cobertura de nubes existente en un momento dado. El término 0.001 es una constante definida arbitrariamente para representar que no siempre $P \leq E$.

El nuevo modelo se completa con las ecuaciones 2 a 6 del modelo original del Mundo de las Margaritas (cambiando A por A_s y T_e por T_s). Este modelo permite explorar diferentes resultados variando factores como A_c , z_c , ϵ_c y ϵ_s . En la siguiente sección se presentan los resultados del nuevo modelo considerando:

- ϵ_c [adimensional]= 0.6, ϵ_s [adimensional]=0.7 y z_c [m]=1000.
- Los valores de A_c son variables y se presentan en cada gráfica.

4. Resultados

Se presentan gráficos para diferentes valores del albedo de las nubes, ($A_c = 0.3 - 0.7 - 0.8 - 0.9$).

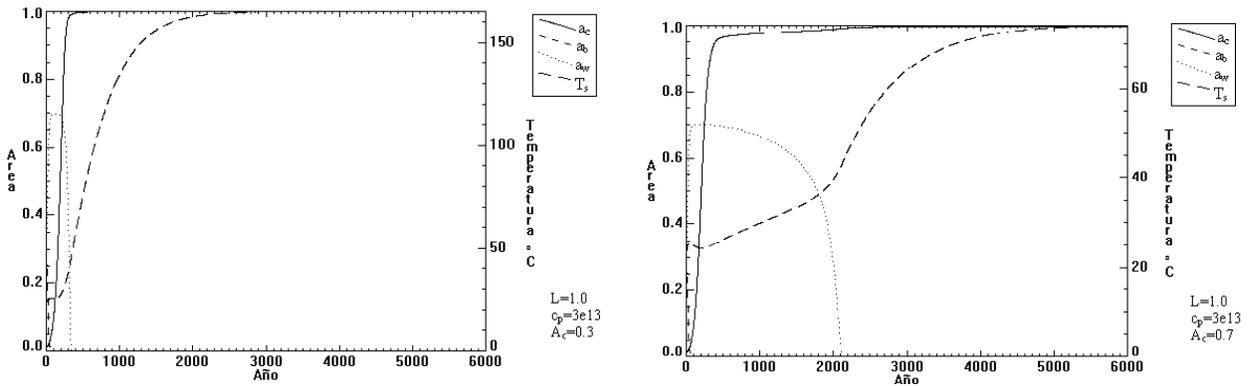


Figura 5. (izquierda) Resultados del nuevo modelo con $A_c=0.3$. Las margaritas desaparecen rápidamente, las nubes cubren todo el planeta y la temperatura se estabiliza en 115°C aproximadamente. (derecha) Con $A_c=0.7$. Las margaritas desaparecen, las nubes cubren todo el planeta y la temperatura se estabiliza en 75°C aproximadamente.

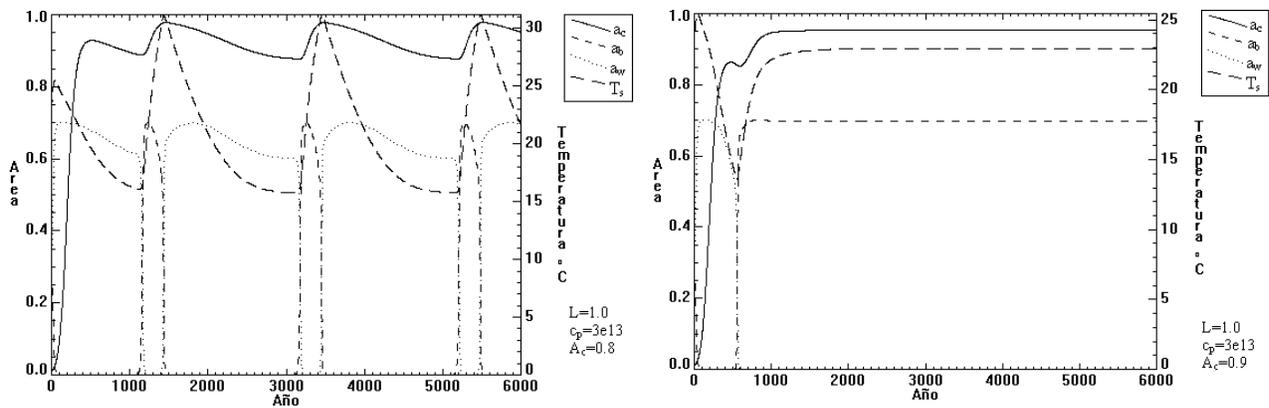


Figura 6. (izquierda) Con $A_c=0.8$. Las margaritas sobreviven, se producen oscilaciones estables de la cobertura de nubes, de la temperatura y de las áreas de margaritas. (derecha) Con $A_c=0.9$. Las margaritas blancas desaparecen y sobreviven las negras, la cobertura de nubes se estabiliza en aproximadamente 0.95, la temperatura se estabiliza cerca de 23°C .

En las figuras 5 y 6 se observa que variaciones en el albedo de las nubes provocan comportamientos muy diferentes del sistema climático modelado. En general, cuando A_c es pequeño el efecto invernadero es intenso y produce un calentamiento del planeta que imposibilita la supervivencia de las margaritas. Esto es más drástico mientras sea menor el albedo de las nubes, de ahí la diferencia entre las gráficas de la figura 5. En los dos casos de la figura 5 las margaritas blancas predominan al principio, lo cual se interpreta como un "intento" por enfriar el planeta. Cuando el albedo de las nubes es muy alto, como en el caso de la figura 6 (derecha), el efecto de las nubes sobre el clima es de enfriamiento pues la energía reflejada en las nubes supera la que llega a la superficie como consecuencia del efecto invernadero. En cambio, en la figura 6 (izquierda) se logra un estado de equilibrio donde ambas especies de margaritas y la cobertura de nubes se

mantienen en el tiempo. Esto se refleja por las oscilaciones estables de los valores de las áreas de nubes, margaritas negras y blancas. Tales oscilaciones están acopladas entre sí y con la temperatura. Sobre estos acoplamientos se destacan las siguientes observaciones:

- En los tramos donde la cobertura de nubes aumenta, la población de margaritas negras crece hasta cierto punto y luego se reduce hasta casi desaparecer. Esto sugiere que el efecto global de la nube es tanto de enfriamiento (vía el reflejo de radiación) como de calentamiento (vía el efecto invernadero), dependiendo del área que cubran.
- Cuando la cobertura de nubes es más alta crece la población de margaritas blancas y decrece la de margaritas negras. Esto se interpreta como un intento por contrarrestar el calentamiento provocado por el efecto invernadero. Con el predominio de las margaritas blancas la temperatura disminuye, por lo que hay menos evaporación y se reduce la cobertura de nubes. En consecuencia, el efecto invernadero se reduce y la temperatura del planeta disminuye por debajo del nivel favorable para las margaritas blancas, pero apto para el predominio de las margaritas negras. Se incrementa entonces la población de margaritas negras y la temperatura se eleva nuevamente. Esto produce mayor evaporación y por tanto la cobertura de nubes empieza a crecer hasta permitir nuevamente el crecimiento de la población de margaritas blancas. Se completa así un ciclo retroalimentativo donde interactúan las poblaciones de margaritas, la cobertura de nubes y la temperatura planetaria. La definición de estos acoplamientos es la principal bondad del nuevo modelo.
- Las margaritas blancas aparecen cuando la temperatura es máxima, al mismo tiempo que casi desaparecen las margaritas negras. Como consecuencia de esto la temperatura empieza a reducirse. Del mismo modo, la población de margaritas negras se incrementa súbitamente cuando la temperatura alcanza su mínimo valor, al mismo tiempo que se reduce al mínimo el área de margaritas blancas.

Comparando las gráficas de la figura 5 con la 6 (derecha) se observa que: en la primera el albedo de las nubes es menor y produce un calentamiento debido a la diferencia positiva entre la ROL recibida por el efecto invernadero y la ROC reflejada en las nubes. En cambio, cuando el albedo de las nubes es muy alto como en la figura 6 (derecha) tal diferencia es negativa y por lo tanto el efecto sobre el planeta es de enfriamiento. En el caso de la figura 5 se logra establecer un equilibrio cuando las nubes cubren todo el planeta y desaparecen las margaritas. A este respecto, en la figura 6 (derecha) se observa lo siguiente: al principio la temperatura se reduce rápidamente debido a la pérdida de energía reflejada en las nubes (porque el albedo es alto), como consecuencia de ello la población de margaritas negras aumenta provocando un calentamiento que favorece el efecto invernadero. Al final se equilibra la temperatura gracias a la compensación que se establece entre la cobertura de nubes y el área de margaritas negras, vía el efecto invernadero y el albedo global.

Se resalta el hecho de que las oscilaciones de temperatura estables a lo largo del tiempo sólo aparecen como resultado de las interacciones entre la biota y los elementos del medio ambiente físico. Este estado de equilibrio oscilatorio se rompe con la desaparición de alguna de las especies de margaritas, lo que conduce al final a la desaparición de la otra especie.

5. Discusión

Los resultados más importantes del nuevo modelo son: (1) bajo ciertas condiciones se producen oscilaciones estables de temperatura, poblaciones de margaritas y cobertura de nubes, acopladas entre sí, y (2) los cambios en un parámetro del modelo (el albedo de las nubes), conducen a estados diferentes de equilibrio de la temperatura planetaria donde puede o no darse la vida.

La interpretación de las oscilaciones acopladas que se presentan en la figura 6 (izquierda) puede apuntarse hacia la descripción del clima de la Tierra, del cual se reconoce un comportamiento a través del tiempo fundamentalmente oscilatorio. Tales oscilaciones del clima terrestre son el resultado de interacciones altamente no lineales entre muchos factores físicos, biológicos, químicos y antrópicos. Un modelo como el que se propone puede entonces servir para explorar los mecanismos que dan lugar a esas interacciones.

Las características más relevantes del nuevo modelo son: (1) es un modelo de base física, (2) es un modelo de balance de energía, por lo tanto su ecuación fundamental es la ecuación del balance radiativo (ecuación 10) sobre un volumen de control definido en la superficie de un planeta simplificado como el Mundo de las Margaritas, (3) acopla al balance de energía un cuasi-ciclo hidrológico donde se representan la evaporación y la precipitación mediante funciones definidas a partir de criterios físicos, y (4) introduce las nubes como un elemento fundamental en la dinámica climática, permitiendo considerar el efecto invernadero.

A diferencia de lo propuesto por Ghil y Childress (1987), el nuevo modelo permite considerar el efecto invernadero dentro de un proceso retroalimentativo donde la cobertura de nubes depende y a la vez condiciona la temperatura planetaria. Esta es una diferencia fundamental con respecto a la consideración de una cobertura de nubes constante como sugieren los autores mencionados.

El hecho de que la temperatura en la Tierra se haya mantenido relativamente constante durante un largo período de tiempo, sugiere que las interacciones que definen el clima terrestre son tales que permiten alcanzar un estado de equilibrio como el que se presenta simplificada en la figura 6 (izquierda). A este respecto, llama la atención el hecho de que en el modelo los cambios en un parámetro como el albedo de las nubes de lugar a cambios tan drásticos como la desaparición de la vida. En las condiciones de la Tierra tal parámetro es de hecho variable, porque depende de factores inherentes a la constitución de la atmósfera y en particular de las nubes, pero esta variabilidad no ha tenido consecuencias tan drásticas sobre la temperatura del planeta como en el caso del modelo. Esto sugiere la idea de que el clima terrestre es un resultado robusto, y en parte lo es porque son muchos los factores que lo condicionan. Esto último, a diferencia del modelo propuesto donde el clima está definido por sólo unas pocas variables. Es precisamente en este sentido que Nordstrom (2002) plantea que los modelos más simples pueden servir mejor para entender las retroalimentaciones entre un grupo menor de procesos relevantes en el estudio del clima.

6. Conclusiones

La principal bondad del modelo propuesto es permitir mediante conceptos físicos representar acoplamientos entre la biota, un cuasi ciclo hidrológico y el clima. Las ideas que en este sentido se presenta sirven como base para nuevos modelos de balance de energía con el ciclo hidrológico acoplado.

A la luz de una evaluación conceptual, es preferible la consideración del efecto invernadero mediante la dinámica de la cobertura de nubes y su interrelación con el balance radiativo, que usando el factor propuesto por Ghil y Childress (1987).

En el modelo, la influencia del crecimiento de la cobertura de nubes sobre la temperatura puede ser enfriamiento o calentamiento, dependiendo de la relación entre los balances de ROC y ROL que están afectados por el albedo y el efecto invernadero.

Las ideas aplicadas en la modelación, por ejemplo para la determinación de E y P , están sujetas a una mayor discusión; sin embargo, indican una dirección que se considera razonable para hacer modelaciones del clima donde se acoplen la biota, el balance de energía y el ciclo hidrológico.

7. Referencias

- Chow, V. T., *et al.* Hidrología Aplicada. McGraw-Hill, Bogotá, Colombia, 1994. 584p.
- Ghil, M. y Childress, S. Topics in Geophysical Fluid Dynamics: Atmospheric Dynamics, Dynamo Theory, and Climate Dynamics. Springer-Verlag, New York, 1987, 485p.
- Gupta, V. *et al.* A framework for reassessment of basic research and educational priorities in hydrologic sciences. En Internet: <http://cires.colorado.edu/hydrology/40.html>. National Science Foundation, USA, 2000, 29p.
- Hartman, D. L. Global physical climatology. Academic Press, San Diego, 1994. 411p.
- Lovelock, J. Las edades de Gaia: una biografía de nuestro planeta vivo. Tusquets editores, Barcelona, España, 1988. 266p.
- Lovelock, J. The living Earth. Nature, Vol. 426, 18/25, 2003, 769-770.
- Nevison, C., Gupta, V. y Klinger, L. Self-sustained temperature oscillations on Daisyworld. Tellus, 51B, 1999, 806-814.
- Nordstrom, K. Simple Nonlinear Models for Use in Hydroclimatology. Doctoral Dissertation, University of Colorado, 2002, 107p.