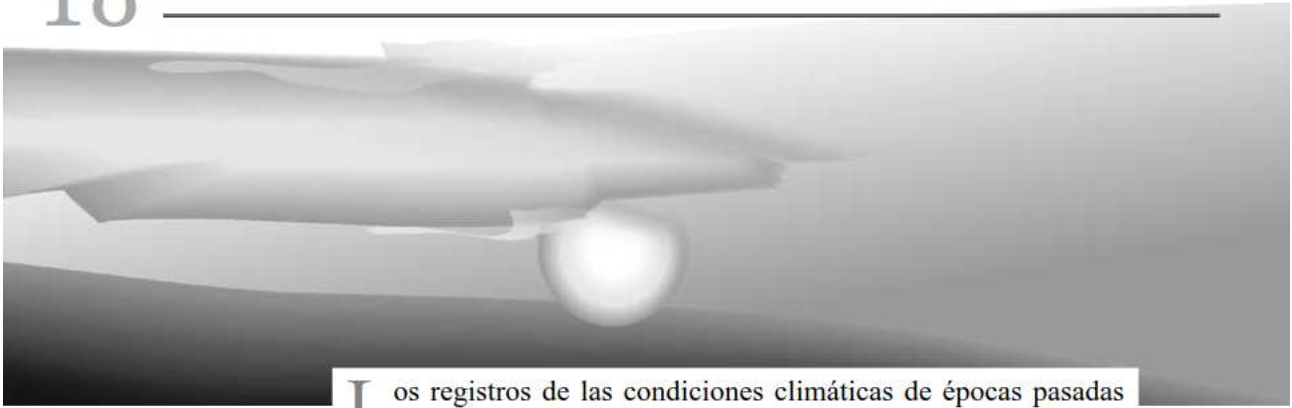


18 El cambio climático



Los registros de las condiciones climáticas de épocas pasadas demuestran que el clima de la tierra está en constante cambio. La variabilidad climática, incluyendo la variación en la frecuencia de los eventos extremos (por ejemplo, las sequías, las inundaciones y las tormentas), siempre ha tenido grandes impactos en las actividades humanas. Por esta razón, los científicos estudian las condiciones climáticas del pasado en diversas escalas de tiempo para hallar indicios que ayuden a la sociedad a planificar con relación a los futuros cambios climáticos.

El cambio climático se refiere a la variación observada en las condiciones del clima durante largos períodos, por modificaciones en la radiación solar, en la excentricidad o en la inclinación de la Tierra o por movimientos de la corteza terrestre (Pabón *et al.* 1998).

La variabilidad climática se refiere a las fluctuaciones observadas en el clima durante períodos relativamente cortos. Ésta incluye los extremos y las diferencias de valores mensuales y anuales con

respecto a los valores climáticos esperados; por ejemplo, las erupciones volcánicas y los eventos El Niño-La Niña (Pabón *et al.*, 1998).

La paleoclimatología estudia los climas del pasado, para lo cual utiliza diferentes fuentes de información (ACCEFYN-ICSU, 1994):

- Publicaciones sobre observaciones meteorológicas, narraciones de viajes.
- Paisajes en pinturas de algunos artistas.
- Estudio de los anillos de los árboles que proporcionan datos anuales y estacionales de la temperatura y la lluvia durante los últimos 10.000 años, ya que estos elementos influyen en el crecimiento de los árboles; factores adversos como las sequías o el frío tienen un efecto en el crecimiento.
- Los arrecifes de coral proporcionan un registro de las condiciones climáticas y marinas. Por medio del análisis de isótopos del oxígeno, del carbono y del cadmio se analizan los flujos de nutrimentos por las corrientes marinas y las condiciones de temperatura del océano o cambios en la salinidad y nivel del océano.
- Estudios de los casquetes polares o de los hielos de los glaciares analizando los contenidos de polvo y gases atrapados que registran las condiciones de vientos, temperatura y precipitación del pasado.
- Estudios en los depósitos de sedimentos terrestres proporcionan registros de erosión eólica, tipos de vegetación y circulación atmosférica.
- Estudio de depósitos de sedimentos marinos, con los cuales se pueden estimar las circulaciones marinas, la temperatura media de la superficie del mar y los volúmenes de hielo: la edad de los sedimentos se puede conocer con la ayuda del carbono (C^{14}) e isótopos de descomposición del uranio.
- Análisis de polen para conocer los cambios de vegetación a través del tiempo como respuesta a cambios climáticos regionales o globales originados por las edades de hielo o cambios provocados por el hombre.

Causas del cambio climático

(Manchester Metropolitan University, 2005; Pidwirny, 2004)

El cambio climático es complejo y caótico, y se debe a múltiples factores que están en permanente interacción: factores de forzamientos externos debidos a la posición de la Tierra respecto del sol (excentricidad, oblicuidad y precesión) y actividad de las manchas solares), y a factores de forzamientos internos como son la formación de los continentes y montañas, el volcanismo, las corrientes oceánicas superficiales y profundas, la proporción de las masas de hielo y la dinámica y composición de la atmósfera.

Mecanismos de forzamiento externo

▪ *Variaciones galácticas*

La órbita del sistema solar con relación al centro de la galaxia se ha considerado como posible mecanismo de forzamiento global; Fischer, 1984, citado en el estudio de cambio climático global (Manchester Metropolitan University, 2005) sugiere que los superciclos de las edades de hielo de 700 millones de años sean el resultado de tales mecanismos.

▪ *Variaciones orbitales*

El astrónomo M. Milankovitch, en la década de 1920-30, calculó las variaciones de insolación en la Tierra resultantes de cambios en los movimientos de translación y de rotación de la Tierra y propuso un mecanismo astronómico para explicar los ciclos glaciales que constaban de tres factores: la excentricidad de la órbita de la Tierra alrededor del sol, la oblicuidad o la inclinación del eje de rotación terrestre, y la precesión o variación en el giro del eje terrestre.

La excentricidad de la órbita terrestre varía desde el 0,5%, correspondiente a una órbita prácticamente circular, al 6% en su máxima elongación. La forma de la órbita terrestre también afecta a las variaciones estacionales con menor intensidad. La órbita se alarga y se acorta en períodos de aproximadamente 100.000 años. Cuando la elipse alcanza su excentricidad máxima se intensifican las estaciones en un hemisferio y se moderan en el otro. Se considera que la variación de la excentricidad de la órbita terrestre ejerce un efecto mucho más débil sobre la intensidad de radiación solar porque su contribución directa al cambio de irradiación sobre la Tierra es menor que el 0,1%. Sin embargo, la frecuencia de las últimas glaciaciones es cercana a los 100.000 años.

La oblicuidad o inclinación del eje de rotación terrestre fluctúa desde los 21,5° hasta los 24,5° en períodos de 41.000 años. Al aumentar la inclinación resultan más extremas las estaciones en ambos hemisferios.

La precesión del eje de rotación de la Tierra describe una circunferencia completa cada 25.790 años. La precesión produce una intensificación de las estaciones cuando la máxima inclinación del eje terrestre coincide con la máxima distancia al Sol. Apoyándose en esta teoría, V. Koeppen, sugería que lo que conduce a una glaciación no es una sucesión de inviernos rigurosos sino la reducción de la insolación en verano, que dificultaría la fusión de los hielos formados en el invierno.

▪ *Variaciones solares*

La variabilidad solar ha sido considerada otro factor de forzamiento externo. El ciclo más conocido es la variación en el número de manchas solares con un período de 11 años. El ciclo de las manchas solares está relacionado con las variaciones en el magnetismo solar y a un doble ciclo de 22 años. En los años con un alto número de manchas solares la constante de radiación solar aumenta. Aunque la variación en la constante solar es muy baja, muchos estudios demuestran relaciones entre el número de manchas solares con las sequías, la temperatura y el ozono atmosférico. Análisis recientes muestran un ciclo solar de 2.400 años, uno de 200 años, otro de 80 a 90 años y unos ciclos más cortos de 11 y 22 años relacionados con avances y retrocesos de los glaciares y variaciones en la temperatura. Como un ejemplo se tiene que en el período de 1645 a 1715 (Mínimo de Maunder) se

presentó un clima excepcionalmente frío en Europa y Norteamérica conocido como la Pequeña Edad de Hielo, que estuvo asociado a una actividad mínima de las manchas solares.

Mecanismos de forzamiento interno

▪ *La formación de los continentes –Epirogénesis-*

La epirogénesis estudia los cambios en la disposición global de las masas continentales de la tierra. Hace 250 millones de años la Tierra tenía un único continente (Pangea) y mediante su movimiento (deriva continental) se llegó a la distribución actual, con lo cual de manera permanente se han modificado las proporciones de masas continentales y de masas de hielo con cambios en las circulaciones oceánicas y con ellas, los intercambios energéticos.

▪ *La formación de las montañas –Orogénesis-*

La orogénesis se refiere a los procesos de la formación de las montañas y los continentes. Tales mecanismos operan entre 10 y 1.000 millones de años. No hay duda que las montañas influyen en el clima terrestre, las montañas orientadas de Norte a Sur tienen un efecto marcado en la circulación general de la atmósfera la cual presenta una componente marcada Este - Oeste como resultado de las fuerzas de Coriolis. Algunos estudios sugieren que el elevamiento del Himalaya ha inducido el enfriamiento global durante los últimos cuarenta millones de años. La formación de montañas aumenta el área cubierta con nieve y modifican el albedo, reduciendo la radiación solar absorbida por la Tierra

▪ *La actividad volcánica*

Los volcanes inyectan grandes cantidades de polvo y gases (especialmente dióxido de azufre) a la atmósfera superior. Las emisiones volcánicas afectan sustancialmente la radiación solar incidente afectando el balance de energía en la troposfera y en la estratosfera. Un ejemplo se tiene con la erupción del volcán Pinatubo en Filipinas en 1991 la cual originó un enfriamiento durante dos años (1992 y 1993) en la superficie terrestre hasta de 0,4°C y un calentamiento en la estratosfera hasta de 1,2°C.

▪ *La circulación oceánica*

Los océanos almacenan una gran cantidad de calor y en consecuencia tienen un papel crucial en la regulación del sistema climático de la Tierra. Las circulaciones oceánicas superficiales (corrientes marinas) y profundas (circulación termohalina) permiten el intercambio de calor entre la región tropical y las regiones polares. Algunos estudios sugieren que en las épocas de glaciación la circulación termohalina se reduce o se frena. La ausencia de la Corriente del Golfo podría originar un enfriamiento entre 6° y 8°C en Europa durante una época interglacial como la actual.

▪ *La variación en la composición atmosférica*

Los cambios en la composición atmosférica, incluyendo el contenido de gases de invernadero y aerosoles, son otro mecanismo de forzamiento interno del cambio climático.

Se define Efecto Invernadero como un proceso natural que se produce en la atmósfera, específicamente en la troposfera superior, en el cual, la energía irradiada desde el suelo sólo es liberada parcialmente al espacio.

En la atmósfera están presentes los gases de invernadero, principalmente el anhídrido carbónico y el metano que tienen la particularidad de dejar pasar los rayos de onda corta del Sol hacia la Tierra y limitar la salida hacia el espacio de la onda larga emitida desde el suelo. El efecto invernadero induce a que la energía que llega a la Tierra sea “devuelta” más lentamente, por lo que “permanece” más tiempo junto a la superficie y así se mantiene una mayor temperatura.

En el conjunto de la Tierra ocurre un efecto natural similar de retención del calor por la presencia de algunos gases atmosféricos. La temperatura media en la Tierra está próxima a 15°C y si la atmósfera no existiera sería de unos -18°C. Se le llama efecto invernadero por similitud, porque en realidad la acción física por la que se produce es totalmente distinta a la que sucede en el invernadero de plantas.

Los cambios en los gases de invernadero de la atmósfera pueden ocurrir como un resultado tanto de factores naturales como de factores antropogénicos los cuales han recibido una gran atención en los últimos 20 años. La quema de fósiles, la tala de bosques y los procesos industriales han incrementado la cantidad de dióxido de carbono y otros gases de invernadero.

El más importante gas de invernadero es el vapor de agua, responsable por el 96% del efecto invernadero. Entre los demás gases de invernadero, como son el dióxido de carbono, el metano, los clorofluorocarbonos y el óxido nitroso, el más importante es el CO₂, que contribuye con el 3% al efecto invernadero. Los aportes antropogénicos de CO₂ a este efecto podrían estar de entre 0,05 a 0,25% (Ellingson *et al.*, 1991)

Es de anotar que en los últimos años han recibido especial atención en los sectores productivos, políticos y gubernamentales los incrementos de las concentraciones de los gases de invernadero tales como el dióxido de carbono, el metano, que podrían generar cambios climáticos globales que incidirían de manera significativa en las sociedades y ecosistemas naturales (ACCEFYN, 1994).

Retroalimentación climática

El sistema climático está en un balance dinámico. Por ello está continuamente ajustándose a perturbaciones forzadas y como resultado, el clima se ve alterado. Un cambio en cualquier parte del sistema climático iniciado por mecanismos forzados internos o externos, tendrá una consecuencia mucho más amplia. A medida que el efecto se propaga en cascada, a través de los componentes asociados en el sistema climático, el efecto se amplifica. Esto se conoce como retroalimentación. A medida que un efecto es transferido desde un subcomponente del sistema a otro, se verá modificado en sus características o en su escala. En algunos casos el efecto inicial puede ser amplificado (retroalimentación positiva), mientras que en otros, puede verse reducido (retroalimentación negativa).

Un ejemplo de un mecanismo de retroalimentación positiva involucra el vapor de agua. Una atmósfera más caliente potencialmente aumentará la cantidad de vapor de agua en ella. Ya que el vapor de agua es un gas invernadero, se atraparán más energía que aumentará aún más la temperatura atmosférica. Esto a su vez, produce mayor vapor de agua, estableciéndose una retroalimentación positiva.

Cambios climáticos en Colombia

Para Colombia los primeros registros climáticos de los climas pasados fueron publicados en 1960 y 1964 por Van Der Hammen y González sobre estudios de polen fósil realizados para la Sabana de Bogotá.

Los estudios de polen revelan un alto número de glaciaciones (Hooghiemstra y Ran, 1996; Van der Hammen, 1996).

Para la parte final de la glaciación y según los investigadores antes citados, se destacan los siguientes eventos:

- Un mínimo de temperatura ocurrió hace 18.000 años, pero entre 35.000 y 18.000 años a pesar de que la temperatura en las montañas colombianas era unos 7°C más baja que la actual, las condiciones de humedad no fueron suficientes para que los glaciares siguieran creciendo. Esto diferencia a Colombia de las latitudes medias donde la mayor extensión de los glaciares ocurrió hace 18.000 años.
- En la parte final de la glaciación (Tardiglacial) entre 14.000 y 10.000 años, los glaciares continuaron en retroceso, se situaron siempre por encima de los 3.900 m. A pesar del retroceso general las fluctuaciones menores de temperatura en ocasiones hicieron crecer levemente los glaciares. Entre 11.000 y 10.000 años la capa de hielo sufrió un fuerte retroceso y dejó depósitos detríticos (morrenas) entre 3.900 y 4.200 m. Este hecho marcó prácticamente el fin del período glacial y de la glaciación y dio paso al interglacial.
- En el Holoceno o Interglacial actual, a partir de hace 10.000 años, la temperatura subió y los hielos se fundieron aún más hasta cuando en una fecha aproximada hace 8.500 años la temperatura llegó a un máximo, ligeramente superior a la actual.
- Desde entonces y en términos generales, la temperatura comenzó a descender nuevamente y los discontinuos glaciares a recuperarse, es decir que tuvieron avances y retrocesos menores.
- Uno de los avances más conocidos comenzó hacia el año 1650 (de nuestra era), como resultado de un enfriamiento que duró hasta 1850 aproximadamente. Durante este mínimo o Pequeña Edad Glaciar que ocurrió en toda la Tierra, los glaciares del Cocuy descendían en promedio hasta 4.400 m.

- La Pequeña Edad Glacial se debió a un mínimo de actividad de la corona solar y el calentamiento actual a un máximo; estas fases, por lo que se conoce actualmente, tienen un máximo de duración de unos 200 años.

Recientemente para Colombia se presentaron los resultados ante las Naciones Unidas sobre los impactos de cambio climático (IDEAM, 2001): las emisiones nacionales de dióxido de carbono representan cerca de 0,2% de las globales, lo que demuestra que el país contribuye con una mínima parte. Se plantean varios efectos ante los aumentos globales de dióxido de carbono sobre el suelo y la desertificación, zonas costeras e insulares, recursos hídricos, zonas de glaciares, coberturas vegetales, desplazamiento de las zonas de vida, efectos sobre la incidencia de enfermedades como malaria y dengue.

