

CAMBIO CLIMÁTICO Y ADAPTACIÓN

Las evaluaciones científicas internacionales llevadas a cabo por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático indican que el “calentamiento global” continuará en aumento. Este artículo ofrece una visión general de cómo las actividades humanas están cambiando la composición atmosférica, cómo estos cambios cambian el clima, y cómo se proyecta la alteración del clima en este siglo XXI por la continua dependencia del carbón, petróleo y gas natural. Es poco probable que se produzcan grandes reducciones en el uso del carbón para fines de siglo, lo que significa que nosotros y el medio ambiente tendremos que adaptarnos a las condiciones cambiantes del clima.



Las actividades humanas están cambiando la composición atmosférica

Cuando el carbón, el petróleo y el gas natural son quemados para impulsar las actividades de la sociedad, el carbono que ha sido vinculado químicamente a esas sustancias, a menudo por decenas de cientos de miles de años, reacciona con el oxígeno de la atmósfera creando dióxido de carbono (CO_2) que es liberado en la atmósfera. Las emisiones presentes de estos carburantes, los cuales son llamados en conjunto combustibles fósiles ya que resultan de los restos fosilizados de plantas y animales muertos hace tiempo, están agregando alrededor de 7 billones de toneladas de carbono (GtC) anuales a la atmósfera. La reducción de los bosques y la merma de los suelos fértiles, si no es compensada con la reforestación, también tiene como resultado emisión de CO_2 a la atmósfera: las emisiones globales netas se estiman en alrededor de 1 a 2 GtC por año. Como referencia, los 8 a 9 GtC agregados a la atmósfera cada año debido a estas actividades son aproximadamente equivalentes a la cantidad total de carbono que toma reverdecer el Hemisferio Norte cada primavera y cada verano.

Con la población mundial acercándose a los 7 billones de habitantes, cada año cada persona en el mundo es responsable, en promedio, de alrededor de 1 tonelada de carbón (tC) por combustión de combustible fósil, y de cerca de 0.2 tC por la deforestación y agricultura no sostenible. Sin embargo, el uso real varía mucho dependiendo del estándar de vida y del nivel de



actividad industrial. Donde hay menos automóviles, menos edificios con aire acondicionado, menos industrias, como es el caso de muchas naciones en vías de desarrollo, las emisiones per cápita de carbono derivado de la biomasa pueden ser relativamente altas debido a que la madera es usada como un combustible importante.

En contraste, los países industrializados caracterizados por extensos sistemas de transporte por aire y por tierra, casas, negocios e industrias, el uso per cápita puede ser varias veces más alto que el promedio global. Las variaciones entre países y regiones surgen debido a una cantidad de factores, incluyendo el clima, la disponibilidad de hidroeléctricas y otros recursos renovables de energía, la cantidad de actividades industriales y mineras, la exportación e importación de energía y de productos que requieren energía, y el grado de esfuerzo del Estado para mejorar la eficiencia de energía de edificios, equipos y transporte. Mientras la

reforestación de bosques y un incrementado consumo de CO_2 por las plantas —a medida que la concentración de CO_2 aumenta— conlleva la eliminación de carbono; esta absorción principalmente compensa la anterior eliminación de cubierta de vegetación y solo contrarresta marginalmente las emisiones a largo plazo debidas al uso de combustible fósil.

Con cada nación dependiendo de otras para alimentos, energía, productos de manufactura local e importada, la energía que se requiere para desarrollar las sociedades se produce alrededor del mundo, por lo que estamos todos atrapados en este problema. Puesto que tanto la población como el estándar de vida promedio siguen aumentando, el continuar dependiendo de combustibles fósiles para impulsar el desarrollo económico global va a traer mayores emisiones globales en el futuro. Si, por ejemplo, la población mundial crece en un 50% para fines del siglo, y en promedio cada uno de los 10 billones de habitantes

depende de los combustibles fósiles en aproximadamente la mitad de la cantidad de energía utilizada por los europeos (o alrededor de un tercio de la utilizada por los norteamericanos), las emisiones anuales per cápita serán alrededor de 2 toneladas de carbono de combustible fósil; multiplicando estos valores, las emisiones totales serán aproximadamente 20 billones de toneladas de carbono al año, o alrededor de 3 veces más de los niveles actuales.

Mirando al mundo desde el espacio, uno debe preguntarse qué podríamos hacer los humanos para provocar un cambio significativo. Pero la atmósfera es muy delgada y el CO₂ es una molécula bastante estable. Combinando las observaciones de la red global de muestreo establecida en 1957 y las mediciones de tiempos anteriores, utilizando aire “viejo” atrapado en burbujas dentro de núcleos de hielo, los datos indican que las actividades humanas han aumentado la concentración de CO₂ en más de un 30%, de aproximadamente 0.028% a cerca de 0.038% de la atmósfera de la Tierra desde el inicio de la Revolución Industrial, hace aproximadamente 250 años. Multiplicando el cambio en la concentración por el volumen de la atmósfera se obtiene que la carga de CO₂ atmosférico ha aumentado de alrededor de 550 GtC a aproximadamente 750 GtC en este periodo. Este aumento en la carga es aproximadamente la mitad del valor estimado de emisiones totales de carbono por el uso de combustible fósil y por la deforestación de los pocos siglos pasados.

Pero, ¿por qué hay un aumento si tanto la vegetación global como los océanos pueden absorber gran-

des cantidades de CO₂ cada año? Particularmente, la fotosíntesis le permite a las plantas de tierra convertir el CO₂ en materia vegetal, eliminando cada año alrededor de 120 GtC de la atmósfera, y la mezcla de aire con agua del océano le permite a los océanos tomar y disolver en sus aguas aproximadamente 90 GtC anuales. Si esto fuera una transferencia de una sola vía, la adición de los humanos de aproximadamente 8 a 9 GtC por año parecería tener poca influencia. Sin embargo, la biosfera y los océanos que acumulan todo ese carbono cada año, lo devuelven todo mediante otros procesos. En el caso particular de los océanos, esto ocurre como resultado de la disolución en las tibias aguas del océano, y las plantas, como resultado de su propia respiración y descomposición, así como por la reconversión de material vegetal a CO₂ por humanos y otros animales. Una persona comiendo es una buena analogía: mientras la persona coma y elimine la misma cantidad, su peso permanecerá igual, pero si aumenta la ingesta con un dulce de coco cada día, al pasar el tiempo el peso comenzará a aumentar, especialmente si, como esta ocurriendo en el mundo real, estamos haciendo lo equivalente a comer más y más dulces.

El aumento de la concentración de CO₂ y otros gases de efecto invernadero ejerce una influencia de calentamiento

Si el Sol fuera la única fuente de energía para la superficie de la Tierra, las temperaturas de nuestro

planeta serían en promedio inferiores a cero: altas por las condiciones de la luz solar y muy bajas en la noche. Afortunadamente, en adición a todo el nitrógeno (N₂) y oxígeno (O₂), la atmósfera de la Tierra consta de un número de gases que están hechos de tres o más átomos en vez de sólo dos. Estos gases adicionales, incluyendo el vapor de agua (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), ozono (O₃), metano (CH₄) y otros, son llamados *gases de efecto invernadero* porque son mayormente transparentes a la radiación solar entrante, pero son capaces de absorber una gran parte de la radiación caliente en dirección ascendente emitida por la superficie de la Tierra para equilibrar la absorción de la luz del sol por la superficie. La energía ascendente que estos gases absorben calientan la atmósfera, y esto hace que la atmósfera, como cualquier cuerpo que se calienta, irradie su calor hacia fuera. Lo que es importante es que los gases de efecto invernadero irradian calor tanto hacia arriba como hacia abajo, con la radiación ascendente sujeta a un más absorción antes de perderse en el espacio. La radiación de calor descendente se añade al efecto de la energía solar y hace que la superficie de la Tierra se caliente. Con la Tierra ahora más caliente, se emite más radiación ascendente, que es absorbida por los gases de efecto invernadero e irradiada de vuelta hacia la superficie, ocasionando aun más calentamiento. Adicionalmente, mientras más caliente es la superficie de la Tierra, más agua se evapora en la atmósfera, y así más efectivo es el conjunto de gases de efecto invernadero en calentar la superficie. Para cuando todas



las cosas alcanzan el equilibrio, y promediando tanto el día como la noche, el promedio global de la energía de calor irradiada desde la atmósfera hacia la superficie (lo cual es básicamente luz solar reciclada) suministrará aproximadamente el doble de la energía para calentar la superficie que la luz solar entrante. De esta manera, así como el techo de un invernadero limita la pérdida de energía, los ga-

ses de efecto invernadero atrapan el calor para calentar la Tierra.

La comparación de los climas de Venus y Marte con el de la Tierra evidencia que a mayor cantidad de gases de efecto invernadero que un planeta tiene, más altas serán las temperaturas de su superficie. Los datos obtenidos de los núcleos de hielo, que se remontan a alrededor de 650,000 años de la historia de la Tierra, arrojan la misma indicación. Por lo tanto, no hay duda de

que el incremento de la concentración de CO_2 atmosférico (y las actividades humanas también están incrementando la concentración atmosférica de CH_4 y de otros gases de efecto invernadero) tenderá a ocasionar que la Tierra se caliente.

El clima de la Tierra se está calentando, en concordancia con los cambios en la composición de la atmósfera

Aunque ha tomado más de un siglo, el calentamiento de cerca de 1°C como resultado de las actividades humanas se ha hecho ahora evidente en los datos de la temperatura promedio global. Las mediciones de la temperatura han sido tomadas en barcos de crucero y en una red global de estaciones durante aproximadamente los últimos 150 años, y cuando los datos son analizados para ver si han ocurrido cambios, virtualmente todas las localidades del mundo muestran un calentamiento inusual y relativamente fuerte, especialmente en los últimos 50 años. Antes de ese tiempo, hay indicios de cambio, pero la mayoría de las fluctuaciones aparentan ser el resultado del enfriamiento que se produce por pocos años luego de importantes erupciones volcánicas, calentamiento y enfriamiento por pequeñas variaciones en la intensidad solar y los eventos de El Niño y La Niña en el Océano Pacífico ecuatorial, y de los efectos de enfriamiento de la neblina cargada de sulfato (por ejemplo, partículas de SO_4) que se crearon como resultado de la emisión de dióxido de sulfuro (SO_2) como un subproducto de la combustión de carbón. Cuidado-



Los análisis que investigan el patrón característico de los cambios de cada factor (la “huella dactilar” de cada influencia) ponen en claro que la influencia de calentamiento de las actividades humanas ahora dominan los cambios que estuvieron ocurriendo debido a las variaciones naturales de luz solar y erupciones volcánicas.

Una amplia variedad de otros indicadores confirman que el mundo se está calentando. Las temperaturas debajo de la tierra y de la superficie de los océanos están aumentando, y el calentamiento del océano está expandiendo las aguas de los océanos y contribuyendo al incremento del nivel del mar. La cubierta de nieve, el permahielo y el hielo de los mares se están derritiendo. Los glaciares montañosos de los trópicos y las grandes altitudes se están derritiendo a una velocidad sin precedentes, y las aguas resultantes de ese deshielo se han agregado a los océanos. Las plantas y las especies animales están cambiando sus zonas, si pueden, y cuando no pueden, como los co-

rales, están experimentando condiciones mucho más estresantes. Tomando todos estos indicadores, está claro que los humanos se han convertido ahora en el principal factor que afecta el clima, y nuestra influencia está creciendo.

El cambio climático se intensificará en el siglo XXI

La combustión de carbón, petróleo y gas natural, que está actualmente suministrando aproximadamente el 80% de la energía mundial, es crítica para la supervivencia de los habitantes del mundo y no hay manera de que el mundo pueda simplemente dejar de utilizar combustibles fósiles. Debido a que el carbono es una parte muy importante de esos combustibles, no hay una manera fácil de eliminarlo, como se ha hecho con el SO_2 para limitar la lluvia ácida, la reducción de visibilidad y daños ecológicos. Aun con importantes compromisos de todas las naciones del mundo, cambiar a otras fuentes de energía tomaría muchas décadas. En este

tiempo habrá considerables emisiones de CO_2 y si el mundo tarda mucho en comenzar a hacer esta conversión, habrá emisiones mucho más grandes y, por ende, más calentamiento.

Las evaluaciones periódicas que realiza el IPCC sobre el conocimiento científico de los cambios climáticos han preparado las proyecciones para el siglo XXI generadas por los modelos climáticos desarrollados por grupos de investigación de todo el mundo. Los modelos climáticos —que son construcciones teóricas del mundo hechas por computadora— son la única herramienta cuantitativa disponible para realizar la proyección de 100 años. Se han considerado otras propuestas, pero el mundo es muy complejo para reconstruirlo como un modelo de laboratorio y la historia de la Tierra no suministra ningún ejemplo de la extensión y tasa de cambio de la composición atmosférica de la cual puedan bosquejarse analogías cercanas. Los científicos pueden probar, y lo hacen, la capacidad de sus modelos para representar las variaciones climáticas en el pasado remoto y en el reciente, y sobre períodos cortos y largos, pero la complejidad del sistema de la Tierra es tal que aún existe un gran rango en los valores estimados de cómo las condiciones climáticas típicas (las cuales son luego promediadas en conjunto para generar un valor estimado de los cambios en las condiciones climáticas) diferirán del presente para un rango de proyecciones diferentes de cómo cambiarán la población mundial, el desarrollo económico y las tecnologías energéticas.

Reuniendo todos los resultados del modelo, el Tercer Informe de

Evaluación del IPCC del año 2001 proyectó que el aumento de la temperatura promedio en todo el mundo oscilaría alrededor de 2 a 4.5°C, con los cambios siendo más grandes que el promedio de medio a alto, sobre tierra, en invierno más que en el verano, y en la noche más que durante el día. Las razones para esto incluyen la influencia de calentamiento extra que resulta del deshielo de la nieve en altas latitudes

bién han comenzado a indicar que los huracanes y tifones son más intensos –esto es porque la presión central está bajando, la velocidad de los picos de viento está aumentando y, para potenciar estos cambios, más energía está siendo derivada de la condensación del vapor de agua que está presente como resultado de temperaturas de los océanos mas calientes, por lo que las precipitaciones están siendo

(con menos nieve se refleja menos radiación solar), la mayor capacidad de calentamiento de los océanos que la tierra, y el potencial de evaporación (donde hay humedad presente) para limitar el incremento de la temperatura. Aunque el pequeño aumento de la temperatura en latitudes bajas suena atractivo, el aumento de la concentración de vapor de agua en la atmósfera que lo acompaña haría que el pequeño aumento de la temperatura se sintiera relativamente incómodo (eso es, que se proyecta que el índice de incomodidad aumente más que la temperatura).

El aumento de la concentración de vapor de agua en la atmósfera también se prevé que ocasione lluvias más intensas, y los datos en muchos países indican que, efectivamente, tales cambios ya están ocurriendo. Las tendencias tam-

mas intensas–. El hecho de que los cambios observados son mayores y están ocurriendo más rápidamente que lo proyectado por los modelos es actualmente el foco de intensivas investigaciones científicas.

El cambio climático global concierne a la República Dominicana

Lo que estos cambios van a significar para la República Dominicana dependerá tanto de lo que está pasando globalmente como de lo que pasa localmente. El aumento en sí mismo de la concentración de CO₂ tenderá a hacer mas ácidos los océanos, creando un problema para todas las regiones tropicales porque será mas difícil para los organismos de los océanos generar conchas y corales. El cambio climático global afectará la economía mundial, las capacidades de compra y pro-

ducción de socios comerciales, la extensión y propagación de enfermedades infecciosas y vectoriales, y la vitalidad de los recursos naturales que la República Dominicana comparte con el mundo (por ejemplo, aves y ballenas migratorias). Adicionalmente, el cambio climático global afectará las circulaciones a gran escala de la atmósfera y los océanos (y la fuerza y ajuste de la zona intertropical de convergencia), las características de los huracanes, y la tasa de deshielo de los glaciares montañosos y las capas de hielo polar, las cuales, junto al calentamiento de los océanos, acelerarán la tasa de incremento del nivel del mar a aproximadamente 0.3 a 0.5 metros por siglo, o más, si la capa de hielo de Groenlandia comienza a deteriorarse rápidamente.

Los expertos locales tendrán que traducir los cambios proyectados en el comportamiento promedio de la atmósfera global a los cambios más probables en el clima local. Hacer esto requerirá detalladas consideraciones de las condiciones geográficas locales que requerirán ser comparadas con las variaciones estacionales del clima de la región y las condiciones oceánicas, incluyendo la traducción de los valores estimados de los aumentos del nivel del mar a su manifestación local. Utilizando valores estimados locales de cambios en, por ejemplo, la duración, intensidad y cambio de los patrones de precipitación, el probable impacto en recursos acuáticos, producción agrícola, turismo y otras actividades puede ser evaluado, determinando a lo largo del tiempo el potencial de adaptación local y de ajustes para limitar las consecuencias negativas y aprovechar



las nuevas oportunidades, todo en el contexto de cómo nuestros competidores están siendo afectados y cómo están respondiendo. Como guía general, lo que todos necesitamos ir haciendo es contabilizar los cambios climáticos que se están produciendo en todas nuestras planificaciones a largo plazo, considerando no sólo las proyecciones más probables, sino tomando en cuenta también el posible incremento o decrecimiento en el riesgo si las condiciones resultan peores o mejores de lo que está admitido como dudas en las declaraciones científicas. Mediante esfuerzos interactivos entre la comunidad científica local y aquellos que se dedican a analizar el clima y la temperatura, la información acerca de potenciales cambios puede refinarse hasta lograr un tipo de información capaz de ayudar a que la toma de decisiones sea informada y con previsión.

Se necesitarán muchas décadas para estabilizar el clima

Reconociendo la importancia de actuar para limitar los cambios climáticos, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático fue aprobada

en la Cumbre de la Tierra de Río en 1992, y virtualmente adoptada por todas las naciones del mundo. Establece como su objetivo “la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que preveniría interferencia antropogénica peligrosa con el sistema climático”. El Protocolo de Kyoto, que entró en efecto en el año 2005, es un pequeño primer paso en esta dirección. Para realmente estabilizar el clima global se requerirá mucho más, básicamente cortar las emisiones de CO₂ hasta aproximadamente el 80% por debajo de los niveles actuales, al mismo tiempo que se suministra energía suficiente para un estándar de vida en aumento para una también creciente población mundial. Aún después de una transformación tan espectacular del sistema global de energía, los cambios climáticos continuarán por varias décadas y el aumento del nivel del mar continuará por muchos siglos, haciendo absolutamente esencial que, en interés de la situación que enfrentarán nuestros nietos y sus nietos, el mundo no solamente comience ahora a tomar medidas realmente serias para limitar las emisiones, sino también incorporar

debidamente las consideraciones de los cambios venideros en el clima y nivel del mar en la toma de decisiones públicas y privadas acerca de infraestructuras futuras, producción y educación.

Michael C. MacCracken es un ingeniero en Ciencias Aplicadas por la universidad de California Davis/Livermore. Es director del Programa de Cambio Climático del Climate Institute de Washington, actual presidente de la Asociación Internacional de Meteorología y Ciencias Atmosféricas, y forma parte del Grupo de Expertos en Cambio Climático y Desarrollo Sostenible creado bajo los auspicios de la sociedad científica Sigma Xi para la Comisión de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas. Es miembro de la American Association for the Advancement of Science, la American Meteorological Society, la Oceanography Society, y la American Geophysical Union. Es autor y coautor de numerosas obras relativas al cambio climático, entre ellas coeditor del Volumen 1 de la *Encyclopedia of Global and Environmental Change*.

Información adicional

1. Los informes del IPCC pueden ser consultados en Internet en <http://www.ipcc.ch/pub/pub.htm>.
2. El portal del Instituto del Clima <http://www.climate.org> incluye una compilación de muchos informes acerca de los probables impactos de cambios climáticos (ver <http://www.climate.org/CI/index.shtml>).
3. El portal de la Iniciativa de las Islas sobre Energía Global Sustentable suministra información acerca de los pasos a tomar para ayudar a limitar el ritmo de los cambios climáticos (ver <http://www.gseii.org/gseii/>).