

El efecto invernadero y México

CARLOS GAY, LETICIA MENCHACA Y CECILIA CONDE

“La actividad atmosférica tan destructiva de los últimos meses está relacionada con el efecto invernadero”. Ésta es una afirmación que frecuentemente se escucha en los medios de difusión como la televisión o la radio. Otros comentarios parecidos se refieren al hecho aparente de que este año ha hecho más calor que el pasado, o que está lloviendo menos y que por lo tanto estamos siendo víctimas de un inusitado calentamiento de la atmósfera. Tales afirmaciones, como otras tantas, en realidad contienen solamente una parte de la verdad, la que corresponde a la experiencia personal de quien las emite, pero no pueden ser consideradas como resultado de la detección de un fenómeno de características globales como lo es el llamado *efecto invernadero*.

El exceso del calentamiento de la atmósfera y de la superficie de la tierra, como consecuencia de un aumento en la cantidad de gases capaces de absorber radiación infrarroja es el resultado de la exacerbación del *efecto invernadero*, proceso atmosférico que ha sido explicado y pronosticado por numerosos científicos en el mundo y que finalmente se ha convertido en noticia debido a las posibles influencias nefastas que podría tener en la sociedad a nivel mundial.

Primero mencionaremos algunas razones por las que los científicos se empezaron a preocupar por este problema:

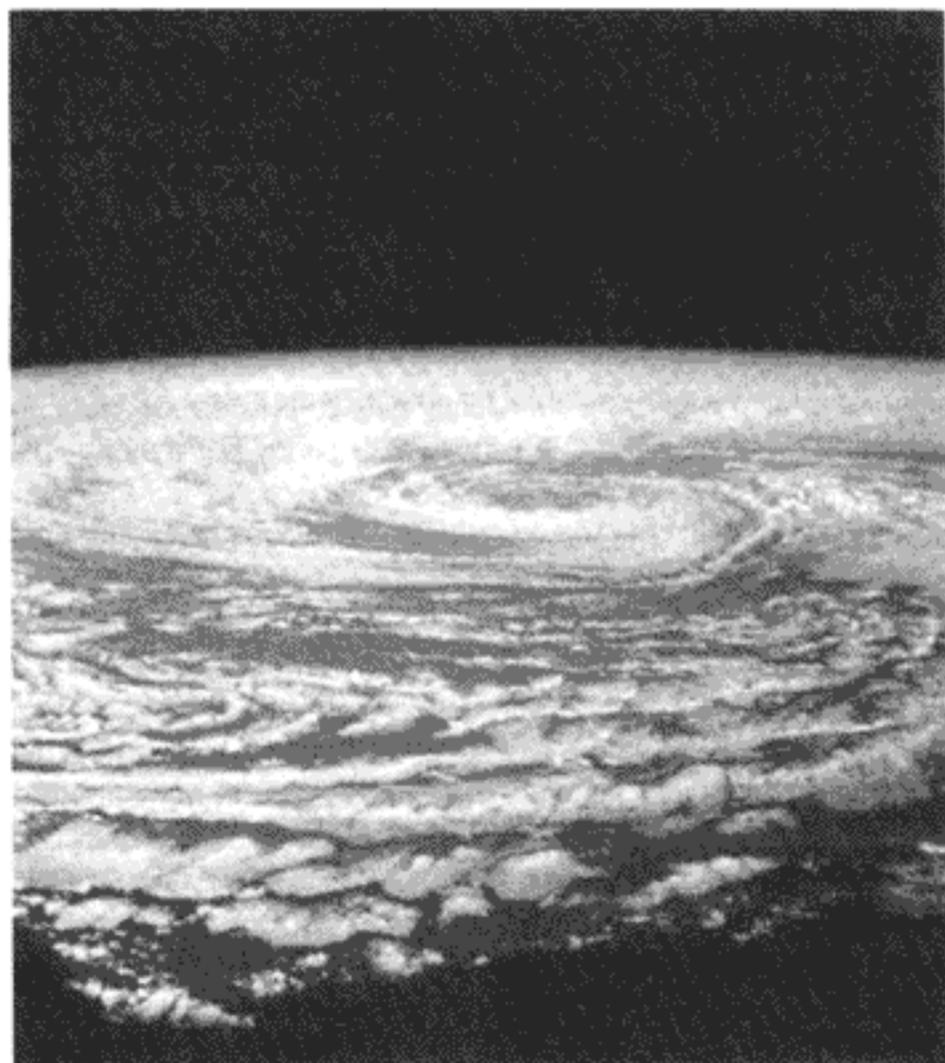
Cuando las sondas espaciales soviéticas y americanas enviaron datos acerca de la constitución y características físicas de Venus, como por ejemplo, que la presión de su superficie es 90 veces la presión de la Tierra, o que la composición de su atmósfera es más del 90% bióxido de carbono y que la temperatura en su superficie es del orden de 700°K (unos 900°C) —evidentemente condiciones bajo las cuales la vida como la conocemos no podría sostenerse—, surgieron las preguntas como la de por qué se dan dichas condiciones en un planeta que es hermano de la Tierra; hermano de la Tierra en el sentido de que ambos se formaron en la misma región de la nebulosa planetaria que dio origen al Sistema Solar y que posiblemente nacieron al mismo tiempo.

La explicación de las condiciones en Venus (al menos en parte) nos la da el *efecto invernadero*. Algunas de ellas ya eran conocidas por los astrónomos aun antes de la llegada al planeta de

las sondas espaciales. Estas características se deducen gracias a la información proveniente de los análisis que se realizaban a partir de la radiación que, a través de los telescopios, llegaba a los detectores utilizados por aquéllos.

A partir de estas observaciones se sabía que la temperatura de las capas altas de la atmósfera de Venus era de unos 450°K y que la temperatura de su superficie era mucho mayor (unos 600°K); además se sabía que un componente muy importante de su atmósfera lo constituía el bióxido de carbono (CO₂). Todos estos ingredientes marcaban la presencia de un fenómeno que causaba este contraste de temperaturas: el fenómeno conocido como el *efecto invernadero*. Podemos afirmar que cuando en un planeta como Venus, o la Tierra o Marte existe un contraste de temperaturas entre la superficie y el tope de la atmósfera, ahí se está manifestando este efecto.

Se puede entender este fenómeno en términos relativamente



Carlos Gay, Leticia Menchaca y Cecilia Conde: Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

sencillos. Por una parte sabemos que tanto Venus como la Tierra o Marte giran alrededor del Sol y por lo tanto la luz que éste emite los ilumina. Por otro lado sabemos que gran parte de la radiación que emite el Sol es luz visible y en el caso de la Tierra sabemos que esta radiación llega a la superficie (puesto que, debido a la reflexión y dispersión que ésta sufre cuando incide en los objetos nosotros podemos verlos). También sabemos que esta radiación es capaz de calentar y de ello nos damos cuenta sencillamente cuando nos asoleamos un fin de semana, o cuando nos achicharramos las manos al tocar el volante del coche después de dejarlo toda la mañana estacionado al rayo del sol.

La radiación visible penetra hasta la superficie y la calienta. A su vez la superficie emite una cierta radiación por estar caliente que, aunque no la vemos, sí la sentimos. Esta radiación se conoce como radiación infrarroja. Todos o casi todos hemos notado que en algún día de invierno, al caer la tarde, si pasamos cerca de alguna pared de piedra ésta emite calor suficiente como para sentirlo aun sin tocarla, esta emisión de calor se debe a la radiación infrarroja proveniente de la pared caliente.

Resulta que la atmósfera, transparente a la radiación visible es casi completamente opaca a la radiación infrarroja. En otras palabras, la atmósfera, o más propiamente dicho el bióxido de carbono, el vapor de agua y el ozono presentes en el aire absorben muy eficientemente la radiación infrarroja calentando el aire y no dejando que ésta escape al espacio. Este proceso es precisamente el que se produce en un invernadero: la radiación solar penetra en él y la estructura de vidrio no deja que la radiación infrarroja escape, elevando así la temperatura del interior.

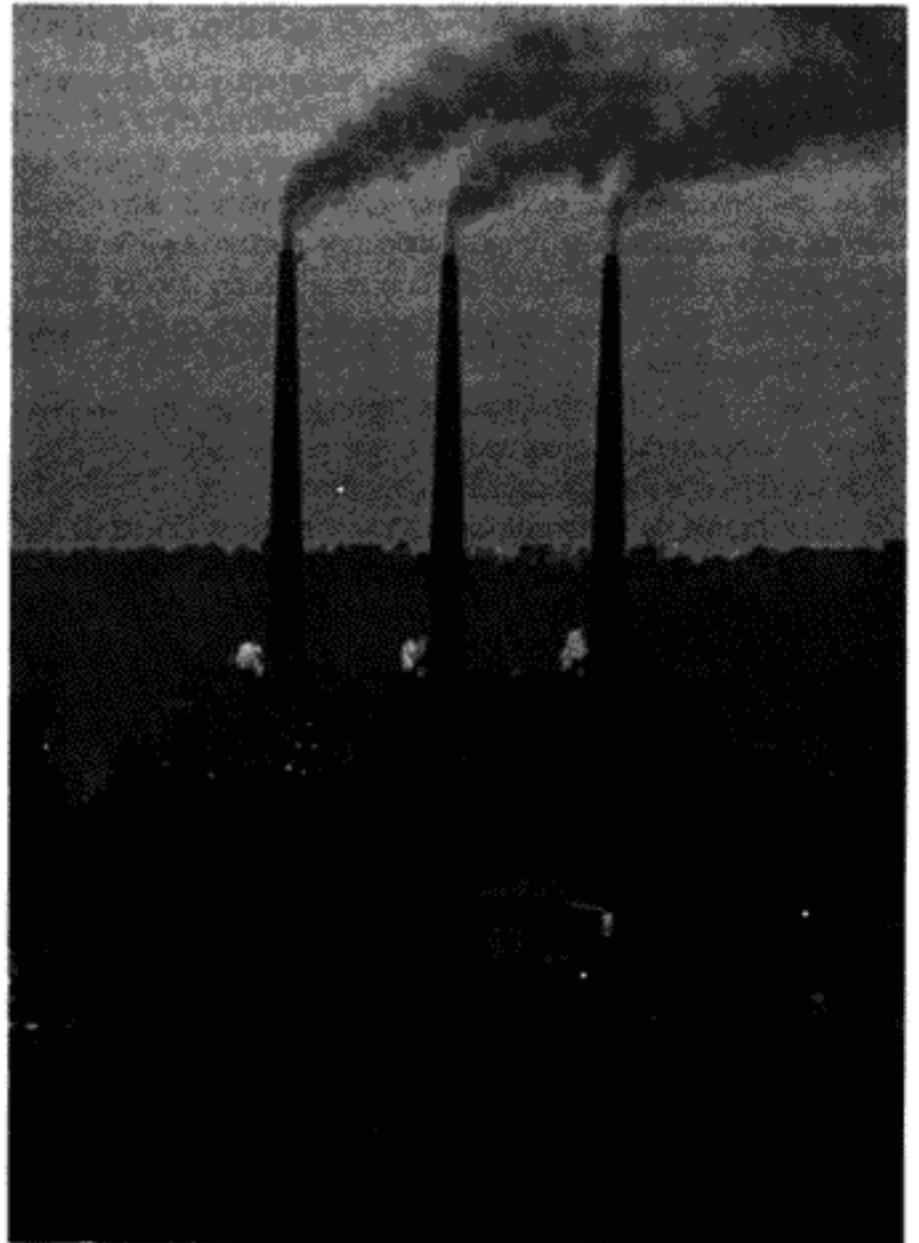
Si un astrónomo extraterrestre observara la Tierra y analizara la radiación que ésta emite (radiación infrarroja), llegaría a la conclusión de que la temperatura de la Tierra es de alrededor de 254°K (-19°C); sabemos que tal temperatura se encuentra en las capas altas en la atmósfera y que la temperatura de la superficie es de unos 288°K (15°C). Los números anteriores nos muestran cómo también en la Tierra se da un contraste importante entre las temperaturas de la superficie y la de la alta atmósfera. Por lo tanto, sabemos que aquí también está funcionando el *efecto invernadero*. Cuando comparamos los datos que tenemos para Venus con los justamente mencionados de la Tierra, nos percatamos de que el contraste en Venus (250°K - 700°K) es mucho mayor que el contraste en la Tierra (254°K - 288°K). Esta diferencia se debe a que la atmósfera de Venus es mucho más gruesa (90 veces) que la atmósfera de la Tierra y a que, además el bióxido de carbono — que representa más del 90% de la atmósfera venusina — es muchísimo más abundante que el bióxido de carbono contenido en nuestra atmósfera (unas 330 partes por millón). Todo ello indica que los procesos de absorción de la radiación infrarroja son mucho más importantes en Venus que en la Tierra.

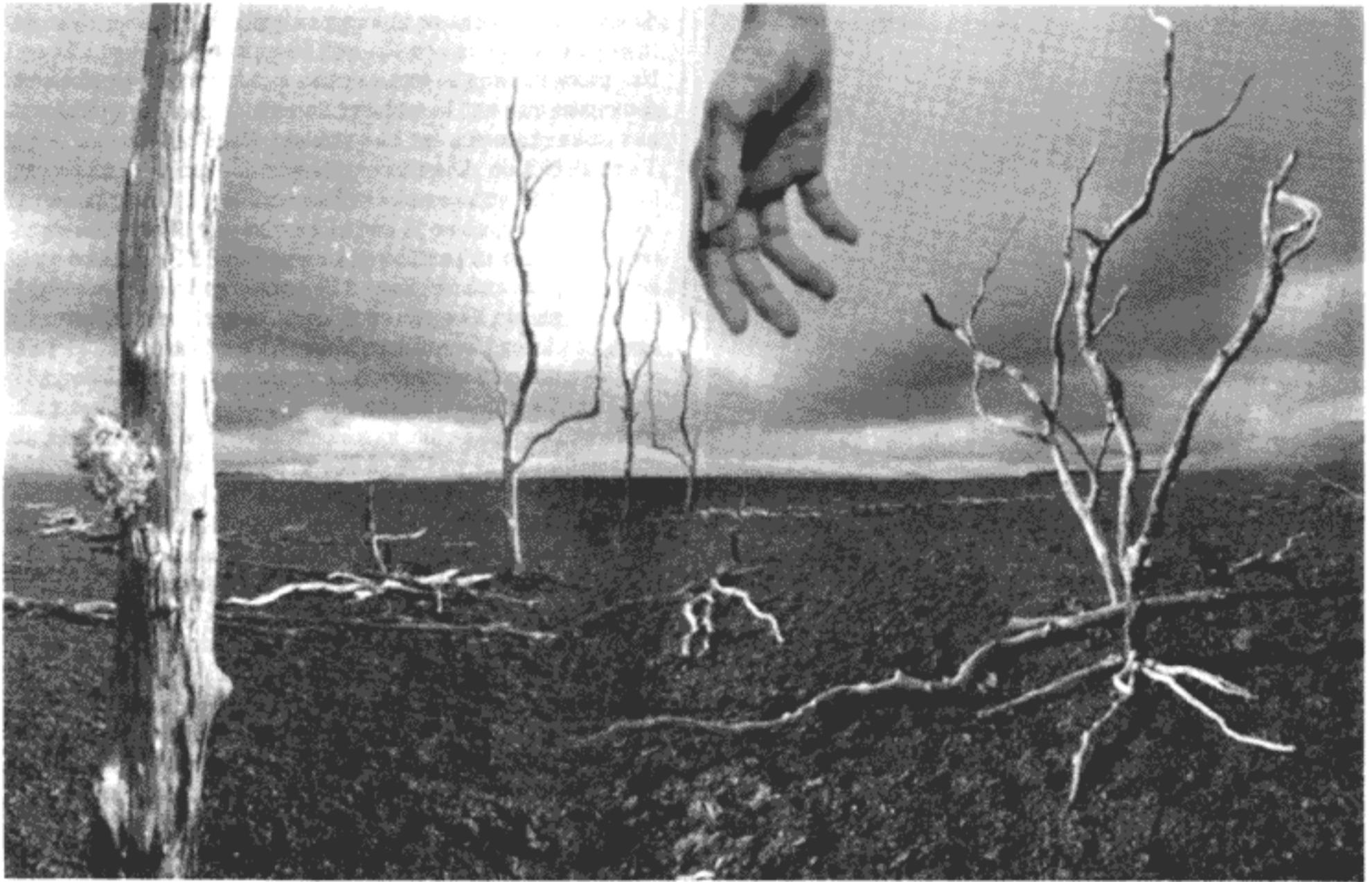
Ahora bien, ¿por qué la comparación entre Venus y la Tierra? La respuesta a esta pregunta tiene mucho que ver con la preocupación que mencionamos al principio del artículo, preocupación relacionada con el *efecto invernadero*.

Como mencionamos al referirnos a Venus, este planeta y la Tierra se formaron en regiones muy cercanas de la nebulosa planetaria. Ambos se formaron aproximadamente al mismo tiempo y a partir de los mismos materiales. Entonces ¿cómo es que actualmente son tan diferentes? Una de las posibles explicaciones supone que, en efecto, en un principio Venus se parecía bastante a la Tierra, es decir, se trataba de un planeta en el que había agua (observaciones modernas indican que ésta está ausente en Venus)

tanto líquida (formando océanos) como en forma de vapor en su atmósfera, la que también contendría ciertas cantidades de bióxido de carbono liberado a la atmósfera a partir de la actividad volcánica que, suponemos estaría presente en las primeras etapas de la vida del planeta. Sin embargo, aunque ambos planetas se parecieron físicamente, había, y aún persiste, una diferencia que causó su distinta evolución: la mayor cercanía de Venus al Sol, lo que implicó que Venus recibiera una mayor cantidad de energía solar que la Tierra.

La historia que puede reconstruirse es como sigue: al encontrarse Venus más cerca del Sol recibía una mayor cantidad de energía, parte de la cual era absorbida en su superficie, calentándola; la superficie caliente a su vez emitía radiación infrarroja que era absorbida por los gases en la atmósfera (*efecto invernadero*), produciendo un calentamiento ésta, que a su vez contribuía al calentamiento de la superficie. Al estar más caliente la superficie ocurrían dos cosas: por un lado, un incremento en la evaporación del agua superficial y por lo tanto un aumento del vapor de agua en la atmósfera, y por el otro, un aumento en la emisión de radiación infrarroja por parte de la superficie. Ahora bien, al haber más vapor de agua en la atmósfera (el agua absorbe eficientemente en el infrarrojo), la absorción de la radiación infrarroja producida por la superficie también aumenta y, por lo tanto, la temperatura de la atmósfera tiende a aumentar. Este aumento de la temperatura (aumento del *efecto invernadero*) implica que la radiación infrarroja también aumenta lo que, a su vez, causa que la temperatura de la superficie se eleve. Cuantas veces suceda esto, se repetirá el incremento de la evaporación del agua





superficial, lo que incrementará la cantidad de vapor de agua en la atmósfera que, a su vez, producirá un aumento de la temperatura de la atmósfera causando el consecuente aumento de la temperatura de la superficie... y ahí va otra vez el ciclo de calentamiento atmosférico y de la superficie. A este proceso le podemos llamar un *efecto invernadero* desbocado.

En Venus este proceso se vió acelerado, además, por el hecho de que cuando las temperaturas de la superficie alcanzaron ciertos valores, se liberó el bióxido de carbono atrapado en las rocas, y esta liberación causó un mayor aumento de las temperaturas, tanto las superficiales como las de la atmósfera y, por lo tanto, el *efecto invernadero* se vió seriamente incrementado.

El conocerse esta posibilidad de lo ocurrido en Venus, provocó que inmediatamente se planteara la pregunta de que si esto podría ocurrir en la Tierra con sus consecuencias destructivas, pues ello implicaría la desaparición de la vida en el planeta.

Si bien lo último que hemos planteado se puede situar, hasta ahora en el terreno de lo especulativo, sin embargo sirvió para abrir los ojos de los científicos en cuanto a las repercusiones que tendría sobre la tierra un calentamiento global de magnitudes no tan catastróficas (como hacer desaparecer cualquier rastro de vida sobre el planeta).

Hablemos ahora de algunas razones por las que el problema del *efecto invernadero* se ha vuelto a poner de moda. Veamos por ejemplo parte de las evidencias que se han observado y que podrían indicar que algo anormal está pasando. Pero primero, mencionaremos lo que los investigadores teóricos (aquéllos que trabajan con modelos físicos) están haciendo en relación con el problema.

Modelos teóricos del *efecto invernadero*

Hasta donde es posible saberse, esto es, a partir de trabajos que se pueden encontrar en la literatura, el problema del *efecto invernadero* se está estudiando a partir de tres tipos de modelos: los de Circulación General o GCM (General Circulation Models), los Radiativo-Convectivos (RCM) y los Termodinámicos (TM).

Los modelos GCM están basados en las ecuaciones de la dinámica de fluidos y pueden considerarse los más complejos. Con ellos se obtienen soluciones sobre muchísimos puntos del globo terrestre y para diferentes niveles atmosféricos, pero la obtención de resultados, por medio de estos modelos representa un esfuerzo computacional muy considerable, incluso es necesario utilizar recursos de supercomputación; en suma, son modelos muy caros que se están desarrollando en diferentes instituciones de investigación de los países del Primer Mundo, en particular en los Estados Unidos y en Europa.

Quizá deberíamos mencionar que debido a la complejidad de los modelos, que en general tratan de incluir todos los procesos conocidos que podrían afectar el clima, algunos de éstos sólo pueden ser tomados en cuenta de manera aproximada. Esto significa que no todos los procesos incluidos tienen el mismo grado de precisión en su adaptación al modelo general. Así por ejemplo, el énfasis en los GCM está en la descripción de la dinámica atmosférica, mientras que, en comparación los fenómenos radiativos se encuentran más aproximados.

Los modelos Radiativo-Convectivos por su parte, hacen mayor énfasis en los aspectos de radiación y la parte dinámica se encuentra contenida en el fenómeno de convección, el que, a su



vez, está esquemáticamente considerado. Estos modelos también presentan una gran complejidad en cuanto a la inclusión del transporte radiativo (transporte de energía por radiación), sobre todo cuando se trata de incluir procesos en los que intervienen diferentes gases y cuando se estudia el efecto que sobre la radiación tiene la cubierta nubosa de la Tierra. Podemos considerar este último punto como toral en el desarrollo de los modelos Radiativos-Convectivos y también como sumamente importante en los modelos de Circulación General.

Los lugares donde estos modelos se están desarrollando de manera más importante, se encuentran en el Primer Mundo. Sin embargo también en México desde hace unos años, se están utilizando en el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México.

El estudio del clima en términos de pronóstico y simulación (acerca de lo cual hemos estado hablando) se puede enfocar desde un tercer punto de vista y éste lo provee el Modelo Termodinámico. Este modelo gravita alrededor de la Primera Ley de la Termodinámica (conservación de la energía) aplicada a una capa atmosférica que interactúa con una capa oceánica, con una capa continental e incluye una capa de nubes en la atmósfera. Este modelo en principio abarca, o puede abarcar, todos los fenómenos que intervienen en el clima, pero presenta muchas menos dificultades computacionales que los modelos de Circulación General. Por otra parte, procesos como los de interacción oceano-continente-atmósfera, se pueden incluir a un costo mucho menor que bajo otros esquemas. En suma, el modelo Termodinámico del clima aparece como conceptualmente más directo, con exigencias computacionales mucho más discretas y con capacidad para competir (yo creo que con ventaja) con modelos más complicados, como los de Circulación General.

Así pues el modelo Termodinámico del clima se está desarrollando en México, en el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM y, debido a su aparente simplicidad ya ha sido adoptado en otros países, incluso en aquéllos en los que se desarrollan los más complejos.

¿Catástrofe o exageración?

En términos de simulación del clima, todos los modelos necesitan utilizar como ingredientes, las concentraciones atmosféricas

de los gases capaces de absorber radiación, tanto solar como infrarroja. Estos gases son los que determinan la energía disponible, necesaria ya sea para calentar la superficie y la atmósfera como para impulsar la máquina atmosférica. Como ya mencionamos, estos gases son los causantes del *efecto invernadero*. En la Tierra el bióxido de carbono, el vapor de agua y el ozono, son los gases más importantes. También existen otros que participan en el fenómeno, como lo son el metano y los clorofluorocarbonos. El primero se produce de manera natural en los pantanos y de forma provocada en plantíos de arroz y en los procesos digestivos del ganado. Los segundos los produce el hombre, gracias a sus aplicaciones comerciales ("sprays", desodorantes) e industriales (solventes en la producción de componentes electrónicos).

Como ya hemos indicado, un aumento de estos gases en la atmósfera, produciría un incremento del *efecto invernadero*, de ahí nuestro interés y el origen de la preocupación acerca del futuro del planeta.

A partir de la revolución industrial, a mitad del siglo XIX, el consumo de hidrocarburos como combustible ha ido en aumento. Consecuentemente también ha aumentado la concentración de bióxido de carbono en la atmósfera, pasando de unas 280 ppm (partes por millón) a unas 330 ppm actualmente. Para el mismo periodo se ha determinado, a partir del análisis de datos de temperatura provenientes de un sinnúmero de estaciones climatológicas y meteorológicas, de buques de todos tipos que atraviesan los océanos y más recientemente de datos de satélite, que la temperatura del planeta se ha incrementado en medio grado centígrado. Estos dos datos puestos lado a lado (el aumento del CO₂ y el aumento de la temperatura) ha causado una terrible tentación para los investigadores: el interpretarlos como causa y efecto y verlos como una manifestación del incremento del *efecto invernadero*.

Aquí deberíamos mencionar que la evidencia observacional del aumento de medio grado en la temperatura del planeta, fue el resultado de un esfuerzo sumamente cuidadoso al analizar los datos. Las dificultades para hacer este análisis recaen en diferentes fuentes, entre ellas está lo que se conoce como la homogeneidad de los datos. Solamente pensemos que para llegar al resultado mencionado, se tuvieron que comparar temperaturas tomadas hace unos cien años —con instrumentos que ahora serían de museo—, con temperaturas medidas actualmente. Así mismo hay que considerar la cantidad enorme de observadores que han intervenido, y, ¿quién nos asegura que algunos o muchos de ellos no padecían miopía, astigmatismo o vista cansada? Es evidente, se tuvo que hacer una cuidadosa depuración de los datos. Por otro lado, tenemos que considerar que el medio grado de aumento en cien años estaba enterrado en datos cuya variación, en pequeños lapsos, es mucho mayor que éste. Por ejemplo, la variación diurna o la variación entre estaciones pueden llegar a varias decenas de grados. Esta variación de medio grado en cien años, parecería entonces no ser de gran importancia al compararse con, digamos, las variaciones estacionales. Sin embargo, la diferencia entre una época glacial y una interglacial, representa muy pocos grados y en este contexto medio grado no es nada despreciable.

Ante la evidencia observacional, los investigadores se lanzaron a tratar de explicarla y para ello alimentaron sus modelos con datos que simularían las condiciones atmosféricas esperadas para el primer tercio o la primera mitad del siglo XXI, tiempos en los que se supone que la cantidad de bióxido de carbono atmosférico alcanzará niveles correspondientes al doble de los existen-

tes hoy en día. Los resultados obtenidos a partir de los distintos modelos varían en sus predicciones, las que van de unos dos a unos siete grados centígrados de aumento en la temperatura.

Estas predicciones, sobre todo aquellas que dan valores más altos, son las que causan alarma, pues las consecuencias, a nivel mundial, del impacto que tendría el aumento de la temperatura, serían catastróficas. Se han simulado escenarios en los que las aguas de los océanos elevarían su nivel, en promedio, de uno a dos metros, con la correspondiente inundación de tierras bajas y por lo tanto, con la destrucción de propiedades y economías regionales enteras. La emigración de las regiones mundiales de cultivo, el aumento de las áreas desérticas; en suma, el cambio del clima a nivel mundial no traería consigo más que caos y destrucción.

Debido a tan negro panorama, numerosas organizaciones mundiales se han movilizado con el objeto de prevenir sobre la posibilidad de que esta situación se presente. Entre las múltiples propuestas que se han hecho, podemos mencionar las referentes al control de las emisiones de los gases invernadero, siendo el más importante el bióxido de carbono. Como este gas es un subproducto de la actividad industrial, es fácil comprender que el control de su emisión representaría la modificación de dicha actividad, lo que significa que tendría que invertirse mucho, pero mucho dinero para encontrar los procesos que sustituyeran los que actualmente utiliza la industria.

Como ya lo mencionamos, otros gases que contribuyen al efecto invernadero, y que por lo tanto son capaces de modificar el clima, son el metano y los clorofluorocarbonos. Estos gases también provienen de la actividad económica del hombre. El primero se relaciona con la agricultura (arroz), y la ganadería (bovino), y el segundo con otras actividades (refrigeración, cosméticos, electrónica). Como estos gases también deberían ser controlados, hay que pensar en una mayor transformación de la actividad productiva del hombre.

Está claro que existe gran resistencia a implementar los cambios que se requieren, pues sólo podrían hacerse a través de inversiones que seguramente no producirían ganancias en el corto y, quizá ni siquiera, en el mediano plazo. Esta resistencia basa sus argumentos en las deficiencias propias que poseen los modelos teóricos. Hemos visto que las predicciones de éstos varían en rangos relativamente grandes (de 2 a 7 grados centígrados). Ello quiere decir que los diferentes escenarios futuros también varían en gravedad, desde aquéllos que indican (como el modelo termodinámico del clima del CCA) un aumento moderado de la temperatura, con implicaciones también moderadas, hasta aquellos que presentan situaciones catastróficas. Nosotros pensamos que lo razonable se encuentra entre ambas posturas, y que sería saludable adoptar una posición preventiva —a través de medios de control y de uso eficiente de la energía—, ante la posibilidad de que se diera una situación más grave. Como se trata de un problema de orden global, lógicamente la solución involucra a todos, lo que implica que tendrían que tomarse en cuenta múltiples consideraciones de tipo socio-económico-político. De esto se tratará en el siguiente apartado.

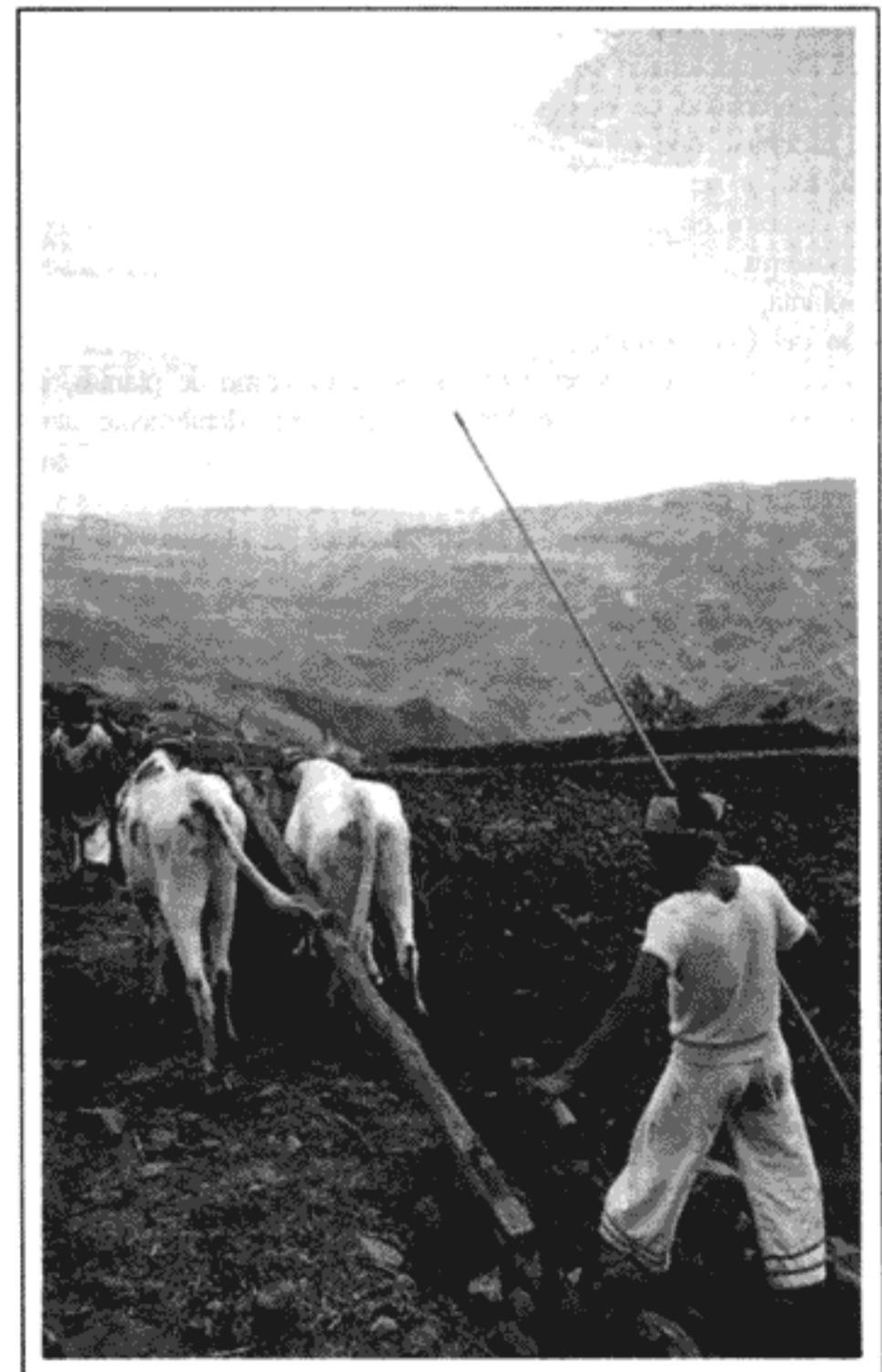
Aquí hemos revisado aquellos modelos que pronostican problemas de calentamiento y que por lo tanto dan pie a las preocupaciones ya mencionadas. Sin embargo también hay autores que afirman que no va a pasar nada, los que a su vez son utilizados por aquellos intereses que prefieren la inmovilidad. Creemos que aunque estos autores estuvieran en lo cierto, lo que sí hemos

aprendido de la discusión y el estudio del efecto invernadero, es sumamente valioso. Me refiero al hecho de admitir que hay, o pudiera haber, problemas que nos atañen a todos, es decir, problemas globales cuya solución también nos involucra. Pensemos en la contaminación, en la supuesta sobrepoblación, en el agua, en la extinción de especies.

El efecto invernadero en la república mexicana

Como se señaló en los apartados anteriores, algunos pronósticos indican que, a menos que se tomen medidas drásticas para reducir las emisiones a la atmósfera de "gases invernadero" (tales como el bióxido de carbono, metano, óxido nítrico, ozono y compuestos clorofluorocarbonos), la Tierra experimentará una tasa de cambio climático y un calentamiento atmosférico global sin precedente. Se espera que para el año 2030 la concentración de CO₂ en la atmósfera se duplique, alcance de 600 a 700 ppm (partes por millón) y la temperatura de la Tierra aumente entre 2 y 7 grados centígrados. Los científicos se refieren comúnmente a este pronóstico como "calentamiento global".

Al aumentar por causas antropogénicas la concentración de los gases mencionados, éstos pueden causar un calentamiento excesivo, o sea el tan controvertido fenómeno de calentamiento global.



Los países desarrollados son los principales productores de gases invernadero¹ (figura 1).

De una manera muy general y breve, podemos repetir que son fuentes importantes de contribución al aumento antropogénico de CO₂ atmosférico, la combustión de hidrocarburos, los incendios forestales, las prácticas agrícolas como la de roza, tumba y quema, la tala de bosques y la desertificación. Como fuentes de metano tenemos la ganadería, los cultivos de inundación, como el del arroz y las termitas —cuya importancia está restringida a ciertos ambientes tropicales. Como fuentes de N₂O están la agricultura, a través del uso de fertilizantes, y como fuentes de cloro-fluorocarbonos (CFC) los compuestos utilizados como propelentes en aerosoles y refrigerantes.

Existe una gran inquietud a nivel mundial acerca de las posibles consecuencias del calentamiento global. Mientras que los países desarrollados llevan un par de décadas estudiando el problema y elaborando planes y estrategias para el caso de un cambio climático de esta naturaleza, los países en desarrollo sólo recientemente comenzaron a preocuparse por el tema y, prácticamente no cuentan con estudios ni estrategias a seguir. Es posible, sin embargo, que estos países (México entre ellos), sufran las consecuencias ecológicas, económicas y sociales del calentamiento global con tanta o mayor intensidad que los países desarrollados.

Muchos de los países en desarrollo se encuentran geográficamente localizados en la franja tropical y entre los ecosistemas que los caracterizan se encuentran aquéllos que cuentan con una gran diversidad de especies y un alto grado de complejidad. Es de esperarse que entre más complejo y diverso sea un ecosistema, mayor será la probabilidad de que éste se vea afectado por los cambios en el clima. Por ejemplo, algunos experimentos con atmósferas controladas, han mostrado que las interacciones insecto-planta, se ven gravemente alteradas al aumentar la concentración del CO₂ atmosférico.² En comparación con otros países, la diversidad y endemismo, tanto de insectos como de plantas, en los bosques y selvas de México son sorprendentemente altos (aproximadamente 30 000 especies de plantas vasculares, y casi 2 millones de especies de insectos)³ (figura 2). En estos ecosistemas, las relaciones que guardan insectos y plantas son muy

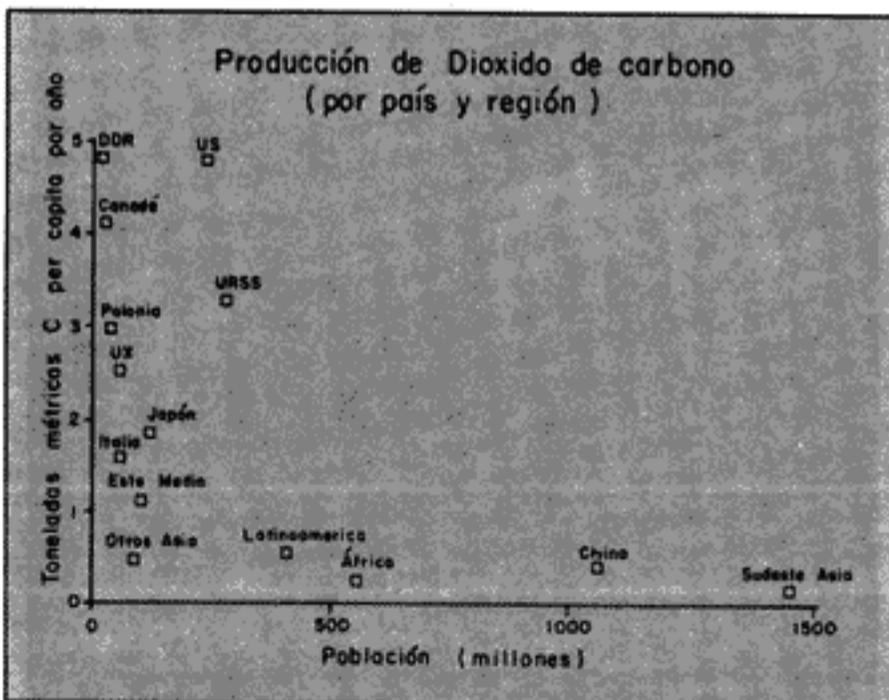


Figura 1. Producción de CO₂ (toneladas per cápita) por país o región en 1983 contra población (millones). Fuente: Gleick (1989).

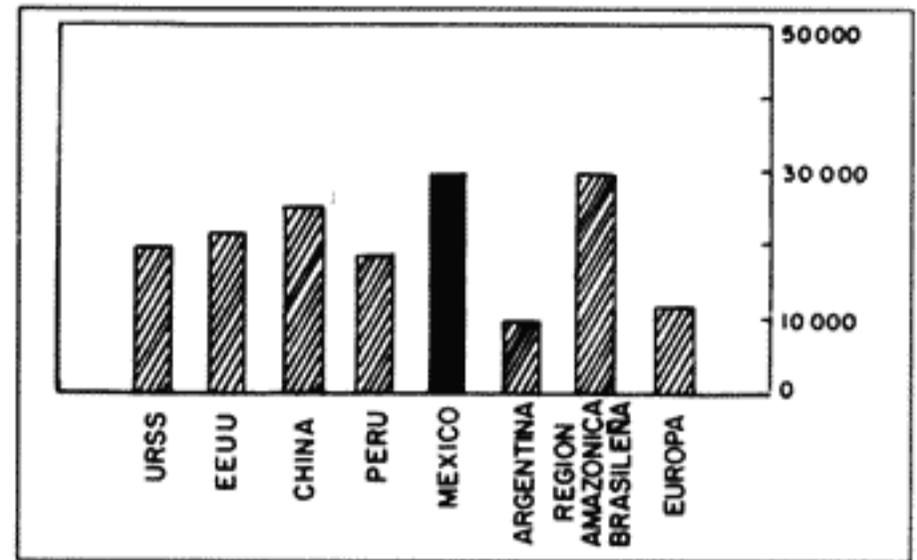


Figura 2. Número de especies conocidas o estimadas de plantas vasculares en México y otros siete países (o regiones) del mundo. Fuente: Toledo (1988).

complejas, frágiles y seguramente sensibles al aumento de CO₂.

Por otra parte, en el caso de un calentamiento global, se pronostica que el nivel del mar se elevaría entre uno y dos metros (como se mencionó anteriormente). No es difícil imaginar los efectos que este cambio tendría en las planicies costeras del Golfo de México, Yucatán e islas como la Del Carmen, con elevaciones cercanas a los cien metros sobre el nivel del mar, y una plataforma marina extensa de poca profundidad. Es de esperarse que, como consecuencia de una elevación en el nivel del mar, haya pérdidas de recursos y productos pesqueros, provenientes de lagunas costeras y otros ecosistemas, también costeros, sensibles a cambios en los niveles de salinidad.

La humedad de los suelos es otro de los factores que también cambiarían radicalmente. Algunos pronósticos que utilizan paleoanalogías, como la reconstrucción de los paleoclimas del Periodo Altitérmico, de 8 000 a 4 500 años antes del presente, indican que los suelos en México serán más húmedos que en la actualidad⁴ (figura 3). En ese caso, quizá habría cambios positivos en cuanto a la reducción de pérdidas en las cosechas, provocadas por las sequías, especialmente en regiones semiáridas o con cultivos de temporal. Sin embargo, también puede esperarse que las tasas de erosión se eleven por el aumento en la precipitación, tales tasas en la actualidad son alarmantes, debido a la deforestación. Hay otros pronósticos aún más pesimistas en cuanto al caso de México; nos referimos a los que han utilizado Modelos de Circulación General, que indican que una duplicación del CO₂ en la atmósfera, causaría un aumento en la temperatura de 2 a 5 grados centígrados, lo cual traería consigo impactos locales importantes. En particular, se prevé que el estado de Puebla y la región de Ciudad Obregón, sufrirían marcados déficits de humedad, lo que se traduciría en graves pérdidas en la producción de maíz⁵ (figura 4). Las autoras de este pronóstico señalan desacuerdos entre las predicciones de los modelos. Sin embargo, aseguran que, independientemente del modelo que se utilice, se espera que México sea más cálido y seco y que cuente con muchos menos recursos acuíferos.

En general, si se dieran cambios significativos en los patrones de precipitación y temperatura, se alterarían o incluso desaparecerían ecosistemas que actualmente ya tienen en México una distribución restringida. Ejemplos de éstos son los que se localizan en los picos de las montañas, sin posibilidad de "emigrar" latitudinalmente para compensar el cambio de temperatura; aquellos que

tienen requerimientos muy específicos de humedad, tipo de suelo y temperaturas de verano e invierno, o bien, que están muy reducidos y localizados, como lo son las selvas altas y medianas del trópico húmedo, los bosques de neblina y los bosques mesófilos de montaña.⁵

Cabría reflexionar también sobre el futuro de los animales que asociamos a estos ecosistemas, a algunos de ellos ya se les identifica como seres en peligro de extinción. Por ejemplo: los ratones del eje neovolcánico (*Habromis* spp.), la tuza de Michoacán (*Zygoeomys* sp.), la ardilla voladora (*Glaucomys volans*), el zorrillo enano de la costa del Pacífico (*Spilogale pygmaea*), el mono araña de la costa del Golfo (*Ateles geoffroyi*), el conejo de los volcanes (*Romerolagus diazi*) y por supuesto el quetzal (*Pharomachrus mocinno*) entre muchos otros.

¿Cómo y cuánto contribuye México al efecto invernadero? Prácticamente no existen estudios que cuantifiquen o analicen la variación en tiempo y espacio, de la producción de gases invernadero en México. Las pocas excepciones son estudios muy localizados, con relativamente pocos datos, o extrapolaciones e interpolaciones a partir de muestreos y cálculos realizados en otros países; sin embargo, hay algunos datos que podemos mencionar:

Con respecto a la agricultura en México, las tierras cultivadas ocupan actualmente entre 15 y 25 millones de hectáreas, aunque se estima que 30 millones son potencialmente cultivables (15% del área del país).⁶ El resto del territorio es muy accidentado o muy árido para permitir la agricultura.

Cabe mencionar, que las tierras agrícolas del norte y noroeste forman el 25% del total de las tierras cultivadas y la mayoría de éstas son de riego, lo cual implica que consumen CO₂ en lugar de emitirlo (a nivel global). Sin embargo, el trópico de México comprende 18 millones de hectáreas (aproximadamente 9% del territorio) y la agricultura que utiliza el sistema de roza, tumba y quema tradicional (generadora de CO₂), se ubica en esta región

en donde, además, la ganadería de pastoreo (generadora de metano) recientemente ha tomado considerable importancia.

Con respecto a la deforestación, según reporte de la FAO (1981),⁷ la tasa de deforestación en el trópico entre 1976 y 1980, fue de 160 000 hectáreas (el 1% del total del bosque tropical) por año, aunque el bosque se regenera en un 10% del área previamente talada. Detwiler y Hall,⁸ tabularon las emisiones de carbón a partir de la tala de bosques y midieron las variaciones entre un 0.4×10^{15} y un 1.6×10^{15} gramos de carbón por año, para los trópicos en general. Relacionando los cálculos de estos autores con los de la FAO, tenemos que México puede emitir entre 0.2×10^{14} y 0.8×10^{14} gramos de carbón por año. Esto equivale al 0.1% de las emisiones mundiales estimadas a partir de la combustión de hidrocarburos.

Las emisiones de metano provocadas por el cultivo de arroz no se conocen, sin embargo, es posible afirmar que este cultivo es relativamente poco extenso en nuestro país. Toledo⁹ reporta que en 1980 se cultivaron 132 000 hectáreas de arroz en comparación con 199 000 que se cultivaron en 1977, lo que indica una marcada reducción de las áreas de cultivo. Un caso muy distinto es el de la ganadería, que también constituye una fuente importante de emisión de metano y que, en la actual década, se ha expandido.

Enhalt¹⁰ calculó que los rumiantes domésticos produjeron, en 1970, del 20 al 35% de las emisiones totales del metano existente en la atmósfera. La población mundial de cabezas de ganado, en 1983, era de 1.2×10^9 , de las cuales el 53% se encontraba en el Tercer Mundo, según la FAO.¹¹ En el mismo año, las emisiones totales de metano, con origen en el ganado fueron de 54×10^{12} gramos y 40% de ellas provinieron del Tercer Mundo. Según Fernández Ortiz y Tarrío García,¹² en 1984 la población de cabezas de ganado en el trópico de México era de 6.5 millones, esto es, el 1% del total de cabezas de ganado en el Tercer Mundo. Al relacionar estas cifras, tenemos que, en 1984, en el trópico de

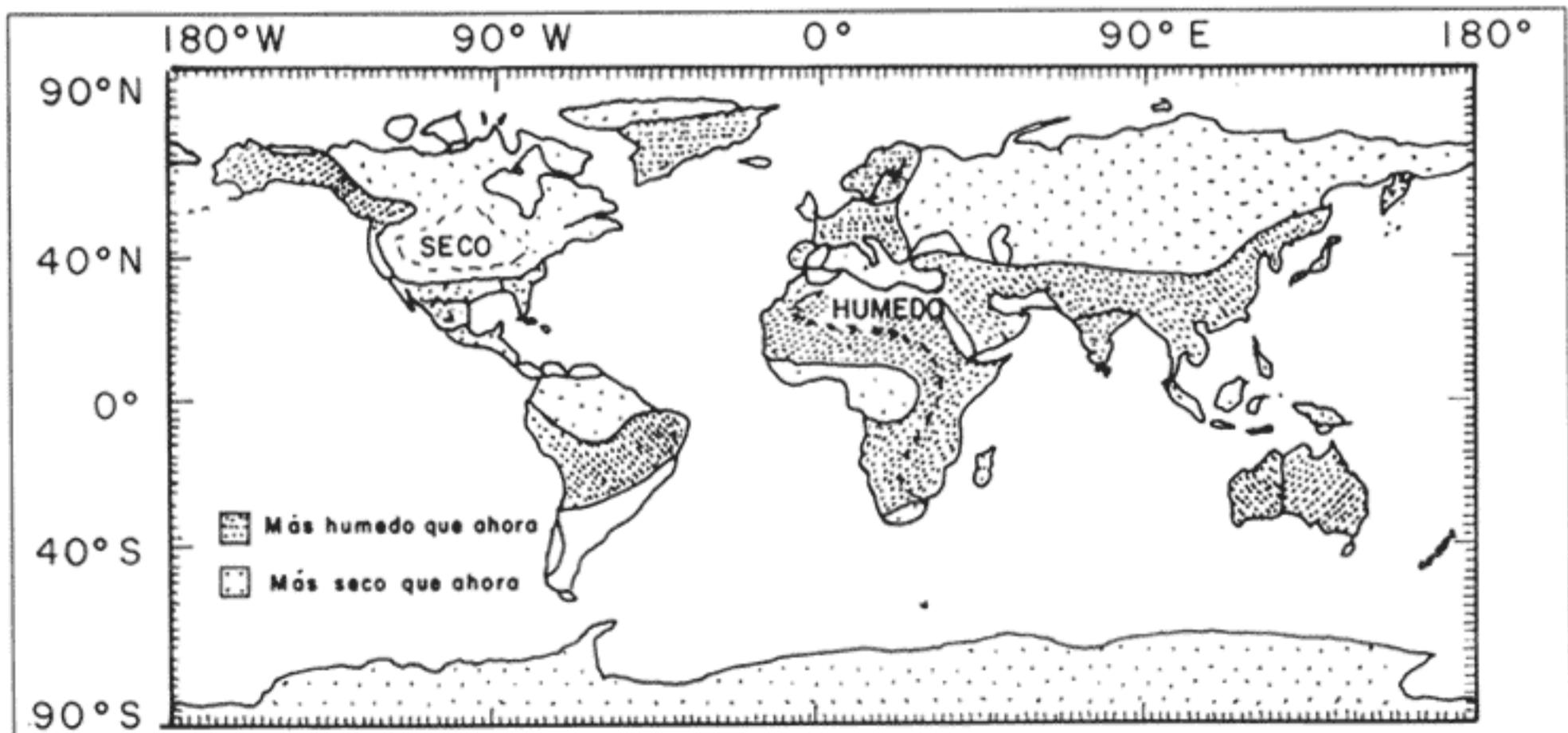
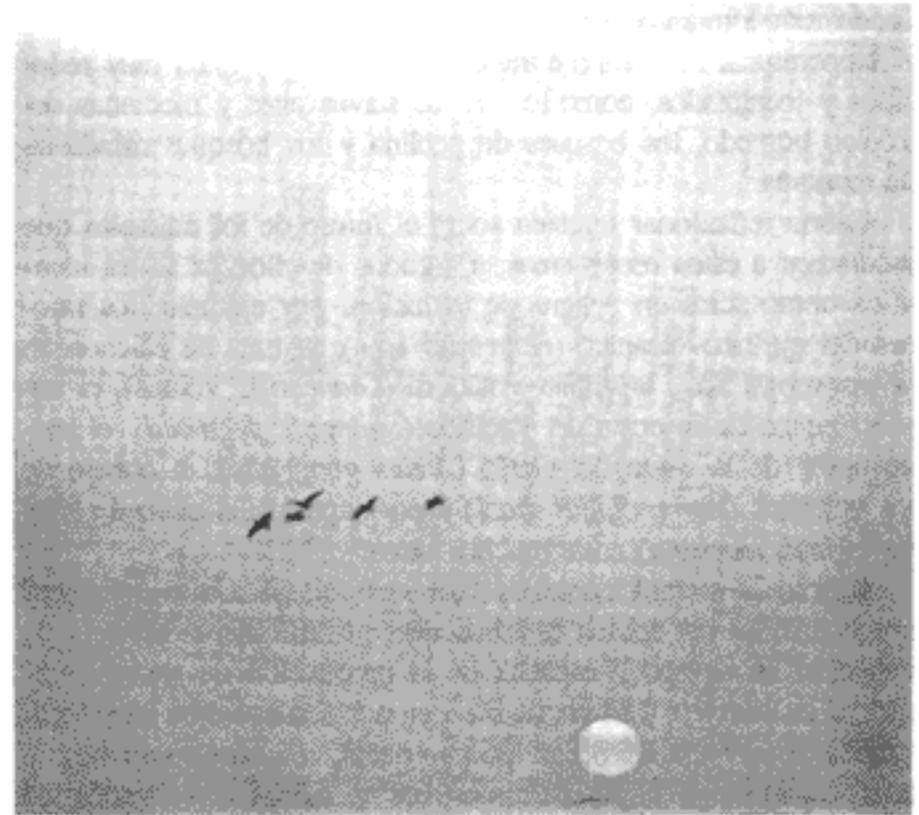


Figura 3. Patrones de humedad del suelo pronosticados ante un calentamiento terrestre. Escenario basado en reconstrucciones del Periodo Altitánico (8 000 a 4 500 años antes del presente), comparado con datos recientes y predicciones de un modelo climático para el hemisferio norte. Fuente: Kellog y Schwere (1981).

México, se emitieron aproximadamente 0.22×10^{12} gramos de metano, lo cual representa el 0.3% del total de metano emitido.

A nivel internacional existe una gran preocupación por regular y controlar las fuentes de emisión de gases invernadero. Organismos internacionales como la ONU, sostienen programas de investigación sobre "Cambio Climático" los cuales analizan a fondo la situación actual del problema de calentamiento global, sus impactos, medidas de prevención y estrategias a seguir. Con estos programas se intenta que se establezcan acuerdos internacionales que permitan reducir las emisiones de gases invernadero en todos los países, tanto del Primero como del Tercer Mundo. Desgraciadamente, el problema que representa el regular estas emisiones, mediante tratados internacionales, es muy complejo, no sólo por las desigualdades económicas, sociales y políticas entre los países, sino también por el hecho de que "regular" las emisiones implica una "regulación" de la producción, en particular en los campos de la agricultura, la ganadería y el uso de la tierra. Entre los aspectos más delicados a enfrentar, se encuentran los peligros de violación a las soberanías de los distintos países, que serían casi inevitables. Por ejemplo, un tratado de este tipo, podría contemplar la posibilidad de "regular" la cantidad y calidad de fertilizantes que pueden utilizar los países en desarrollo, el tipo de cultivos, el tipo de ganado y de forraje, la utilización de la tierra, las técnicas agrícolas y la tala y quema de los bosques.

Hay que tomar en cuenta que la validez de las predicciones sobre calentamiento global es debatible, como lo indicamos anteriormente, ya que algunos científicos han publicado argumentos muy convincentes que, no sólo ponen en entredicho estas predicciones, sino que incluso favorecen predicciones totalmente con-



trarias (como la de un "Enfriamiento Global"). Sin embargo, en los países desarrollados se invierten, justificadamente, miles de millones de dólares en la investigación sobre el calentamiento global y cambio climático. Queda claro que, para ellos, en caso de que las predicciones sean acertadas, los conflictos, las fricciones y la competencia por recursos entre países desarrollados y en desarrollo se agudizarán. Es importante pues prevenir, ante posibles cambios en las áreas del planeta adecuadas para las plantaciones del futuro, los mercados, los centros de producción, los centros de pobreza, los núcleos de fricción, etc. Así, también queda claro que las relaciones internacionales, la economía mundial, la política y la seguridad están en juego. ♦

Bibliografía citada

1. Gleick, P.H. 1989. Global climatic changes and geopolitics: pressures on developed and developing countries. In: A. Berger et al (eds.), *Climate and Geo-Sciences* 603-621. Kluwer Academic Publishers.
2. Fajer, E. D., M. D. Bowers and F. A. Bazzaz 1989. The effects of enriched carbon dioxide atmospheres on plant - insect herbivore interactions. *Science* 243: 1198-1200.
3. Toledo, V. M. 1988. La diversidad biológica en México. *Ciencia y Desarrollo*, núm. 81, año XIV, México.
4. Kellogg, W. W. and R. Schware 1981. *Climate change in Mexico: Likely effects and impacts*. Presented at the 1990 AAAS Annual Meeting, New Orleans, 17 February.
5. Liverman D. M. and K. O'Brien. 1990. *Climate change in Mexico: likely effects and impacts*. Presented at the 1990 AAAS Annual Meeting, New Orleans, 17 February.
6. Wellhausen, E. J. 1976. The Agriculture of Mexico. *Scientific American* 239:129-141.
7. Food and Agriculture Organization (FAO) 1981. *Los Recursos Tropicales de la América Tropical*. Rome.
8. Detwiler, R. P., and C. A. S. Hall 1988. Tropical Forests and the Carbon Cycle. *Science* 239:42-50.
9. Toledo, V. M., et al. 1989. *La Producción Rural en México: Alternativas Ecológicas*. Fundación Universo Veintiuno, México.
10. Enhalt, D. H. 1974. The atmospheric cycle of methane. *Tellus*. 26:58-69.
11. Food and Agriculture Organization (FAO) 1983. *Production yearbook*. Volume 37. Rome.
12. Fernández-Ortiz, L., and M. Tarrío-García, 1983. *Ganadería y estructura agraria en Chiapas*. Universidad Autónoma Metropolitana, México.

Cambios climáticos Promedio para México			
Modelo	Temperatura (°C)	Precipitación (%)	
GFDL	3.12	98	
GISS	2.92	103	
NCAR	2.38	77	
OSU	3.13	99	
UKMO	5.44	99	

Déficit de humedad / Puebla		Déficit humedad / Ciudad Obregón	
Totales anuales		Totales anuales	
Observados	706 mm	Observados	2171 mm
GFDL	918 mm	GFDL	2928 mm
GISS	882 mm	GISS	2899 mm
NCAR	844 mm	NCAR	2796 mm
OSU	768 mm	OSU	2861 mm
UKMO	821 mm	UKMO	3012 mm

Precipitación- Potencial de evaporación de Penman	Cosechas de maíz en Puebla		
	Cambio climático observado y previsto por el modelo GISS		
	Clima actual (1980)	Clima previsto (2 X CO ₂)	
Lluvia	657 mm	589 mm	
Días para madurar	155 días	115 días	
Cosecha de lluvia	3.78 Tons/Ha	2.25 Tons/Ha	
Cosecha de riego	4.27 Tons/Ha	5.78 Tons/Ha	
Contenido de irrigación	169 mm	285 mm	

Modelo de maíz Ceres-Bajo Nitrógeno

Figura 4. Cambios de temperatura para la República Mexicana, déficits de humedad en el estado de Puebla y en la región de Ciudad Obregón, a partir de modelos de circulación general (GFDL, GISS, NCAR, OSU, UKMO) y cambios en la producción de maíz, pronosticados por el modelo de producción de maíz CERES, para el caso de una duplicación en la concentración de CO₂ atmosférico. Fuente: Liverman y O'Brian (1990).