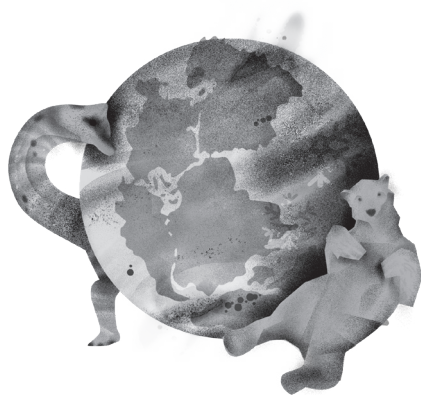


# HISTORIA CLIMÁTICA DE LA TIERRA



# HISTORIA CLIMÁTICA DE LA TIERRA

Calentamientos globales  
y glaciaciones del pasado  
para entender el clima  
presente y futuro

SERGIO GONZÁLEZ

 Planeta

# Capítulo 1.

## Clima y sistema climático

### Promedios

Probablemente todos estamos de alguna forma familiarizados con el concepto de media o promedio. Es común que para determinar si una persona reprueba o aprueba una asignatura se determine el promedio de los controles o pruebas que la persona realizó a lo largo del curso. El promedio vendría siendo un valor que representa el rendimiento general del alumno. Pues bien, el concepto de clima está muy asociado al promedio. Se entiende como el clima de una zona a la condición meteorológica media de ese lugar o territorio. Cuando tenemos mediciones de variables como temperatura, precipitación, presión atmosférica, humedad, nubosidad, radiación, velocidad y/o dirección del viento, determinamos la condición meteorológica media calculando el promedio de las mediciones de cada una de las variables. Por un acuerdo entre científicos dedicados a las ciencias del clima se estimó que es adecuado contar con al menos treinta años de datos para calcular un promedio que pueda ser utilizado para describir un clima. A ese promedio de al menos treinta años lo llamamos promedio climatológico. El campo de ciencia que se encarga de calcular esos promedios se llama climatología. Por ejemplo, la ciudad de Viña del Mar presenta un promedio climatológico de temperatura cercano a los 15 °C. Esta afirmación suele decirse de forma más resumida de la siguiente forma: “La temperatura media de Viña del Mar es de 15 °C”. Una temperatura media de 15 °C no quiere decir que siempre la temperatura sea de 15 °C o que la temperatura media de cada día sea 15 °C<sup>8</sup>. Por ejemplo, en verano la ciudad de Viña del Mar experimenta temperaturas superiores a 30 °C con una media del día mayor a 20 °C. Durante el invierno, la ciudad experimenta temperaturas inferiores a 7 u 8 °C un par de horas al día. Por tanto, debe entenderse la temperatura media como un valor que representa a las temperaturas de esa zona o

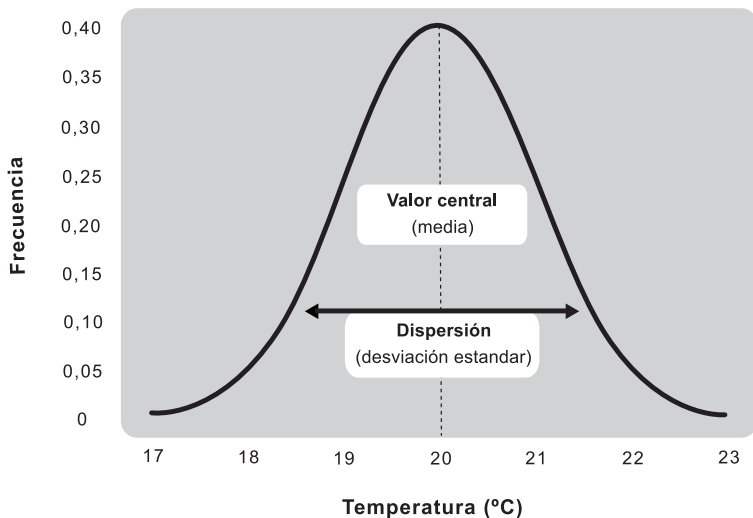
---

8 La temperatura media del día es la temperatura que se calcula promediando las temperaturas que se miden a lo largo de un día.

territorio. Seguramente se estará usted preguntando por qué buscamos que un valor represente las temperaturas de una zona. ¿No sería más adecuado trabajar y observar todos los datos que tenemos para describir el clima de un lugar? Dos simples razones pueden ayudarnos a entender por qué se calculan métricas que representan un conjunto de datos. La primera de ellas está relacionada con el volumen de información; si trabajamos o mostramos todos los valores que tenemos medidos, nuestro cerebro no sería capaz de retener toda esa información. Hagamos el siguiente cálculo: si anoto la temperatura cada hora del día tengo 24 datos de temperatura en un día. En un año tendré 8760 datos y en treinta años acumularé 262 800 datos. Este es un enorme volumen de información, por lo que necesitamos comprimirla para poder recordarla. Así, al promediar mediciones estamos comprimiendo la información. Por lo tanto, cuando decimos que la ciudad de Viña del Mar tiene una temperatura media de 15 °C estamos indicándole a nuestro cerebro que puede suponer que los valores de temperatura giran en torno a ese valor, algunos grados más, algunos grados menos. Pero ¿cuántos grados más o menos? Las temperaturas en Viña del Mar podrían moverse muy cerca de los 15 °C o muy lejos de los 15 °C. Es claro que el promedio es insuficiente para hacernos una idea del clima de un lugar, por lo que necesitamos también contar con los valores mínimos, máximos y la desviación estándar, una medida de la lejanía o distancia de los datos respecto del promedio. El otro motivo por el que los científicos calculamos métricas para representar un conjunto de datos es que esto nos permite realizar ejercicios de comparación fácilmente. Por ejemplo, la temperatura media medida en Eureka, una estación científica ubicada en Nunavut, Canadá, es de -18.8 °C. Comparando esta temperatura con la temperatura media de Viña del Mar nos queda muy claro que si queremos ir a Eureka tendremos que ir bien abrigados.

Debe destacarse que el promedio es una buena medida para representar un conjunto de datos si este conjunto tiene una distribución de datos en forma de campana de Gauss, es decir, los datos que están concentrados en torno a un valor central variando hacia los extremos de forma simétrica (**Figura 2**). Cuando la distribución de los datos no es simétrica el promedio no refleja donde están concentrados los datos. En este caso se recomienda calcular otros parámetros que muestren de mejor forma los datos (podemos calcular la mediana). La elección de la mejor forma de representar los datos del clima también es parte de lo que analiza la climatología. Por lo tanto, la climatología no solo calcula promedios sino que su objetivo es obtener

la condición general de la atmósfera utilizando métricas que representen de forma adecuada al conjunto de datos disponibles. Junto con lo anterior, la climatología analiza cómo los datos se desvían o difieren del promedio.



**Figura 2.** Gráfico de la distribución normal o de campana de Gauss de un grupo de datos medidos. Para este ejemplo son datos de temperatura. En el gráfico, la línea curva indica la frecuencia de datos, es decir, la cantidad de datos que tienen un cierto valor dividido por la suma total de datos medidos. Por ejemplo, cerca del 40 % de los datos (0,40) tiene un valor que es cercano a 20 °C (puede ser un poco mayor o un poco menor a ese valor). En el gráfico también podemos ver que la mayoría de los datos tienen un valor entre los 18 °C y los 22 °C. Entre los 17-18 °C y los 22-23 °C hay pocos datos (la curva está cerca del 0). Decimos por tanto que la mayoría de los datos están concentrados entre los 18 °C y los 22 °C. El ancho de la campana de Gauss (representada en la línea con doble flecha) se denomina dispersión, y una medida de la dispersión es la desviación estándar. Si la línea doble flecha fuese más larga (la campana más ancha), los datos estarían más dispersos. Si la línea fuese más corta (la campana más delgada), los datos estarían más concentrados. Si tomáramos todos los datos medidos y calculamos el promedio de todos ellos obtenemos la media. En una distribución normal la media está ubicada en el centro, es decir, la media es el valor central o mediana. Por lo tanto, cuando nos entregan la media de un grupo de datos es muy importante saber cómo es la forma de la distribución de los datos. Si los datos tienen una distribución normal sabremos que esa media es el valor central y que el resto de los datos fluctúan alrededor de este valor de forma simétrica, es decir, la cantidad de datos que hay bajo la media es la misma que la cantidad de datos que hay sobre la media.

Sobre la base de los valores calculados por la climatología solemos calificar o clasificar los climas utilizando conceptos como frío, cálido, templado, lluvioso, tropical, seco, árido, etcétera. Ahora bien, ¿qué sucede cuando queremos calificar cómo era el clima de un lugar hace miles o millones de años? Es evidente que hace miles de años no se contaba con termómetros para medir la temperatura o pluviómetros para medir la precipitación. En

esos casos la metodología de cálculo de promedios no se puede utilizar. Los científicos han tenido que crear múltiples técnicas para obtener alguna noción, aproximación o visión general de cómo era el clima del pasado y esto es algo que no se debe olvidar de ahora en adelante. Gran parte de este libro aborda aspectos relacionados con climas del pasado de los cuales no se tienen datos meteorológicos medidos por instrumentos. Por tanto, los valores de temperatura o precipitación asociados a estos climas son datos que se obtuvieron por técnicas indirectas, es decir, técnicas que observan características de rocas, hielos, sedimentos o árboles que se han mantenido miles o millones de años. Estas características son indicadores de un rango en que fluctuaban los valores de una variable meteorológica, no son valores exactos. No obstante, la idea mental que debemos hacernos es la misma que se describió anteriormente; si hablamos de que hace un millón de años la temperatura era de 13 °C debemos interpretar este número como algo similar a un valor medio en torno al cual fluctuaban los valores de temperatura. Este valor nos permite comparar si el clima era más cálido o frío en un periodo pasado o futuro.

## TIEMPO Y CLIMA

Ya sabemos que si estudiamos la condición media de la atmósfera en un lugar por un periodo de treinta años o más conoceremos el clima de ese lugar. Ahora bien, si nos focalizamos en lo que sucedió un día puntual, por ejemplo, el 14 de mayo de 2016, dejamos de hablar de clima y utilizamos las palabras tiempo atmosférico o simplemente tiempo. El campo de la ciencia que estudia los fenómenos físicos de la atmósfera que ocurren en un periodo de tiempo corto (días a un par de semanas) se llama meteorología. A modo de resumen, si queremos tener una idea de cómo es el clima de una zona debiésemos vivir muchos años en esa zona. Lo que experimentamos día a día, a cada hora, es el tiempo. Así, la diferencia entre la ciencia climática y la ciencia meteorológica radica en la escala temporal del análisis. A pesar de esta separación, tiempo y clima están relacionados; una sucesión de tiempos produce el clima y el clima a su vez es el escenario base en torno al cual el tiempo atmosférico fluctúa.

## CLIMA PLANETARIO

En la actualidad el planeta Tierra tiene zonas de clima templado, seco y frío, seco y cálido, frío y húmedo y tropical. Hacia la línea del ecuador se concentran los climas más cálidos y húmedos. Hacia los polos el clima se vuelve más seco y frío. Este patrón general se ve modificado por otros factores como la influencia oceánica, la topografía y la vegetación, produciendo una variedad de climas. Ahora bien, imaginemos que viajamos a otro planeta y en ese planeta existen seres inteligentes que nos preguntan cuál es el clima de nuestro planeta. Por supuesto, podemos darles una larga explicación de los diferentes tipos de clima que existen en la Tierra y especificarles la temperatura media de cada uno de los climas. Si tenemos poco tiempo y solo queremos darles una idea general acerca del clima terrestre podemos decirles el valor de la temperatura media del planeta. ¿Cómo se calcula este valor? Para empezar, se necesitan datos de temperatura de a lo menos treinta años de muchos puntos de la superficie del planeta. Cada serie de datos de temperatura debe tener la misma cantidad de datos y debe ser representativa de igual superficie. Para entender esto último pensemos lo siguiente: si vamos a calcular la temperatura media del planeta y tenemos más mediciones del hemisferio norte de la Tierra, el promedio obtenido representará más lo que sucede en el hemisferio norte que lo que sucede en todo el planeta. Para evitar este problema, se debe utilizar igual cantidad de puntos de medición para cada zona o región del planeta, para que ninguna zona sea más representada que otra. Teniendo esta precaución, la temperatura media del planeta se calcula promediando los promedios climatológicos de la temperatura de muchos puntos de la Tierra espaciados de forma regular (grilla). En otras palabras, se calculan dos promedios; un promedio temporal y un promedio espacial. Cuando realizamos este procedimiento obtenemos que en la actualidad la temperatura media del planeta es cercana a los 15 °C. Este dato es útil porque podemos usarlo para compararlo con la temperatura media del planeta Marte (-55 °C) o con la temperatura media de la Tierra en el Cretácico hace 80 millones de años (23-25 °C). Así, la temperatura media del planeta es un valor que refleja una condición general del planeta (más cálido o frío) sin olvidar que es un valor calculado a partir de datos de temperatura que pueden ser muy diferentes a ese promedio.

## SISTEMA CLIMÁTICO

Ya sea si queremos entender el clima global o el clima de alguna región específica del planeta, debemos tener presente que el clima es el resultado de las interacciones que se establecen entre muchos elementos. Todos estos elementos y sus interacciones se agrupan en un concepto llamado sistema climático. Así, el clima es básicamente el resultado de las interacciones que se producen en el sistema climático. Pero ¿qué es un sistema?

Un sistema es una entidad que está constituida por múltiples partes, elementos o componentes que interactúan entre sí. En particular, el sistema climático es una entidad que agrupa varios componentes que interactúan y que al funcionar definen o determinan eso que llamamos clima. Como el sistema climático está ubicado en el espaciotiempo, cambia a medida que avanza el tiempo y puede ser susceptible de mediciones. Estas características permiten decir que el sistema climático es un sistema físico. Existen varios tipos de sistemas físicos los cuales se diferencian en la existencia o no de intercambio de energía o materia con los alrededores del sistema. Los alrededores del sistema es todo aquello que no es parte del sistema. El sistema climático es uno físico, que se asume o se aproxima a un sistema cerrado, es decir, es uno que no intercambia materia con el entorno, pero sí intercambia energía. La verdad es que la atmósfera sí intercambia un poco de materia con el espacio exterior; sin embargo, este intercambio es mínimo y por lo tanto podemos asumir que es un sistema cerrado.

## COMPONENTES DEL SISTEMA CLIMÁTICO

El sistema climático está constituido por cinco componentes que interactúan de diversas formas entre sí. Estos componentes son la atmósfera, la hidrósfera, la criósfera, la litósfera y la biósfera.

La atmósfera es una capa gaseosa que rodea a un planeta. En el caso de la Tierra, esta capa está constituida principalmente por nitrógeno y oxígeno. En menor cantidad también podemos encontrar agua ( $H_2O$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), gases nobles y ozono ( $O_3$ ). La importancia de la composición química de la atmósfera en el clima planetario se analizará a lo largo de todo el libro. A modo de resumen, podemos decir que la interacción que se produce entre los gases de la atmósfera y la radiación que llega desde el Sol es fundamental para



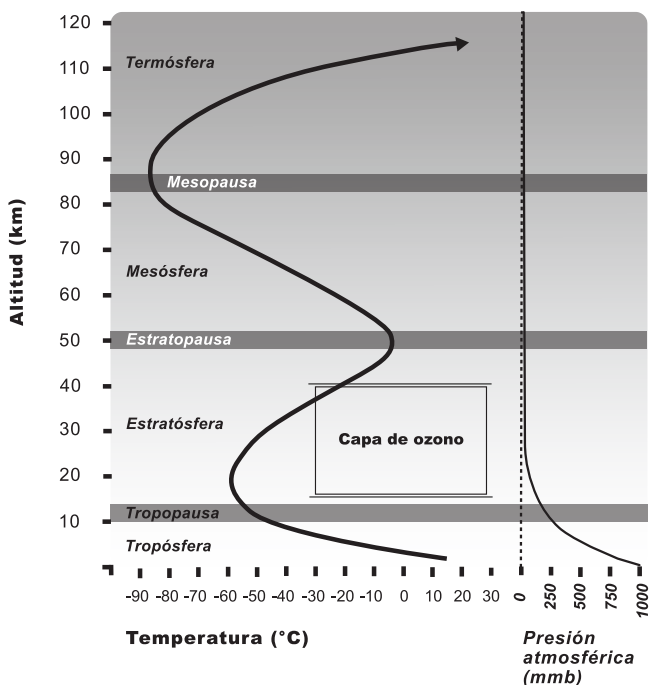
que el planeta sea un lugar habitable. Esta interacción implica la absorción<sup>9</sup>, emisión y dispersión<sup>10</sup> de radiación por parte de las moléculas. Un aspecto fundamental de la composición atmosférica de la Tierra es que la cantidad de los distintos gases va variando en el tiempo por una multiplicidad de procesos que incorporan gases a la atmósfera o retiran gases desde la atmósfera. Los componentes de la Tierra que incorporan gases a la atmósfera se denominan fuentes y los componentes que retiran gases de la atmósfera y los almacenan se denominan sumideros. Otro aspecto de la atmósfera es que esta es una capa gaseosa que se mueve, es decir, es un fluido. El movimiento de la atmósfera no solo implica transporte de masa entre un punto y otro, sino que también involucra transporte de energía. A nivel planetario, el movimiento de las masas de aire en la atmósfera recibe el nombre de circulación atmosférica y juega un papel decisivo para entender el clima del planeta.

La atmósfera puede dividirse esquemáticamente en cinco capas, cada una con propiedades y características diferentes (**Figura 3**). La capa más superficial y donde ocurren principalmente los fenómenos meteorológicos y climáticos es la tropósfera. La tropósfera posee el 90 % de la masa de la atmósfera, por lo que es ahí donde están la mayoría de los gases que tienen importancia en los procesos climáticos. La capa que está sobre la tropósfera se denomina estratósfera y es ahí donde se ubica la capa de ozono. Cuando compuestos químicos o partículas logran llegar a la estratósfera pueden permanecer mucho tiempo en ella debido a que el intercambio de materia entre la tropósfera y estratósfera es limitado. Las erupciones volcánicas constituyen uno de los fenómenos que pueden lanzar compuestos y partículas a la estratósfera.

---

9 La absorción es un proceso mediante el cual la energía en forma de radiación es capturada por moléculas y átomos.

10 La radiación solar está compuesta por radiación con distintas longitudes de onda. Esta radiación viaja en línea recta, pero los gases y partículas en la atmósfera pueden separar o descomponer la radiación solar según sus longitudes de onda y cambiar la dirección de (desviar) esta radiación. Esto es lo que se denomina dispersión.



**Figura 3.** Capas de la atmósfera. La unidad de la presión atmosférica es el milibar. Los fenómenos climáticos ocurren en la tropósfera. El 90 % de la masa de la atmósfera está en la tropósfera.

La hidrósfera es el componente del sistema climático que agrupa a todas las masas de agua líquida de la superficie del planeta, es decir, océanos, mares, lagos, lagunas, ríos y acuíferos. El agua juega un papel trascendental en el clima debido a que esta molécula posee una alta capacidad calorífica, es decir, se necesita mucha energía para elevar en 1 °C la temperatura del agua. Por esta gran capacidad de retener energía, los océanos son un reservorio de energía que permite regular la temperatura del planeta. Además, disueltos en los océanos y cuerpos de agua, existen muchos elementos o moléculas que fluyen desde o hacia la atmósfera y la litósfera. Estos intercambios de moléculas entre los componentes del sistema climático tienen efectos en el clima planetario.

Al igual que la atmósfera, la hidrósfera también es escenario de movimientos de masa. En los océanos los movimientos de grandes cantidades de agua se llaman corrientes marinas. Junto con transportar masa, una corriente marina también transporta energía. A nivel planetario, el patrón de movimiento de los océanos recibe el nombre de circulación oceánica y junto con la circulación atmosférica llevan a cabo el transporte de

calor entre los distintos puntos del planeta. En el libro mencionaremos algunas corrientes marinas importantes al explicar la ocurrencia de ciertos eventos o procesos climáticos.

La criósfera constituye el componente del sistema climático que agrupa a todas las masas de agua en estado sólido incluyendo hielos<sup>11</sup>, glaciares y permafrost<sup>12</sup>. La red de interacciones que hay entre la criósfera y los demás componentes del sistema climático es múltiple. Para empezar, los hielos son reservorios de agua que si se derritieran implicarían un cambio en el nivel del mar y modificaciones en parámetros físicos de las aguas como su densidad y salinidad. Los cambios en la densidad y salinidad del agua de mar pueden afectar a las corrientes marinas, lo que a su vez trae consecuencias a nivel climático. Los hielos, además, participan en el balance de energía del planeta (algo que se abordará un poco más adelante), puesto que las superficies blancas reflejan al espacio parte de la energía que llega desde el Sol. Este fenómeno se denomina efecto del albedo del hielo y a lo largo del libro veremos que juega un papel significativo en la historia climática de la Tierra.

La litósfera es la capa superficial sólida de la Tierra y está formada por la corteza y la zona más externa del manto (**Figura 4**). Su espesor va de 50 a 100 km y su límite externo es la superficie del planeta. La litósfera está fragmentada en una serie de placas tectónicas en cuyos bordes se concentran fenómenos geológicos como el magmatismo (incluido el vulcanismo), la sismicidad y la orogénesis<sup>13</sup>. Los procesos que ocurren

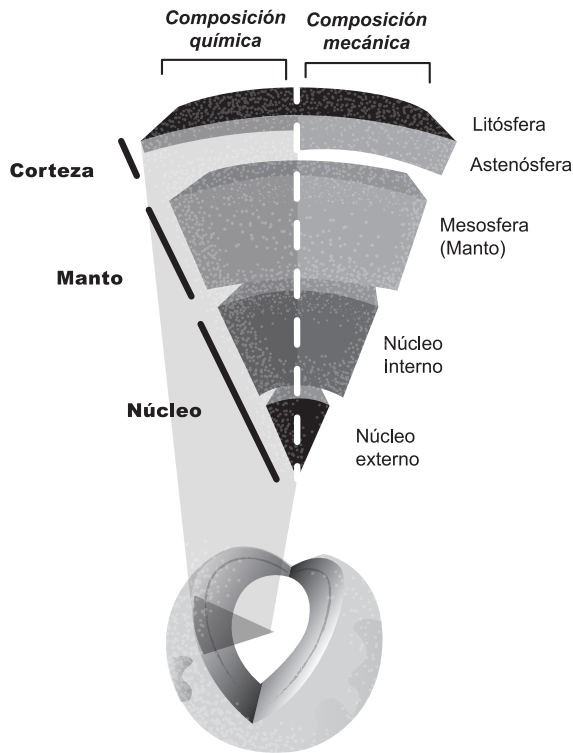
---

11 Existen diversas denominaciones para las distintas extensiones de hielo. El hielo que se forma sobre el océano recibe el nombre de banquisa. La banquisa suele ser delgada y como mucho alcanza los veinte metros de espesor, siendo su espesor promedio cercano a tres metros. La banquisa es distinta al iceberg, pues este último es hielo que se desprende de una plataforma de hielo. Una plataforma de hielo es una gran plataforma flotante que se forma donde un glaciar o capa de hielo fluye hacia la costa. En otras palabras, los icebergs son porciones de glaciares que se encontraban en el continente y que al desprenderse quedan en el océano. Respecto de los hielos continentales, cuando su extensión es inferior a 50.000 km<sup>2</sup> reciben el nombre de campos de hielo. Cuando los hielos continentales tienen una extensión superior a 50.000 km<sup>2</sup> se habla de casquete glaciar, manto de hielo o *indlandsis*. En la actualidad existen dos casquetes glaciares: el casquete de Groenlandia y el casquete de la Antártida. Finalmente, los hielos sobre montaña reciben el nombre de glaciar de montaña.

12 El permafrost es una capa de suelo que está permanentemente congelada.

13 La orogénesis es el proceso geológico por el cual una zona alargada de la corteza terrestre se acorta y engrosa por deformación y fracturación como consecuencia de esfuerzos tectónicos laterales. Este es el mecanismo principal de formación de las cordilleras en los continentes.

en la litósfera, como la desintegración de las rocas y el vulcanismo, tienen efectos en la composición química de la hidrósfera y la atmósfera. Además, el movimiento de las placas tectónicas y la orogénesis tienen efectos a largo plazo en la circulación atmosférica y oceánica. En el libro se expondrán diversas hipótesis acerca de cómo el movimiento de las placas tectónicas y los procesos de la litósfera jugaron un papel relevante en cambios climáticos.



**Figura 4.** Capas internas del planeta Tierra. Figura basada en la imagen 16 del libro *Vida: su origen, evolución y búsqueda en el espacio*.

Finalmente, la biósfera hace referencia a todos los seres vivos del planeta. Podría no ser tan obvio cómo la presencia de los seres vivos juega un rol en el clima, así que me esforzaré en ilustrar muchas interacciones que hay entre los seres vivos y el clima. Los seres vivos modificamos la composición química de la hidrósfera, litósfera y atmósfera generando elementos o moléculas que son liberadas al ambiente. Además,

contribuimos a acelerar procesos físicos que tienen importancia en el clima. Por ejemplo, las raíces de las plantas contribuyen a desintegrar físicamente rocas, proceso que contribuye a que el  $\text{CO}_2$  pase desde el aire hacia las rocas (veremos cómo ocurre este proceso).

Cada uno de los cinco componentes del sistema climático posee sus propios campos de estudio, razón por la cual la ciencia del clima constituye una disciplina que integra conocimiento de áreas específicas muy diferentes entre sí. En este sentido, el presente libro no deja de ser un reto al intentar condensar información científica que proviene de distintos campos. Para contribuir a una lectura fácil asumí que el lector no proviene de ningún campo específico de la ciencia y, por lo tanto, me tomé el tiempo de ir explicando o definiendo conceptos básicos de los distintos campos de las ciencias naturales a medida que van apareciendo en el relato de la historia del clima de la Tierra.

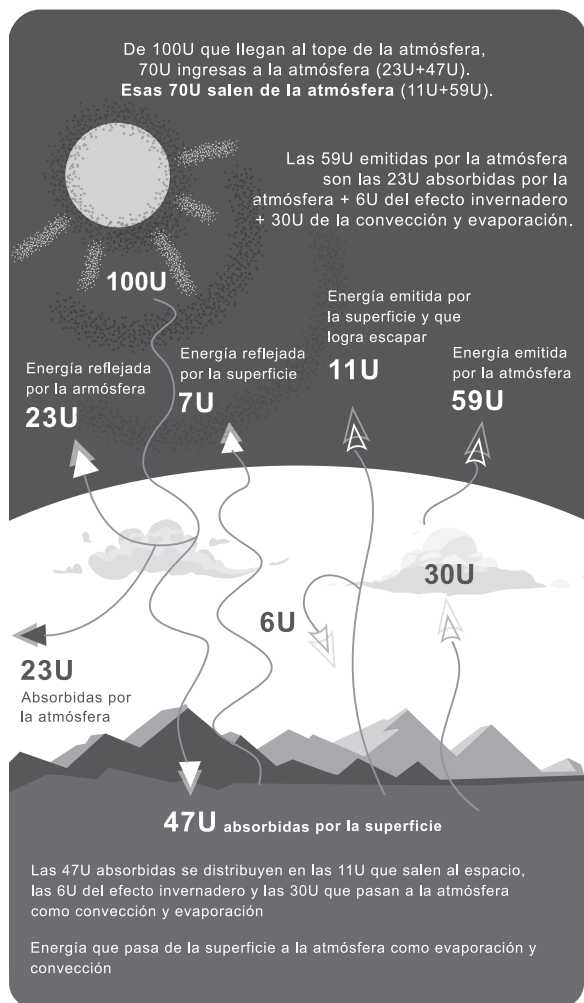
## CONTABILIDAD ENERGÉTICA

Ya sabemos que la interacción de los cinco componentes del sistema climático mencionados produce el clima, es decir, la condición media de la atmósfera. Pero ¿cómo exactamente el sistema climático produce el clima?

La condición general o media de la atmósfera en una región o lugar depende de la cantidad de energía que tenga la atmósfera en ese lugar. Por ejemplo, en las zonas tropicales la atmósfera tiene más energía y eso produce que las temperaturas sean más elevadas en esas regiones. La cantidad de energía de que dispone la atmósfera en un lugar es resultado de un balance de energía en el cual intervienen distintos procesos que distribuyen o reparten energía entre los cinco componentes del sistema climático. En este sentido, debemos entender al sistema climático como una gran máquina que distribuye energía entre los distintos puntos de la superficie del planeta. Esa distribución o repartición de energía hace que la atmósfera de un lugar en específico se quede con una cierta fracción de energía y es esa fracción la que genera el clima de ese lugar. A nivel planetario, el fenómeno es el mismo. La Tierra recibe energía y esta se reparte entre los distintos componentes del sistema climático conduciendo a que la atmósfera se quede con una fracción de energía. Esta fracción produce el clima del planeta.

Si el sistema climático es una máquina que reparte energía, ¿cuál es la fuente de esa energía? La energía del sistema climático proviene de dos

fuentes: el Sol y el interior de la Tierra. La mayor parte de la energía que mueve el sistema climático proviene del Sol y nos llega principalmente en forma de radiación ultravioleta y radiación visible<sup>14</sup>. La cantidad de radiación que llega desde el Sol a la parte más alta de la atmósfera no es la misma que llega a la superficie terrestre. En su viaje a través de la atmósfera la radiación solar va interactuando con las moléculas y átomos que constituyen la atmósfera.



**Figura 5.** Balance final de energía del sistema climático. La energía que ingresa es igual a la que sale del planeta.

14 La radiación ultravioleta es radiación electromagnética cuya longitud de onda está comprendida aproximadamente entre los 100 nm y los 400 nm. En tanto, radiación visible es radiación electromagnética que puede ser percibida por el ojo humano. La longitud de onda de esta radiación está comprendida entre 400 y 700 nm aproximadamente.

En la actualidad, de 100 unidades de radiación que ingresan a la atmósfera (**Figura 5**), 23 son devueltas al espacio por las nubes y por las moléculas de la atmósfera (23 %) y 7 unidades son reflejadas por la superficie devolviéndolas al espacio (7 %). El porcentaje de la radiación incidente que refleja una superficie se llama albedo y su valor es muy diferente según el tipo de superficie. Las superficies blancas reflejan mucha más radiación que las superficies oscuras. Seguramente si usted ha visitado glaciares, superficies con nieve o un salar blanco (como el salar de Uyuni en Bolivia) le habrán recomendado que utilice lentes para protegerse de la intensa radiación que reflejan estas superficies. Los científicos han estimado que si la superficie del planeta estuviese cubierta un 100 % por océano la temperatura media de la Tierra sería cercana a 27 °C como consecuencia de un albedo superficial menor. Por el contrario, si el planeta estuviese cubierto de hielo, la temperatura media de la Tierra descendería a valores inferiores a -40 °C.

Continuando con la contabilidad, de las 70 unidades que no fueron devueltas al espacio por la atmósfera y por la superficie (no olvide el 70), 23 son absorbidas por la atmósfera (23 %) y 47 unidades son absorbidas por la superficie (47 %). La energía que es absorbida por la superficie no queda retenida en ella y una parte (17 unidades) es reemitida por ella, pero no como radiación ultravioleta y visible sino como infrarroja<sup>15</sup>. No todas esas 17 unidades escapan al espacio; solo 11 lo logran. Las 6 unidades restantes son absorbidas por moléculas de la atmósfera y devueltas hacia la superficie. Este proceso se denomina efecto invernadero y los gases que tienen la capacidad de absorber la radiación infrarroja que emite la Tierra se llaman gases de efecto invernadero. El efecto invernadero se produce porque moléculas como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), ozono (O<sub>3</sub>), vapor de agua y algunas moléculas orgánicas tienen la capacidad de capturar radiación infrarroja. Cuando se produce esta captura las moléculas pasan a un estado excitado, es decir, pasan de un nivel de menos energía a un nivel de más energía que se manifiesta en que esa molécula cambia de posición (rota) o vibra más (se mueve más). Un estado excitado es un estado inestable, por lo que la molécula reemite la energía absorbida y vuelve a su estado no excitado. Este efecto es muy importante para que la Tierra sea un lugar habitable pues, sin los gases de efecto invernadero, la temperatura

---

15 La radiación infrarroja es radiación electromagnética menos energética que la radiación ultravioleta y visible y cuya longitud de onda está comprendida entre 700 nm y 1 mm.

promedio del planeta sería de  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ , no los agradables  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  que experimentamos hoy.

Las 30 unidades de energía que no fueron emitidas por la superficie como radiación infrarroja pasan a la atmósfera por medio de los procesos físicos de convección<sup>16</sup> y evaporación<sup>17</sup>. De esta forma, la atmósfera se queda con estas 30 unidades, que junto a las 23 unidades absorbidas antes de que la radiación llegara a la superficie y las 6 unidades del efecto invernadero, suman un total de 59 unidades (59 %). Estas 59 unidades son reemitidas por la atmósfera y las nubes hacia el espacio como radiación infrarroja. Así, si sumamos lo que emite la atmósfera (59) y la superficie (11) al espacio nos da un total de 70 unidades, valor similar a la cantidad de energía que fue absorbida por la atmósfera y la superficie inicialmente. En otras palabras, toda la energía que ingresa al sistema Tierra-atmósfera es devuelta o reemitida al espacio. Si la energía que ingresa al planeta no fuese devuelta al espacio, el planeta estaría siempre calentándose. Por el contrario, si el planeta devolviese más energía de lo que está recibiendo, la Tierra estaría en un proceso de enfriamiento permanente.

El balance o contabilidad de energía que acabamos de ver se conoce como balance energético del sistema Tierra-atmósfera y depende de los distintos componentes del sistema climático. Si los componentes del sistema climático experimentan variaciones, cambian los porcentajes en que la energía es absorbida, reflejada o emitida hasta alcanzar un nuevo equilibrio. El equilibrio es el estado en que toda la energía que ingresa al sistema sale de él. En la actualidad, es el ser humano el que está alterando esta contabilidad energética, incorporando más gases de efecto invernadero a la atmósfera. Una mayor cantidad de gases de efecto invernadero implica que más unidades de energía quedan en la atmósfera. Una parte de esta energía pasa a ser calor sensible<sup>18</sup>, es decir, temperatura. Otra parte de esa energía se transforma en movimiento. Por lo tanto, una atmósfera con más energía es una atmósfera más cálida, pero además una atmósfera con más energía disponible para los procesos que ocurren en ella.

---

16 La convección es el transporte de calor por medio del movimiento del fluido.

17 La evaporación es un proceso físico que consiste en el paso lento y gradual de un estado líquido hacia un estado gaseoso.

18 El calor sensible es la energía que suministrada a un cuerpo o un objeto hace que aumente su temperatura sin afectar su estructura molecular y, por lo tanto, no provoca un cambio de fase o cambio de estado.



La historia del clima de la Tierra que usted conocerá por medio de este libro es el relato de cómo ha cambiado el balance energético del sistema Tierra-atmósfera y las consecuencias que tuvieron esos cambios. En los 4600 millones de años de historia de la Tierra, el albedo, la cantidad de gases de efecto invernadero en la atmósfera y la cantidad de radiación solar que recibe el planeta, han cambiado por diversos factores desequilibrando el balance de energía. A estos desequilibrios los llamamos cambios climáticos y sus causas las identificamos como forzantes. Nos introduciremos en las definiciones y conceptos generales acerca de los cambios climáticos en el siguiente capítulo y veremos cuáles son los forzantes naturales que provocan estos fenómenos.