



Evidencias científicas del cambio climático debido al efecto invernadero

Juan Carlos Sanabria

Profesor titular, Departamento de Física
Universidad de los Andes



Fotografía por: Freepik.

Las evidencias científicas del cambio climático que estamos experimentando son irrefutables: desde finales del siglo XVIII, sabemos que el efecto invernadero en la atmósfera es el responsable del incremento de la temperatura en la superficie de la Tierra. Desde finales del siglo XIX, que algunos gases presentes en la atmósfera, como el dióxido de carbono y el metano, juegan un papel muy importante en el efecto invernadero. Desde finales del siglo XX, sabemos que la Tierra ha entrado en un proceso de calentamiento global; y en los últimos veinticinco años, la ciencia ha demostrado que ese calentamiento global es, en gran medida, resultado de la emisión de gases de efecto invernadero por parte del ser humano, y que contamos con una década para cambiar de curso antes de que sea muy tarde.

La primera persona en darse cuenta de que la Tierra ha experimentado profundos cambios climáticos fue Louis Agassiz, un científico suizo obsesionado con el estudio de los glaciares alpinos, quien, en 1837, presentó su teoría de la *Era del Hielo*. Cincuenta años antes, en la década de 1770, Horace Bénédict de Saussure, otro científico suizo apasionado por los Alpes y sus glaciares, había llevado a cabo detallados estudios de la temperatura en esas montañas como función de la altitud. Durante sus investigaciones, de Saussure se preguntó por qué, si el Sol le entrega calor a la Tierra durante el día, el calor no escapa durante la noche.

La respuesta debía ser que la atmósfera atrapa ese calor, ¿en qué forma? Probablemente de la misma en que atrapa calor un invernadero: la luz que penetra por el techo transparente se convierte en calor al interior, pero una fracción grande de ese calor no puede atravesar el techo de vuelta hacia fuera y queda atrapado. De esta forma, la temperatura al interior del invernadero es más alta que al exterior, aun en la noche. Para de Saussure, la Tierra, junto con su atmósfera, era un gigantesco invernadero.



Glaciar. Fotografía por: Freepik.

En la década de 1820, el gran matemático francés Joseph Fourier, conocedor de la teoría de de Saussure, se preguntó qué determina el valor de la temperatura promedio de la Tierra. La respuesta debía depender de qué tanto calor atrapa la atmósfera. Esta cantidad, a su vez, debía estar relacionada con los gases atmosféricos. Para comenzar, Fourier calculó la cantidad de calor que recibe la Tierra del Sol y, con este valor, también calculó la temperatura promedio del planeta — sin incluir el efecto de la atmósfera—. Según sus resultados, si no fuera por la atmósfera, la Tierra estaría completamente congelada. Es decir que de Saussure tenía razón: es gracias al efecto invernadero de la atmósfera que la temperatura en la superficie es mucho más alta. En seguida, Fourier intentó calcular la cantidad de calor que absorbe la atmósfera, a partir de su composición química, pero no logró llegar a ningún resultado convincente. Los conocimientos necesarios para esto aún no existían.

La gran mayoría de químicos de la época rechazaron las ideas de de Saussure y de Fourier, pues afirmaban que todos los gases se distinguen por absorber muy poco calor y, por tanto, no pueden generar el efecto invernadero requerido. En 1859, el científico británico John Tyndall — otro apasionado por los Alpes y sus glaciares— decidió poner a prueba esta afirmación al medir la absorción de calor por parte de los principales gases presentes en la atmósfera: oxígeno y nitrógeno. Sus resultados mostraron que, en efecto, esos gases absorben muy poco calor. El laboratorio de Tyndall, en el sótano de la Royal Institution en Londres, estaba iluminado con lámparas de gas. Tyndall decidió medir qué tanto calor absorbía ese gas. El resultado fue sorprendente: el gas de las lámparas absorbía una gran cantidad de calor. Ese gas era metano. Entonces procedió a hacer mediciones para otros gases que debían estar presentes en la atmósfera, aunque en pequeñas cantidades. Los resultados eran concluyentes: el vapor de agua y el dióxido de carbono también absorben mucho calor.

Estos eran los gases responsables del efecto invernadero. Pero, dado que la concentración de vapor de agua en la atmósfera es mucho mayor que la de dióxido de carbono, Tyndall consideró que este último gas no jugaba un papel relevante al momento de determinar la temperatura promedio del planeta.

Para finales del siglo XIX, las evidencias geológicas y paleontológicas confirmaron la teoría de Agassiz de la Era del Hielo. Entonces, una de las grandes preguntas científicas que surgió fue: ¿cómo pudo haber sucedido semejante cambio climático? A diferencia de Tyndall, el químico sueco Svante Arrhenius vio en el CO_2 un potencial causante. Este gas abunda en la naturaleza; se emite en grandes cantidades durante erupciones volcánicas, pero también lo absorben las plantas, los suelos y el agua oceánica, por tanto, su concentración en la atmósfera puede cambiar drásticamente de una época a otra.

Estos cambios, a su vez, pueden afectar la temperatura promedio del planeta a través del efecto invernadero. En un esfuerzo por entender los orígenes de la Era del Hielo, en 1896, Arrhenius llevó a cabo largos y tediosos cálculos para determinar la dependencia de la temperatura como función de la concentración de CO_2 en la atmósfera. Sus resultados indicaban que, si se disminuye la concentración del gas a la mitad, la temperatura puede disminuir hasta en 5°C . Por el contrario, si se dobla la concentración, la temperatura puede aumentar hasta en 6°C . Arrhenius estaba interesado en el problema del origen de la Era del Hielo, más no en los efectos nocivos de las emisiones industriales de CO_2 , dado que, en ese entonces, nadie se preocupaba por eso. Lo verdaderamente importante del trabajo de Arrhenius fue que mostró cómo la concentración de CO_2 en la atmósfera puede afectar de forma notoria la temperatura del planeta.

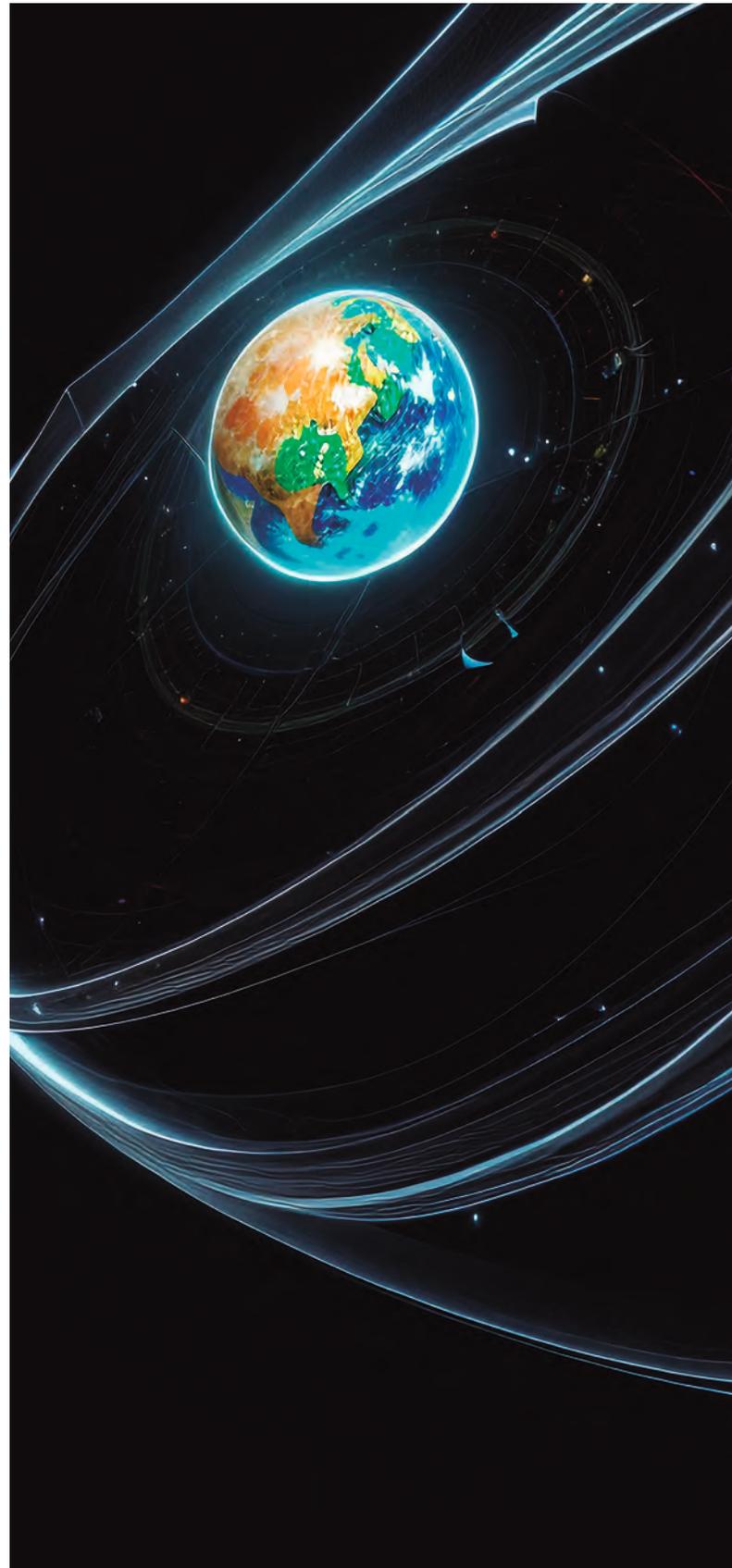


Temperatura alta. Fotografía por: Freepik.

Los ciclos de Milanković

La temperatura promedio de la Tierra depende, antes que nada, de la cantidad de energía solar que incide sobre su superficie. La Tierra, en su rotación diaria, se comporta como un trompo: precesa y nuta. El término *precesión* hace referencia a que el eje de rotación está cambiando de dirección de forma continua; este cambio completa un periodo en un lapso de tiempo conocido como el *periodo de precesión*. El periodo de precesión de la Tierra es de 26 000 años. Por su parte, el término *nutación* hace referencia a que el eje de rotación, al precesar, también ejecuta un movimiento oscilatorio: el «cabeceo» característico que observamos en el movimiento de un trompo. Este cabeceo tiene un periodo conocido como el *periodo de nutación*. El periodo de nutación de la Tierra es de unos 41 000 años. Además de estos «bamboleos» del eje de rotación de nuestro planeta, su órbita también cambia con el paso del tiempo. El nivel de deformación de la órbita elíptica de la Tierra con respecto a un círculo se conoce como la *excentricidad de la elipse*. Una excentricidad igual a cero indica que la órbita es circular, mientras que una excentricidad con un valor alto indica que la órbita está muy deformada. Debido a la interacción gravitacional de la Tierra con los demás planetas del Sistema Solar, la excentricidad de su órbita también oscila. La excentricidad de la órbita de la Tierra tiene un periodo de oscilación de unos 100 000 años.

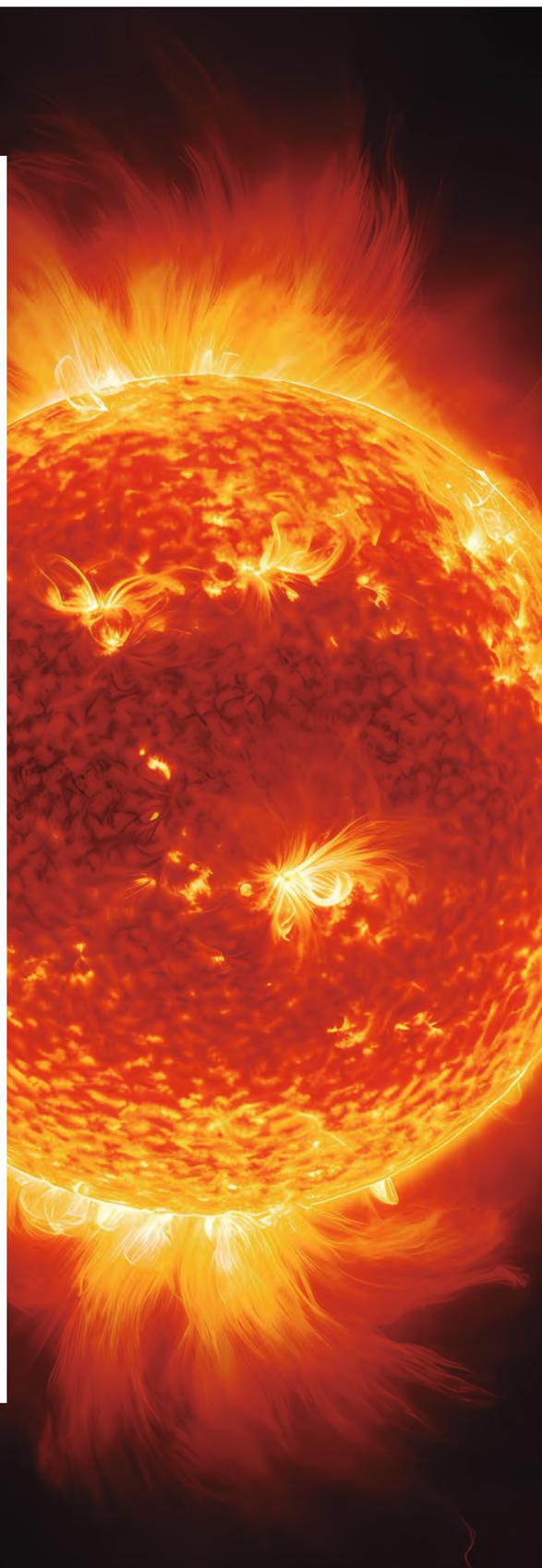
Órbita de la Tierra.
Fotografía por: Freepik.



En la década de 1920, el matemático serbio Milutin Milanković calculó el efecto que tendrían la precesión y la nutación del eje de rotación de la Tierra, además del cambio en la excentricidad de su órbita, sobre la intensidad de la radiación solar que incide en la superficie del planeta. Milanković identificó los tres periodos que mencionamos en el párrafo anterior: el periodo de precesión, el periodo de nutación y el periodo de excentricidad. Para la precesión obtuvo un ciclo de 26 000 años, para la nutación 41 000 años y para la excentricidad 100 000 años. La intensidad de la radiación solar que recibe la Tierra, al igual que la temperatura promedio en la superficie, deberían experimentar oscilaciones asociadas a estos tres ciclos. Milanković relacionó estas oscilaciones con los cambios climáticos que determinaron la ocurrencia de glaciaciones en el pasado.

Los cambios en la cantidad de radiación solar incidente sobre la Tierra, a causa de los ciclos de Milanković, son muy pequeños. Por tanto, muchos científicos descartaron el origen astronómico de las glaciaciones. Pero existía la posibilidad de que, si bien estas fluctuaciones son pequeñas, ellas hubiesen podido desatar cambios abruptos en la temperatura promedio del planeta debido al carácter inestable del clima.

Radiación solar.
Fotografía por: Freepik.





CO₂ en la atmósfera. Fotografía por: Freepik.

La curva de Keeling

Los geólogos y meteorólogos de la década de 1930 no estaban muy interesados en la acumulación de CO₂ en la atmósfera, dado que no la veían como un problema. Por el contrario, las causas de los cambios climáticos que llevaron a las glaciaciones sí constituían un área de investigación muy interesante. Durante esos años, Guy Stewart Callendar, un meteorólogo aficionado de origen británico, estuvo recolectando datos sobre el clima y sobre las emisiones de CO₂ en diferentes lugares del mundo.

En 1938, Callendar presentó sus resultados en una charla que dio ante la Royal Meteorological Society en Londres. Sus datos mostraban señales de calentamiento en varios lugares del planeta, al mismo tiempo que un aumento sostenido en la concentración de CO₂ en la atmósfera. Callendar concluyó que la actividad industrial estaba produciendo un cambio climático por medio del efecto invernadero. Pero, dado que Callendar no era un científico de renombre, sus resultados y conclusiones fueron ignorados.



John Von Neumann visitó la Universidad y dictó una serie de conferencias. De izquierda a derecha: Mario Laserna Pinzón, John Von Neumann y Henry Yerly. Fotografía por: Archivo de la Universidad de los Andes.

A comienzos de la década de 1940, en las universidades de Chicago y MIT, en Estados Unidos, se crearon programas dedicados al estudio de la meteorología. Al finalizar la Segunda Guerra Mundial, gracias al desarrollo de los computadores para realizar simulaciones para el diseño de las bombas atómicas, y métodos para descifrar los códigos secretos del enemigo, los científicos adquirieron la capacidad para llevar a cabo cálculos muy largos y complejos en un lapso de tiempo razonable. Uno de los pioneros de esta nueva tecnología, el gran matemático John von Neumann, también se había convertido en experto en dinámica de fluidos, gracias a la investigación que tuvo que realizar durante la Guerra. Computadores y dinámica de fluidos eran las dos herramientas necesarias para atacar los complejos problemas del clima planetario.

Von Neumann vio la oportunidad de usar su experiencia para construir modelos que simularan los flujos de energía a través de la atmósfera. Von Neumann formó un grupo en el que su principal colaborador fue Jule Charney, un matemático y meteorólogo proveniente de la Universidad de Chicago. Para 1949, el grupo ya estaba obteniendo resultados que simulaban en forma realista algunos aspectos de la dinámica atmosférica. Pero, tanto los computadores como los modelos numéricos eran aún muy primitivos. Además, no había suficientes datos de buena precisión con los cuales alimentar los modelos. Sin embargo, el trabajo pionero de von Neumann y Charney dio inicio al desarrollo de modelos climáticos computarizados cada vez más sofisticados.

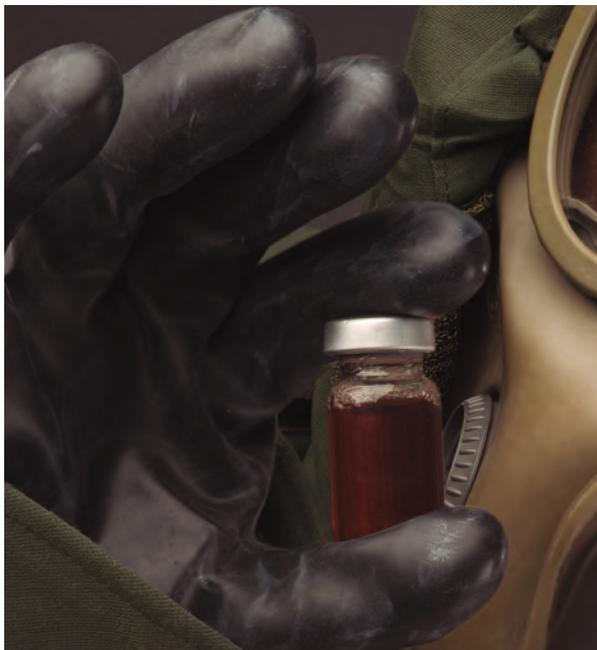


Máscara antigas.
Imagen diseñada por Adobe Firefly AI.

El otro desarrollo científico que encontró aplicación en el estudio del clima, fue el de la física nuclear. Durante la Guerra se acumularon muchos conocimientos sobre isótopos radioactivos. Además, se construyeron sofisticados instrumentos para detectar trazas minúsculas de estos isótopos. Uno de los isótopos que adquirió gran relevancia en varias áreas de la ciencia fue el Carbono-14 (C-14), es decir, un núcleo de carbono con seis protones y ocho neutrones —el isótopo de carbono más abundante en la naturaleza es el C-12, que tiene seis protones y seis neutrones—. El exceso de neutrones hace del C-14 un isótopo radioactivo.

Este isótopo se produce en la parte superior de la atmósfera debido a colisiones de rayos cósmicos con núcleos de nitrógeno. Si bien su concentración es muy pequeña, los seres vivos terminan por absorber una fracción detectable. Una vez un ser vivo muere, su cuerpo deja de absorber C-14 de la atmósfera. El C-14 que haya quedado al interior del cuerpo comienza a decaer y, por tanto, su concentración comienza a disminuir. Al medir esta concentración en restos de materia orgánica, los arqueólogos, paleontólogos y geólogos pueden determinar la edad de esos restos.

El otro isótopo que adquirió mucha importancia fue el Oxígeno-18 (O-18), es decir, un núcleo de oxígeno con ocho protones y diez neutrones —el isótopo de oxígeno más abundante en la naturaleza es el O-16, con ocho protones y ocho neutrones—. El O-18 es más pesado que el O-16 y, por tanto, es menos propenso a evaporarse; en consecuencia, su concentración en los océanos es función de la temperatura del agua superficial. La abundancia de O-18 queda grabada en el lecho submarino como resultado de la acumulación y fosilización de los caparazones de foraminíferos —un tipo especial de plancton— que terminan convirtiéndose en capas de roca caliza. La relación entre las abundancias de O-18 y de O-16 en la roca caliza permite determinar la temperatura promedio que tenía el agua oceánica cuando se formó la capa de roca en el fondo marino. Esta técnica fue ideada por Harold Urey, un profesor de la Universidad de Columbia.

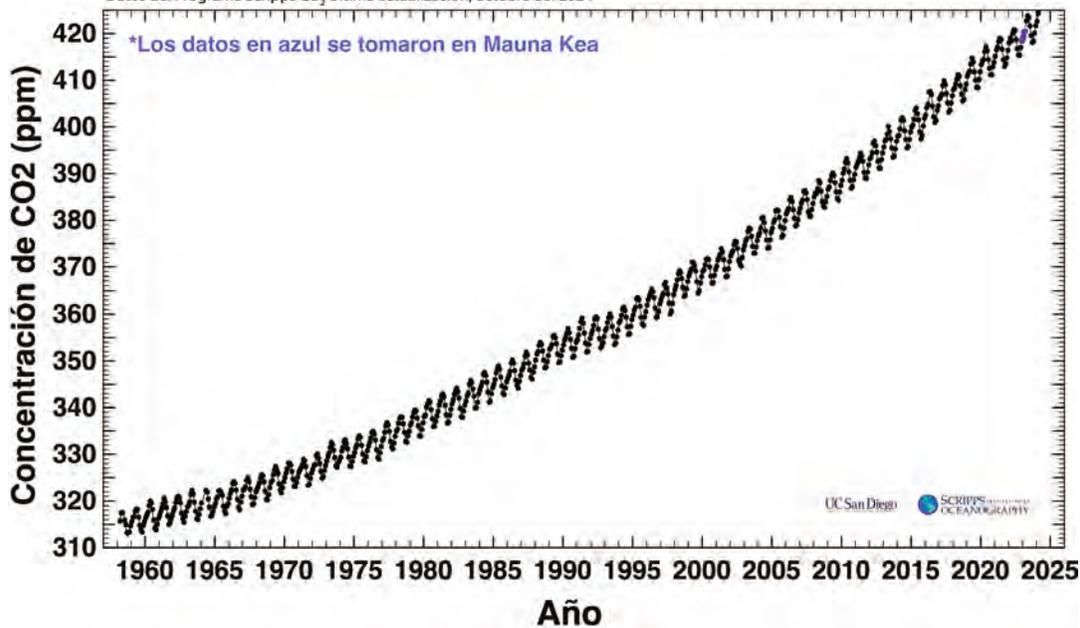


Isótopo.
Imagen diseñada por AI

Al finalizar la Guerra, en la Institución Oceanográfica Scripps, en California, el oceanógrafo Roger Revelle se interesó por el problema del CO_2 , ya que durante sus investigaciones había determinado que los océanos contienen enormes cantidades de ese gas disuelto en sus aguas. La cantidad de CO_2 en el agua marina es unas sesenta veces mayor que el de la atmósfera. Revelle concluyó que los océanos debían jugar un papel protagónico en la regulación del clima en el planeta. ¿Qué tanto CO_2 podían absorber esos océanos? Esta fue la pregunta que se propuso contestar. Una forma de lograrlo era al usar la técnica del C-14. Las emisiones industriales de CO_2 son producto de la quema de combustibles fósiles, es decir, materia orgánica que dejó de estar viva hace millones de años, por tanto, este CO_2 debe poseer una fracción de C-14 muy baja. Entonces, al medir la concentración de C-14 en el CO_2 que está disuelto en el agua oceánica se puede determinar qué tanto de ese gas tiene origen industrial. Para lograrlo, Revelle contrató a Hans Suess, uno de los expertos mundiales en el uso de la técnica del C-14, quien pronto demostró que mucho del CO_2 oceánico es producto de la quema de combustibles fósiles. Revelle, además, era consciente de que existen límites físicos y químicos a la cantidad de CO_2 que las aguas oceánicas pueden absorber; el resto debería permanecer en la atmósfera. Entonces, para avanzar en el entendimiento del problema había que medir, con gran precisión, la concentración atmosférica de ese gas. Alguien tendría que retomar el trabajo que, años atrás, había emprendido en solitario Guy Stewart Callendar.

Observatorio de Mauna Loa, Hawái*. Concentración media mensual de dióxido de carbono

Datos del Programa Scripps CO₂, Última actualización, octubre del 2024



La curva de Keeling muestra la concentración mensual promedio de dióxido de carbono en la atmósfera desde 1958 hasta 2024 [1].

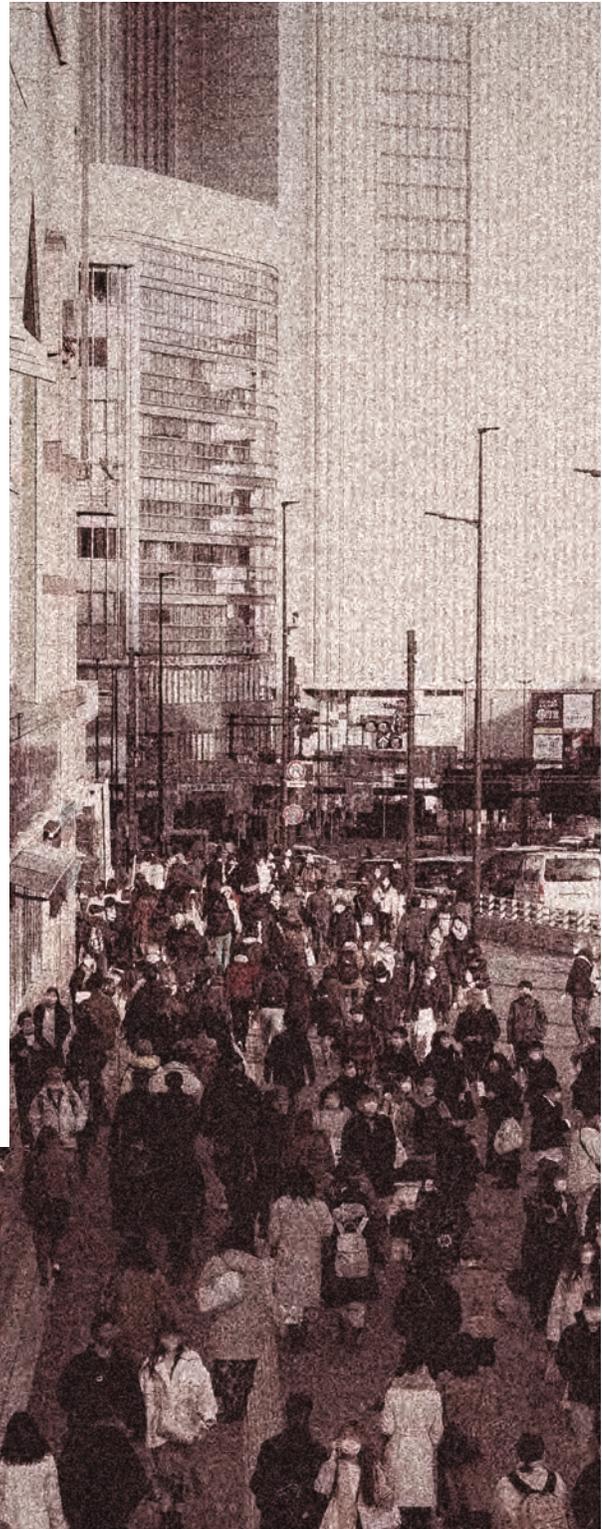
El 1.º de julio de 1957, la comunidad científica de más de sesenta países del mundo dio inicio al Año Geofísico Internacional, que se extendió hasta el 31 de diciembre de 1958. Revelle consiguió fondos para medir concentraciones de CO₂ en la atmósfera y en el agua oceánica en varios lugares del planeta. Para llevar a cabo la parte atmosférica del proyecto, Revelle contrató a Charles David Keeling, un químico y geólogo de la Universidad de Northwestern. Muy pronto Keeling se percató de que, si quería medir la concentración de CO₂ atmosférico con gran precisión, debía hacerlo en lugares muy remotos, alejados de las grandes ciudades y centros industriales; lugares como Hawái. Keeling se trasladó hasta Mauna Loa, donde comenzó a hacer sus mediciones. Los primeros resultados los publicó en 1959, y continuó haciéndolo durante muchos años. En la medida en la que fue pasando el tiempo y los datos se fueron acumulando, estos comenzaron a mostrar un aumento sostenido y rápido en la concentración de CO₂ en la atmósfera. No quedaba ninguna duda: los cálculos teóricos de Arrhenius y el análisis de datos de Callendar eran, en esencia, correctos. Entre 1959 y 1970, la concentración de CO₂ pasó de 316 ppm (partes por millón) a 325 ppm; ¡un aumento del 3 % en tan solo una década!

La gráfica que muestra cómo cambia la concentración de CO₂ atmosférico en función del tiempo y que crece en forma exponencial con el paso de los años se ha convertido en una de las imágenes icónicas asociadas al problema del cambio climático: *la curva de Keeling*.

Boulder, 1965

Para comienzos de la década de 1960, gracias, en gran medida, al trabajo de Keeling, ya estaba claro que la actividad industrial estaba causando una acumulación apreciable de CO₂ en la atmósfera. También era evidente que el aumento de la concentración de este gas debía generar un calentamiento global por medio del efecto invernadero. Ahora la pregunta era qué tanto aumenta la temperatura promedio del planeta como función del aumento en la concentración de CO₂ en la atmósfera. La respuesta a esta pregunta no era sencilla dada la complejidad del problema. El geoquímico de Caltech, Harrison Brown, se apresuró a señalar que, dado el crecimiento exponencial de la población mundial y del consumo de combustibles fósiles después de la Segunda Guerra Mundial, estas concentraciones podían llegar a niveles muy altos. Según sus cálculos, el fenómeno podría tener consecuencias catastróficas en el siglo XXI.

Fotografía por: Freepik



Poco a poco, la comunidad científica internacional se comenzó a interesar más y más en el tema. Muchas de las técnicas para estudiar el problema se fueron perfeccionando y surgieron otras muy novedosas. Por ejemplo, el estudio de granos de polen fosilizados. Estos granos se pueden extraer del lecho de los lagos o de capas de material sedimentario en tierra. Al estudiar el polen se pueden identificar las plantas que vivían en la zona en la época en la que se formó el sedimento. Esta información, a su vez, nos da claros indicios del clima que imperaba en ese momento. Al combinar esta técnica con la del C-14, se puede determinar la edad de los granos de polen y, así, aportar información valiosa para reconstruir la evolución de la temperatura planetaria.

Otra fuente importante de información fue el estudio de antiguos arrecifes de coral en aguas tropicales. En 1960, al estudiar estos arrecifes, el geoquímico de la Universidad de Columbia, Wallace Broecker, fue capaz de encontrar evidencias de cambios en el nivel del agua oceánica, asociados a la formación y derretimiento de casquetes de hielo en las zonas polares. Estos cambios debieron ser consecuencia de grandes fluctuaciones en la temperatura del planeta.

Mientras tanto, en el laboratorio de dinámica geofísica de fluidos de la Universidad de Princeton, el trabajo de construcción de modelos computacionales del clima que habían iniciado von Neumann y Charney continuó con mucho ímpetu bajo la dirección de Joseph Smagorinsky, quien reclutó al joven y hábil meteorólogo japonés Syukuro Manabe.



Arrecifes de coral. Imagen diseñada por AI.

Durante las siguientes tres décadas, Manabe iba a liderar el esfuerzo por desarrollar modelos climáticos cada vez más sofisticados. En la Universidad de California, en Los Ángeles, Yale Mintz y Akio Arakawa estaban creando un programa de investigación similar, al igual que lo hacían Warren Washington y Akira Kasahara en el Centro Nacional de Investigación Atmosférica en Boulder, Colorado. Los modelos computacionales mostraban que para finales del siglo XXI se podría esperar un incremento en la concentración de CO₂ atmosférico que, a su vez, podría causar un aumento de temperatura de más de 2°C.



Datos meteorológicos. Fotografía por: Freepik.

A comienzos de la década de 1960, en MIT, el matemático y meteorólogo Edward Lorenz fue el primero en demostrar que las ecuaciones que describen el clima exhiben soluciones de tipo caótico. Un sistema caótico suele tener estados de cuasiequilibrio y estados altamente inestables. Cuando el sistema se encuentra en un estado inestable, cualquier pequeño cambio va a generar realimentaciones positivas que lo llevan rápidamente a alguno de los estados de cuasiequilibrio. En el caso del clima planetario, los estados de cuasiequilibrio son el estado de glaciación y el estado interglaciar (más cálido). Cuando el clima se encuentra en un estado intermedio, cualquier pequeña fluctuación puede enviarlo hacia un periodo glacial o hacia un periodo cálido. De acuerdo con los cálculos de Lorenz, este cambio debía suceder en forma brusca. Si esto era así, las emisiones industriales de gases de efecto invernadero podrían generar un cambio climático drástico y rápido.

A medida que los datos y los cálculos se iban acumulando, también se iba consolidando la evidencia de un patrón repetitivo en los cambios climáticos que habían sucedido en el pasado: largas épocas de glaciaciones seguidas por épocas cálidas más breves. Los datos sugerían variaciones con periodos aproximados de 26 000 años, 40 000 años y 100 000 años: los ciclos de Milanković. Entonces, a pesar de que estos ciclos generan cambios muy pequeños en la cantidad de radiación solar que incide sobre el planeta, aparentemente ellos gobiernan la evolución del clima a gran escala. Esto solo se podía entender en términos de un comportamiento no lineal y caótico del sistema: pequeños cambios sostenidos que pueden generar enormes consecuencias.

Muchos de los actores de esta trama convergieron en Boulder en 1965 para asistir a la conferencia Causas del Cambio Climático, organizada por Roger Revelle. El evento, que representó un punto de quiebre en el tema, estuvo caracterizado por acaloradas discusiones entre científicos que tenían puntos de vista muy diferentes sobre el problema del cambio climático y sus consecuencias. Para unos, la acumulación de gases de efecto invernadero, necesariamente debía llevar a un calentamiento global. Pero otros argumentaban que había muchas razones para concluir que el planeta se dirigía hacia otra Era del Hielo: un enfriamiento global. Por ejemplo, la presencia de más vapor de agua en la atmósfera, no solo genera efecto invernadero, sino también un incremento en la nubosidad. El exceso de nubes aumenta el *albedo* del planeta, es decir, la fracción de radiación solar que se refleja de vuelta hacia el espacio exterior. El resultado es una disminución de la temperatura debido a la disminución de radiación solar en la superficie. Un fenómeno similar podía suceder con los aerosoles: partículas suspendidas en el aire, producidas por polvo, humo, esmog, y otras emisiones contaminantes de origen industrial. Ellos podían aportar al efecto invernadero, pero, a su vez, bloquear fracciones cada vez mayores de radiación solar, causando un enfriamiento en la superficie. La controversia entre calentamiento y enfriamiento se prolongó durante dos décadas e involucró a actores con diversos intereses económicos y políticos. Sin embargo, para finales de la década de 1980, quedó claro que, en la segunda mitad del siglo XX, la gran batalla entre el calor y el frío la estaba ganando el primero.

Una de las conclusiones que quedó de la conferencia de Boulder fue la necesidad de recolectar muchos más datos y de mejor calidad. Justo en ese momento, un

nuevo horizonte se estaba abriendo para la climatología: los satélites. En 1969, la NASA puso en órbita el Nimbus 3, un satélite equipado con sofisticados detectores de infrarrojo para medir la temperatura de la atmósfera a varios niveles, y con un amplio cubrimiento superficial. La meteorología entró en la era de los datos de alta precisión. Estos datos fueron cruciales para alimentar los modelos computacionales del clima, cuyo nivel de sofisticación también estaba progresando con rapidez, debido al vertiginoso aumento en la velocidad de procesamiento de los computadores.

Pero, si los satélites miran el presente del clima y los modelos computacionales el futuro, se necesita mirar al pasado para cerciorarse de que estos modelos describen bien los cambios climáticos que han de suceder. Afortunadamente, para finales de la década de 1960, ya se estaba perfeccionando una técnica para determinar, con muy buena precisión, el valor de varios parámetros climáticos en el pasado. La técnica permitía ir hacia atrás en el tiempo cientos de miles de años: la extracción de cilindros de sedimentos del suelo o del hielo de los casquetes polares. Estos cilindros de material se obtienen al taladrar a profundidades que van desde cientos de metros hasta varios kilómetros. A lo largo de los cilindros está grabado y codificado el pasado climático del planeta. Los cilindros de hielo más largos nos han dado información que se remonta hasta hace 800 000 años. De su estudio ha surgido, con claridad, una correlación muy fuerte entre la temperatura global, la concentración de CO₂ atmosférico y el nivel de los mares. Cuando la temperatura aumenta o disminuye, la concentración de CO₂ y el nivel de los mares también lo hacen.

Satélite cerca a la Tierra. Imagen por: Freepik.



Metano

A comienzos de la década de 1970, en la NASA, Veerabhadran Ramanathan se concentró en el estudio del impacto ambiental de los gases emitidos como parte de la actividad industrial. Ramanathan demostró que los clorofluorocarbonos (CFC), además de destruir el ozono, son gases de efecto invernadero. Pronto descubrió que el metano (CH_4) y nitratos como el N_2O también lo son. De hecho, el metano es un gas de efecto invernadero unas veinte veces más potente que el CO_2 , ya que absorbe radiación infrarroja justo en el rango de longitudes de onda en el que la Tierra emite la mayoría de su radiación, y en el que otros gases absorben muy poco: *la ventana del infrarrojo*.

La superficie de la Tierra, al tener una temperatura promedio de unos 13°C , emite radiación electromagnética en el infrarrojo. Si bien esta radiación tiene un amplio rango de longitudes de onda, su máximo se encuentra alrededor de los 10 micrómetros. Sin embargo, es justo alrededor de este valor que la atmósfera absorbe muy poca radiación. Entonces, es en este rango que mucho del calor que emite la superficie escapa hacia el espacio exterior: es como una ventana entreabierta que «refresca» al planeta. La acumulación de metano en la atmósfera puede «cerrar esta ventana». Es por esto que el metano es tan peligroso en términos de calentamiento global.

Entonces, en asuntos climáticos, además del CO_2 está el metano. Pero, en realidad existen más de treinta otros gases que también aportan al efecto invernadero; juntos son casi tan importantes como los dos primeros. Además, el CO_2 y el metano tienen algo especial, y es que los producen los seres vivos, y hacen parte de la naturaleza. Muchos de los demás gases, por el contrario, son producidos exclusivamente por la industria moderna. Sin embargo, el CO_2 y el metano también son producidos por la industria: el CO_2 como resultado de la combustión y el metano como combustible. Por lo tanto, estos dos gases tienden a acumularse en la atmósfera en mayor cantidad que los demás. En este sentido, son más importantes.

El metano es producido por diversas bacterias en pantanos y en otros cuerpos de agua similares, por ejemplo, en los arrozales. También se produce como resultado de la digestión de los rumiantes, en especial, de las vacas. Lo anterior no sería un problema de no ser porque, hoy en día, el ser humano consume enormes cantidades de arroz y de carne de res. Por tanto, la cantidad de metano emitida por estas actividades agrarias resulta ser significativa. La deforestación y la creación de nuevas zonas de cultivo también hace que proliferen bacterias productoras de metano en los suelos. Por último, están las fugas de gas natural que, si bien suelen ser pequeñas, dado el enorme crecimiento de esta industria a partir de la década de 1970, se han incrementado con el paso de los años.

En 1981 se presentaron los primeros estudios sobre la acumulación de metano en la atmósfera. Para 1988, las mediciones mostraron que la concentración de este gas había incrementado en un 11 % durante esa década; más rápido que la de CO₂.

Pero, en asuntos de calentamiento global causado por metano, el mayor riesgo proviene del permahielo de las tundras de Siberia y de Canadá, y de los hidratos de metano acumulados en el fondo de los océanos. El permahielo es el suelo de las regiones muy frías y secas del planeta, que permanece congelado todo el año —y que ha estado así desde hace cientos de miles de años—: en él están atrapadas enormes cantidades de metano. Si el permahielo de las tundras se derrite, debido al calentamiento global, puede liberar una cantidad de metano tal que cause un enorme desastre ambiental.

El IPCC

Mientras todos estos descubrimientos sucedían, Charles David Keeling continuaba realizando sus mediciones en Mauna Loa. La curva de Keeling era cada vez más elocuente e incontrovertible. Para 1990, la concentración de CO₂ atmosférico ya había superado las 350 ppm: un aumento de 10 % en tres décadas. Las mediciones de temperatura, realizadas a lo largo de todo el planeta, indicaban un aumento promedio de 0,4°C durante el mismo periodo. Para ese momento, los avances en la capacidad de procesamiento de los computadores habían llevado los modelos climáticos a un nivel de sofisticación tal que los hacían muy confiables. Estos modelos predecían que, de continuar con el mismo nivel de emisiones de gases de efecto invernadero de finales del siglo XX, para finales del siglo XXI el aumento de temperatura sería de más de 2 °C.



Burbujas. Fotografía por: Freepik.

Este nivel de calentamiento global desataría cambios catastróficos para la biosfera del planeta, con graves consecuencias para el ser humano.

En 1988, Naciones Unidas creó el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por su sigla en inglés). Este grupo está conformado por miembros de laboratorios nacionales, centros meteorológicos, agencias científicas, entre otros. Pero también hacen parte de él representantes de los gobiernos nacionales. Por tanto, siempre ha sido una mezcla entre ciencia y política. Si bien, en sus acciones, los argumentos científicos han primado, los diversos intereses nacionales también han jugado un papel. Para la década de 1990, el IPCC ya se había convertido en la principal fuente de información sobre los problemas climáticos para los gobiernos y para el público en general.

La principal labor de este comité es la de publicar regularmente reportes sobre el estado del clima mundial y proyecciones hacia el futuro, al recurrir a los principales expertos mundiales. Desde la creación del IPCC en 1988, estos expertos trabajaron intensamente para publicar el primer reporte en 1990, titulado «Cambio climático, evaluación científica del IPCC». Este documento afirmaba que la evidencia científica indicaba que el planeta se está calentando. Pero, en el documento también se subrayaba que tomaría una década de estudios determinar si ese cambio era natural o resultado de la actividad industrial.

El segundo reporte del IPCC, publicado en 1995, ya afirmaba que existía suficiente evidencia de una influencia humana en el cambio climático que estaba experimentando el planeta. El documento también afirmaba que, en caso de doblar la concentración de CO₂ atmosférico, la temperatura promedio aumentaría entre 1,5°C y 4,5°C. Pero, los científicos no estaban en capacidad de predecir cuándo sucedería esto, ya que ello dependía de la evolución de la economía mundial y de los niveles de emisiones de gases de efecto invernadero.

Los reportes del IPCC se convirtieron en una especie de metrónomo para la investigación en temas ambientales. Los científicos comenzaron a enfocar sus esfuerzos en responder las preguntas y cuestionamientos que surgían de estos reportes y en preparar nuevos resultados para el siguiente reporte. Durante la década de 1990 mucho del esfuerzo se concentró en mejorar los modelos climáticos, al incluir descripciones más realistas de procesos como la formación de nubes, la circulación de los vientos, el derretimiento de glaciares, el efecto de los aerosoles suspendidos en la atmósfera, el impacto de la deforestación y de la actividad agrícola, entre otros.

En el tercer reporte del IPCC, publicado en el 2001, se afirmaba abiertamente que el planeta se estaba calentando como resultado de la emisión de gases de efecto invernadero y que la temperatura promedio estaba aumentando a una tasa sin precedentes en los últimos diez mil años. Si no se tomaban acciones tendientes a limitar este cambio climático, para finales del siglo la temperatura promedio podría aumentar 5,8°C y el nivel del agua oceánica podría aumentar medio metro o más.

Durante la década del 2000, mucha de la investigación se concentró en evaluar el impacto del cambio climático a todo nivel. En el cuarto reporte del IPCC, publicado en el 2007, se afirmaba que era prácticamente imposible evitar un aumento menor a 1,5°C durante el siglo XXI. Además, se mostraba cómo los primeros efectos importantes del calentamiento global ya estaban sucediendo: olas de calor, sequías, lluvias torrenciales, huracanes de mayor intensidad, incendios forestales más frecuentes y extendidos, incremento en la acidez del agua oceánica, muerte de muchos corales, pestes y enfermedades tropicales que migran hacia otras latitudes, entre otros.

En el quinto informe del IPCC, publicado en el 2014, se afirmaba que el cambio climático ya estaba teniendo un impacto generalizado en los sistemas humanos y naturales. Hasta el momento, la atmósfera y los océanos se han calentado, los volúmenes de nieve y de hielo han disminuido y el nivel de los mares se ha elevado. También se afirmaba que, para contener el cambio climático, era necesario reducir, en forma sustancial y sostenida, las emisiones de gases de efecto invernadero. En términos humanos, el cambio climático iba a afectar primero, y en mayor medida, a las poblaciones más vulnerables. Muchas de las opciones existentes para limitar el cambio climático y mitigar sus



Industria. Fotografía por: Freepik.

efectos contribuirían de forma efectiva, pero ninguna de ellas bastaría por sí sola. Para que las estrategias de control y mitigación fuesen efectivas, se necesitarían decisiones políticas adecuadas y cooperación a todas las escalas. El informe también advertía que, cuanto mayor fuese el cambio climático, mayores serían los desafíos: había que actuar pronto.

El reporte del IPCC del 2018 se concentró en describir las acciones que hay que tomar para que el aumento en la temperatura promedio del planeta a finales del siglo no supere los 1,5°C. Entre las medidas que hay que implementar antes del 2050 están: hacer que el 80% de la energía eléctrica sea generada a partir de fuentes renovables; lograr que las emisiones de CO₂ se reduzcan a cero; reducir la emisión de cualquier otro

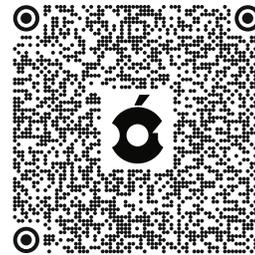
gas de efecto invernadero, especialmente la de metano; reducir la demanda de comida y aumentar la eficiencia con la que se produce; aumentar la inversión en el desarrollo de tecnologías que no emitan CO₂; remover y almacenar carbono atmosférico; y, por último, lograr que, tanto los gobiernos, como el sector privado y los individuos, participen en forma activa en la consecución de los objetivos planteados.

Sexto informe de IPCC

En el sexto reporte del IPCC, publicado el 20 de marzo del 2023, se presenta un panorama muy concreto. Según este documento, los estudios científicos demuestran, con absoluta certidumbre, que durante el último siglo la temperatura promedio de la Tierra aumentó en 1,1 °C, mientras que en la última década las emisiones de gases de efecto invernadero aumentaron en un 12%. El calentamiento global ha generado cambios muy rápidos y evidentes por toda la biosfera. Las medidas que han adoptado los gobiernos para mitigar los efectos de estos cambios, y para adaptar a la sociedad a la nueva realidad, no han sido suficientes. Con los actuales niveles de emisión de CO₂ y de CH₄, durante las próximas dos décadas el incremento de la temperatura promedio del planeta podría alcanzar 1,5 °C, lo que generaría desastres climáticos mucho mayores que los que ya estamos experimentando, con consecuencias económicas y sociales sin precedentes. Muchos de estos efectos podrían revertirse al disminuir en forma drástica las emisiones de gases de efecto invernadero, pero esto debe suceder muy pronto o, de lo contrario, la probabilidad de que se desencadenen cambios abruptos e irreversibles aumenta. En la medida en que se deje pasar el tiempo, las acciones que se tomen dejarán de ser efectivas, por tanto, es necesario disminuir las emisiones de CO₂ durante esta década, con el objetivo de alcanzar un nivel cero de emisiones en el 2050. Las políticas que adopten, o dejen de adoptar, los gobiernos de todos los países del mundo durante los próximos años van a determinar el futuro de la biosfera durante los próximos milenios.

Se necesitan acciones rápidas y de largo alcance que involucren a toda la sociedad. Lo más urgente que tenemos que hacer es reducir drásticamente las emisiones de CO₂ y de otros gases de efecto invernadero. Estas emisiones, en gran medida, son producto de la quema de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica o en usos finales como el transporte, la industria, y otras aplicaciones. Entonces, nos encontramos ante la perspectiva de tener que reemplazar estos combustibles por fuentes alternativas de energía. En resumen: al ser humano se le agotó el tiempo. Contamos con una década para cambiar de curso.

Comparte este artículo:



Referencias

[1] Scripps CO2 Program [Internet]. «Monthly Average Atmospheric Carbon Dioxide Concentration Versus Time at Mauna Loa Observatory» [actualizado 2024 oct.; citado 2024 oct.]. Disponible en: https://scrippsco2.ucsd.edu/graphics_gallery/mauna_loa_record/mauna_loa_record.html

Industria petrolera. Fotografía por Freepik.

