

Comprobación de la estabilidad del estado atmosférico mediante la obtención de su diagrama fase

Jorge Castro López¹*, Bárbara Zavala Trujillo¹ & Laura Fabiola Vital Martínez¹

Resumen

Al estudiar el sistema climático desde la perspectiva de los sistemas dinámicos se busca entender cómo evoluciona este proceso en el tiempo. En el presente trabajo se analizan las series de tiempo y el retrato fase del sistema formado por el tiempo y el campo de la temperatura global media atmosférica, encontrando que las soluciones de equilibrio son del tipo Liapunov-estable, lo que nos dice que se trata de un sistema altamente estable.

Palabras clave: Equilibrio, estabilidad, sistemas dinámicos, variabilidad climática, temperatura.

Recibido: 23 de marzo de 2018

Abstract

To study the climate system from the perspective of dynamic systems, we must understand the evolution of this process over time. In this paper we analyze the time series and phase diagram of the system formed by time and the by the field of global mean atmospheric temperature, finding that the equilibrium solutions are of the Lyapunov-stable type, which tells us that it is a highly stable system.

Key words: Equilibrium, stability, dynamic systems, climatic variability, temperature.

Aceptado: 13 de junio de 2018

Introducción

Antes de hacer una definición del clima, empezaremos por decir que el estado de la atmósfera está compuesto de diferentes variables, entre las que se encuentran: la humedad, la temperatura, la presión, el viento, la precipitación y la nubosidad. Ahora, si se nos da una región geográfica definida y un promedio temporal del estado de la atmósfera, ya sea anual, mensual, diario, etc.; entonces podremos definir el clima de esa región. Para esto debemos tomar un número mínimo de muestras o de mediciones con el objeto de que los datos tengan una validez estadística (Trenbert

1991). Por ejemplo, el clima de Puerto Ángel, Oaxaca durante el verano será el promedio de las mediciones tomadas del estado de la atmósfera durante muchos años en dicha estación.

Por otro lado, tenemos también el sistema climático el cual está formado por cinco grupos que interactúan fuertemente entre sí, estos grupos son: 1) la atmósfera, 2) el océano, 3) la superficie de la Tierra, 4) glaciares (tanto en tierra como en océano) y 5) la biósfera (terrestre y marina) (Trenbert 1991).

De lo anterior podemos inferir entonces que el cambio climático estará dado cuando

¹ Instituto de Recursos, Universidad del Mar campus Puerto Ángel. Ciudad Universitaria, Puerto Ángel 70902, Pochutla, Oaxaca, México.

* Autor de correspondencia: catrol@angel.umar.mx (JCL)

haya una variación estadísticamente significativa en el promedio temporal de alguna de las variables que definen al clima y cuando el sistema climático interactúe en diferentes proporciones a las que se han observado en los últimos milenios (Trenbert 1991). En la actualidad por las mediciones que se reportan frecuentemente no podemos hablar todavía de un cambio en el estado de la atmósfera, y además, el sistema climático no interactúa de manera diferente a como lo ha hecho en los últimos siglos. Debido a ello no podemos hablar aún de que estemos pasando un cambio en el estado de la atmósfera.

A la representación matemática de un proceso que evoluciona con el tiempo y del cual se conoce la ley de su comportamiento y sus condiciones iniciales se le conoce como sistema dinámico, esto es, se considera una situación o un sistema que dependa del parámetro tiempo y cuya ley de comportamiento ya esté establecida. La representación geométrica de un sistema dinámico es la visualización de su comportamiento, la cual se consigue mediante gráficas de series de tiempo y, graficando además, la evolución de la velocidad de algún parámetro en particular con respecto a él mismo. Por ejemplo, si graficamos la presión sanguínea cardiaca en función del tiempo, obtendremos una curva de presión que al final se visualiza como una serie de tiempo.

Una manera más completa de ver la evolución de la presión sanguínea es graficar la rapidez con la que cambia la presión contra la presión misma, a esta gráfica se le conoce como retrato fase, diagrama fase o espacio fase (Arrowsmith & Place 1994, Valdés *et al.* 2009).

El espacio fase retratará las posiciones generalizadas de las variables junto con sus momentos correspondientes, por lo que todos los posibles estados del sistema serán representados. Los retratos fase entonces nos ayudarán a visualizar la evolución de los procesos en la naturaleza (Arrowsmith & Place 1994, Valdés *et al.* 2009). La evolución, por lo tanto, estará determinada por el tipo de soluciones que presenta el sistema estudiado.

Un sistema dinámico está dado por una

variable X , el parámetro temporal T y una regla de evolución F , tal que $F: X \times T \rightarrow X$, donde la representación de un sistema dinámico está dada por $\dot{X} = F(X)$ y cuyas soluciones visualizadas desde la perspectiva de un retrato fase nos indicarán si el sistema tiende a un equilibrio estable, a uno inestable o si todo el sistema tiende a caos.

Algunos de los tipos de comportamientos que se pueden presentar son:

- a) Estable - Sucede cuando toda trayectoria que comienza cerca de ella se aproxima a ella mientras el tiempo transcurre.
- b) Inestable - Sucede cuando toda trayectoria que comienza cerca de ella diverge conforme pasa el tiempo.
- c) Liapunov-estable - Está dada cuando todas las trayectorias que están suficientemente cercanas a ella se mantienen cercanas a ésta durante todo el tiempo.
- d) Caótico - El sistema presenta una alta sensibilidad a las condiciones iniciales, el comportamiento es aperiódico.

La temperatura global es un diagnóstico que involucra promedios de temperaturas locales, radiación solar absorbida y radiación solar reflejada. Es una herramienta útil como punto de referencia para obtener la temperatura anómala; asimismo, es un promedio total de la temperatura de la atmósfera de la Tierra calculada mediante flujos de calor y promedio locales.

En este trabajo se analizó la temperatura global media de la Tierra tomando un intervalo de 130 años, iniciando desde el año 1880 hasta el 2010; se tomó la temperatura de los meses más representativos en cuanto a esta variable, es decir, se analizaron los meses de enero, abril, julio y octubre de todo este lapso (1880-2010). Se obtuvo la serie de tiempo de la temperatura graficando el tiempo contra la temperatura, después se elaboró el diagrama fase derivando numéricamente la temperatura con respecto al tiempo y graficando éste contra la temperatura. En el caso de la derivada numérica se utilizó una interpolación polinomial para suavizar las curvas. A fin

de derivar numéricamente se empleó la fórmula de diferencias centrales, programada en lenguaje m mediante el uso de matlab, al igual que las gráficas y el procesamiento de datos. Las series de tiempo de la temperatura global media de la atmósfera terrestre se obtuvieron de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA 2018).

Los resultados encontrados (Figura 1a), para el mes de enero, muestran una serie de tiempo con una tendencia al alza para los últimos treinta años, mientras que su correspondiente retrato fase (Figura 1b) muestra un equilibrio del tipo Liapunov-estable.

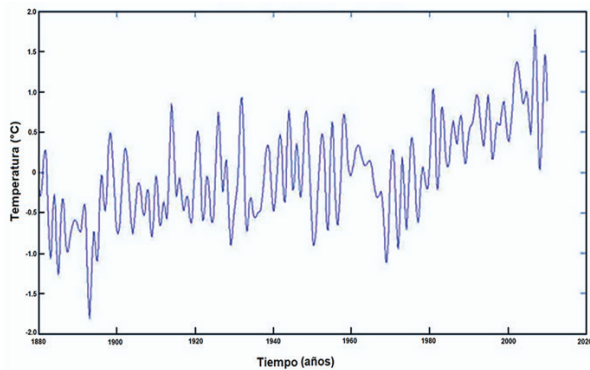


Figura 1a. Serie de tiempo de temperatura (°C) del mes de enero.

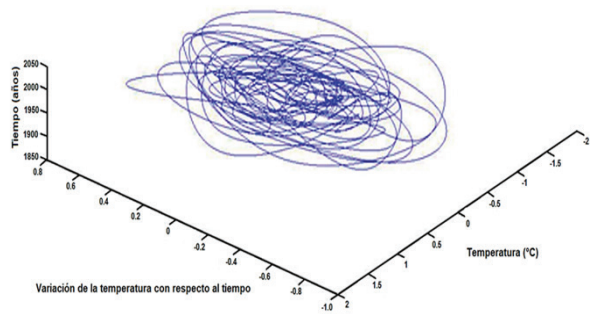


Figura 1b. Retrato fase de la temperatura para el mes de enero.

De manera similar los meses de abril, julio y octubre (Figuras 2a, 2b, 3a, 3b, 4a y 4b) muestran en los últimos treinta años una tendencia al alza en la temperatura y un equilibrio Liapunov-estable en el retrato fase.

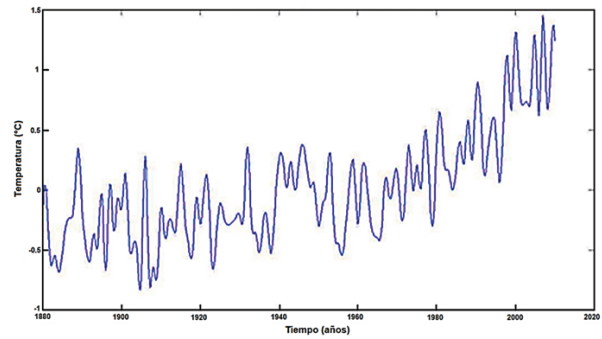


Figura 2a. Serie de tiempo de temperatura (°C) del mes de abril.

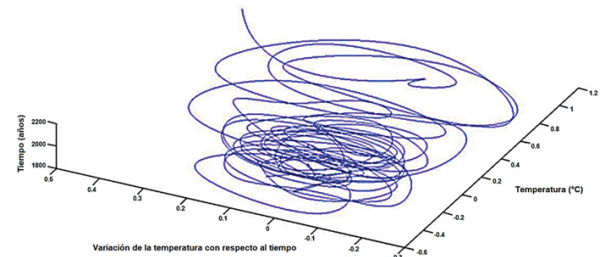


Figura 2b. Retrato fase de la temperatura para el mes de abril.

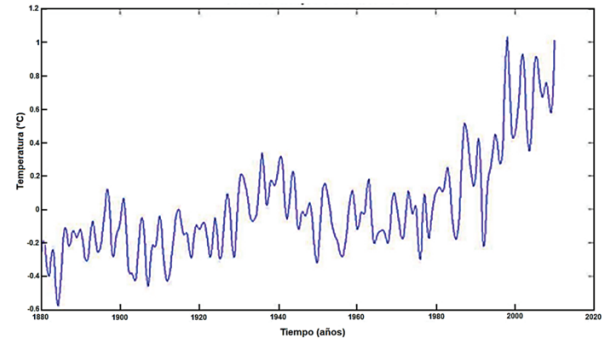


Figura 3a. Serie de tiempo de temperatura (°C) del mes de julio.

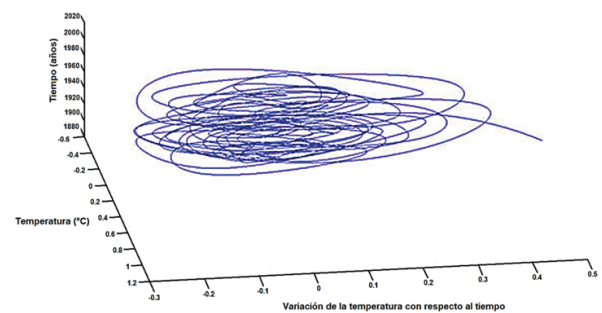


Figura 3b. Retrato fase de la temperatura para el mes de julio.

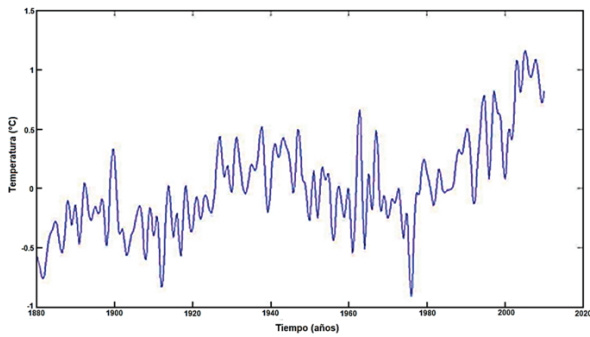


Figura 4a. Serie de tiempo de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) del mes de octubre.

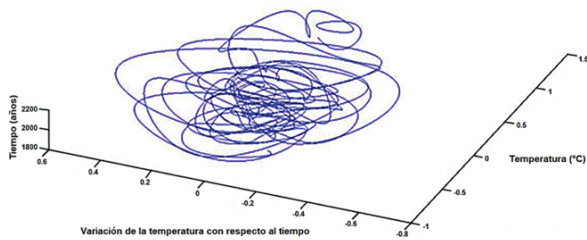


Figura 4b. Retrato fase de la temperatura para el mes de octubre.

Las órbitas que nos muestran los retratos fase del sistema formado por el tiempo y la temperatura son del tipo Liapunov-estable, es decir, que todas las trayectorias están alrededor de un punto, que en este caso es el valor medio de todas las temperaturas, lo que nos dice que el sistema climático es un sistema altamente estable, aunque como se puede ver en las series de tiempo la pendiente es más pronunciada a partir de 1980; sin embargo, no lo suficiente como para sacar al sistema de equilibrio. Por otro lado, está la interacción de la temperatura atmosférica con otros grupos del sistema climático como son: la biosfera, los glaciares y el océano; entre otros, los cuales podrían ser sistemas más vulnerables a las condiciones iniciales y cuyas soluciones muestren una naturaleza divergente lo cual implicaría una alteración significativa en el comportamiento del sistema climático. El estudio del sistema climático es hasta ahora por métodos estadísticos ya que tratar de establecer un modelo determinista es casi imposible por la cantidad de variables que se tienen, el modo de interactuar entre ellas y los datos que habría que capturar, además

de su procesamiento. El presente trabajo es un primer intento para la visualización sobre la variable temperatura desde el análisis de su retrato fase, el cual nos muestra la tendencia de su evolución, en otras palabras, si se va hacia un punto fuera de equilibrio o si permanece en equilibrio. Como era de esperarse este trabajo confirma que la temperatura global debe ser un sistema muy fuerte para poderlo sacar del equilibrio; sin embargo, las preguntas que surgen inmediatamente son ¿Cómo es la evolución de las demás variables? ¿Son más susceptibles los glaciares, la biósfera marina, etc.? En este caso los datos para procesar ya no son ni tan abundantes, ni tan simples de interpretar porque dada la interconexión de todas estas variables el problema se vuelve altamente no-lineal.

Las diferentes series de tiempo aquí mostradas revelan una tendencia al aumento en la temperatura global media; sin embargo, los retratos fase del sistema formado por el tiempo y la temperatura muestran que se trata de un sistema en equilibrio altamente estable.

Agradecimientos

A la Universidad del Mar por las facilidades para la ejecución del presente trabajo. A Dereck Joe Brockett y Alison Tai Rosewicks por la revisión a la versión en inglés del presente documento, así como a dos árbitros anónimos que contribuyeron a realizar mejoras a la versión final del trabajo.

Referencias

- Arrowsmith, D. K. & C. M. Place. 1994. Structural stability, hyperbolicity and homoclinic points. Pp. 119-154 In: Arrowsmith, D. K. & C. M. Place (Eds), An Introduction to Dynamical System. Third Edition. Cambridge University Press.
- NOAA. 2018. Historical Climate data. Consultado el 17 de febrero de 2017. Disponible en: http://www.nws.noaa.gov/om/csd/pds/PCU2/statistics/Stats/part1/NCDCdata_source.htm
- Trenbert. E. K. 1991. Climate System Modelling. First Edition. Cambridge University Press.
- Valdés, J. G., J. Castro & T. Córdova. 2009. Bio-Ingeniería Computacional en el Estudio de la Hemodinámica y su Interacción con las Arterias. Acta Universitaria. 19(2): 111-119