
ASTROFISICA, CLIMA, TECNOLOGIA

GEORGE MARX —
DEPARTAMENTO DE FÍSICA ATÓMICA, UNIVERSIDAD DE EÖTVÖS, HUNGRÍA

Revisión y Traducción: RAUL COMES — Facultad de Matemática, Astronomía y Física
Universidad Nacional de Córdoba.

ABSTRACT

The inner planets of the Solar System (Venus, Earth, Mars) started under very similar conditions, but only the Earth has been able to develop an atmosphere sustaining liquid water through billions of years, what is a prerequisite for biological evolution. This raises the question about the nature of the terrestrial thermostat and its stability against internal and external impacts. Understanding this problem is of vital importance for the anticipation of the future changes in the terrestrial climate, what is nowadays under attack by human technological activity.

RESUMEN

Los planetas interiores del Sistema Solar (Venus, Tierra, Marte) nacieron bajo condiciones muy similares, pero sólo la Tierra ha sido capaz de desarrollar una atmósfera reteniendo agua líquida por miles de millones de años, lo cual es un requisito para la evolución biológica. Esto entraña la pregunta sobre la naturaleza del termostato terrestre y su estabilidad contra impactos internos y externos. La comprensión de este problema es de vital importancia para anticipar los futuros cambios en el clima terrestre, el cual está siendo atacado actualmente por la actividad tecnológica humana.

El Sistema Solar

Dentro del primer segundo luego de la Gran Explosión (alrededor de 16 mil millones de años atrás) no existía ningún núcleo com-

puesto, debido al intenso movimiento térmico. Aún actualmente, los principales constituyentes del Universo son elementos químicos ligeros heredados del Primigenio Universo Caliente.

En el Universo en expansión, y consecuentemente en proceso de enfriamiento, se formaron nubes de hidrógeno frío contrayéndose bajo la acción de la gravedad. El trabajo de la gravedad calentó las estrellas iniciando la fusión nuclear. La intensa gravedad de las estrellas supergigantes podía equilibrarse solamente con enormes presiones. Para mantener el equilibrio hidrostático se necesitaron temperaturas muy elevadas. A temperaturas altas las reacciones de fusión se desarrollan más rápidamente. Masividad era sinónimo de rápido envejecimiento. Las estrellas gigantes murieron tempranamente por explosión supernova. Durante la explosión, a 10 mil millones de grados todos los canales de reacción nuclear se abrieron, aún núcleos tan pesados como el uranio fueron formados y eyectados al frío espacio exterior.

El empuje de una eyección supernova en nuestra Galaxia hace menos de 5 mil millones de años atrás provocó la formación de una nube de hidrógeno más densa, contaminada por metales pesados, dando nacimiento al Sistema Solar 4 mil seiscientos millones de años atrás. El momento angular de esta nube —nacida de la colisión de la capa de gas en expansión de la superno-

va con el gas interestelar— era diferente de cero. La parte principal de su masa pudo ser capaz de formar una estrella central solamente liberando su momento angular al exterior. El Sol se formó porque los planetas orbitales nacieron simultáneamente.

En la vecindad del brillante Sol se formaron planetas a partir de partículas sólidas de polvo (óxidos y silicatos metálicos): Mercurio, Venus, Tierra, Luna, Marte. En las regiones exteriores más frías se formaron enormes planetas gaseosos a partir de los elementos ligeros más abundantes (H_2 , CH_4). Sobre el extremo frío del Sistema Solar se solidificaron rocas de hielo: lunas de los planetas gigantes, Plutón, cometas.

Los planetas interiores sólidos se formaron por coagulación de partículas de polvo, cubiertas por capas congeladas de hielo de moléculas polares (H_2O , CO_2 , NH_3) las cuales tienen temperaturas de congelación más elevadas. Los planetas coagularon 4 mil quinientos noventa millones de años atrás. La vida media del ^{238}U es de 4 mil novecientos millones de años (siendo la abundancia actual sobre la corteza terrestre de $2,2 \text{ g/ton}^1$), la del ^{235}U es 700 millones de años ($0,016 \text{ g/ton}$ actualmente), la del ^{40}K es mil trescientos millones de años ($0,24 \text{ g/ton}$ actualmente). Una simple extrapolación hacia el pasado demuestra que en la formación de la Tierra, la actividad de su corteza era un orden de magnitud más alta que en nuestros días. El globo de polvo estaba fundido por la intensa radiactividad temprana, heredada de la supernova. Los metales pesados (hierro, níquel, iridio) precipitaron hacia el centro, la escoria (silicatos) emergió a la superficie, los productos volátiles (H_2 , He, CH_4 , Ne) escaparon. En 700 millones de años la radiactividad se debilitó y la superficie planetaria se solidificó. El neón es un elemento común en el Univer-

¹N. T. La unidad ton no ha sido traducida al castellano para evitar confundirla con la tonelada métrica (tm). En este trabajo $1 \text{ ton} = 2000 \text{ lb} = 0.907 \text{ tm}$

so pero raro en la Tierra debido al escape de los elementos volátiles durante la era de la fusión. Así, tenemos que concluir que tras la resolidificación, la nueva atmósfera no contuvo H_2 ni CH_4 . Ellos fueron incorporados gradualmente a partir de la difusión de las moléculas polares hacia afuera del interior planetario caliente por la actividad volcánica. Así nacieron el océano de H_2O y la atmósfera de CO_2 . Podemos observar esta clase de atmósferas de CO_2 en Venus y Marte aún en nuestros días. Las primeras rocas sedimentarias tienen 3 mil novecientos millones de años sobre la Tierra.

Venus

La distancia de Venus al Sol es de 0,72 unidades astronómicas (72% de la distancia de la Tierra al Sol). La intensidad solar a esta distancia es casi dos veces mayor que en la Tierra:

$$I_V(\text{ahora}) = 1,93 I_T(\text{ahora}).$$

En el pasado, la concentración de hidrógeno en el centro del Sol era menor, y por lo tanto eran necesarias temperaturas menores para sostener las reacciones de fusión que cubriesen la luminosidad solar L . Sobre el nacimiento del Sol y los planetas era:

$$L(\text{entonces}) = 0,7L(\text{ahora}),$$

por lo tanto la radiación solar que alcanzaba al naciente Venus tenía la intensidad $I_V(\text{entonces}) = 1,35 I_T(\text{ahora})$. La potencia de radiación que alcanzaba a Venus era $\pi R^2 I$, el planeta absorbía una energía por segundo igual a $(1 - a)\pi R^2 I$, si a es el albedo (reflectividad) de las rocas: $a = 30\%$. La superficie del planeta rotante se calentó hasta que su emisión térmica (proporcional a la cuarta potencia de la temperatura) alcanzó a balancear su absorción de la radiación:

$$(1 - a)\pi R^2 I = 4\pi R^2 \sigma T_0^4.$$

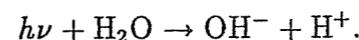
($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}$ es la constante de Stefan-Boltzmann). Si ahora sustituimos $I_V(\text{entonces}) = 1,8 \text{ kW/m}^2$, $I_V(\text{ahora}) = 2,9 \text{ kW/m}^2$, podemos calcular la temperatura superficial correspondiente al planeta descubierto: $T_V(\text{entonces}) = -1 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_V(\text{ahora}) = +22 \text{ }^\circ\text{C}$. Un clima muy confortable —teóricamente.

La verdadera temperatura superficial de Venus es $T(\text{ahora}) = +460 \text{ }^\circ\text{C}$. Nos hace acordar al infierno: el plomo sería líquido en nuestro vecino planeta. La explicación de la alta temperatura es que Venus ha colectado una espesa atmósfera de CO_2 por desgasamiento de la corteza: la presión atmosférica ahora es de 95 atm y el albedo de las nubes es $a = 63\%$. La gruesa atmósfera venusiana absorbe el 96% de la radiación térmica del suelo caliente y la transparencia es solamente $b = 4\%$ en el infrarojo. El balance de energía

$$(1 - a)\pi R^2 I = 4\pi R^2 b \sigma T^4.$$

da $T(\text{ahora}) = 460 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tras la solidificación (hace 3 mil novecientos millones de años) Venus podría haber poseído un océano líquido durante menos de mil millones de años. Incluso podría haber surgido durante esta era alguna vida simple procariótica. Pero a medida que el Sol se volvió más caliente y la atmósfera se hizo más gruesa, el océano hirvió hasta evaporarse completamente. Arriba, la intensa radiación UV proveniente del Sol descompuso las moléculas de H_2O :



El hidrógeno escapó; Venus se había vuelto un mundo caliente, seco, muerto.

El efecto Invernadero

Si dejamos el automóvil en la playa, cuando regresamos a su interior percibimos que se ha vuelto mucho más caliente que afuera. Esto no contradice la Segunda Ley de la termodinámica. Las ventanas de vidrio son

transparentes para la radiación electromagnética de altas frecuencias (luz óptica), pero la radiación infrarroja de frecuencias menores —emitida por los calientes asientos del automóvil— fuerza la vibración de los iones en el vidrio: la radiación infrarroja es absorbida (y reirradiada). Este "efecto invernadero" es utilizado en los invernaderos de las granjas: en los días fríos de la primavera la luz solar penetra el techo de vidrio y calienta el suelo, pero el vidrio evita el escape de la radiación infrarroja del suelo durante las noches muy frías. El calor ha sido atrapado (Figura 1). El campo electromagnético no interactúa con moléculas covalentes, neutras como N_2 , O_2 , pero la vibración electromagnética excita las cargas de las moléculas polares CO_2 , H_2 , O_3 , N_2O de la atmósfera. Aproximadamente a $T = 300 \text{ K}$ la frecuencia dominante de la radiación térmica corresponde a $\nu = 2 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$, que es idéntica a la autofrecuencia de los enlaces de valencia polares dentro del CO_2 . Por lo tanto, el CO_2 es un eficiente absorbente en el infrarojo. (El O_3 tiene una autofrecuencia a $3 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$, el H_2O la tiene en $4-5 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$, en la cola del espectro de Planck). Aún una modesta presencia de CO_2 recorta el máximo del espectro de radiación del suelo (Figura 2).

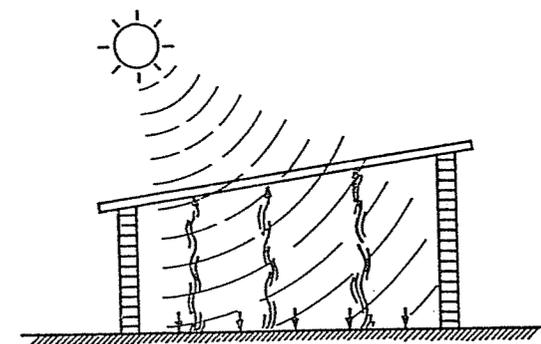


Figura 1: Efecto invernadero

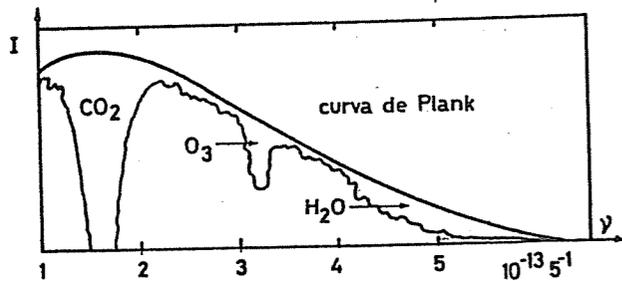


Figura 2: Absorción infrarroja atmosférica

Marte

El planeta Marte orbita a una distancia de 1,5 unidades astronómicas del Sol, mucho más lejos que la Tierra. La intensidad solar alcanzando al planeta actualmente es $I_M(\text{ahora}) = 0,43I_T(\text{ahora})$. Hace 4 mil millones de años el Sol era un 25% más débil, $I_M(\text{entonces}) = 0,30I_T(\text{ahora})$. Usando el bajo albedo de Marte ($a = 15\%$ para sus desiertos rojo oscuros) calculamos que la temperatura marciana era $T(\text{entonces}) = -80^\circ\text{C}$, que ahora es $T(\text{ahora}) = -60^\circ\text{C}$. La luminosidad solar aumenta alrededor del 5% cada mil millones de años; por lo tanto $T(\text{futuro}) = +50^\circ\text{C}$ tendrá lugar dentro de 3 mil millones de años a partir de ahora. Marte se convertirá en un planeta húmedo, confortable en el futuro lejano, cuando la Tierra se vuelva intolerablemente caliente debido a la escalada en la luminosidad solar.

Una experiencia sorprendente fue la de la sonda espacial Viking cuando avistó lechos de ríos secos en Marte. Ellos debieron secarse mucho tiempo atrás puesto que se deben haber erosionado por impactos meteoríticos. Pero Marte seguramente fue un planeta húmedo 3 mil novecientos a 3 mil millones de años atrás.

El templado pasado del planeta sólo puede explicarse por el efecto invernadero: el desgastamiento de la corteza formó una gruesa atmósfera de CO_2 , convirtiéndolo en un in-

vernadero en el helado ambiente astronómico. A medida que miles de millones de años transcurrieron, una fracción grande de este CO_2 se fijó en el CaCO_3 (del mismo modo que está ligado a la Tierra actualmente). Cuando la temperatura cayó por debajo del punto de congelación, el agua se convirtió en hielo, más aún, el CO_2 produjo nieve en las regiones polares. Marte se había convertido en un planeta congelado con un atmósfera muy delgada. Las futuras misiones tripuladas a Marte pueden explorar simples formas de vida extinta en el Planeta Rojo.

Al formarse el Sistema Solar la luminosidad solar sólo era el 70% de su valor actual. El Sol gradualmente se vuelve más brillante, su luminosidad era el 94% de su valor presente hace mil millones de años. Se convertirá en el 200% en cinco mil millones de años a partir de ahora, y a medida que nuestra estrella se vuelva una gigante roja se hará 10 veces más brillante que ahora en 10 mil millones de años. Esto significa que la zona de habitabilidad se desplazará hacia el exterior durante la historia del Sistema Solar. Originalmente estuvo en Venus, ahora está en la Tierra, alcanzará Marte en 3 mil millones de años a partir de ahora, y las heladas lunas de Júpiter se fundirán en unos 6 mil millones de años. El problema es que la era de agua líquida no dura más que mil millones de años en cualquier parte del Sistema Solar, aún si tomamos en cuenta el efecto invernadero de una atmósfera de CO_2 . Venus y Marte confirman esta conclusión física (Figura 3).

Hay, sin embargo, una destacada excepción de esta regla astrofísica: el caso de la Tierra. Nuestro planeta ciertamente ya tuvo océano líquido hace 3 mil novecientos millones de años, y aún lo tiene. Esta larga presencia de agua líquida fue necesaria para que la vida evolucionara hacia la inteligencia.

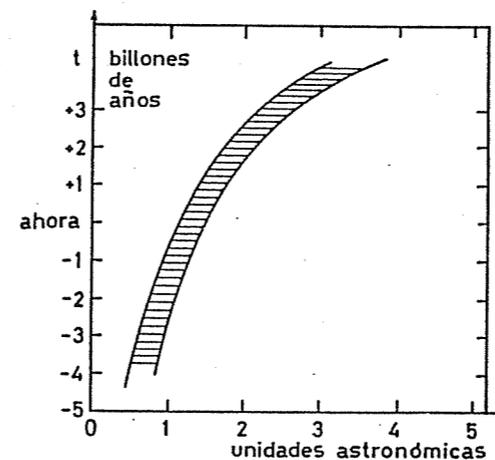


Figura 3: Cinturón cósmico de agua líquida

Tierra

Actualmente la Tierra recibe radiación proveniente del Sol a razón de $I_T(\text{ahora}) = 1,4 \text{ kW/m}^2$ (con la temperatura fotosférica de $T_s = 6000 \text{ K}$). Una fracción $a = 30\%$ de esta luz óptica es reflejada. La radiación absorbida calienta el suelo a la temperatura T_T , hasta que su emisión infrarroja equilibra la luz absorbida:

$$(1 - a)\pi R^2 I = 4\pi R^2 \sigma T_0^4.$$

La temperatura calculada del planeta descubierto resulta ser $T_0 = 18^\circ\text{C}$. Este valor puede usarse sobre un cuerpo astronómicamente descubierto, como la Luna. Pero la Tierra posee una atmósfera, la cual principalmente consiste de N_2 y O_2 apolares, transmitiendo $b = 60\%$ de la radiación infrarroja, el resto es absorbido por los gases de trazo H_2O , CO_2 , CH_4 , N_2O , CCl_2F_2 . El balance energético

$$(1 - a)\pi R^2 I = 4\pi R^2 b \sigma T^4,$$

arroja su temperatura actual $T = +16^\circ\text{C}$. El calentamiento del delgado invernadero actual asciende a $T - T_0 = 33^\circ\text{C}$, cantidad muy relevante para la vida terrestre.

Esto significa que existe un flujo estacionario de calor, proveniente del Sol ($T_s = 6000$

K), pasando a través de la Tierra ($T_T = 300 \text{ K}$) y yendo hacia el frío Universo ($T_U = 3 \text{ K}$). El calor entrante Q llega en forma de luz óptica ($T_s = 6000 \text{ K}$), el mismo calor Q parte en forma de radiación infrarroja ($T_T = 300 \text{ K}$), por lo tanto el cambio de entropía del sistema abierto llamado Tierra se eleva a:

$$\Delta S_T > \frac{Q}{T_s} - \frac{Q}{T_T} = -\frac{Q}{T_T} \left(1 - \frac{1}{20}\right).$$

La variación ΔS_T puede hacerse negativa, permitiendo así la organización biológica. El decrecimiento de entropía puede llamarse evolución. La eliminación de entropía por flujo de energía puede visualizarse de la siguiente manera: De acuerdo a la ley del desplazamiento de Wien, la frecuencia ν es proporcional a la temperatura T , por lo tanto las quanta de energía $h\nu_s$ de la luz solar son $T_s/T_T = 20$ veces mayores que las quanta de energía $h\nu_T$ del brillo terrestre. Los fotones solares transfieren energía desde el Sol hacia la Tierra. Para liberar la misma cantidad de calor se emiten 20 veces más fotones que los que se absorben. Este es el modo en que el desorden es eliminado de la Tierra viviente (Figura 4).

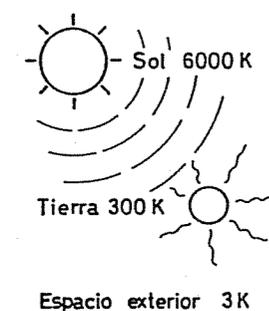
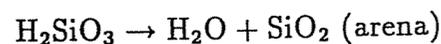
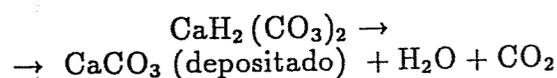
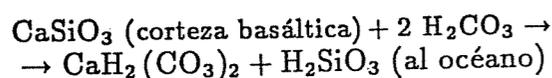
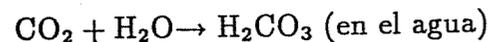


Figura 4: La tierra como máquina térmica

La luminosidad solar crece con el tiempo. La temperatura promedio actual es de $+15^\circ\text{C}$. ¿Cómo era ella en el pasado?. Hace 3 mil quinientos millones de años era $I(\text{entonces}) = 0,8 I(\text{ahora})$, el albedo de

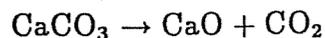
la Tierra cubierta de hielo era $a = 63\%$, dando $T(\text{entonces}) = -70^\circ\text{C}$. El aumento de I hasta su valor actual no hubiera fundido una Tierra congelada, porque $I(\text{ahora}) = 1,4 \text{ kW/m}^2$ y $a = 63\%$ (hielo) dará $T(\text{ahora}) = -55^\circ\text{C}$. Si la Tierra estuvo congelada en el pasado, reflejó tanta luz que no pudo haberse fundido solamente por aumento de la radiación solar.

El rompecabezas de la Tierra Congelada puede resolverse tomando en cuenta la cambiante composición atmosférica. Alrededor de 3 mil novecientos millones de años atrás el desgaseamiento de la corteza terrestre produjo una atmósfera de CO_2 y un océano de H_2O . Debido al espeso invernadero de CO_2 el océano era líquido. El Sol lentamente aumentó su luminosidad. Para compensar el descontrolado calentamiento—experimentado en Venus— el creciente brillo del Sol tuvo que compensarse por el espesamiento del invernadero:



Esto es lo que ocurrió en Marte.

En otros planetas el océano líquido constituyó un corto intermezzo, en la Tierra ha existido por cuatro mil millones de años, ¡y esperemos que lo siga haciendo por más tiempo aún!. Hay una realimentación de CO_2 en la Tierra: La piedra caliza (CaCO_3) en hundimiento se calentará geotérmicamente,



El CO_2 escapa por actividad volcánica, y entonces:

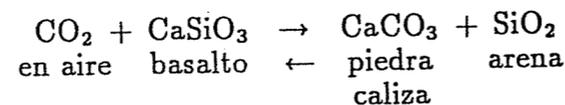


La radioactividad calienta el núcleo de la

Tierra. Los materiales fundidos más calientes y ligeros afloran, mientras que los sólidos más fríos se hunden. La circulación de Bénard produce la tectónica de placas: el basalto aflora nuevamente.

En forma de ecuación de balance, el detalle de la situación planteada en la discusión precedente es como sigue:

erosión \rightarrow actividad volcánica \leftarrow



El ciclo está gobernado por la radioactividad. Puede jugar un papel regulador: Un clima más cálido significa erosión más intensa, extracción de CO_2 , enfriamiento. Un clima más frío significa menor erosión, más CO_2 liberado al aire, calentamiento.

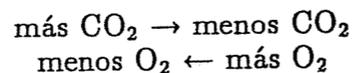
Esta regulación no opera en la sequía de Venus porque no hay océano, no hay H_2CO_3 , no hay erosión. No opera en el diminuto Marte porque su masa es solamente el 11% de la de la Tierra; pierde su calor radiactivo por conducción y radiación; no hay tectónica de placas activas en el Planeta Desierto.

¿Opera bien sobre la Tierra?. Difícilmente. Las estimaciones indican que esta realimentación geológica es muy débil: su potencia puede ser menor que el 1% de la eficiencia requerida.

Gaia

La regulación biológica del clima puede visualizarse en forma muy simple y conveniente por medio del siguiente ciclo esquemático:

plantas \rightarrow animales \leftarrow



mayor temperatura menor temperatura

La erosión ataca las rocas volcánicas (CaSiO_3) a través de la lluvia ácida (H_2CO_3) sobre los continentes (convirtiéndolas en $\text{CaH}_2(\text{CO}_3)_2$ soluble). Esta reacción es mucho más rápida en el suelo (debido a su superficie mucho mayor) que en la roca desnuda. Debido a la asimilación orgánica, la concentración de CO_2 es mucho más elevada en el suelo que en el aire abierto. Ácidos orgánicos adicionalmente más fuertes (ácido fórmico, etc.) se agregan al ácido carbónico y en consecuencia la erosión puede realizarse unas 500 veces debido a la vida terrestre, resultando una regulación más efectiva de la temperatura.

De acuerdo a la Mitología Griega dos criaturas nacieron del matrimonio de Caos con Eros: Urano (Cielo) y Gaia (Tierra). Ambos dieron vida a Cronos (Tiempo) y Rhea, quienes procrearon a Zeus y Hera, representantes de la humanidad desagradecida. La idea, que la regulación biológica del clima mantiene habitable a la Tierra, es una explicación emocionalmente atractiva de la posición única de nuestro planeta. William Golding propuso el nombre de Gaia para la Tierra Viviente. La idea fue introducida por James E. Lovelock en tiempos de la misión Viking a Marte, buscando vida en vano; posteriormente fue elaborada por David Schwartzmann y otros en los detalles científicos.

Nacimiento de Gaia

La explicación del origen de la vida que se encuentra en los libros de texto ha sido ofrecida por Stanley Miller. El demostró in vitro que los compuestos ricos en hidrógeno (CH_4 , NH_3 , H_2O), con la adición de energía libre (chispas, luz UV) puede producir moléculas $\text{H}-\text{C}\equiv\text{N}$, $\text{H}_2\text{C}=\text{O}$ (observadas también en el espacio exterior). Estas contienen enlaces múltiples ricos en energía, por lo tanto pueden polimerizar azúcar, celulosa, polipéptidos y has-

ta ácidos nucleicos (a los que se considera los precursores directos de las estructuras auto-replicantes) en agua.

El problema es que en el momento de la solidificación de la corteza fundida, cuando se formaron los océanos 3 mil novecientos millones de años atrás, no había disponible una atmósfera reductora rica en hidrógeno. La Tierra poseía una envoltura oxidada de CO_2 , H_2O . Solamente puede encontrarse un medio ambiente reductor (H_2 y CH_4) lejos del Sol, pero allí no hay océanos líquidos.

Para satisfacer ambas condiciones, los científicos le pidieron ayuda a los cometas. Los cometas están hechos de hielo de H_2O , NH_3 , CH_4 , CO_2 . El cometa Halley es negro, indicando polimerización de HCN. Una posibilidad es que los impactos de los cometas enriquecieron los pantanos terrestres con materiales cometarios reductores. Una idea más desafiante es que el decaimiento radioactivo de ^{26}Al fundió los núcleos de grandes cometas en el primer millón de años después de la explosión supernova. El océano interno del cometa poseía la fuente apropiada de energía libre bajo la forma de radioactividad. La buena aislación térmica del cuerpo cometario podría haber mantenido líquido el océano interno como por mil millones de años, dándole una oportunidad a la aparición de la vida. El impacto de un cometa gigante de tal magnitud, infectaría la Tierra con vida.

Agua líquida más compuestos reductores: estas dos condiciones necesarias indican que la vida es un delicado mecanismo, proveniente del contacto entre los Cielos y la Tierra (Urano y Gaia). Posteriormente la vida tuvo que continuar sin la celestial providencia, tuvo que inventar la fotosíntesis. Las verdes plantas alimentadas por la luz solar gradualmente extrajeron CO_2 de la atmósfera, debilitando el efecto invernadero. La extracción de los gases de efecto invernadero de la atmósfera compensó casi exactamente el calentamiento del Sol, para

mantener estable la temperatura terrestre durante 3 mil seiscientos millones de años o tal vez más aún.

La fragilidad de Gaia

Las edades de hielo indican que el termostato terrestre no es absolutamente a prueba de todo tipo de fallas. La perforación del hielo antártico en la estación polar Vostok ha mostrado que las edades de hielo eran más frías (4 °C en promedio) y simultáneamente la concentración atmosférica de CO₂ era menor (alrededor de la mitad del valor presente). ¿Cuál podría ser la explicación de las repetidas oscilaciones climáticas?

Milankovich trató de explicar estos cambios climáticos con la precesión de la Tierra. En la Edad de Hielo (verbigracia, 10.000 años atrás) la Tierra alcanzó el afelio de su órbita cuando era invierno en el Hemisferio Norte. Ese hemisferio está dominado por los continentes. La reducida luz solar en el invierno produjo capas de nieve extendidas y prolongadas, aumentando el albedo, reduciendo consecuentemente la temperatura promedio. Actualmente los inviernos del Hemisferio Norte ya no son tan crudos porque la Tierra está en el punto de su órbita más próximo al Sol. La reducida capa de nieve suprime la radiación de la luz solar, resultando en temperaturas promedio más elevadas. (Figura 5).

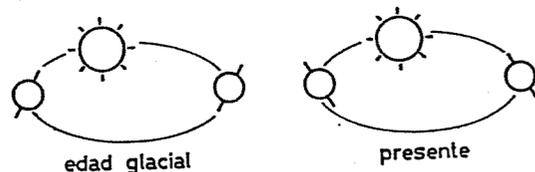


Figura 5: Modelo de Milankovich de las glaciaciones

La excentricidad de la órbita terrestre es, sin embargo, muy pequeña como para producir efectos tan grandes. Como vemos ahora, el mecanismo de Milankovich puede disparar pero no puede causar los cambios climáticos. La clave de las edades de hielo puede ser la observación de que en los períodos glaciales la concentración de CO₂ en la atmósfera era aproximadamente la mitad del valor presente (Figura 6).

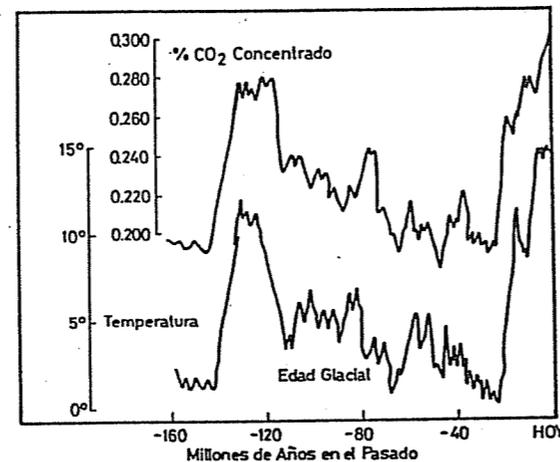


Figura 6: Concentraciones de CO₂ y temperaturas en el pasado

La capa superior del océano de 1 km de espesor está iluminada, es viva y es rica en CO₂. El fondo del océano es oscuro, sin vida y pobre en CO₂. Como vemos ahora, alrededor de la mitad del CO₂ liberado a la atmósfera por la vida y por las actividades volcánica e industrial es extraído por los océanos. La intensidad de la extracción oceánica depende de la rapidez con que el CO₂ es transportado desde las capas superiores casi saturadas a las diluidas capas inferiores. Este bombeo es poderosamente llevado a cabo por la Corriente del Golfo.

El caudal de la Corriente del Golfo es de 1 km³/min de agua, lo que equivale a diez veces la intensidad de todos los ríos. Se origina en el Golfo de México, fluye en dirección nordeste hacia el Artico, donde soplan los secos y helados vientos árticos. Las tibias aguas de la Corriente del Golfo se

evaporan más rápido que las heladas aguas árticas. Su concentración salina aumenta, como así también su peso específico, por lo tanto se sumerge al fondo llevando consigo su contenido de CO₂. En el Golfo de México las aguas pobres en CO₂ suben a la superficie. La Corriente del Golfo es una máquina térmica alimentada por la diferencia de temperatura entre México y Noruega. Esta máquina bombea CO₂ desde el aire hasta el océano profundo. Mayores diferencias de temperatura hacen más eficiente la máquina, extrae más CO₂ desde la atmósfera (Figura 7).

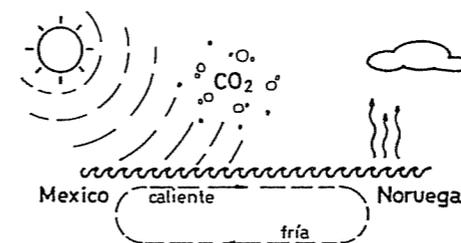


Figura 7: La máquina térmica de la Corriente del Golfo

De acuerdo al modelado por computadora, una duplicación del CO₂ en la atmósfera significaría un calentamiento de 1 °C en el ecuador, 3 °C en promedio, alrededor de 10 °C en el círculo ártico, este último siendo causado por el hundimiento de la capa de nieve. Con un clima más frío (en una edad glacial) hay más nieve sobre los continentes, más hielo en los océanos, por lo tanto la región ártica es mucho más fría que lo que es actualmente. El cinturón tropical es menos afectado por la fluctuación climática.

Esto significa que el clima frío hace la diferencia de temperatura más grande, la máquina de la Corriente del Golfo funciona más eficientemente, la extracción del CO₂ es más intensiva. Una disminución en la

concentración del CO₂ significa un efecto invernadero más débil, clima aún más frío, esto es, realimentación positiva. Las caídas de la temperatura y de la concentración de CO₂ evolucionan paralelamente, como se observó durante las eras glaciales.

(Una bio-amplificación adicional de la edad de hielo puede ocurrir del siguiente modo: La edad de hielo deposita más hielo sobre los continentes. El nivel del mar en recesión extiende los continentes, los ríos más largos disuelven más fósforo, los planktons oceánicos mejor alimentados se extienden, asimilan más CO₂ lo que enfría el clima aún más).

Un calentamiento global, por otra parte, disminuye las diferencias de temperatura. La Corriente del Golfo se hace menos eficiente, bombea menos CO₂ a las profundidades oceánicas. La emisión volcánica de CO₂ no es extraída completamente, la intensificación del efecto invernadero resulta en un mayor calentamiento. Una realimentación positiva también funciona de este modo.

De acuerdo a la evidencia actual, el clima se está calentando, el Mar Artico es menos salado de lo que era en la década de 1900. Esto indica menos evaporación proveniente de la Corriente del Golfo debido a menores diferencias de temperatura en el Mar Artico. El bombeo de la Corriente del Golfo se debilita.

Debería notarse que una corriente oceánica es un sistema dinámico inestable. El Pacífico Norte es más frío que el Atlántico Norte, por lo tanto ninguna corriente fuerte fluye hacia el norte, por lo tanto el Pacífico Norte es más frío...

Si la Corriente del Golfo se detuviese, podría no volver a fluir de nuevo.

La Revolución Industrial

En la última Edad de Hielo la concentración de CO₂ era la mitad del valor actual, el promedio global de la temperatura era

aproximadamente 4 °C más baja. En este siglo observamos el crecimiento acelerado de la concentración de CO₂ en la atmósfera, evidentemente debido al quemado más intensivo de los combustibles fósiles. Esto es

1000	0,019%	1960	0,0316%
1800	0,028%	1970	0,0323%
1900	0,030%	1980	0,0335%
1950	0,031%	1990	0,0360%

En los últimos 130 años la temperatura global creció en $\Delta T = 0,6$ °C. Hay ahora más luz solar absorbida que infraroja emitida, el actual aumento en el nivel de CO₂ un aumento adicional de 0,6 °C. (El tiempo de retardo del bombeo oceánico es de alrededor de 30 años).

Una tendencia de calentamiento está impresionantemente expresada por el hecho de que 1990 fue el año más cálido de la historia meteorológica de más de 100 años. Los años más cálidos han estado todos comprendidos en las décadas de los ochentas y los setentas:

1990	15,45 °C	1989	15,25 °C
1981	15,35 °C	1973	15,17 °C
1988	15,35 °C	1977	15,17 °C
1987	15,30 °C	1986	15,17 °C
1983	15,28 °C	1985	15,16 °C

El líquido trepa en el termómetro cuando la temperatura aumenta. La expansión térmica relativa del agua ($2 \times 10^{-4}/K$) excede la de las rocas ($5 \times 10^{-7}/K$) en tres órdenes de magnitud. El aumento de la temperatura significa el aumento del nivel del mar. Calculando con una profundidad oceánica de 5 km, un aumento de 1 °C significa una elevación de 1 m del nivel del mar. Esta elevación ha sido observada: +14 cm entre 1800 y 1900, +33 cm entre 1900 y 1950. La actual tasa de elevación es $+2,4 \pm 1,0$ mm/año. Podemos concluir que el aumento de la emisión de CO₂ durante la Revolución Industrial ha hecho que la Tierra esté 1 °C más caliente y que el nivel del mar se haya elevado 1 m.

La civilización humana se originó en los deltas del Eufrates, Nilo, Yangtse, Ganges, Mekong, Rhin, Po. El creciente nivel del mar amenaza inundar las áreas costeras. Hoy 1/3 de los Países Bajos sobrepasa el nivel del mar por menos de 1 m. Aún una modesta elevación amenaza no sólo a Venecia, Amsterdam, Londres, Nueva York, Tokyo, sino que amenaza mucho más aún la agricultura en los deltas fértiles.

De acuerdo a los modelos climáticos una duplicación de la presente concentración de CO₂ implicaría un aumento en la temperatura $\Delta T = 3,0 \pm 1,5$ °C, correspondiente a una elevación del nivel del mar entre 2 y 5 metros. Esto destruiría el 25% de la producción agrícola, forzaría a mil millones de personas a abandonar sus hogares.

En 1990 el consumo global de combustibles fósiles era (en equivalente de carbón)

4 mil millones de tons de carbón
4 mil millones de tons de aceite
2 billones de m ³ de gas
cca 10 mil millones tons de carbón/año,

correspondiente a la liberación de 30 mil millones de tons de CO₂ por año. Para los 5 mil millones de personas que viven en la Tierra esto significa un consumo de combustible de 2 tons/capita/año, un número tremendo.

Todos los depósitos conocidos de combustible fósil equivalen aproximadamente a 4 billones de tons de carbón. Esta provisión se acumuló durante cientos de millones de años, pero al ritmo actual la humanidad lo quemaría en 400 años. (Cada año se quema una cantidad de combustible fósil que se ha acumulado durante un millón de años a partir de la energía libre de la luz solar). Teniendo en cuenta el actual 2% de aumento/año en el consumo, la reserva global de combustible fósil puede agotarse dentro de 100-200 años, aumentando el actual 0.035% de CO₂ al 0.1% en la atmósfera. Esto resultaría en $\Delta T = 10$ a 15 °C de calentamiento global y 10 m de elevación del

nivel del mar (principalmente debido a la expansión térmica), más una elevación adicional debida al fundimiento de los depósitos de hielo en Groenlandia y la Antártida. El cambio climático sería aún mayor si el océano perdiese su capacidad de bombear la mitad de su estimulado influjo de CO₂.

Los Gases del Efecto Invernadero

La radiación electromagnética del suelo representa un campo electromagnético vibrando a frecuencias iguales a pocas veces 10^{13} s⁻¹. Esta radiación será absorbida por moléculas que tienen autofrecuencias de vibración en este dominio. Las moléculas productoras del efecto invernadero más relevantes son:

H₂O (vapor): Se origina a partir de la evaporación del agua, su cantidad está influenciada por la temperatura del aire. El agua se evapora más en los cálidos trópicos (desertificación) y precipita en las frías regiones árticas.

CO₂ (dióxido de carbono): Es liberado por la actividad volcánica, por decaimiento de la biomasa, por quemado de combustibles fósiles, por deforestación. Contribuye al efecto invernadero (también influyendo indirectamente en la concentración de H₂O) con el 66%, produjo 0.5 °C de calentamiento en los últimos 100 años de industrialización. Las emisiones de CO₂ en nuestros días son principalmente debidas a la industria y aumenta a una tasa del 4%/año.

CH₄ (metano): Es un producto del decaimiento de la biomasa en la ausencia de aire. Las principales fuentes son estiércol bovino y ovino, arrozales. La emisión de CH₄ es de 400 millones de tons/año. La concentración actual de CH₄ es solamente de 1,7 partes por millón, pero contribuye en un 20% al efecto invernadero. El CO₂ ya produce una absorción total a frecuencias resonantes; al aumentar la concentración de CO₂, la banda de absorción se en-

sancha sólo debido al ancho de línea, por lo tanto la temperatura del aire sólo es logarítmicamente sensible a la concentración de CO₂. El CH₄ en resonancia no produce una absorción total, por lo tanto su efecto calefactor depende casi linealmente de la concentración de CH₄. La emisión de CH₄ está relacionada con la producción de alimentos, por lo tanto aumenta con el aumento de población, alrededor del 1%/año.

N₂O (gas de la risa): Se origina a partir del quemado del aire a elevadas temperaturas (en automóviles, en máquinas, en turbinas de gas); su emisión asciende a 28 millones de tons/año, crudamente proporcional al número de automóviles. Actualmente el N₂O contribuye en un 3% al efecto invernadero.

O₃ (ozono): También producido por maquinarias de alta temperatura, en la tropósfera contribuye en un 8% al efecto invernadero. La emisión de O₃ aumenta a razón del 1%/año.

CF₂Cl₂ (freón): Es 15000 veces más eficiente por molécula para producir calentamiento por efecto invernadero, debido a sus enlaces altamente polares. Es usado en artículos del hogar (aerosoles, refrigeradores, acondicionadores de aire). El CF₂Cl₂ es responsable sólo del 3% del efecto invernadero pero su contribución crece rápido, un 5%/año. (Este es el gas que destruye la capa de ozono estratosférico, por lo tanto hay tratados internacionales respaldando la supresión de la emisión de CF₂Cl₂).

Si intentamos evitar el calentamiento por efecto invernadero, tenemos que limitar la emisión de CO₂ (combustibles fósiles, principalmente las industrias que queman carbón), reglamentar el uso de los automóviles (N₂O) y aerosoles (CF₂Cl₂). Esto es principalmente responsabilidad de las naciones desarrolladas las cuales lanzaron la revolución industrial. Otro deber es limitar la explosión de la población, esto es, restringir la deforestación (CO₂) y algunos

tipos de agricultura intensiva (CH_4). Esto significa una obligación para las naciones desarrolladas.

Actualmente, 1000 millones de personas viven en países industrializados, consumiendo aproximadamente 6 tons de carbón equivalente/cápita/año:

RDA	11 tons/cápita/año
RFA	6 tons/cápita/año
EEUU	10 tons/cápita/año
Japón	4 tons/cápita/año

lo cual debería disminuirse. 4 mil millones de personas viven en países en vías de desarrollo, consumiendo alrededor de 1 ton de carbón/cápita/año, por ejemplo:

China	0,7 tons/cápita/año
India	0,3 tons/cápita/año

Diffícilmente pueda aconsejarse disminuir este consumo. Pero la población de los países desarrollados es más bien estacionaria; la de las naciones en desarrollo aumenta un 2%/año aproximadamente, por lo tanto la emisión de los gases de efecto invernadero de los países en vías de desarrollo pronto será comparable al de los países desarrollados. Con la actual tasa de aceleración de consumo de combustible y crecimiento poblacional, la duplicación de los gases de efecto invernadero en la atmósfera puede esperarse que ocurra dentro de 50 años, dentro del término de vida de nuestros niños.

Impacto del Calentamiento Invernadero

Una duplicación de los gases del efecto invernadero significaría un calentamiento de 10°C en el ártico y un calentamiento de 1°C en el trópico, lo que no parece ser un terrible cataclismo. Las consecuencias más peligrosas son la inundación de las áreas costeras y la desertificación de moderadas zonas climáticas: el agua se evapora más

en el trópico y precipita en el ártico, resultando en un corrimiento de los cinturones productores de trigo y maíz hacia el norte. Ambos corrimientos amenazan con hambrunas y migraciones masivas. El creciente costo de mantenimiento de las compuertas alemanas, las inundaciones más frecuentes y dañinas en Bangladesh, las hambrunas en Africa, las pobres cosechas golpeadas por la sequía en Europa y EEUU sólo son indicios de lo que serían las consecuencias de un calentamiento global.

El primer mensaje de desastre llegó al Congreso de EEUU desde la NASA en 1988: el calentamiento global por efecto invernadero podría estar aquí. En el mismo año autoridades gubernamentales emitieron la Declaración de La Haya: "La duplicación de los gases de efecto invernadero no puede tolerarse".

En 1989, la Sociedad Médica Europea y la Sociedad Meteorológica Europea presentaron una Declaración a los Participantes del Concilio Ecuménico de Iglesias Europeas, en la cual establecieron el objetivo de reducir el consumo de energía en Europa desde 6 tons de carbón/cápita/año a 3 tons de carbón equivalente/cápita/año dentro de 20 años; pero a partir de este consumo reducido de energía solamente 1 ton/cápita/año puede ser combustible fósil productor de CO_2 . Las necesidades adicionales deben ser cubiertas por la energía nuclear y fuentes renovables. El mismo año, en la conferencia UNO en Copenhage, la Comunidad Europea apoyó la propuesta alemana de detener el aumento de la emisión de CO_2 para el año 2000, pero la mayoría de la conferencia sustituyó la fecha límite fija por la expresión más suave "tan pronto como sea posible".

En 1990, el Papa emitió una Encíclica sobre la Integridad de la Creación, declarando que el calentamiento por el CO_2 , el agotamiento del ozono, la lluvia ácida y la contracción de la diversidad biológica son las amenazas actuales más grandes para la hu-

manidad. La Organización de las Naciones Unidas convocó a una Conferencia Mundial de expertos en Ginebra para el otoño de 1990.

En 1991 el Congreso Climático Mundial en Washington declaró al calentamiento por efecto invernadero como una amenaza inmediata real. El Presidente Bush se unió a esta conclusión sobre el ahorro de energía y la reconsideración positiva de la energía nuclear.

El problema principal es que la declaración no sustituye a la acción. Tanto los políticos como los industriales están sometidos a presiones de corto plazo: ganar las elecciones, producir ingresos al final del próximo año. Ellos no están dispuestos a prestar su atención a lo que ocurrirá dentro de 30 años más allá de la frontera del país.

Si hoy manejo un automóvil de alto consumo a 100 millas por hora, ninguna corte me sentenciará dentro de 30 años por matar bebés en Bangladesh inundándolos: la cadena causal es muy larga (muy científica) para cualquier juez.

La prevención de una catástrofe climática es más un problema educacional y moral que afecta "solamente" el destino de nuestros hijos y nietos.

Los actuales adultos pueden argüir con astucia que la relación entre el consumo de combustibles fósiles y el calentamiento global no está verificado en un cien por ciento. Puede ser que la relación causal esté comprobada sólo con una probabilidad de 1/6.

Si usted ve una película en la que las autoridades juegan a la ruleta rusa con un revólver de seis tiros (cargado sólo con una bala) llega a la conclusión de que estos muchachos están locos. Es la misma locura que jugar a la ruleta rusa con el globo terráqueo.

Dinámica No Lineal

Para un físico el clima es un sistema no lineal con realimentación positiva.

Un enfriamiento debido a fluctuaciones estadísticas aumentará la capa de nieve, así aumentará el albedo terrestre resultando en adicionales pérdidas de calor. Las cantidades de H_2O y CO_2 disminuirán, el efecto invernadero se debilitará, lo que enfriará aún más la Tierra. (Esto podría haber ocurrido en el planeta Marte).

Un calentamiento debido a fluctuaciones estadísticas, fundirá hielo y nieve, el albedo disminuirá, lo que significa una ganancia adicional de calor a partir del Sol. La evaporación libera H_2O a la atmósfera. El debilitamiento de las corrientes oceánicas deja de bombear CO_2 hacia las profundidades oceánicas. El efecto invernadero se hace más potente. El calentamiento es estimulado, resultando en un hundimiento adicional del casquete de hielo ártico... (Esto podría haber ocurrido en el planeta Venus).

Hay una delicada regulación funcionando sobre el Planeta Tierra debido a una afortunada interrelación geofísica geoquímica y biológica. La realimentación negativa no lineal de Gaia mantiene en nuestros días el clima en un autoestado interglacial.

Ahora la humanidad industrializada hace un experimento global dando un puntapié caliente exactamente en un cálido período interglacial. ¡Hemos logrado que 1990 sea el año más cálido de la historia meteorológica escrita!. Tenemos la oportunidad de presenciar el resultado de este Gran Experimento. ¿Será Gaia lo suficientemente fuerte como para mantener estable el clima?. ¿O ella ya está malherida por la contaminación oceánica, la deforestación tropical y por la diversidad biológica estrechada?. ¿Saltará la Tierra a un nuevo autoestado, similar al estado de Venus?. ¿Deberíamos esperar y ver?.