

La teoría astronómica del cambio climático

ANTONIO HERNÁNDEZ NAVARRO

Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

Si bien no se puede descartar que la presencia del hombre haya acelerado los cambios climáticos por el incremento de las emisiones de bióxido de carbono a la atmósfera y su conocido efecto invernadero, por la contaminación en general del medio ambiente, la tala indiscriminada de los bosques, o por la depredación de especies, sin embargo, se habla poco sobre el efecto de las fuerzas orbitales dentro de todo este contexto y cómo los cambios orbitales afectan al clima, tal como lo explica la teoría de Milankovitch.

Milutin Milankovitch fue un astrofísico que nació en 1879 en Dalj, cerca de Osjek, en la actual Croacia, y murió en 1958. Fue uno de los primeros en desarrollar teorías relativas al movimiento de la Tierra y su influencia a largo plazo en los cambios climáticos. Trabajó durante 30 años en la Universidad de Belgrado en el área de Matemática Aplicada, desarrollando la teoría matemática del clima terrestre (1920), la teoría de los cambios climáticos (1930 y 1938) y la teoría de los polos terrestres divagantes.

Milutin Milankovitch no fue el primero en relacionar los ciclos orbitales con los cambios climáticos. Se sabe que el matemático francés Joseph Alphonse Adhemar (1797-1862), fue el primero en sugerir que las eras glaciales están controladas por fuerzas astronómicas en su libro *Revolutions of the Sea* publicado en 1842; o James Croll (1821-90), científico escocés quien desarrolló una teoría del cambio climático basado en los movimientos orbitales de la Tierra, publicada en 1875 en su libro *Climate and Time, in Their Geological Relations*.

La obra cumbre de Milankovitch, *Kanon der Erdbe-strahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitproblem*, de 1911, fue un trabajo interdisciplinario que

conjuntó elementos matemáticos, astronómicos, geofísicos y geológicos. Con métodos astronómicos, Milankovitch resolvió el problema de las perturbaciones seculares en los movimientos terrestres; con métodos geofísicos solucionó la ley de insolación terrestre; mientras que con métodos geológicos estudió la sucesión y la historia del periodo de glaciación cuaternal.

A través de su teoría Milankovitch explica los cambios climáticos en nuestro planeta en función de cómo varía la posición de la Tierra en el universo, planteando que estas variaciones están directamente relacionadas con los cambios de la órbita de la Tierra alrededor del Sol. La teoría de Milankovitch se basa en que la Tierra gira alrededor del Sol y que estos movimientos del planeta tienen variaciones en:

Excentricidad de la órbita alrededor del Sol. Recordemos que la trayectoria definida por nuestro planeta alrededor del Sol corresponde a una elipse. Si la órbita es más elíptica, la excentricidad es mayor, reflejándose los cambios de la excentricidad directamente en la variación de la distancia que separa a la Tierra del Sol.

Oblicuidad. Esto es, el ángulo que forma el eje de rotación de la Tierra con respecto a su órbita alrededor del Sol. La variación en la oblicuidad tiene su efecto máximo en los polos.

Precesión equinoccial. El cambio de dirección del eje de rotación de la Tierra tiene dos componentes, la precesión axial y la precesión elíptica. La primera ocurre debido al torque del Sol y los planetas en el área ecuatorial causando la rotación del eje. La precesión elíptica es la que se produce cuando la órbita rota alrededor del Sol. La combinación de las dos componentes es la que da lugar a la precesión equinoccial.



Milankovitch calculó estos cambios en los parámetros orbitales de la Tierra a través de medidas de la posición de las estrellas, considerando ecuaciones que toman en cuenta la fuerza gravitacional de planetas y estrellas. Determinó por ejemplo, que el eje de rotación terrestre se desplaza entre 22.1 y 24.5 grados en un ciclo de 41 mil años. Estas variaciones en la inclinación del eje de rotación terrestre, causan las estaciones y su intensidad, por lo que los cambios en la inclinación del eje de rotación de la Tierra pueden hacer más o menos severas las estaciones.

Por otro lado, la posición de los solsticios se pueden acentuar o modificar por la excentricidad de la órbita que tiene la Tierra alrededor del Sol y el efecto de precesión.

Estas variaciones orbitales en la excentricidad de la órbita afectan la distancia entre la Tierra y el Sol; normalmente la diferencia es de 3.4%, una variación cercana a los 5.1 millones de kilómetros entre el lugar más próximo llamado *perihelio*, el cual ocurre cerca del 3 de enero, y la parte más alejada de la órbita, que se produce aproximadamente el 4 de julio, denominada *afelio*. El perihelio es conocido como la precesión de los equinoccios y tiene un periodo de 22 mil años. La excentricidad de la órbita de la Tierra varía en ciclos de 100 mil a 400 mil años y su efecto se ve reflejado directamente en las estaciones.

La variación en la distancia entre el Sol y la Tierra hace que se produzca cerca de un 6.8% de incremento en la radiación solar (insolación) de julio a enero. La forma de la órbita terrestre cambia de ser elíptica, alta excentricidad, a estar muy cercana a la forma circular, baja excentricidad, en un ciclo que toma entre 90 mil a 100 mil años. Cuando la órbita es altamente elíptica la cantidad de insolación recibida en el perihelio puede llegar a ser de 20 a 30% mayor que durante el afelio. Esto hace que ocurran cambios sustanciales que lleven a marcados cambios climáticos.

Este conjunto de movimientos orbitales llevan el nombre de ciclos de Milankovitch.

Utilizando tres variaciones orbitales, Milankovitch formuló un modelo matemático que calcula diferencias latitudinales en la insolación y el correspondiente cambio de temperatura superficial

para 600 mil años, correlacionando estos cambios con la retirada de los hielos. Luego de esto, asumí que los cambios de radiación en algunas latitudes y estaciones son más importantes para el crecimiento y decaimiento de la cantidad de hielo.

La combinación de los 41 mil años del ciclo de inclinación de la Tierra sobre su propio eje y los 22 mil del ciclo de precesión provoca que los inviernos y los veranos sean más o menos severos, e influye directamente sobre las capas de hielo al incrementarlas o derretirlas.

Por más de 50 años, la teoría de Milankovitch fue ignorada. Un estudio que data de 1976 en la revista *Science* examinó sedimentos de aguas profundas y encontró que aplicando esta teoría se podían reflejar los cambios climáticos ocurridos (Hays *et al.*, 1976). En este trabajo los autores estuvieron en capacidad de extraer el registro de cambios de temperaturas hasta 450 mil años, encontrando las mayores variaciones de clima asociadas con cambios en la geometría (excentricidad, oblicuidad y precesión) de la órbita terrestre.

Los cambios orbitales ocurren en miles de años y el sistema climático puede tomar el mismo tiempo en responder a los cambios inducidos por las fuerzas orbitales. La teoría sugiere que el conductor de la edad de hielo es la radiación total recibida en las zonas de latitud norte donde las mayores capas de hielo han sido formadas en el pasado, cerca de 65 grados de latitud norte.

Actualmente las teorías de las glaciaciones se basan en los ciclos de Milankovitch. Hace medio millón de años, fue un periodo en donde el hielo cubrió la mayor parte de Canadá, el norte de Europa y el norte de Asia. Este periodo estuvo separado por otros en donde la capa de hielo estuvo confinada a las altas latitudes, tal como lo tenemos hoy. Estas masivas cubiertas de hielo se desplazaron kilómetros, arrastrando con ellas grandes cantidades de terrenos y rocas a una gran distancia de su posición original. La evidencia se fundamenta en los registros geológicos y afloramientos encontrados al norte en latitudes medias. El problema para los científicos que estudian estos fenómenos es el encontrar la razón que los causa y la teoría de Milankovitch explica perfectamente lo que se ha denominado teoría astronó-

mica de la glaciación. Esta teoría fue sugerida por primera vez por el matemático francés Joseph Adhemar en 1842. Él propuso que existen perturbaciones cíclicas en la Tierra, causadas por la posición de la Tierra con respecto al Sol, y que están directamente asociadas a glaciaciones y desglaciaciones. En su momento, esta propuesta no tuvo acogida, pero luego, el geólogo escocés James Croll retomó la idea, pero quien le dio total impulso e hizo de ella una teoría fue Milutin Milankovitch.

Fue en 1976 cuando esta teoría fue aceptada ampliamente y se demostró que las fluctuaciones en el volumen de las grandes masas de hielo de la Tierra están directamente relacionadas con la frecuencia de las perturbaciones orbitales.

Todos estos cambios en temperatura y las fluctuaciones de las grandes masas de hielo quedan registradas geológicamente y es este punto en el que Croll basa su reconstrucción. Se ha demostrado que existe una correlación entre los ciclos glaciares y los cambios de temperaturas y las teorías expuestas por Milankovitch, sobre todo en frecuencia y tiempo. Los modelos paleoclimáticos intentan explicar las relaciones entre las fuerzas astronómicas calculadas y los cambios paleoclimáticos.

Para Van Vugt *et al.*, los ciclos de Milankovitch y la manera como afectan el clima se ven expresados en el registro sedimentario como ciclos litológicos que pueden tener uno o más de cuatro periodos típicos relacionados con la precesión (21 mil años), la oblicuidad (41 mil) y la excentricidad (de 100 mil a 400 mil años). En numerosas sucesiones continentales del Mediterráneo que han sido estudiadas se presentan diferencias en las expresiones de precesión y excentricidad. Los autores presentaron los resultados del estudio de una sección lacustre del Plioceno tardío en Lupoaia, al sureste de Rumania. Cuando se compara la expresión cíclica del lignito y los detritos en la cuenca, con el equivalente en tiempo de lignito y carbonatos de la cuenca de Ptolemais al norte de Grecia, la cuenca de detritos y lignitos del Pleistoceno de la cuenca de Megalópolis, al sur de Grecia, y la cuenca de carbonatos y arcillas de Orera, al norte de España, se encuentra que: 1) en las cuencas con carbonatos predomina la precesión, y

2) en las cuencas detríticas predomina la expresión de excentricidad en sus ciclos litológicos.

Esto podría ser explicado por una respuesta más lineal a las fuerzas de insolución en los carbonatos que en los detritos. Otra explicación podría ser la baja amplitud de 100 mil años de excentricidad en el tiempo en que las secciones carbonáticas fueron depositadas.

Actualmente, para muchos científicos no están bien entendidos los mecanismos con los cuales la excentricidad de la órbita de la Tierra puede afectar el clima de una manera directa e importante. Evidencia reciente, publicada en el año 2000, indica que el dióxido de carbono atmosférico podría jugar un papel principal en amplificar los efectos orbitales. Muchos investigadores aún tienen dudas sobre la asociación entre el ciclo de clima de 100 mil años y las variaciones orbitales.

¿Será que el cambio climático es algo que se da en forma independiente al ser humano? ¿Es un efecto combinado de acciones antrópicas y la naturaleza? ¿O es algo que sólo debemos al hombre? La respuesta podría darse en los próximos años, pero debemos seguir cuidando nuestro planeta.



- Berger, A., 1988, "Milankovitch theory and climate", *Reviews of Geophysics*, vol. 26, pp. 624-657.
- Broecker, W. S. & Denton, G. H., 1990, "What drives glacial cycles?", *Scientific American*, enero, pp. 43-50
- Hays, J. D.; Imbrie, J. & Shackleton, N. J., 1976, "Variations in the earth's orbit: pacemaker of the ice ages", *Science*, 194, núm. 4270, pp. 1121-1132.
- Herbert, T. D. & Fischer, A. G., 1986, "Milankovitch climatic origin of mid-Cretaceous black shale rhythms in central Italy", *Nature*, vol. 321, pp. 739-743.
- Imbrie, J., 1992, "A good year for Milankovitch", *Paleoceanography*, vol. 7, pp. 687-690.
- Van Vugt, N.; Langereis, C.G. & Hilgen, F.J., 2001, "Orbital forcing in Pliocene-Pleistocene Mediterranean lacustrine deposits: dominant expression of eccentricity versus precession. Palaeogeography, Palaeoecology", vol. 172, núms. 3-4, pp. 193-205.