

Julián Ádem

**DESCRIPCIÓN GENERAL  
DEL MODELO  
TERMODINÁMICO.  
VARIABLES, PARÁMETROS  
E INTERACCIONES**

DISCURSO DE INGRESO

PRESENTACIÓN  
Guillermo Haro



DESCRIPCIÓN GENERAL  
DEL MODELO TERMODINÁMICO





Dr. Julián Ádem  
(1924)

Julián Ádem

DESCRIPCIÓN GENERAL  
DEL MODELO  
TERMODINÁMICO.  
VARIABLES, PARÁMETROS  
E INTERACCIONES  
(10 DE MARZO DE 1975)

PRESENTACIÓN  
Guillermo Haro



ANIVERSARIO

Coordinación editorial: Rosa Campos de la Rosa

Primera edición: 2013

D. R. © 2013. EL COLEGIO NACIONAL

Luis González Obregón núm. 23

Centro Histórico, C. P. 06020, México, D. F.

Teléfonos: 5789.4330 • 5702.1878 Fax: 5702.1779

Impreso y hecho en México

Printed and made in Mexico

Correo electrónico: [colegio\\_emeritos@yahoo.com.mx](mailto:colegio_emeritos@yahoo.com.mx)

[colnal@mx.inter.net](mailto:colnal@mx.inter.net)

Página: <http://www.colegionacional.org.mx>

PRESENTACIÓN  
POR EL SEÑOR GUILLERMO HARO

**J**ulián Ádem. Después de haber terminado en la Universidad Nacional Autónoma, los estudios para el grado de Ingeniero Civil, tentó el examen profesional correspondiente en 1948, y prosiguió estudios de especialización en la Universidad Brown, en Rhode Island, Estados Unidos de Norteamérica, hasta obtener el grado de Doctor en Matemáticas y más tarde siguió estudiando en el Instituto Meteorológico Internacional, en la Universidad de Estocolmo, en Suecia.

Actualmente es investigador titular de tiempo completo en el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma, y director del propio establecimiento, así como Asesor del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y colabora asiduamente en varias instituciones extranjeras en labores de su especialidad.

Ha dedicado su atención preferentemente a la geofísica y, dentro de esta disciplina, a la meteorología y todavía más particularmente a la

predicción a largo plazo del tiempo, para lo cual inventó un Modelo termodinámico con cuyo uso, basado en conceptos físico-matemáticos, se ha obtenido gran eficiencia, por lo cual dicho Modelo es usado corrientemente en varios países de Europa, en Japón y en los Estados Unidos de Norteamérica.

Es autor del primer trabajo científico para predecir la temperatura en los océanos dentro del hemisferio norte, así como de un método para pronosticar la trayectoria de los ciclones tropicales.

Por lo anterior se puede apreciar que el caso del Doctor Ádem es insólito un tanto en nuestro medio. Dotado con los conocimientos que ampara su título de ingeniero civil, bien pudo haber explotado tales recursos en el libre ejercicio de su profesión, para el cual sus personales capacidades le auguraban éxito provechoso. Sin embargo, prefirió servirse de su preparación profesional para investigar nuevas verdades científicas y no con la tendencia un tanto egoísta de acumular saber, sino de hacerlo servir al provecho del hombre en el mejor conocimiento de esta su morada, la Tierra, y especialmente para contribuir a su bienestar mediante la predicción oportuna y certera del estado del tiempo.

Así, pues, con el Dr. Julián Ádem entra hoy en

nuestra Casa no sólo un nuevo miembro de ella, sino también una disciplina científica de trascendental importancia. Ojalá que la actuación que tendrá aquí nuestro nuevo colega reciba el interés que merece e incite para formar nuevas vocaciones e influya para mejorar nuestro servicio oficial de predicción del tiempo, del cual sospecho que está necesitado de esa mejoría.

Repasando el currículum del Dr. Ádem, registramos que la mayor parte de los resultados de su labor de investigación ha sido publicada en revistas científicas extranjeras, y aun cuando apreciamos bien lo que de encomiable hay en tal circunstancia, también sentimos que se conoce mejor al autor de tal obra en el extranjero que en nuestro país. Este caso es, a mi ver, una muestra de cómo a veces dejamos de aprovechar el producto del trabajo de nuestros sabios. Mucho se ha hablado, recientemente, de "fuga de cerebros", pero poco se ha dicho de cómo a veces, por indolencia o por algo más grave todavía, por mera ignorancia, dejamos de aprovechar la ciencia que algunos compatriotas crean y que podría servir, animando a la tecnología, para mejorar nuestra propia vida.

El compatriota nuestro que, dedicado fructivamente a la ciencia deja nuestro país y se establece en el extranjero, en donde halla condicio-

nes mejores para realizar su obra, en beneficio de la humanidad, no merece vituperio. Probablemente su capacidad logrará más y del provecho que ella rinda algo habrá de alcanzarnos. Pero el dentista mexicano fecundo, que sabe de las ventajas de trabajar en el extranjero y las escaseces que se suele sufrir en nuestro país y, a pesar de ello, sacrifica parte de su éxito posible para ayudar aquí al progreso de la ciencia, con su propia labor y orientando y estimulando la de sus discípulos, ése, además de su mérito científico, merece el aprecio de su actitud auténticamente patriótica, hecha sin ostentaciones, sin verbosidad, sin demagogia.

Sea pues, por todo lo dicho antes, bienvenido en esta Casa su nuevo miembro, el Dr. Julián Ádem.

DESCRIPCIÓN GENERAL  
DEL MODELO TERMODINÁMICO.  
VARIABLES, PARÁMETROS E INTERACCIONES



**E**l tema que he escogido para ésta, mi primera conferencia en el seno de El Colegio Nacional, es uno al que me he dedicado los últimos veinte años. Es un tema de carácter eminentemente interdisciplinario que podríamos definir como un intento para establecer una base teórica tendiente a explicar la serie de fenómenos físicos que constituyen el clima, fenómenos que prácticamente no había sido posible estudiar con un certero y adecuado enfoque sino hasta muy recientemente, gracias, entre otras cosas, a la mayor cantidad y mejor calidad de datos de observación a escala planetaria con los que ahora contamos. Se empezó a contar con esta información en el año de 1957, al iniciarse el Año Geofísico Internacional, cuando casi todos los países del mundo se pusieron de acuerdo para recabar datos y hacer estudios geofísicos que incluían los estudios de la atmósfera y de los océanos, indispensables para abordar un problema tan complejo, y tratar

de encontrar una base físico-matemática para la teoría del clima. Una segunda circunstancia que ha hecho posible intentar la formulación de este problema fue la utilización de las computadoras electrónicas, iniciada a principios de los años 50, que abrió el camino a la posibilidad del análisis del cúmulo enorme de datos necesarios para resolver las complicadas ecuaciones que aparecen en la formulación del problema.

En la conferencia del día de hoy, voy a mencionar en forma descriptiva cuáles son los elementos, cuáles son los parámetros y cuáles las interacciones que intervienen en dicha formulación, procurando que la exposición sea accesible a todo el público. En las dos conferencias siguientes trataré de exponer la teoría, incluyendo las ecuaciones empleadas, y en las dos últimas conferencias presentaré algunas de las aplicaciones de esta teoría a la predicción del tiempo a largo plazo y al estudio de las fluctuaciones climáticas.

Para estudiar el clima y sus fluctuaciones, hay que considerar el sistema atmósfera-océano-continente, el cual es muy complejo y contiene numerosas variables e interacciones que trataré de describir a continuación.

La fuente externa de energía que alimenta al sistema es la radiación solar. La radiación

recibida por la tierra depende de los siguientes factores: la latitud, la época del año, los elementos orbitales de la tierra y la constante solar. La radiación solar que es el elemento primario de energía del sistema fue estudiada desde 1920 por Milankovitch, quien desarrolló una fórmula matemática para describirla como función de los factores mencionados. La figura 1 muestra cómo esta fuente primaria de energía depende de la latitud y de la época del año. Algo que salta a la vista en esta figura es que en verano la variación de la radiación solar, como función de la latitud, es muy débil y se recibe más energía en el Polo que en el Ecuador; en cambio en invierno, lo que se recibe de radiación solar en el Polo es cero y hay un fuerte gradiente que hace que aumente la radiación hacia el Ecuador, siendo ésta prácticamente igual en invierno que en verano en esta latitud.

La radiación solar es el parámetro fundamental que determina el campo de temperatura en el sistema atmósfera-océano-continente, así como la circulación oceánica y atmosférica y las interacciones entre estas dos circulaciones y los campos térmicos correspondientes. Al entrar al sistema atmósfera-océano-continente, dicha energía induce numerosas interacciones y fenómenos cuyos efectos integrados producen el di-

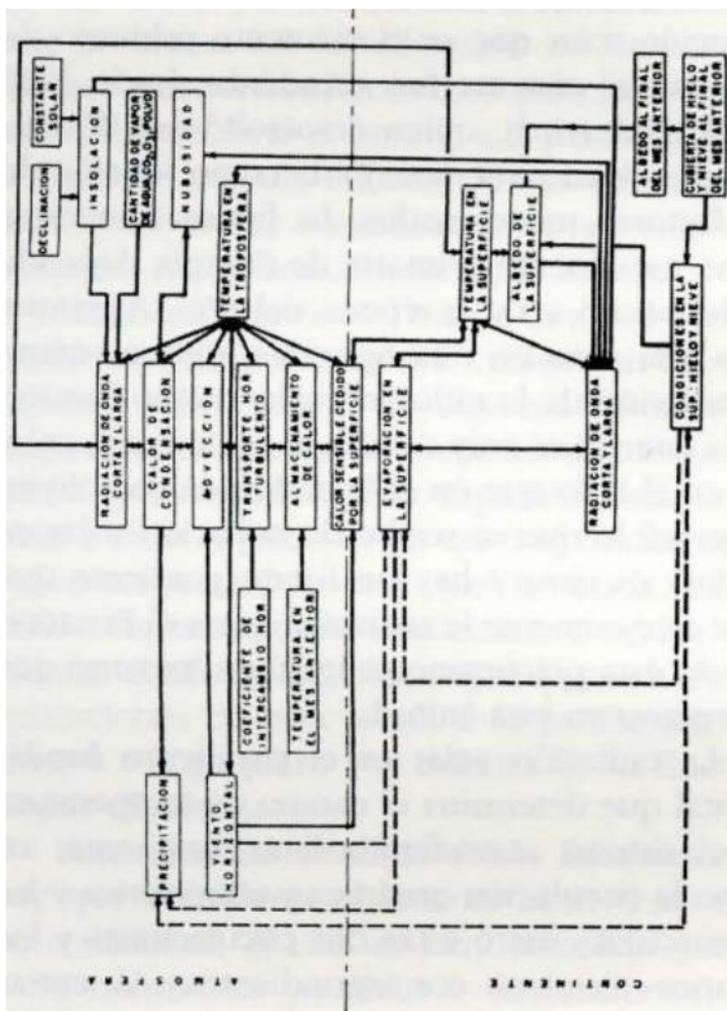
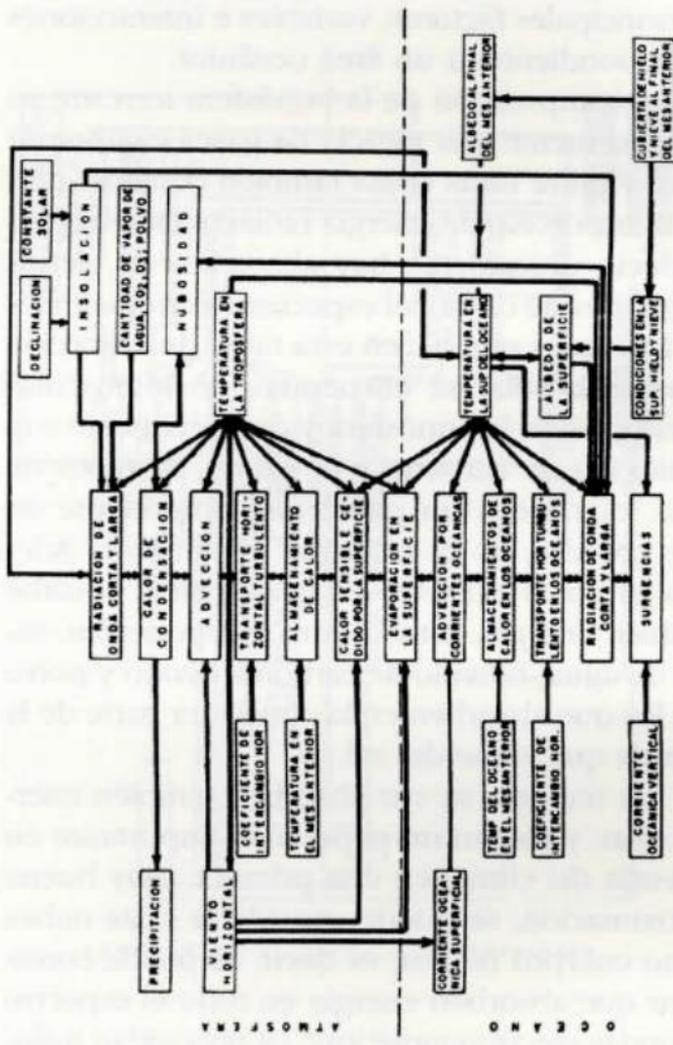


Figura 1. Distribución de la radiación solar recibida por la tierra en función de la latitud y la época del año. Las unidades utilizadas son centésimas de calorías por milímetros, por centímetro cuadrado.

ma. La figura 2 muestra un esquema que incluye los principales factores, variables e interacciones correspondientes a un área oceánica.

La composición de la atmósfera terrestre es principalmente una mezcla de gases y vapor de agua; y entre otras cosas también contiene polvo. La absorción de energía radiante es selectiva; es decir, únicamente hay absorción en ciertas longitudes de onda del espectro electromagnético. Los gases que hacen esta tarea de absorción de energía solar se encuentran en minúsculas cantidades en la atmósfera y concretamente son el bióxido de carbono y el ozono. El vapor de agua, que juega un papel muy importante en este proceso, es el principal absorbente. Además, el polvo existente en la atmósfera absorbe también energía. Estos cuatro componentes, vapor de agua, bióxido de carbono, ozono y polvo son los que absorben en la atmósfera parte de la energía que viene del sol.

Las nubes a su vez absorben también energía solar, y juegan un papel muy importante en la teoría del clima; en una primera, muy buena aproximación, se puede considerar a las nubes como cuerpos negros; es decir, se puede considerar que absorben energía en todo el espectro de ondas electromagnéticas. La nubosidad influye en forma importante en el clima, es una va-



Figuro 2. Representación esquemática de las variables, parámetros e interacciones en el modelo termodinámico del clima, en áreas oceánicas.

riable esencial que está íntimamente ligada con la absorción de energía por la superficie de la tierra.

Una parte de la energía que procede del sol es absorbida por la atmósfera, debido a la existencia de los componentes atmosféricos antes citados y a la nubosidad; por otro lado, la atmósfera emite energía a su propia temperatura terrestre, y ese balance de energía de radiación (de onda corta) que viene del sol y de onda larga emitida a las temperaturas atmosféricas es la contribución de energía de radiación de onda corta y onda larga mostrada en este esquema de la figura 2 en lo que se refiere a la parte atmosférica. Igualmente, la superficie del mar y de los continentes recibe energía solar y emite energía a su propia temperatura. Se tiene entonces que en este sistema la energía que llega del sol se distribuye en la siguiente forma: una parte es absorbida por la atmósfera libre de nubes, otra por las nubes y otra por la superficie de la tierra. Parte de la energía que llega del sol regresa al espacio exterior sin aprovecharse debido a las condiciones físicas propias tanto de la atmósfera como de la superficie terrestre. En particular, un parámetro muy importante es el albedo total del sistema, que es el porcentaje de energía solar que regresa, sin haber sido utilizado, al espacio

exterior. Éste tiene tres componentes, asociados respectivamente con la atmósfera, las nubes y la superficie. La absorción de energía solar en la superficie depende de la nubosidad y del albedo de la superficie, el cual a su vez depende de las propiedades de la superficie y se define como el porcentaje de la energía incidente en la superficie terrestre que no es absorbida por ésta.

Además de estas fuentes de energía de radiación, en el sistema atmósfera-océano-continente se generan internamente otras fuentes de energía. Así, de gran importancia es el calor que la atmósfera se apropia por medio de la condensación del vapor de agua en las nubes, fenómeno simultáneo al que ocurre en la superficie de los océanos y de los continentes, en donde ocurre una pérdida de energía debida a la evaporación.

Otros mecanismos que hay que tomar en cuenta son las energías transportadas en el sistema: la energía que los vientos medios transportan horizontalmente en la atmósfera y la que transportan los elementos turbulentos, cuya duración es menor que el promedio de las variables que estamos considerando. Por ejemplo, en el caso en que tomemos estos promedios en periodos de un mes, los elementos turbulentos del sistema son los ciclones y anticiclones,

cuya duración no llega a los treinta días. Existe un transporte de la superficie de calor sensible que la atmósfera obtiene, y existe también una advección o transporte horizontal que efectúan las corrientes oceánicas, que en el esquema de la figura 2 aparece separado en dos partes, una representa el transporte de las corrientes con un valor medio en el intervalo en que se han considerado promediadas las variables, y otra nos muestra el transporte turbulento o mezcla horizontal de las aguas oceánicas.

En el estudio del clima y sus fluctuaciones, hay que considerar la gran importancia del almacenamiento de energía que existe en los océanos, el cual regula la variación de la temperatura del sistema atmósfera-océano-continente durante el año. El océano va almacenando energía durante todos los meses cálidos, la cual luego cede gradualmente al sistema climático durante los meses fríos. Además de las corrientes superficiales inducidas por el viento, existen en la parte profunda de los océanos corrientes lentas, poco conocidas, que aparentemente no están acopladas con los factores meteorológicos. Estas corrientes llevan agua de la parte más profunda de los océanos a la superficie, modificando las temperaturas de la superficie, y al modificar las temperaturas de la superficie de

los océanos, influyen en el balance térmico del sistema atmósfera-océano-continente, haciendo variar el clima. Estos transportes de aguas profundas a la superficie que se llaman surgencias son poco conocidos, pero son elementos fundamentales que hay que introducir en el estudio del clima. Se deben estas corrientes, entre otras causas, a deshielos o a evaporación, los cuales producen cambios en la salinidad de las aguas y, por tanto, en su densidad, lo que a su vez induce movimientos de las aguas afectadas.

Las variables fundamentales en la formulación de la teoría del clima son indudablemente los campos de temperatura: el de la temperatura troposférica y el de la temperatura de la superficie de la tierra (océano y continente). En el esquema de la figura 2 se muestra con flechas cómo, dentro del sistema, unas variables influyen en otras: las temperaturas determinan las funciones de calentamiento y transporte que entran y asimismo dichas funciones influyen en la temperatura. Así, la temperatura troposférica determina el campo de los vientos, el campo de los vientos influye en las corrientes oceánicas superficiales las que, a su vez, determinan la advección por corrientes oceánicas, las cuales influyen en el campo de temperatura en el océano. Este campo de temperatura oceánica

influye en la evaporación, en el calor sensible cedido a la superficie y en la radiación, la que influye en el campo de temperatura troposférica. Además, el viento influye en la evaporación y en el calor sensible cedido por la superficie, los que a su vez influyen en la temperatura; es decir, que la temperatura determina el viento horizontal y el viento, a su vez, influye en el campo de temperatura.

La figura 3 representa el diagrama que muestra, esquemáticamente, lo que acontece en el caso de los continentes. El sistema continente-atmósfera tiene, en la parte atmosférica, exactamente los mismos elementos que el sistema océano-atmósfera, representado en el diagrama de la figura 2; pero en los continentes, a diferencia de lo que ocurre con los océanos, el almacenamiento y el transporte horizontal de energía son pequeños y en una primera aproximación se pueden tomar como cero. Por tanto, en el continente existe un balance entre la energía obtenida por radiación de onda corta y larga, el calor perdido por evaporación y el calor sensible cedido por la superficie a la atmósfera. Desde el punto de vista del clima, es de especial importancia en los continentes la existencia de hielo y nieve, ya que afecta en forma drástica el albedo de la superficie terrestre. Por ejemplo, el

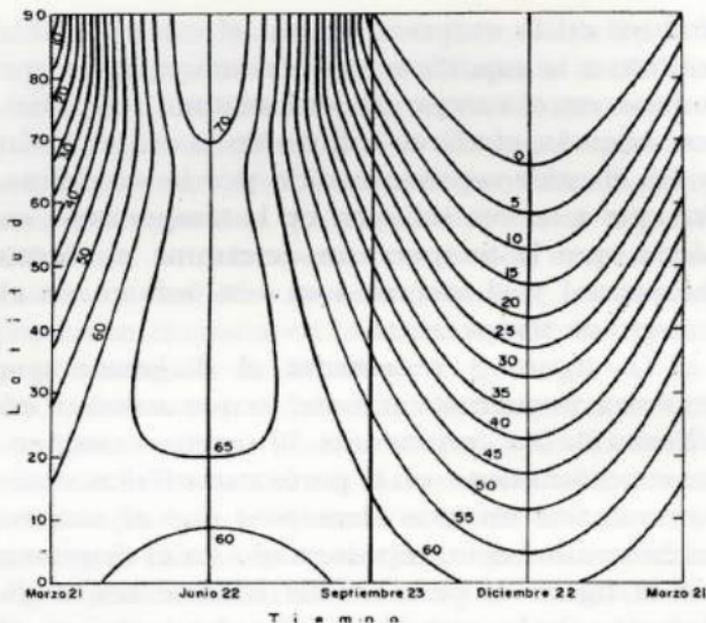


Figura 3. Representación esquemática de las variables, parámetros e interacciones en el modelo termodinámico del clima, en áreas continentales.

albedo correspondiente a una superficie cubierta de hielo o nieve fresca puede ser como de 80 a 90 por ciento; es decir, esto significa que regresa de un 80 a 90 por ciento de la energía que allí se recibe, mientras que el albedo en un suelo sin hielo o nieve es de 20 a 40 por ciento. Estas variaciones influyen en forma notable en la temperatura.

En el sistema climático existen varios mecanismos de retroalimentación; por ejemplo, al aumentar la cubierta de nieve en el casquete polar, aumenta el albedo y, por tanto, el sistema recibe menos energía, y al recibir éste menos energía, bajan las temperaturas, lo cual a su vez ayuda a que se mantenga la cubierta de nieve.

No debemos omitir el hecho de que también existen mecanismos de retroalimentación en los océanos. Por ejemplo, las anomalías de temperatura oceánica modifican el transporte de calor sensible y latente de la superficie a la atmósfera, afectando la circulación atmosférica y la nubosidad. Estos cambios, a su vez, afectan la propia temperatura de la superficie de los océanos tanto a través del cambio de radiación, como por la mezcla inducida por el viento, la advección y la convergencia. Estos procesos pueden resultar en un aumento o disminución de la anomalía inicial de la temperatura de la superficie del océano, lo cual ilustra la incertidumbre asociada con razonamientos puramente cualitativos. Frecuentemente se invoca a unos u otros mecanismos para explicar tales o cuales condiciones climáticas pero, en general, el problema con que tenemos que enfrentarnos es un problema de interacciones múltiples.

Las interacciones y mecanismos de retroalimentación que acabamos de describir corresponden solamente a algunos de los ejemplos que están representados en los esquemas de las figuras 2 y 3, los que, por su complejidad, solamente pueden incorporarse en forma integral en la construcción de un modelo climático por medio de un sistema simultáneo de ecuaciones diferenciales y algebraicas. Para hacer tal cosa, se utilizan los principios de conservación de cantidad de movimiento, de masa y de energía térmica, así como las ecuaciones de estado; en otras palabras, es necesario formular un problema de dinámica de fluidos, para lo cual es indispensable que las ecuaciones contengan los ingredientes esenciales que existen en la naturaleza, y ésta no es una tarea fácil, porque aunque las ecuaciones generales de un problema de dinámica de fluidos son bien conocidas, se sabe muy poco respecto a los detalles de los mecanismos que intervienen en el sistema climático; es decir, se tiene un conocimiento incompleto del funcionamiento de la naturaleza, lo que dificulta poderla representar en forma real. Por tanto, al formular el problema es necesario hacer ciertas hipótesis simplificadoras, con el objeto de definir la forma en que las funciones de calentamiento y transporte, y las di-

versas interacciones existentes se incorporan en las ecuaciones. La formulación matemática de dichas hipótesis, conjuntamente con las ecuaciones básicas mencionadas, conduce a la construcción de un modelo climático. Los esquemas de las figuras 2 y 3 corresponden al Modelo termodinámico desarrollado por el autor, el cual se explicará con mayores detalles en las próximas conferencias.

A continuación, voy a citar algunos ejemplos de causas de las fluctuaciones climáticas. Una de estas causas se debe a las variaciones en la emisión de energía del sol, ya que es lógico suponer que siendo la radiación solar la fuente primaria de energía, variaciones en ella pueden ocasionar fluctuaciones o cambios climáticos en nuestro planeta. De hecho, este tema es de gran actualidad y a él me referiré en la última conferencia en la que se va a aplicar el Modelo termodinámico para evaluar el efecto de cambios de la constante solar en la temperatura y en las otras variables climáticas.

Otra posible causa de cambio climático es la variación de la órbita terrestre, que a su vez también hace variar la radiación solar recibida en la tierra. Milankovitch demostró o creyó demostrar en 1930, que los cambios en la oblicuidad de la tierra son los principales responsa-

bles de las variaciones de las glaciaciones que ha sufrido nuestro planeta. Estudios recientes con modelos climáticos altamente simplificados han demostrado que dichas variaciones no son del orden de magnitud suficiente como para producir cambios glaciares. Sin embargo, dichos cálculos son muy recientes y basados en modelos aún muy simplificados. Con la aplicación de modelos más realistas se podrá determinar cuál es verdaderamente el efecto de los elementos orbitales en las glaciaciones de nuestro planeta.

Otro factor importante que puede producir cambios o fluctuaciones en el clima es la variación de los elementos responsables de la absorción y emisión de energía en la atmósfera. Empezaré por el polvo. Es bien conocido y está registrado en los anales históricos de nuestro planeta que las grandes erupciones volcánicas enturbian la atmósfera y los polvos finos emitidos llegan hasta la estratosfera, permanecen ahí y, como consecuencia de esto, la atmósfera terrestre se enfría, lo cual ha sido observado en forma espectacular después de las erupciones de los volcanes Tambora en 1815, Crakatoa en 1883 y Agung en 1963.

Según algunos investigadores, esta causa volcánica, reforzada con el polvo introducido

artificialmente por el hombre, puede explicar el enfriamiento que desde 1940 la Tierra ha sufrido que, en general, es de  $0.4^{\circ}\text{C}$ .

El bióxido de carbono introducido recientemente por el excesivo uso de combustibles fósiles como petróleo, gas y carbón, es un elemento que ha ido aumentando en los últimos años de industrialización. Sin embargo, su incremento produce un calentamiento, lo cual no está de acuerdo con el enfriamiento observado desde 1940 a la fecha. Esto no quiere decir que dicho efecto no sea importante, sino que siendo sólo uno de los tantos factores que intervienen en el clima, su efecto aparece integrado con el de los otros factores y es indispensable para su evaluación estudiarlo basados en modelos más realistas del clima.

Finalmente, quiero mencionar como posible causa de cambios considerables en el sistema climático, a las variaciones en el contenido de ozono. La capa de ozono, que tiene su máxima densidad entre 20 y 25 kilómetros de altura en la atmósfera, tiene una función muy importante. De hecho, los rayos ultravioleta que llegan a la tierra disocian el oxígeno molecular  $\text{O}_2$  en oxígeno atómico  $\text{O}$ , y entonces este oxígeno atómico se combina con el oxígeno molecular para producir el ozono  $\text{O}_3$ . La capa de ozono,

mediante dicho proceso, absorbe los rayos ultravioleta, protegiendo nuestro medio ambiente de dichas radiaciones.

Los óxidos nítricos que se encuentran en forma natural en la estratosfera actúan como catalizadores para destruir el ozono, evitando un excedente del gas en los procesos de su formación; sin embargo, los óxidos nítricos que son introducidos en la estratosfera por los aviones supersónicos rompen este equilibrio, destruyendo artificialmente la capa de ozono que envuelve a la tierra. Otra causa de formación perturbadora de óxido nítrico son las explosiones termonucleares, así como lo son también los fluorocarburos que se emplean en los pulverizadores de insecticidas, deodorantes y pinturas y en los refrigerantes de los sistemas de aire acondicionado.

Al disminuir la capa de ozono, aumenta la cantidad de rayos ultravioleta que recibimos, lo cual puede producir efectos altamente nocivos. Por ejemplo, se sabe que el exceso de rayos ultravioleta produce cáncer en la piel.

Estos ejemplos de posibles causas de fluctuaciones climáticas ilustran la necesidad de la evaluación de dichas causas y sus efectos, mediante la utilización de modelos que incluyan las múltiples interacciones existentes en la for-

ma más realista posible, incorporando por lo menos los factores, parámetros e interacciones discutidos el día de hoy.

El objeto de esta primera conferencia ha sido destacar los elementos esenciales que intervienen en la formulación del Modelo termodinámico del clima. En las siguientes conferencias desarrollaremos tal Modelo basados en esta información y en estos factores. Analizaremos las hipótesis y formularemos las ecuaciones para, finalmente, hacer aplicaciones donde se analicen numéricamente algunas de las posibles causas climáticas mencionadas. También se presentarán aplicaciones a la predicción del tiempo a largo plazo.



## ÍNDICE



|   |    |
|---|----|
| Presentación,<br>por Guillermo Haro.....  | 7  |
| Descripción general del<br>Modelo termodinámico.<br>Variables, parámetros e interacciones. .... | 13 |



Se terminó de imprimir el 30 de agosto de 2013 en los talleres de Impresos Chávez de la Cruz, S. A. de C. V., Valdivia 31, Col. Ma. del Carmen, C. P. 03540, México, D. F. Tel. 5539 5108. En su composición se usó el tipo Garamond de 10.5:12.5, 9.5:12.5 y 8.5:10.5 puntos. La edición consta de 1000 ejemplares. Captura de textos: Ma. Elena Pablo Jairnes; composición: Rebeca Rodríguez Jairnes y Laura Eugenia Chávez Doria.  
Editor: Hildebrando Jaimes Acuña.