

PROBLEMAS GLOBALES: CAMBIO CLIMÁTICO Y DEBILITAMIENTO DE LA CAPA DE OZONO

CONTENIDOS

1	PROCESOS DE ABSORCIÓN DE ENERGÍA EN LA ATMÓSFERA	1
1.1	ABSORCIÓN DE ENERGÍA RADIANTE A NIVEL MOLECULAR	1
1.2	EFFECTO INVERNADERO	2
1.3	BALANCE ENERGÉTICO DE LA TIERRA	3
1.4	ABSORCIÓN DE ENERGÍA EN LA ATMÓSFERA	6
1.5	GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI)	6
1.6	FUENTES DE LOS PRINCIPALES GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI)	8
2	CAMBIO CLIMÁTICO.....	11
2.1	CALENTAMIENTO ATMOSFÉRICO Y CAMBIO CLIMÁTICO.....	11
2.2	FORZAMIENTO RADIATIVO Y MÉTRICAS DE EVALUACIÓN	13
2.3	PREVISIONES DEL IPCC.....	15
2.4	POSIBLES CONSECUENCIAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO	17
2.5	MEDIDAS DE GESTIÓN A NIVEL INTERNACIONAL	23
2.6	DESEMPEÑO DE URUGUAY ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO.....	25
2.7	EJEMPLO DE CÁLCULO DE EMISIONES DE GEI: METANO EN EL CULTIVO DE ARROZ	38
3	DEBILITAMIENTO DE LA CAPA DE OZONO	43
3.1	LA CAPA DE OZONO	43
3.2	FORMACIÓN Y DISOCIACIÓN NATURAL DEL OZONO	43
3.3	DESTRUCCIÓN CATALÍTICA DEL OZONO ESTRATOSFÉRICO	45
3.4	SUSTANCIAS AGOTADORAS DE OZONO (SAO)	48
3.5	POTENCIAL DE AGOTAMIENTO DE OZONO (PAO)	51
3.6	CONSECUENCIAS DEL DEBILITAMIENTO DE LA CAPA DE OZONO	51
3.7	SITUACIÓN DE URUGUAY	54
	BIBLIOGRAFÍA BÁSICA, REFERENCIAS	55

1 Procesos de absorción de energía en la atmósfera

1.1 Absorción de energía radiante a nivel molecular

De acuerdo con su estructura, cada molécula química solo puede existir en ciertos estados de rotación, vibración y configuración electrónica, con energías características. Al absorber un fotón, una molécula

pasa a un estado de mayor energía y esto se puede manifestar según los siguientes efectos, en orden creciente de energía absorbida:

- Incremento de su energía rotacional
- Incremento de su energía vibracional
- Excitación electrónica, disociación o ionización, en que intervienen electrones de valencia
- Excitación electrónica o ionización, en que intervienen electrones internos.

Análogamente, la transición a un estado de menor energía va asociada a la emisión de un fotón de la frecuencia correspondiente.

Los gases diatómicos solo cambian su estado de energía rotacional o vibracional cuando este cambio va asociado a la existencia de un momento dipolar eléctrico. Los gases diatómicos atmosféricos, como el nitrógeno (N_2) y el oxígeno (O_2), no tienen dipolos eléctricos, ya que los centros de carga positiva y negativa coinciden y, por lo tanto, no cambian su estado rotacional o vibracional. En consecuencia, sólo absorben o emiten en la franja de luz ultravioleta (UV) o visible, de mayor energía, también llamada de onda corta, y que corresponde a la franja de emisión del Sol. Cuando esto ocurre, pueden disociarse o ionizarse.

En cambio, los gases triatómicos, como el vapor de agua (H_2O), el dióxido de carbono (CO_2) y el ozono (O_3), presentan diferentes estados de rotación y vibración y, por lo tanto, absorben y emiten en la banda del infrarrojo o de onda larga, que es de menor contenido energético. No obstante, el ozono también absorbe radiación de onda corta procedente del Sol, en la franja ultravioleta más próxima a la luz visible, y es donde es realmente importante para la atmósfera y para el planeta globalmente.

1.2 Efecto Invernadero

Se denomina **efecto invernadero** al fenómeno por el cual determinados gases, que son componentes de la atmósfera de un planeta (u otro cuerpo), retienen la energía que la superficie de éste emite e irradian una parte de ella nuevamente hacia esa superficie. Esto impide que la superficie de ese cuerpo se enfríe.

El efecto invernadero es un efecto natural que se hace tanto más pronunciado cuanto más densa es la atmósfera, pero también según los gases que la componen. Esto se debe a que las diferentes especies químicas absorben radiación selectivamente. De hecho, si se formula un balance energético simplificado de algunos planetas para conocer las temperaturas teóricas que éstos deberían presentar en sus superficies en función de la energía que reciben del Sol, las diferencias con las temperaturas reales que efectivamente ocurren son atribuibles al efecto invernadero que sus atmósferas generan. En la Tabla 1.1 se presenta esta información para algunos planetas del Sistema Solar.

Tabla 1.1. Diferencias entre temperatura teórica y real de distintos planetas (adaptado de Ralph et al., 1990)

Planeta	$T_{teórica}$	T_{real}	Tipo de Atmósfera
Mercurio	410 K	460 K	Ninguna
Venus	300 K	700 K	Densa
Tierra	255 K	288 K	Delgada
Marte	205 K	220 K	Muy delgada
Urano	60 K	65 K	Muy delgada

Es importante remarcar que es deseable que exista el efecto invernadero para posibilitar, entre otras cosas, la vida en sus formas actuales. El proceso problemático que agobia a la comunidad internacional es la **intensificación del efecto invernadero natural** y sus potenciales consecuencias.

1.3 Balance energético de la Tierra

1.3.1 Balance teórico simplificado

Si se realiza un balance energético esquemático sobre el planeta Tierra con el objetivo de relacionar la energía que recibe del Sol y la temperatura de la superficie terrestre, puede verse que la temperatura teórica y la real no se corresponden.

En efecto, sea F_0 la intensidad de energía de la luz solar en la superficie del Sol; entonces se define F_s como la *constante solar* de un cuerpo celeste ubicado a una distancia d del Sol al valor tal que:

$$F_s = \frac{F_0}{d^2}$$

Para la Tierra, el valor de F_s es de 1380 W/m^2 .

Es razonable asumir que la Tierra recibe energía del Sol en la superficie que “es vista” por el Sol, o sea la energía recibida se puede expresar como $F_s \cdot A_T$, siendo $A_T = \pi r_T^2$ el área de la Tierra que es vista por el Sol, representada como un disco plano de radio r_T .

La energía recibida puede ser luego absorbida o reflejada. La cantidad de energía que se refleja es función del albedo terrestre¹ α , que tiene un valor promedio de 0,31. Entonces, la energía que absorbe la superficie terrestre es la diferencia entre la que recibe y la que refleja, y puede escribirse como:

$$\text{Energía absorbida} = F_s \cdot A_T \cdot (1 - \alpha)$$

Imponiendo una condición de equilibrio, la energía absorbida por el planeta debe igualarse con la energía emitida. Para evaluar la energía emitida es razonable emplear la hipótesis de que la Tierra se comporta como un cuerpo negro, es decir, que absorbe toda la energía radiante que incide sobre él sin dejar pasar ni reflejar nada. Entonces, se puede calcular la máxima energía emitida aplicando la ley de Stefan-Boltzmann, que resulta de integrar la ley de Planck⁽²⁾ en todo el espectro de longitudes de onda. En tales condiciones, la máxima emisión energética será proporcional a T^4 , siendo T la temperatura absoluta del cuerpo emisor, expresada en K:

$$E = \sigma \cdot T^4$$

$$\text{con } \sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4} \text{ (constante de Stefan-Boltzmann).}$$

La superficie terrestre irradia en la banda del infrarrojo. La longitud de onda a la que ocurre la máxima emisión es inversamente proporcional a su temperatura; su valor se puede conocer aplicando la ley de

¹ Se denomina **albedo** α a la fracción de energía incidente sobre una superficie que es reflejada por ésta. El albedo planetario de la Tierra tiene un valor medio de $\alpha = 0,31$ (31 %). Aumenta con la latitud y varía estacionalmente. El albedo medio de las nubes oscila entre el 50 % y el 60 %, dependiendo del tipo de nubes y de su espesor.

² La ley de Planck relaciona la energía E emitida o absorbida a una cierta frecuencia ν por un cuerpo, según: $E = h \cdot \nu$, donde h es la constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$). Cada unidad energética emitida/absorbida se designa como fotón o quantum.

Wien. Como puede verse, las ondas de mayor energía resultan ser las de menor longitud, o sea, las de mayor frecuencia:

$$\lambda_{\text{máx}} [m] = \frac{0,0028976}{T [K]}$$

La emisión resultará entonces:

$$\text{Energía emitida} = \sigma T^4 A_{\text{emisora}}$$

La superficie emisora es la superficie total de la Tierra, que es aproximadamente la superficie de una esfera de radio r_T :

$$A_{\text{emisora}} = 4 \pi r_T^2 = 4 A_T$$

Luego, igualando la energía absorbida y la emitida, resulta:

$$F_s A_T (1 - \alpha) = 4 A_T \sigma T_T^4$$

Despejando y sustituyendo por valores numéricos, resulta que la temperatura de equilibrio teórica de la Tierra es de $T_T = 255 \text{ K} = -18 \text{ °C}$. Este valor haría imposible la vida tal y como la concebimos en la actualidad.

La diferencia de la temperatura teórica de equilibrio con la temperatura terrestre real se debe a que los distintos gases presentes en la atmósfera absorben en forma selectiva la energía radiante proveniente del Sol, lo que modifica el balance de energía teórico de nuestro planeta y evita que su superficie se enfríe. Se puede asumir que aproximadamente el 70 % de la energía emitida por la Tierra se mantiene en la atmósfera y es re-irradiada por los gases presentes en ésta.

1.3.2 Balance energético detallado

El balance de radiación del sistema Tierra-Atmósfera se obtiene de la diferencia entre la radiación solar recibida y la emitida por el sistema (341 W/m^2). En una situación de equilibrio, este balance debería ser nulo, es decir, la fracción de energía solar absorbida por la Tierra debería ser igual, a escala anual, a la energía emitida por ésta y el sistema, entonces, no se calentaría ni se enfriaría.

Una parte de la radiación que llega a la Tierra es reflejada por la atmósfera, en particular por las nubes, y también por la superficie terrestre. La cantidad de energía reflejada es función del albedo α .

Otra fracción de la radiación que llega a la parte superior de la atmósfera es difundida en ella por las moléculas de aire, agua y polvo presentes allí. Cuando la radiación incide en una molécula o partícula, ésta se dispersa en todas direcciones, como si se convirtiera en una nueva fuente emisora de radiación. De esta manera, la radiación inicial resulta atenuada. Las moléculas de aire difunden más la radiación de menor longitud de onda (esto hace, por ejemplo, que el cielo se vea de color azul).

Finalmente, una fracción importante es absorbida por los gases atmosféricos, sobre todo en las longitudes de onda más pequeñas. Como resultado de estos procesos de reflexión, difusión y absorción, la radiación que finalmente alcanza la superficie terrestre es bastante menor que la que llega a la alta atmósfera.

Los principales gases atmosféricos responsables de la absorción de radiación solar son:

- En la franja de bajas longitudes de onda (radiaciones UV, por debajo de la luz visible): ozono (O_3) y oxígeno (O_2), aunque también nitrógeno (N_2) y óxido de nitrógeno (NO).
- Para las longitudes de onda mayores (luz visible y radiación infrarroja): ozono (O_3), vapor de agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4).

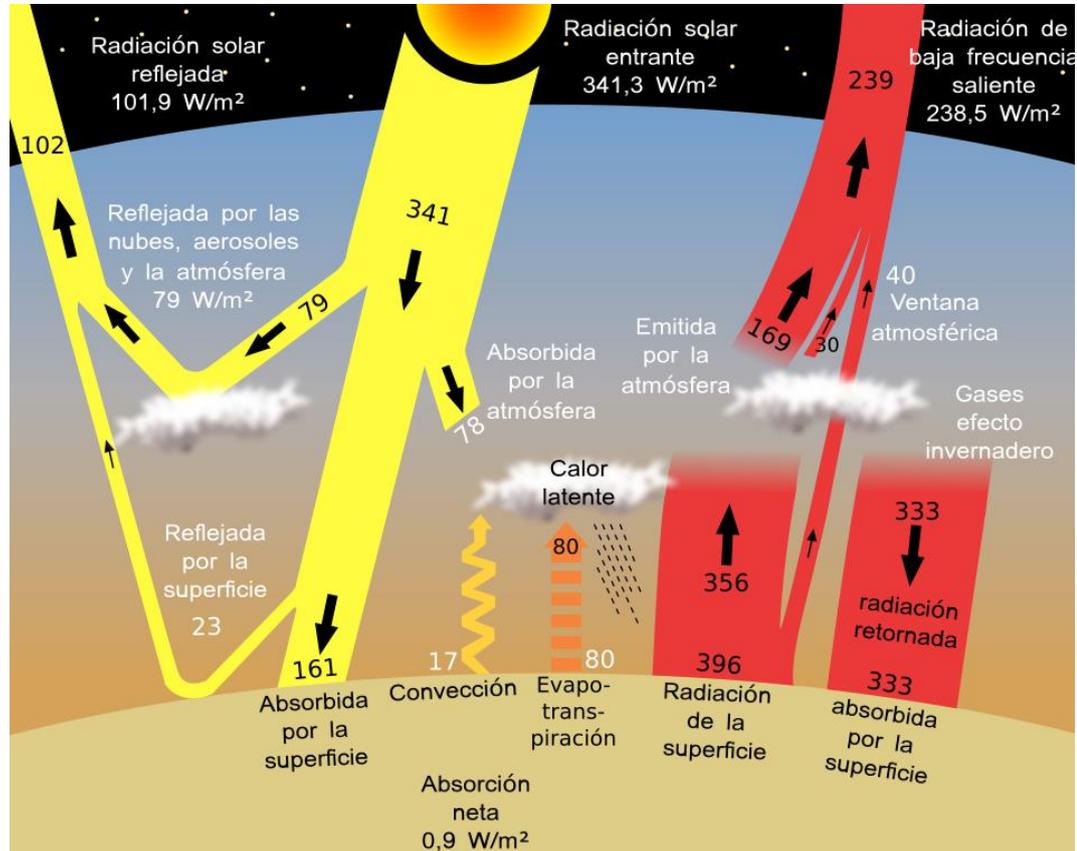


Figura 1.1. Balance energético terrestre detallado (tomado de https://seslab.org/fotovoltaico/31_absorcin_y_reflexin.html)

Analizando a un nivel más detallado este balance, puede verse que:

- De los 341 W/m² que llegan a la alta atmósfera como radiación de onda corta, se refleja en promedio un 30 % (es el albedo terrestre promedio), o sea, 102 W/m².
- De los restantes 239 W/m², 78 W/m² son absorbidos por la atmósfera y 161 W/m² por la superficie terrestre.

Ahora bien, la Tierra, por tener una temperatura mayor que el cero absoluto, emite radiación, y lo hace en una longitud de onda mucho mayor que la que recibe, dado que la longitud de onda de emisión se relaciona con la temperatura del cuerpo emisor.

La Tierra emite 493 W/m² como energía de onda larga, de los que:

- 356 W/m² van a la atmósfera
- 17 W/m² se gastan en procesos de convección
- 80 W/m² se gastan en evapotranspiración o calor latente de vaporización del agua
- 40 W/m² se emiten directamente al espacio.

Aplicando ahora un balance a la atmósfera, ésta recibe:

- 78 W/m² directamente de la radiación que llega a la alta atmósfera desde el sol
- 356 W/m² que emite la Tierra
- 17 W/m² por procesos de convección
- 80 W/m² por procesos de evapotranspiración.

A su vez, re-irradia hacia la Tierra 333 W/m² y los restantes 198 W/m² hacia el espacio exterior. Estos 198 W/m² más los 40 W/m² emitidos directamente por la Tierra hacia el espacio, completan los 238 W/m² que cierran el balance energético de modo que la energía entrante al sistema Tierra – atmósfera es igual a la energía saliente del mismo.

Sin embargo, se ha comprobado que la Tierra está absorbiendo (0,85 ± 0,15) W/m² más que lo que emite al espacio. Se piensa que esto tiene que ver con el progresivo aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera.

1.4 Absorción de energía en la atmósfera

La absorción de energía en la atmósfera está estrechamente relacionada con su composición química. Esto se manifiesta, por ejemplo, en las diferencias que se constatan entre los espectros de energía en la alta atmósfera y en la superficie terrestre que se comparan en la Figura 1.2.

Nótese que las diferencias en la región del UV y la luz visible se deben principalmente al O₃, en tanto en la zona del infrarrojo (IR) la mayor absorción se relaciona con el vapor de agua, uno de los principales gases naturales de efecto invernadero.

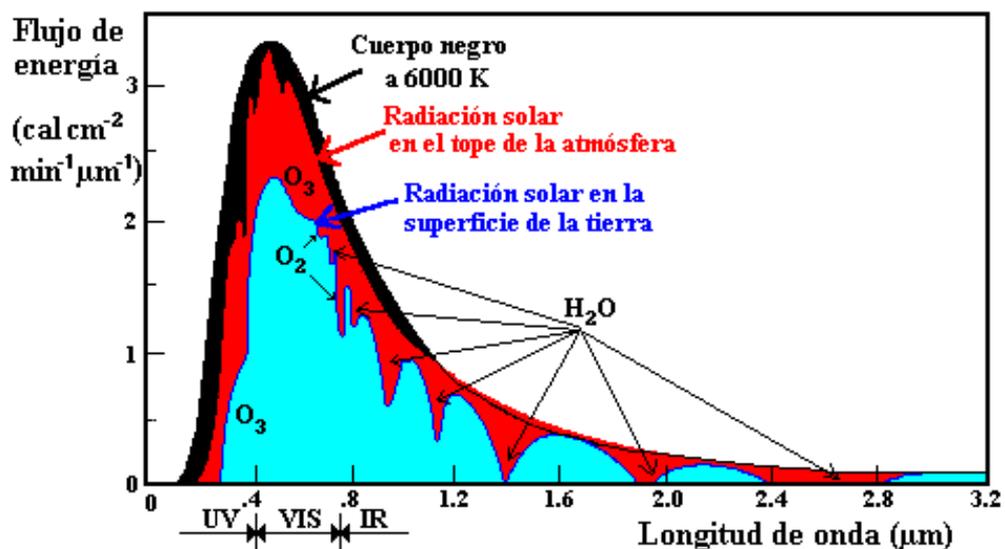


Figura 1.2. Distribución espectral de la radiación solar en la alta atmósfera y en la superficie terrestre (se indican los gases responsables de la absorción de las diferentes longitudes de onda). Extraído de <https://cesacev.wordpress.com/about/>

1.5 Gases de Efecto Invernadero (GEI)

Los **Gases de Efecto Invernadero (GEI)** o **gases termoactivos** son aquellos **capaces de absorber radiación infrarroja**. Esa energía no es suficiente como para que ocurran reacciones químicas, sino que simplemente

aumenta la energía de rotación y de vibración de las moléculas. El exceso de energía se transfiere a otras moléculas por colisión molecular, lo que aumenta la temperatura del aire y, por ende, colabora con el calentamiento de la Tierra.

Los principales gases naturales de efecto invernadero son el vapor de agua H_2O , dióxido de carbono CO_2 , metano CH_4 , óxido nitroso N_2O y ozono troposférico O_3 . Los espectros de absorción energética de estos GEI se presentan en la Figura 1.3.

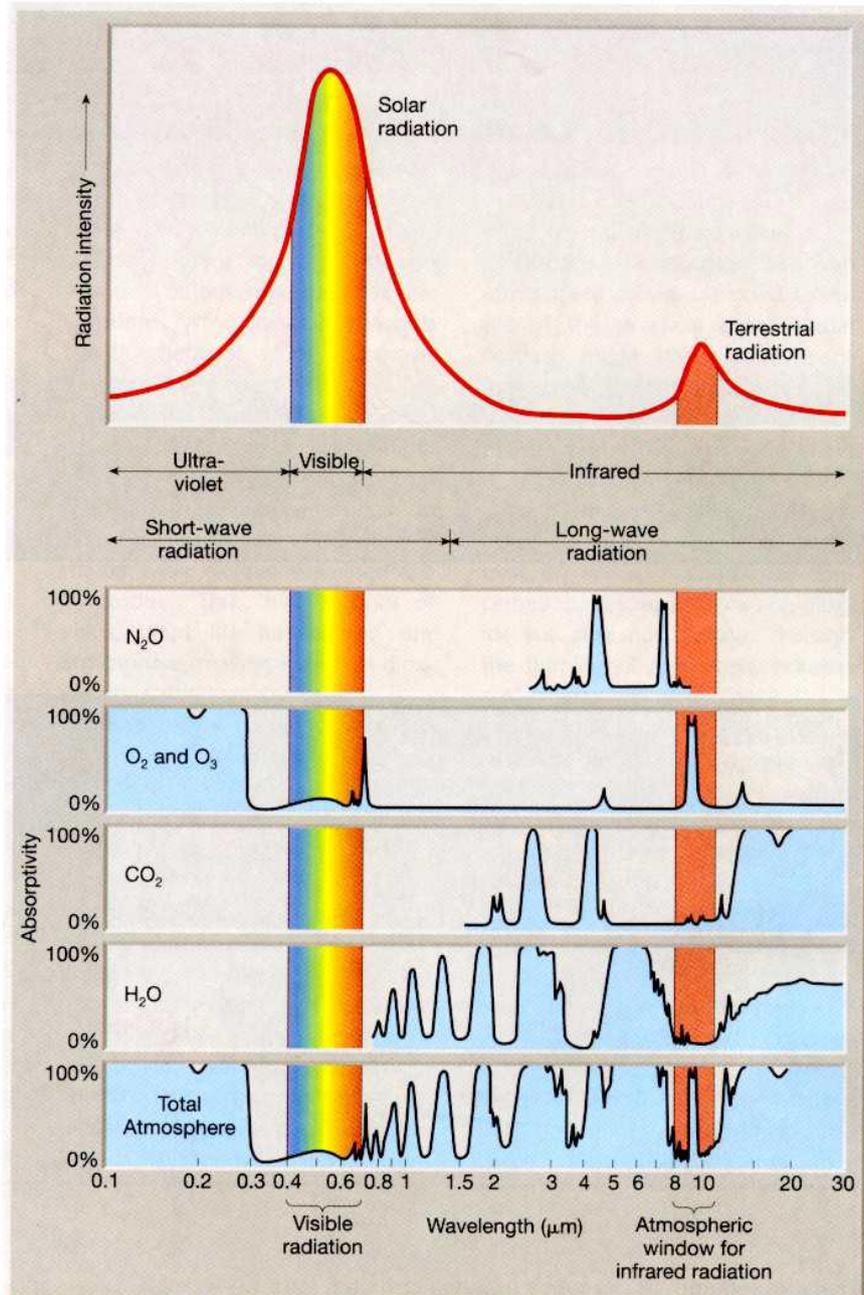


Figura 1.3. Espectro de absorción de los principales Gases de Efecto Invernadero presentes en la atmósfera.

Tomado de <https://www.ugr.es/~andyk/Docencia/Metclim/02.pdf>

A estos GEI naturales se han sumado otros de origen xenobiótico: clorofluorocarbonos CFC, hidroclorofluorocarbonos HCFC, hidrofluorocarbonos HFC, perfluorocarbonos PFC, hexafluoruro de azufre SF_6 , trifluoruro de nitrógeno NF_3 .

1.6 Fuentes de los principales Gases de Efecto Invernadero (GEI)

1.6.1 Vapor de agua (H₂O)

Es el gas de origen natural que posee mayor capacidad de absorción de calor y es por lo tanto el más activo de los gases de efecto invernadero. Su ciclo normal (tiempo de permanencia en la atmósfera) es de siete días. La brevedad del ciclo, el hecho de que la evaporación sea un fenómeno natural y necesario en el equilibrio del ciclo hidrológico que se produce a partir de innumerables fuentes -mayoritariamente naturales-, y la importancia del agua para la vida, son buenos argumentos para no centrar las preocupaciones ambientales en el contenido de vapor de agua de la atmósfera. Si la temperatura de la atmósfera aumenta, es capaz de aceptar mayor cantidad de vapor de agua y aumentar así el efecto invernadero, generando un ciclo de retroalimentación positiva, con efectos adversos desde el punto de vista del calentamiento atmosférico.

1.6.2 Dióxido de carbono (CO₂)

Es el gas que se toma como referencia a los efectos de estudiar los fenómenos relacionados con el calentamiento atmosférico. Su vida media en la atmósfera es de unos 120 años.

Los efectos de otros GEI se evalúan en relación a los del CO₂ a través del Potencial de Calentamiento Global (GWP), que se define en la sección 2.2.2 de estas notas.

El crecimiento de la concentración de CO₂ en la atmósfera es preocupante. Previa a la Revolución Industrial se estima que la concentración era de unas 280 ppm, en tanto en el año 2000 eran próximas a 380 ppm; a 2011, del orden de 390 ppm. En mayo de 2013 se alcanzó por primera vez un valor puntual de 400 ppm de CO₂ en la atmósfera. A partir de diciembre de 2015, todos los promedios mensuales obtenidos en el observatorio de Mauna Loa han superado ese valor, lo que redundó en que en noviembre de 2016 se superara por primera vez la barrera de las 400 ppm como media anual móvil. En 2022 se han superado las 420 ppm (valores puntuales), según datos de la US-NOAA medidos en el laboratorio de Mauna Loa, Hawaii (ver Figura 1.4).

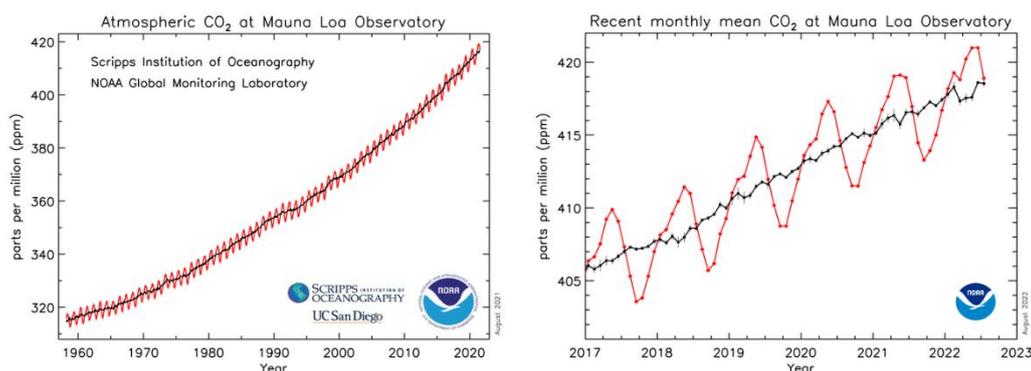


Figura 1.4. Evolución de las concentraciones de CO₂ medidas en la estación de Mauna Loa, Hawaii. (según US-NOAA).

Entre 1970 y 2004, las emisiones anuales de CO₂ aumentaron en aproximadamente un 80 %, pasando de 21 Gton a 38 Gton; en 2004 representaban el 77 % de las emisiones antropogénicas totales de GEI. El crecimiento de los niveles de CO₂ se asocia con los desequilibrios impuestos por el hombre al ciclo natural del carbono, principalmente la quema de combustibles fósiles y la deforestación masiva.

A escala mundial, se considera que el 30 % del CO₂ emitido proviene de la generación energética, el 20 % de la actividad industrial y el 20 % del transporte. El rol de los cambios de uso del suelo y producción de biomasa se evalúa en un 9 %, por lo que se estima que se lograría poco solamente reforestando, pues la mayor incidencia en el crecimiento de las concentraciones de CO₂ atmosférico proviene del aporte de las emisiones antropogénicas. También las tasas de crecimiento de las concentraciones ascienden década a década: la tasa media anual de crecimiento de 2001-2010 es de 2,04 ppm, más del doble de la tasa correspondiente a la década de 1960, que fue de 0,88 ppm.

1.6.3 Metano (CH₄)

Su tiempo de residencia en la atmósfera es de 10 años. En los últimos años, la concentración de metano en la atmósfera ha sufrido un gran incremento.

La emisión de metano se asocia con procesos de degradación anaerobia. A nivel mundial, se considera que un 23 % del metano proviene de procesos naturales de degradación en ambientes naturales como pantanos, el 17 % de la fermentación entérica del ganado y el 12 % de los cultivos de arroz (por ser un cultivo de inundación, en las zonas con cierto nivel de sumergencia e irrigación permanente se desarrollan bacterias anaerobias). Además, un 20 % procede de las actividades de extracción de combustibles fósiles (actualmente se trata de maximizar su recuperación y su uso como gas natural) y un 18 % de la degradación de residuos sólidos y líquidos por procesos anaerobios.

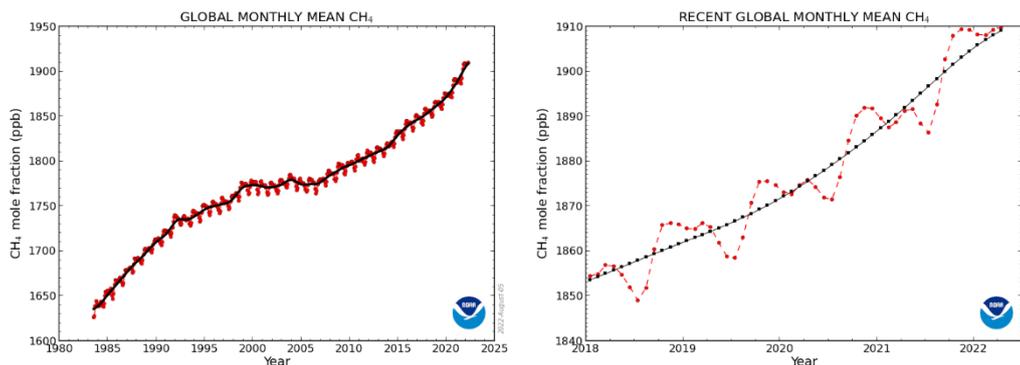


Figura 1.5. Evolución de las concentraciones de CH₄ en la atmósfera (según US-NOAA)

A partir de un estudio de emisiones de las turberas boreales de Rusia en ocasión de una prolongada ola de calor, se determinó que contenían muy elevadas concentraciones de metano y también un alto contenido de CO₂. Esto condujo a evaluar que las emisiones que se producen en verano desde las turberas y el permafrost pueden ser más del doble de las que ocurren durante el resto del año. Adicionalmente, a mediados de 2016 se publicó un estudio acerca de 267 embalses y represas construidos desde el año 2000, que puso en evidencia que en todos los casos liberan importantes cantidades de metano. Si bien en algunos casos se encontró que podrían fijar mayor cantidad de CO₂ y/o de N₂O del que emiten, la emisión de CH₄ resultó siempre positiva y además, significativa. Las emisiones desde embalses no están aún integradas en los inventarios de GEI.

Algunas tecnologías actualmente en uso contribuyen fuertemente con las emisiones de metano a la atmósfera y dificultan su control. Es el caso, por ejemplo, de los establecimientos de cría intensiva de ganado (feed lots), donde coexisten problemas de emisiones de gases malolientes y GEI.

1.6.4 Óxido nitroso (N₂O)

Proviene principalmente del sector agropecuario, por excretas de animales y utilización de fertilizantes nitrogenados, que representa a nivel mundial el 62 % de la emisión. También hay emisión de N₂O a partir de las excretas humanas y desde embalses. Las concentraciones atmosféricas de óxido nitroso son crecientes, a razón de 0,5 % anual.

El óxido nitroso N₂O tiene picos de absorción en longitudes de onda del orden de los 5 μm y 8 μm (Figura 1.3). Su tiempo de residencia en la atmósfera es del orden de 130 años.

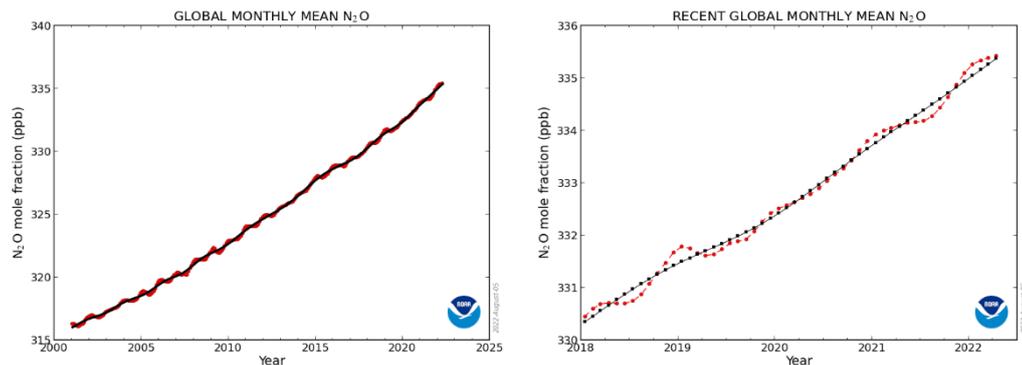


Figura 1.6. Evolución de las concentraciones de N₂O en la atmósfera (según US-NOAA)

El N₂O es susceptible de convertirse en NO_x en la tropósfera. Los NO_x son gases irritantes que se consideran *contaminantes atmosféricos criterio*³, como se verá en el módulo de calidad de aire.

1.6.5 Ozono (O₃)

Es un gas termoactivo, al igual que otros gases triatómicos. Su absorción es muy alta en la región ultravioleta pero muy escasa en las regiones infrarroja y visible, excepto en picos de longitudes de onda aislados. Esto significa que este gas absorbe esencialmente toda la radiación ultravioleta, pero es casi “transparente” a la fracción visible e infrarroja del espectro.

El ozono troposférico tiene incidencia local y un ciclo muy breve, por lo que no se toma en consideración en los balances de emisiones de gases de efecto invernadero. A nivel estratosférico, su concentración desciende a razón de 0,2 % anual.

Se piensa que el calentamiento de la tropósfera por efecto del crecimiento de las concentraciones de GEI estaría generando un enfriamiento importante en la estratósfera. De ser así, esto podría generar una mayor reducción de ozono en la estratósfera y la ocurrencia más frecuente de agujeros de ozono. La reducción de la cantidad de ozono estratosférico permitiría una mayor penetración de radiación solar, que tendería a calentar la tropósfera. Pero a su vez, una estratósfera más fría emitiría menos radiaciones de onda larga, y esto tendería a enfriar la tropósfera, oponiéndose al efecto anterior. Estas tendencias opuestas, dentro de un fenómeno de por sí complejo, dificultan las predicciones a futuro.

³ Los contaminantes criterio son un conjunto de sustancias muy abundantes en la atmósfera, que tienen el potencial de causar efectos adversos a la salud humana al cabo de exposiciones relativamente cortas. Eso hace que sea necesario fijar criterios de exposición.

1.6.6 Compuestos clorofluorocarbonados CFC

Son compuestos xenobióticos de prolongada vida media en la atmósfera, que se han presentado en el capítulo anterior de estas notas. La importancia de los CFC en relación al calentamiento atmosférico es considerable pues, pese a sus pequeñas concentraciones atmosféricas, tienen valores de Potencial de Calentamiento Global (ver sección 2.2.1) miles de veces mayores que el del CO₂ (del orden de 15.000 para un período de 100 años, contra un valor de 1 que se asigna al CO₂).

Sus tasas de producción han descendido sostenida y notoriamente a nivel mundial, a partir de la entrada en vigencia del Protocolo de Montreal en 1989. El móvil inicial de reducir la producción de CFC fue la protección de la capa de ozono, ya que desde 1974 se había demostrado la participación de estas moléculas en la destrucción catalítica del ozono estratosférico.

2 Cambio Climático

2.1 Calentamiento atmosférico y Cambio Climático

2.1.1 Variabilidad climática y cambio climático

Usualmente se designa como **variabilidad climática** al conjunto de los permanentes cambios del clima que son atribuidos a causas naturales.

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC) define el **cambio climático** como **el cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada en períodos comparables**. A veces se usa también la expresión *cambio climático antropogénico* para referirse al *cambio atribuible a causas humanas*.

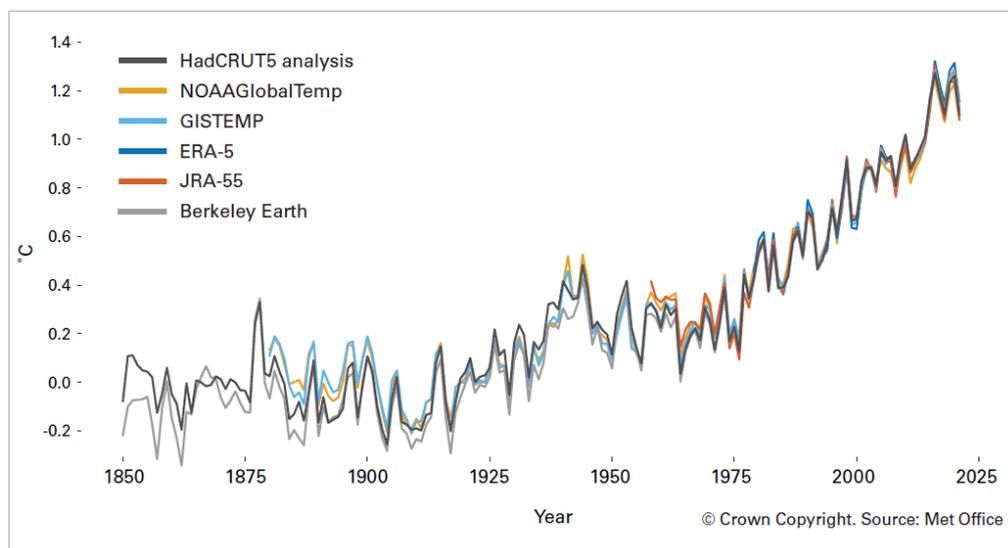


Figura 2.1. Variaciones medias de la temperatura desde 1850 según diferentes conjuntos de datos, según el Servicio Meteorológico del Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte (OMM, 2022)

El cambio climático implica cambios en otras variables como las precipitaciones a nivel global y sus patrones, la cobertura de nubes y los demás elementos del sistema atmosférico. La complejidad del problema y sus múltiples interacciones hacen que la única manera de evaluar estos cambios sea mediante el uso de modelos computacionales que simulan la física de la atmósfera y de los océanos.

Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM), los años de 2015 en adelante han sido los más calientes desde que se tienen registros. Aunque el incremento de la temperatura media de la Tierra se estima en +1,2 °C a 2020, algunas predicciones que maneja la OMM indican que en 2024 se podría alcanzar un valor de +1,5 °C. Para el PNUMA, la urgencia de la descarbonización no permite esperar más: si solamente se realizan las acciones previstas en el Acuerdo de París de 2015, las temperaturas medias hacia 2100 serán 3,5 °C más altas.

2.1.2 Concentración de GEI y Cambio Climático

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) declaró que *el calentamiento del sistema climático es inequívoco*. Las temperaturas en la tropósfera inferior se han incrementado entre 0,08 °C y 0,22 °C por decenio desde 1979, en tanto las temperaturas en la superficie terrestre muestran un incremento de aproximadamente 0,15 °C por decenio en el mismo período.

Tabla 2.1. Evolución de gases de efecto invernadero afectados por actividades humanas (datos de la Agencia Meteorológica de Japón)

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Concentración preindustrial	≈ 280 ppm	≈ 715 ppb	≈ 270 ppb
Concentración 2020	413 ppm	1889 ppb	333 ppb
Tiempo de vida en la atmósfera	5 a 200 años ^a	12 años ^b	109 años ^b

^a No puede definirse un solo período de vida para el CO₂, dados los diferentes índices de absorción según proceso de eliminación.

^b Este período de vida ha sido definido como un “tiempo de ajuste” que tiene en cuenta el efecto indirecto del gas en su propio tiempo de residencia.

La temperatura media global ha aumentado, debido principalmente a actividades humanas que están incrementando las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera (Figura 2.2).

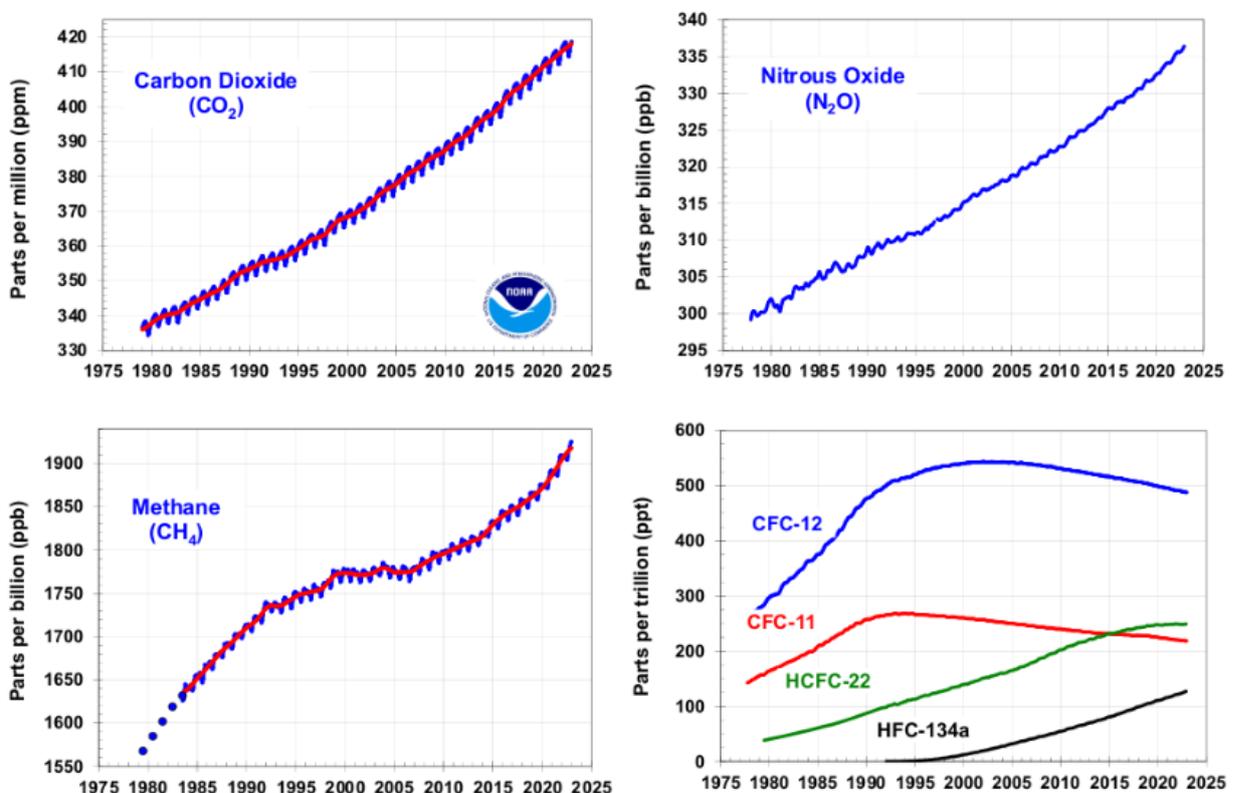


Figura 2.2. Evolución de las concentraciones de los principales GEI en la atmósfera en las últimas décadas (tomado de: <https://es.co2.earth/annual-ghg-index-aggi>)

Las emisiones antropogénicas mundiales de gases de efecto invernadero (GEI) aumentaron en forma sostenida desde el comienzo de la Revolución Industrial, como resultado de múltiples actividades humanas. En particular, entre 1970 y 2004 se estima que el crecimiento ha sido de un 70 %. La compara la situación previa a la revolución industrial con la de los últimos años.

2.1.3 Algunos gases no termoactivos que participan en el calentamiento atmosférico

Existen algunos gases que, sin ser GEI (es decir, no absorben radiación infrarroja), contribuyen indirectamente al incremento del efecto invernadero y se asocian con emisiones antropogénicas. Entre ellos, cabe citar el CO, los NO_x y los compuestos orgánicos volátiles distintos del metano⁴ (COVDM o COVNM).

En contraposición, el dióxido de azufre (SO₂) y las partículas de sulfato que se forman a partir de él tienden a incrementar la radiación solar que se refleja al espacio. El SO₂ lo hace directamente, y las partículas de sulfato, al disolverse en el agua que forma las nubes, aumentan la reflectividad de la parte superior de éstas. De este modo, el dióxido de azufre y las partículas de sulfatos contribuyen al enfriamiento de la atmósfera. Como la vida media de estos compuestos de azufre en la atmósfera es de entre 1 y 3 semanas, el efecto que se logra es más bien local. No debe perderse de vista la importancia que tienen los procesos de desulfuración de combustibles fósiles y la aplicación de estas tecnologías a nivel mundial: al evitar la emisión de óxidos de azufre, se genera una menor contraposición al efecto de las emisiones de CO₂ resultantes de la combustión de combustibles fósiles.

La mayor parte de los aerosoles derivados de emisiones antropogénicas enfrían el clima a nivel local al refractar la luz solar al espacio, y al proporcionar núcleos para el inicio de procesos de condensación y formación de nubes que luego realicen esa refracción, contribuyendo a su vez a un efecto de enfriamiento. Estos aerosoles pueden provenir de fuentes naturales o de procesos de combustión con importante generación de dióxido de azufre SO₂. En las regiones más industrializadas, el enfriamiento producido por los aerosoles atmosféricos puede contrarrestar localmente casi todo el aumento del calentamiento producido por las emisiones de GEI. Entre los principales emisores de aerosoles cabe citar las plantas de generación de energía eléctrica, los incendios forestales y la quema de residuos agrícolas. Si bien los aerosoles desaparecen del aire en unos pocos días, su impacto sobre el clima deriva de las grandes cantidades emitidas.

2.2 Forzamiento radiativo y métricas de evaluación

La expresión **forzamiento radiativo** se refiere a *la variación de la capacidad de la atmósfera para absorber radiación emitida por la Tierra*. La definición del Panel Internacional de Cambio Climático (IPCC) indica que *es la variación neta del intercambio de energía por unidad de área, medida en la parte superior de la atmósfera*. Se expresa en W/m².

Actualmente se habla de *forzamiento radiativo positivo*, es decir, de un *incremento en la capacidad de absorber radiación*, ya que la Tierra está absorbiendo unos (0,85 ± 0,15) W/m² más que lo que está emitiendo al espacio. En respuesta a este forzamiento radiativo *positivo*, y para intentar restablecer el equilibrio energético a nivel de la tropopausa (lograr mantener un forzamiento radiativo *nulo*), ocurren

⁴ Los COVDM son compuestos orgánicos de cadena lineal que contienen entre 2 y 5 átomos de carbono.

cambios en el sistema climático y la superficie terrestre (incremento de las temperaturas promedio, crecimiento del nivel medio del mar, cambios en la circulación atmosférica).

Tabla 2.2. Expresiones simplificadas para calcular el forzamiento radiativo de algunos GEI (IPCC, 2001)

Gas	Expresión simplificada para el cálculo del Forzamiento Radiativo ΔF (W/m^2)	Constante
CO ₂	$\Delta F = \alpha \ln(C/C_o)$	$\alpha = 5,35$
CH ₄	$\Delta F = \beta(M^{1/2} - M_o^{1/2}) - [f(M, N_o) - f(M_o, N_o)]$	$\beta = 0,036$
N ₂ O	$\Delta F = \epsilon(N^{1/2} - N_o^{1/2}) - [f(M_o, N) - f(M_o, N_o)]$	$\epsilon = 0,12$

El subíndice "o" refiere a las concentraciones de 1750, es decir, preindustriales:
 C_o = 278 ppm, M_o = 722 ppb, N_o = 270 ppb
 $f(M, N) = 0.47 \ln[1 + 2.01 \times 10^{-5} (MN)^{0.75} + 5.31 \times 10^{-15} M(MN)^{1.52}]$
 C es la abundancia global de CO₂ en la atmósfera en ppm, M es lo mismo para CH₄ en ppb, N lo mismo para N₂O en ppb

2.2.1 Índice Anual de Gases de Efecto Invernadero (AGGI)

El Índice Anual de Gases de Efecto Invernadero (AGGI) es un índice creado por la US-NOAA para expresar cuantitativamente la capacidad de la atmósfera terrestre para atrapar el calor como resultado de la presencia de gases de efecto invernadero de larga duración; está estrechamente relacionado con el concepto de Forzamiento Radiativo.

El AGGI toma como punto de referencia las concentraciones atmosféricas de GEI en el año 1990, que es el año base que se aplica en el Protocolo de Kyoto; a ese año corresponde el valor 1. Por ejemplo, en 2021 el AGGI fue de 1,49, lo que quiere decir que hubo un incremento del 49 % desde 1990. Las variaciones del AGGI de un año a otro están, en la práctica, estrechamente relacionadas con las variaciones de las concentraciones atmosféricas de CO₂ en el mismo período.

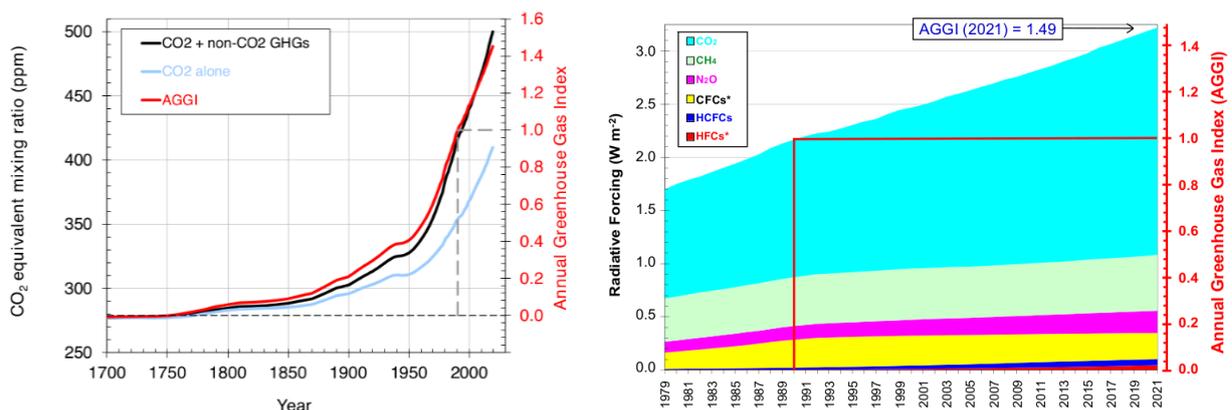


Figura 2.3. Evolución del Índice Anual de Gases de Efecto Invernadero (AGGI) de la US-NOAA

2.2.2 Potencial de calentamiento global (GWP)

La contribución que cada gas realiza al calentamiento atmosférico depende, entre otros factores, de su naturaleza química (poder de absorción de calor de las propias moléculas) y de su tiempo de permanencia en la atmósfera. Para medir la contribución relativa de un gas en el forzamiento radiativo y comparar el rol de diferentes gases en la intensificación del efecto invernadero natural, actualmente se emplea el Potencial

de Calentamiento Global (PCG) o Global Warming Potential (GWP), que es la versión actual del antes usado Potencial de Calentamiento Atmosférico (PCA).

El GWP representa la cantidad de calor que puede ser absorbido por una unidad de masa de un gas en un cierto período de tiempo, en relación al que absorbe una masa igual de CO₂ en el mismo lapso de tiempo. Dado que el PCG se refiere **siempre** al correspondiente valor del CO₂, el **CO₂** tiene por definición **GWP = 1** para **cualquier período de tiempo**. Por lo general, los valores más usuales de GWP son para un período de 100 años.

Tabla 2.3. Valores de GWP a 100 años para algunos GEI (según IPCC, 2013)

Gas	GWP (100 años)
CO ₂	1
CH ₄	28
N ₂ O	265
SF ₆	23500

Actualmente el SF₆ tiende a ser sustituido en algunos usos por el NF₃, trifluoruro de nitrógeno, cuyo GWP es algo menos elevado, de entre 16.000 y 17.000.

2.2.3 Potencial de Cambio de Temperatura Global (GTP)

El Potencial de Cambio de Temperatura Global o Global Temperature Potential (GTP) es otro parámetro que se emplea para comparar posibles efectos de diferentes GEI. Se refiere al *cambio de la temperatura media global de la superficie terrestre que es capaz de inducir un GEI, en relación al que induciría el CO₂ en el mismo horizonte de tiempo*.

Tabla 2.4. Valores de GTP a 100 años para algunos GEI

Gas	GTP (100 años)
CO ₂	1
CH ₄	4
N ₂ O	234
CFC-11	2340

2.3 Previsiones del IPCC

El IPCC considera que es muy probable que el cambio climático se acelere y estima un incremento de las temperaturas medias globales de superficie de entre 1,8 °C y 4,0 °C para fines del siglo XXI. Estas predicciones se obtienen por modelación numérica, analizando diferentes escenarios acerca de las futuras emisiones y las posibles políticas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Los modelos numéricos son extremadamente complejos, por lo que las predicciones estacionales y a escala local son mucho más inciertas. Las previsiones difieren de un modelo a otro, e incluso existen teorías que niegan la incidencia de los procesos antropogénicos en los fenómenos meteorológicos/climáticos actuales e incluso niegan la ocurrencia de un proceso de calentamiento del planeta. En el Acuerdo de París firmado en diciembre de 2015 se estableció como objetivo un límite de 2 °C al incremento global de temperatura para fines del S. XXI. El retiro de Estados Unidos y los incrementos en las concentraciones de GEI registrados en el último tiempo hacen dudar de las posibilidades reales de alcanzarlo.

Las principales conclusiones del Informe sobre el Estado del Clima en Latinoamérica y el Caribe, publicado en julio de 2022 por la Organización Meteorológica Mundial, se transcriben en lo que sigue tal como las presenta esta Organización en su sitio Web, ofrecen un panorama de la situación actual y perspectivas para nuestro continente en relación al Calentamiento Global:

Conclusiones principales:

- *Temperatura: La tendencia al calentamiento en América Latina y el Caribe continuó en 2021. La tasa media de aumento de las temperaturas fue de aproximadamente 0,2 °C por década entre 1991 y 2021, frente a los 0,1 °C por década registrados entre 1961 y 1990.*
- *Los glaciares de los Andes tropicales han perdido, al menos, un 30 % de su superficie desde la década de 1980, y presentan una tendencia negativa en cuanto a su balance de masas de $-0,97$ m de equivalente en agua al año durante el período de monitoreo (1990-2020). Algunos glaciares del Perú han perdido más del 50 % de su superficie. El retroceso de los glaciares y la correspondiente pérdida de masa de hielo han agravado el riesgo de escasez de agua para la población y los ecosistemas andinos.*
- *El nivel del mar en la región continuó subiendo a un ritmo más rápido que a escala mundial, sobre todo a lo largo de la costa atlántica de América del Sur al sur del ecuador ($3,52 \pm 0,0$ mm por año, de 1993 a 2021) y en el Atlántico norte subtropical y el golfo de México ($3,48 \pm 0,1$ mm por año, de 1991 a 1993). El incremento del nivel del mar amenaza a un porcentaje muy importante de la población que se concentra en las zonas costeras, ya que contamina los acuíferos de agua dulce, erosiona las costas, inunda las zonas de baja altitud y aumenta el riesgo de mareas de tempestad.*
- *La “megasequía” que castiga la zona central de Chile prosiguió en 2021, en su decimotercer año hasta la fecha, lo que la convierte en la más prolongada que afecta a la región en el último milenio, agravando una tendencia al aumento de la sequedad y poniendo a Chile a la cabeza de la crisis hídrica de la región. Además, una sequía pluriannual en la cuenca del Paraná-Plata, la peor desde 1944, afectó al centro-sur del Brasil y a partes del Paraguay y del Estado Plurinacional de Bolivia.*
- *En la cuenca del Paraná-Plata, los daños a la agricultura causados por la sequía redujeron las cosechas, en especial las de soja y maíz, y ello afectó a los mercados agrícolas mundiales. En el conjunto de América del Sur, las condiciones de sequía provocaron un descenso del 2,6 % en la cosecha de cereales de 2020/2021 con respecto a la temporada anterior.*
- *La temporada de huracanes del Atlántico de 2021 fue la tercera más activa de la que se tiene constancia en esa cuenca, al haberse registrado 21 tormentas con nombre (incluidos siete huracanes), y fue la sexta temporada consecutiva de huracanes en el Atlántico por encima de lo normal. Algunas de estas tormentas afectaron directamente a la región.*
- *En 2021, las precipitaciones extremas —que acumularon valores sin precedentes en muchos lugares— ocasionaron crecidas y deslizamientos de tierra. Se produjeron importantes pérdidas, y en particular cientos de víctimas mortales, decenas de miles de viviendas destruidas o dañadas y cientos de miles de desplazados. Las crecidas y los deslizamientos de tierra en los estados brasileños de Bahía y Minas Gerais provocaron unas pérdidas estimadas en 3100 millones de dólares de los Estados Unidos.*

- *La deforestación en la pluviselva amazónica brasileña se duplicó con respecto al promedio de 2009-2018 y alcanzó su nivel más alto desde 2009. En 2021 se perdió un 22 % más de superficie forestal que en 2020.*
- *Un total de 7,7 millones de personas en Guatemala, El Salvador y Nicaragua experimentaron altos niveles de inseguridad alimentaria en 2021, a lo que contribuyeron factores como el efecto continuado de los huracanes Eta e Iota de finales de 2020 y las repercusiones económicas de la pandemia de COVID-19.*
- *Los Andes, el noreste del Brasil y los países del norte de América Central son algunas de las regiones más sensibles a las migraciones y los desplazamientos motivados por causas climáticas, fenómenos que han aumentado en los últimos ocho años. Las migraciones y los desplazamientos de población tienen múltiples causas. El cambio climático y los fenómenos extremos asociados son factores amplificadores que agravan problemas sociales, económicos y medioambientales.*
- *América del Sur es una de las regiones con mayor necesidad documentada de reforzar los sistemas de alerta temprana. Los sistemas de alerta temprana de peligros múltiples son instrumentos fundamentales para lograr una adaptación eficaz en zonas expuestas a los fenómenos meteorológicos, hidrológicos y climáticos extremos.*

Adicionalmente, en la conferencia de presentación de esta publicación, el representante de la CEPAL expresó:

“El agravamiento del cambio climático y los efectos combinados de la pandemia de COVID-19 no solo han afectado a la biodiversidad de la región, sino que también han estancado décadas de progreso contra la pobreza, la inseguridad alimentaria y la reducción de las desigualdades en la región”.

2.4 Posibles consecuencias del Cambio Climático

Entre los múltiples efectos que cabe esperar en el mediano plazo a causa del calentamiento global de la superficie terrestre, cabe citar los siguientes.

2.4.1 Ascenso del nivel de los mares

Es quizás el efecto más inmediato y más comentado, lo que se relaciona con que la mayor parte de la población mundial habita sobre o en las proximidades de las costas. Los ascensos que se prevén son muy significativos, aunque varían mucho entre diferentes modelos y escenarios (entre 9 y 88 cm para el año 2100). La causa principal sería la expansión térmica de las capas superiores del océano, con alguna contribución proveniente del descongelamiento de los glaciares.

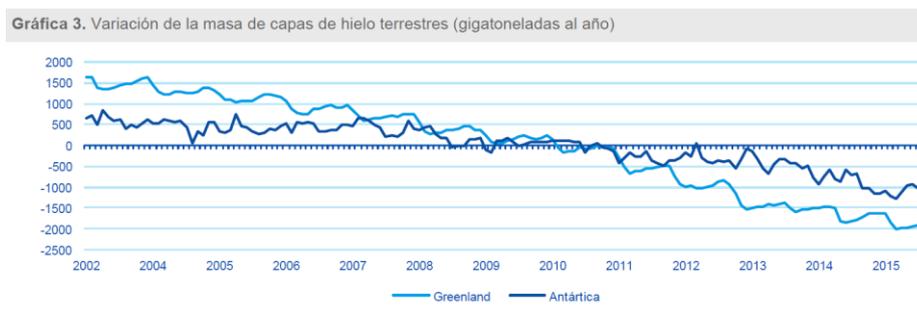


Figura 2.4. Variación de la masa de capas de hielo terrestres en Groenlandia (línea clara) y la Antártida (línea oscura). Tomado de BBVA, 2017

Las consecuencias más inmediatas y significativas del cambio climático para las costas mundiales incluyen la erosión costera, la variación en los patrones de caudales, la intrusión salina y las alteraciones en los ecosistemas, con modificación o pérdida de hábitats y sus consecuencias directas sobre la biodiversidad.

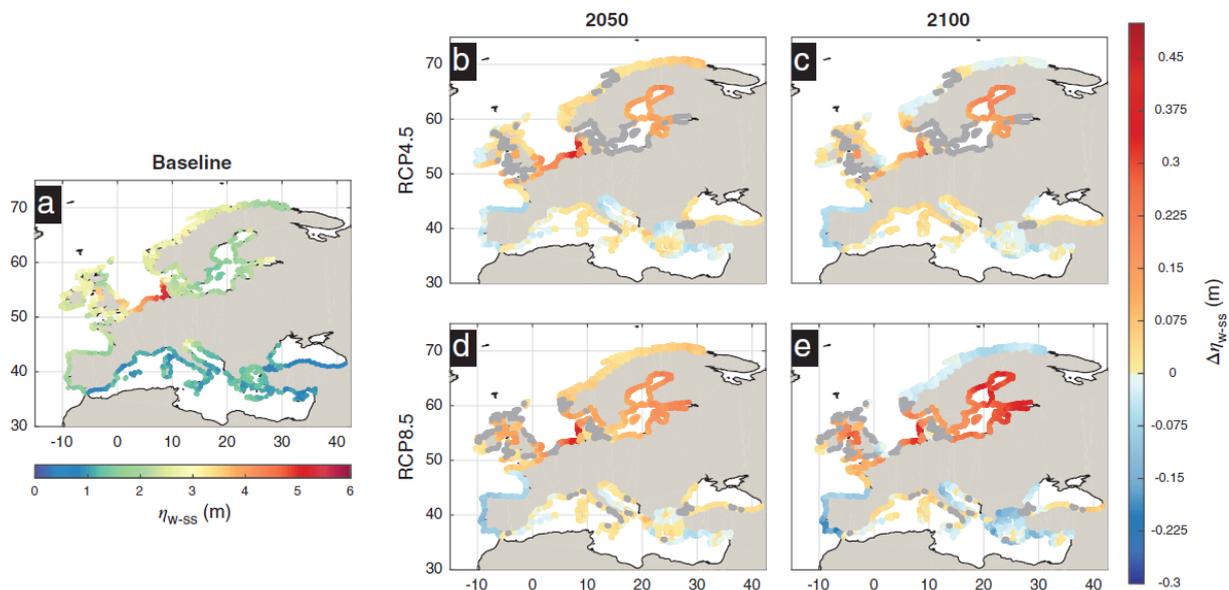


Figura 2.5. Contribución de eventos climáticos extremos a la ocurrencia de niveles extremos del mar en las costas europeas en dos escenarios (b-c y d-e) y dos horizontes temporales (2050 y 2100). Aunque algunos escenarios muestran resultados contradictorios en algunas zonas, en general se esperan ascensos en los niveles extremos en las costas del Mar Báltico, Mar del Norte, Mar Negro y parte del Mediterráneo, así como descensos en las costas no mediterráneas de la Península Ibérica (Tomado de Vousdoukas et al., 2017)

2.4.2 Acidificación de los mares

Al aumentar la cantidad de CO_2 atmosférico, éste tiende a disolverse incrementando su concentración en el agua. El incremento de la concentración de CO_2 induce un desplazamiento de la reacción de equilibrio, de modo de formar HCO_3^- y H^+ . El incremento en la concentración de protones baja el pH del medio, con posibilidades de generar efectos adversos sobre los ecosistemas.

Se estima que entre 1751 y 1994 el pH de la superficie del océano ha descendido en casi 0,1 unidades, y se prevé que a medida que el océano absorba más CO_2 , se produzca un descenso de entre 0,3 y 0,5 hacia 2100.

2.4.3 Retroceso y posible desaparición de los glaciares

Entre 1550 y 1850, los glaciares crecieron. Desde fines del Siglo XIX ha habido una reducción sostenida de la superficie de los glaciares a un 50 % de su valor original. En el período entre 1950 y 1980 sufrieron un proceso fluctuante. A partir de 1980, el retroceso de los glaciares ha sido muy rápido, amenazando la existencia de numerosos de ellos en todo el mundo. El proceso ha sufrido un profundo incremento y aceleración desde 1995. Esto provoca inundaciones o desbordes de lagos glaciales y aumenta la variación anual del caudal en ríos (ver Figura 2.7).



Figura 2.6. El Glaciar Upsala en 1968 (arriba) y 2016 (abajo). Retrocedió más de 10 km y redujo su ancho a la mitad (Tomado de <http://www.estrucplan.com.ar>)

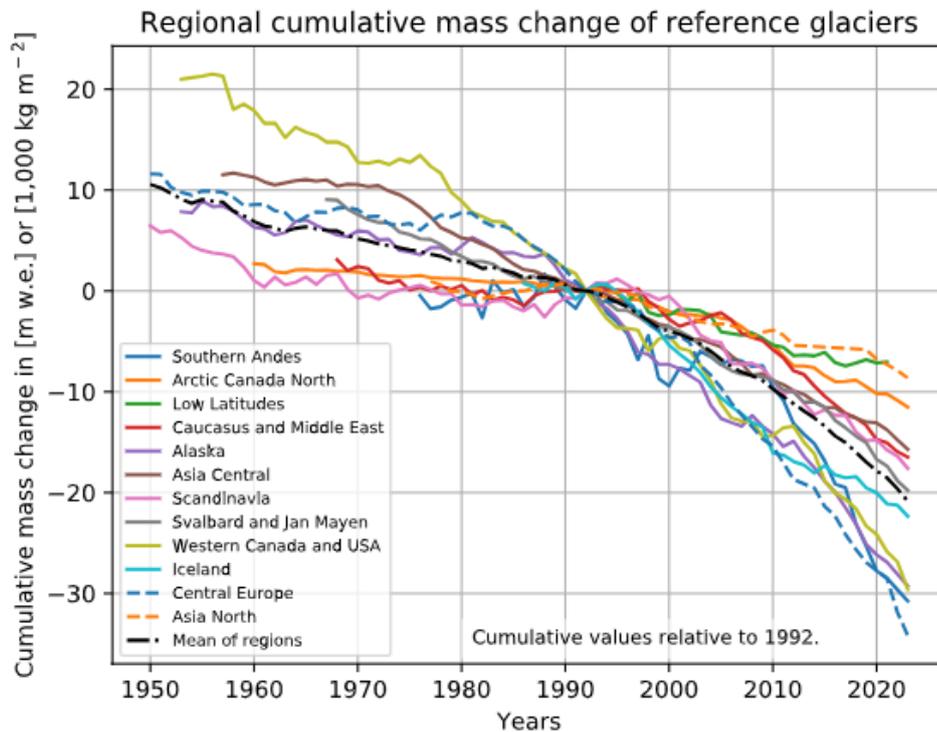


Figura 2.7. Balance de masa acumulado de glaciares de referencia a nivel global. Tomado de: <https://wgms.ch/global-glacier-state/>

2.4.4 Corrimiento de las zonas climáticas

El corrimiento de las zonas climáticas pone en juego la capacidad de adaptación al cambio de los distintos seres vivos, y sobre todo pone en riesgo la alimentación mundial, ya que los cultivos en que se basa la dieta de la humanidad en su conjunto son propios de clima templado.

Los cambios en los regímenes de precipitación generarán modificaciones en la humedad de los suelos, y si bien la presencia de mayor cantidad de CO₂ en la atmósfera podría teóricamente inducir un incremento

en la productividad primaria de los vegetales, no se esperan mejoras sino mayores dificultades en el abastecimiento de alimentos.

2.4.5 Propagación de enfermedades transmisibles

El calentamiento global puede extender las zonas de acción de diversos vectores, propiciando la propagación de enfermedades de carácter infeccioso como el dengue y la malaria. A su vez, puede modificar la distribución geográfica de vectores (especies capaces de transmitir enfermedades, como los mosquitos y garrapatas) y generar mayor problemática asociada con aguas de consumo humano sin tratar por mayor actividad bacteriológica.

Se ha comprobado que las poblaciones de especies de aves comunes sufren los efectos del cambio climático reduciendo su abundancia; es esperable que a futuro esto redunde en desequilibrios a nivel de las cadenas tróficas que integran. Ese desequilibrio podría contribuir a incrementar la ocurrencia de algunas enfermedades, por ejemplo, las de tipo parasitario, debido a un aumento en las poblaciones de moscas y parásitos intestinales.

2.4.6 Mayor frecuencia e intensidad de episodios de esmog fotoquímico

Aunque hasta hace poco tiempo no estaba dentro del catálogo de consecuencias del cambio climático, un estudio de la Universidad de Harvard publicado en 2016 indica que el cambio climático podría incrementar los episodios de esmog fotoquímico, aumentando el número de días con concentraciones de ozono insalubres o letales; se estima que podrían duplicarse hacia 2050.

Los fenómenos de esmog ocurren con mayor frecuencia en días soleados y calurosos. Las reacciones químicas que producen ozono se aceleran y, en días calmos, éste se acumula. El número de casos de ataques de asma se incrementa en consecuencia. Para mantener los niveles actuales y evitar un mayor número de días de esmog intenso, la única solución sostenible es reducir las emisiones de contaminantes primarios asociados al transporte (especialmente NO_x).

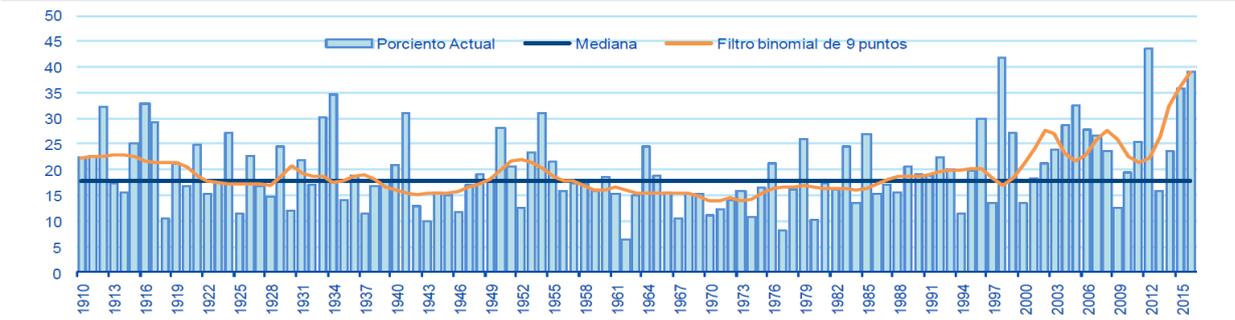
2.4.7 Modificaciones en el clima y la circulación atmosférica y marina. Mayor frecuencia y severidad de eventos extremos

Globalmente se esperan variaciones en la temperatura, incremento de las precipitaciones y variaciones en otras características climáticas, pero las distribuciones espaciales y temporales no pueden ser predichas con certeza. Parece esperable que las precipitaciones invernales aumenten en el hemisferio norte y en la zona de la Antártida, en tanto se espera un descenso en las precipitaciones invernales en amplias zonas del hemisferio sur.

De acuerdo con el IPCC, es esperable un incremento en la frecuencia y/o la magnitud de ciertos eventos extremos meteorológicos y climáticos (olas de calor, sequías, inundaciones, temporales).

Los ciclones tropicales probablemente serán más intensos, con mayores picos de velocidad de viento y mayores precipitaciones asociadas con los aumentos en curso de las temperaturas de la superficie marítima. Las regiones afectadas por estos eventos extremos, incluyendo muchos de los grandes destinos turísticos, se seguirán extendiendo.

Gráfica 4. Índice de Extremos Climáticos en EEUU (EEUU limítrofe con indicador de ciclón tropical, Enero-Diciembre, 1910-2016)



Fuente: NOAA

Figura 2.8. Frecuencia de ciclones tropicales en Estados Unidos (Tomado de Augustine & Nava, 2017)

2.4.8 Mayor frecuencia y severidad de las olas de calor

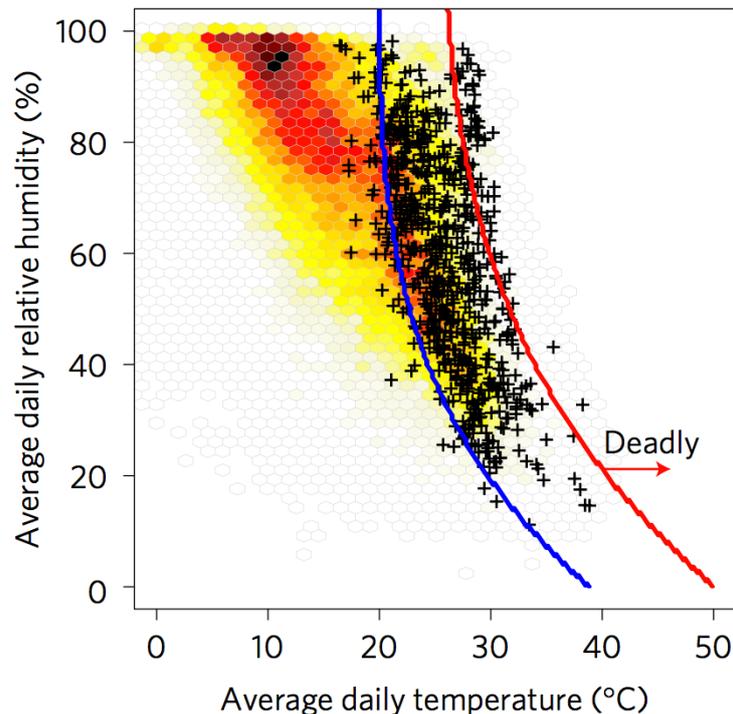
Se espera que la frecuencia e intensidad de las olas de calor continúe incrementándose. Esto incrementa el estrés térmico sobre el ganado, la fauna y la flora, se esperan mayores incendios forestales y mayor presión sobre los recursos hídricos y las reservas de agua. Como contrapartida a las olas de calor, también se incrementa la ocurrencia de olas de frío persistente que también afectan a personas, animales y plantas.

También hay consecuencias directas sobre la salud humana, con comprobada incidencia sobre enfermedades cardiovasculares y respiratorias, entre otras. Entre 1980 y 2014 se registraron más de 780 olas de calor con consecuencias letales para habitantes de 164 ciudades y de 36 países. En la actualidad un 30 % de la población mundial estaría expuesta a temperaturas potencialmente letales durante por lo menos 20 días en el año. Se espera que ese porcentaje pueda incrementarse hasta el 74 % si no se logra una reducción efectiva en las emisiones de GEI a nivel mundial. En el gráfico de la Figura 2.9 se observan condiciones de temperatura y humedad registradas en distintos lugares del mundo en los últimos años; la curva superior define condiciones que han resultado comprobadamente mortales.

En un estudio de 2021 se modeló la relación entre el número de muertes diarias y la temperatura media diaria a nivel de países que tuvieran información disponible sobre mortalidad diaria, teniendo en cuenta el nivel socioeconómico del país, lo que dio una medida de la vulnerabilidad de la población ante temperaturas extremas. Con esta información se modelaron cuatro escenarios de cambio de la temperatura media del país durante el S. XXI, para observar cómo esto afectaría a la tasa de mortalidad a nivel global. Los resultados mostraron que las bajas temperaturas no generaron una gran variación. En cambio, el aumento de temperaturas podrían aumentar la tasa de mortalidad, en particular en regiones de nivel socioeconómico medio bajo como África, Medio Oriente y el Sur de Asia.

2.4.9 Impactos sobre el turismo

El turismo es un sector económico sumamente sensible al clima. El clima es el principal recurso para el turismo, ya que determina si el destino turístico es apropiado para una amplia gama de actividades. Es uno de los principales motores de la estacionalidad global en la demanda turística y tiene un impacto importante en los costos operativos, tales como calefacción-enfriamiento, irrigación, alimentos y suministro de agua y costos de seguros. Así, los cambios en la duración y calidad de las estaciones turísticas dependientes del clima (por ejemplo: vacaciones de playa o de deportes de invierno) podrían pesar en las opciones entre diferentes destinos y, en consecuencia, en la rentabilidad de los emprendimientos turísticos.



Temperatura media diaria del aire en la superficie y humedad relativa durante eventos de calor letales (cruces negras) y durante eventos de calor no letales de igual duración en las mismas ciudades (el sombreado rojo a amarillo indica la cantidad de tales eventos no letales). La línea azul separa en líneas generales los eventos de olas de calor letales y no letales, pero la línea roja es una estimación conservadora más allá de la cual todos los eventos fueron mortales. Fuente: Mora et al. (2017), en <https://www.carbonbrief.org/billions-face-deadly-threshold-heat-extremes-2100-study/>

Figura 2.9. Condiciones de humedad y temperatura registradas durante eventos extremos e incremento de mortalidad en humanos. Tomado de: <https://www.carbonbrief.org/billions-face-deadly-threshold-heat-extremes-2100-study/>

2.4.10 Impactos sobre el turismo

El turismo es un sector económico sumamente sensible al clima. El clima es el principal recurso para el turismo, ya que determina si el destino turístico es apropiado para una amplia gama de actividades. Es uno de los principales motores de la estacionalidad global en la demanda turística y tiene un impacto importante en los costos operativos, tales como calefacción-enfriamiento, irrigación, alimentos y suministro de agua y costos de seguros. Así, los cambios en la duración y calidad de las estaciones turísticas dependientes del clima (por ejemplo: vacaciones de playa o de deportes de invierno) podrían pesar en las opciones entre diferentes destinos y, en consecuencia, en la rentabilidad de los emprendimientos turísticos.

Las predicciones indican que es muy probable que las condiciones climáticas atractivas para el turismo se desplacen latitudinalmente. Cambios en la disponibilidad de agua, pérdida de biodiversidad, modificaciones en el paisaje, modificaciones en la producción agrícola (por ejemplo: para el turismo relacionado con la gastronomía o el vino), mayores amenazas naturales, erosión costera e inundaciones, evidencia de la presencia de enfermedades transmitidas por vectores, tendrán impactos de distinta entidad en el turismo.

2.5 Medidas de gestión a nivel internacional

2.5.1 La Convención Marco y el Protocolo de Kyoto

En junio de 1992, ciento cincuenta y cinco países firmaron la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, Río '92 (la "Cumbre de la Tierra", realizada en Río de Janeiro). El objetivo planteado era estabilizar las concentraciones atmosféricas de GEI a un nivel tal que no se generaran riesgos en el sistema climático debido a emisiones antropogénicas.

Uno de los puntos clave de la Convención Marco es la elaboración de Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero por las partes suscriptoras, de acuerdo con una metodología común, de modo de poder comparar las contribuciones relativas de los diferentes países, con miras a desarrollar políticas y medidas de mitigación tanto a nivel nacional como internacional.

Entre las políticas y medidas que proponía el Protocolo de Kyoto, cuya vigencia finalizó en 2020, se incluían:

- El fomento de la eficiencia energética y la investigación, promoción, desarrollo y aumento del uso de formas nuevas y renovables de energía, tecnologías de secuestro del CO₂ y tecnologías avanzadas y novedosas que sean ecológicamente racionales.
- La promoción de prácticas sostenibles de gestión forestal, forestación y reforestación y de modalidades agrícolas sostenibles a la luz de las consideraciones del cambio climático.
- Medidas para limitar y/o reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero en el sector del transporte.
- Limitación y/o reducción de las emisiones de CH₄ mediante su recuperación y utilización en la gestión de los desechos, así como en la producción, el transporte y la distribución de energía.

2.5.2 El Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL)

El Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) es un sistema de "créditos de carbono" que permite a los mayores emisores del planeta obtener créditos en el mercado internacional de carbono, volcando fondos en terceros países para la ejecución de proyectos de reducción de emisiones de GEI en ellos. El país inversor puede acreditar así un aporte, cuantificado a través de la medición de emisiones evitadas, para lograr los objetivos internacionales en materia de reducción de emisiones. De todos modos, está estipulado un cierto porcentaje de reducción que necesariamente debe abatirse en el propio país.

Más de 8.000 proyectos se han presentado ante la Junta Ejecutiva del MDL. Temáticamente, un 65 % son proyectos de energías renovables. Geográficamente, el 47 % de los proyectos se localizan en China. El principal comprador de Certificados de Reducción de Emisiones (CER) es Reino Unido, promotor del 40 % de los proyectos, seguido por Suiza con el 20 % de los proyectos.

En Uruguay funcionan unos 30 proyectos en el marco de MDL, que obtienen regularmente sus Certificados de Reducción de Emisiones; de ellos, 27 son proyectos relativos a energías renovables, entre los cuales hay 15 proyectos de energía eólica.

2.5.3 El Acuerdo de París

El Acuerdo de París es un acuerdo realizado y aprobado por representantes de casi 200 países, en el marco de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. El mismo fue negociado en la XXI Conferencia sobre Cambio Climático (COP 21) en el año 2015, y finalmente firmado el 22 de abril del 2016 (coincidiendo con el Día de la Tierra). Sus objetivos se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C con respecto a los niveles anteriores a la industrialización, y proseguir los esfuerzos para limitar dicho aumento a 1,5 °C.
- Aumentar la capacidad de adaptación a los efectos adversos del cambio climático.
- Promover la resiliencia al clima y un desarrollo con bajas emisiones de GEI.
- Elevar las corrientes financieras a un nivel compatible con un desarrollo resiliente al clima y con bajas emisiones de GEI.

Se procurará asegurar que las emisiones mundiales de GEI lleguen a su máximo lo antes posible, de modo de lograr equilibrar las emisiones y absorciones de estos gases en la segunda mitad del S. XXI.

Además, el acuerdo incluye las medidas de adaptación al cambio climático, apoyo financiero y de otra índole para los países en desarrollo, la transferencia de tecnología y la creación de capacidades locales, así como las pérdidas y daños.

El Acuerdo de París compromete a todos los países firmantes (no sólo a los países desarrollados), a presentar sus contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC, por sus siglas en inglés), a tomar las medidas para lograrlo y a informar cada 5 años sobre sus avances. Cada informe deberá estar acompañado de nuevas NDC, que serán más ambiciosas que las anteriores.

El Acuerdo de París implica así un cambio de paradigma en la lucha contra el cambio climático. En la siguiente tabla se resumen las diferencias centrales con el Protocolo de Kyoto.

Tabla 2.5. Comparación de las principales características del Protocolo de Kyoto y del Acuerdo de París

	Protocolo de Kyoto	Acuerdo de París
Alcance	Orientado principal (pero no únicamente) a la mitigación	Mitigación, adaptación, financiamiento
Duración	Fase 1: 2008-2012; Fase 2: 2013-2020	Indefinida, con revisión de los NDC cada 5 años
Aplicación	Sólo los países Parte desarrollados tienen objetivos de reducción de emisiones	Todos los países Parte deben hacer contribuciones de mitigación determinadas a nivel nacional
Cobertura de las emisiones globales	14 % en la fase 2	El 99 % de las emisiones están cubiertas por los INDC ya presentados
Mecanismo	Objetivos de emisiones para los países desarrollados; mecanismos basados en el mercado	Contribuciones determinadas a nivel nacional, cooperación voluntaria entre las Partes
Cumplimiento	Obligación por suspensión del comercio de emisiones y reducción de emisiones adicionales en el segundo período de compromiso	Mecanismo de facilitación basado en expertos, que sea transparente, no competitivo y no punitivo
Transparencia	Diferentes requisitos de información para los países desarrollados y en desarrollo	Requisitos de información similares para todas las Partes

Entre los principales problemas que quedaron sin considerar en el Acuerdo de París, cabe mencionar:

- No hay una cuantificación de la reducción de emisiones a lograr para alcanzar la meta de calentamiento inferior a 2 °C.
- No se menciona la descarbonización para equilibrar emisiones y absorción de GEI.
- No hay compromisos de mitigación formalmente exigibles.
- Aunque se mantiene la posibilidad de utilizar mercados de carbono, no se establece ninguna disposición para fijar el precio del carbono.
- Aunque se mencionan las pérdidas y daños, se excluye cualquier responsabilidad o compensación.
- No se menciona el transporte marítimo internacional ni la aviación, aunque la Organización Marítima Internacional (OMI) trabaja en medidas basadas en el mercado para reducir las emisiones del transporte marítimo, y la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) pretende acordar medidas mundiales basadas en el mercado para lograr un crecimiento neutro en carbono a 2016, que entrarían en vigor en 2020.

Las medidas implementadas hasta 2021 en 162 Municipios de América Latina se clasifican en el esquema de la Figura 2.10.:

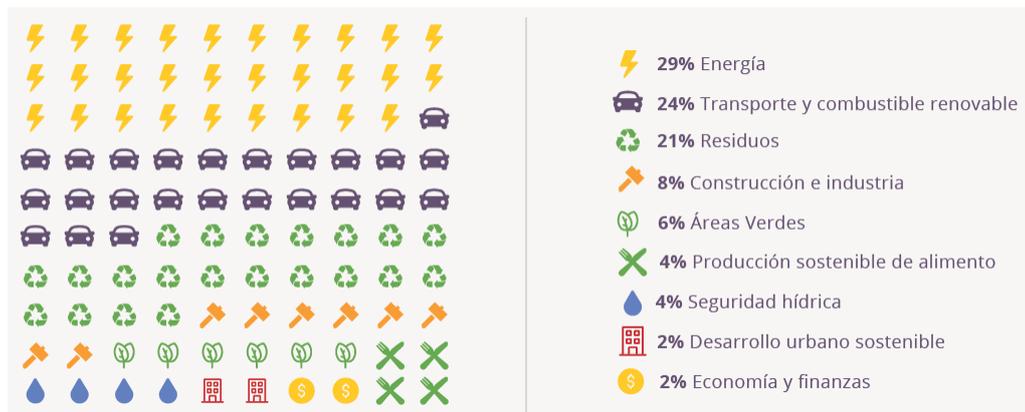


Figura 2.10. Naturaleza de las medidas implementadas a nivel de Municipios de Latinoamérica (tomado de CDP Latin America - Programa Regional Seguridad Energética y Cambio Climático en América Latina (EKLA) de la Fundación Konrad Adenauer (KAS), 2021)

2.6 Desempeño de Uruguay ante el Cambio Climático

Pese a que las emisiones de GEI de Uruguay son muy modestas en el concierto internacional (ver Figura 2.11), nuestro país suscribió la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático en Río '92. A partir de esto, adquirió compromisos tales como reducir sus emisiones netas de GEI, realizar Inventarios Nacionales de Emisiones y Absorciones de estos gases, planificar e incorporar medidas de mitigación, entre otros. Con este motivo, el ex - MVOTMA creó la Unidad de Cambio Climático (UCC) en el ámbito de la DINAMA, en diciembre de 1994; hoy, en el nuevo Ministerio de Ambiente, tiene jerarquía de Dirección Nacional.

En 2009 se estableció el Sistema Nacional de Respuesta al Cambio Climático y variabilidad (SNRCC), basado en las siguientes hipótesis de partida (SNRCC, 2009):

Historical GHG emissions

CLIMATEWATCH

Data source: Climate Watch; Location: Argentina, Bolivia, Brazil, Chile, Colombia, Costa Rica, Cuba, Dominican Republic, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Honduras, Mexico, Nicaragua, Panama, Paraguay, Peru, Uruguay; Sectors/Subsectors: Energy; Gases: All GHG; Calculation: Total; Show data by Countries.

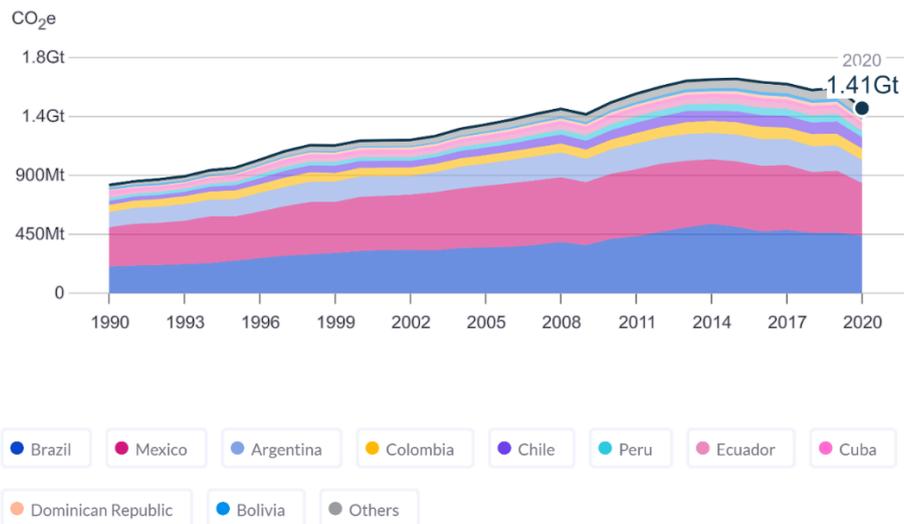


Figura 2.11. Emisiones de GEI en América Latina. Fuente: climatewatchdata.org

- *El cambio climático es una realidad.*
- *El cambio climático ya nos está afectando.*
- *Estamos a tiempo de tomar acciones efectivas para minimizar los impactos negativos.*
- *Tenemos, ante este nuevo escenario, oportunidades que debemos aprovechar.*
- *La única manera de enfrentar este asunto, que atraviesa transversalmente a todas las áreas de acción del Estado, es coordinando los esfuerzos que hasta este momento se habían aplicado de manera dispersa.*

Elevando aún más la apuesta, en la Ley de Presupuesto de diciembre de 2015 se creó la Secretaría Nacional de Ambiente, Agua y Cambio Climático (SNAACC), con la misión de *“articular y coordinar la ejecución integrada de políticas públicas en materia de Ambiente, Agua y Cambio Climático (...) para incorporar la dimensión ambiental de forma transversal en las políticas de desarrollo del país”* (SNAACC, 2015). La misma desapareció con la creación del Ministerio de Ambiente (MA), en 2020. En contrapartida, actualmente en el MA funciona la Dirección Nacional de Cambio Climático (DINACC), creada para cumplir con dos funciones: cumplir con las obligaciones de Uruguay referentes a los acuerdos ambientales multilaterales sobre cambio climático y protección de la capa de ozono de los cuales es parte; y apoyar al funcionamiento del SNRCC, coordinando las políticas nacionales de cambio climático con once Ministerios, la OPP, el Congreso de Intendentes y el Sistema Nacional de Emergencias (SINAE).

La Política Nacional de Cambio Climático se aprobó por Decreto 310/017. En su párrafo 1 enuncia:

“La Política Nacional de Cambio Climático (en adelante; Política) tiene como objetivo general promover la adaptación y mitigación en la República Oriental del Uruguay (en adelante: Uruguay) ante el desafío del cambio climático.

La Política debe contribuir al desarrollo sostenible del país, con una perspectiva global, de equidad intra e intergeneracional y de derechos humanos, procurando una sociedad más resiliente, menos vulnerable, con mayor capacidad de adaptación al cambio y a la variabilidad climática, y más consciente y responsable ante este desafío, promoviendo una economía de bajas emisiones de carbono, a partir de procesos productivos y servicios sostenibles ambiental, social y económicamente, que incorporan conocimiento e innovación.

La Política tiene como horizonte temporal el año 2050 y prevé su desarrollo e implementación en el corto, mediano y largo plazo, con la participación de los distintos actores de la sociedad uruguaya.”

Plantea luego un amplio conjunto de líneas de acción. En el mismo Decreto se aprueba la Primera Contribución Determinada a Nivel Nacional (CDN), en la que se establecen objetivos cuantificados a 2025 para el abatimiento de emisiones de GEI. Entre los compromisos que Uruguay ha asumido, está la presentación periódica a la Conferencia de las Partes de los Inventarios de Gases de Efecto Invernadero (INGEI), las Comunicaciones Nacionales, los Informes Bienales de Actualización (BUR) y las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC), de las que presentó la primera en 2017 y la segunda, en diciembre de 2022 (ver Figura 2.12).

2.6.1 Inventarios de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (INGEI)

La realización de inventarios de emisiones de GEI apunta a considerar todas las contribuciones relevantes al forzamiento radiativo, y en ese sentido intentar atacar la emisión de los GEI más relevantes en cada sector y subsector de análisis.

En el marco de los compromisos internacionales asumidos, Uruguay realiza los inventarios de emisiones prescritos por el IPCC. Estos **inventarios son puntuales**, y se realizan sobre los **datos del 4º año de una serie (no sobre la evolución de los datos en ese cuatrienio)**. Es por eso que, en países como el nuestro, en que el área forestada con fines de explotación industrial es muy vasta, se podrán tener grandes variaciones entre años con forestación más o menos adulta y años de tala. Uruguay ha realizado la siguiente serie de INGEl: 1990, 1994, 1998 y todos los años pares entre 2000 y 2014. Desde entonces, hay actualizaciones anuales.

Según los resultados del Inventario de GEI 2019, Uruguay tiene emisiones netas de GEI por 19.463 Gg de CO₂ equivalente. La emisión de nuestro país corresponde a un aporte anual per cápita del orden de 5,7 Ton de CO₂ equivalente. Este valor había sido de unas 8,4 Ton de CO₂ equivalente per cápita y por año en 2004, valores que evidencian un muy buen desempeño en un contexto en que el Producto Interno Bruto (PIB) pasó en el mismo período de 13,7 a 57,2 millones US\$ y el PIB per cápita, de US\$ 4.100 a US\$ 16.500 (datosmacro, 2019).

En la Figura 2.13 se sintetizan los resultados del INGEl 2019 expresados como emisiones equivalentes en kton CO₂-eq, como valores de GWP (primera columna correspondiente a cada año) y de GTP (segunda columna). En la Tabla 2.6 se sintetizan los resultados del INGEl 2019 para los tres principales GEI emitidos en nuestro país, CO₂, CH₄ y N₂O, expresados en kton CO₂-eq (tomando en cuenta los valores de GWP del Segundo Informe de Evaluación del IPCC, 1995).



Figura 2.12. Compromisos de reducción de emisiones de GEI al 2030 en América Latina. Contribuciones Tentativas Determinadas a nivel nacional (INDC, por sus siglas en inglés) presentadas por los países de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático 2016 para fortalecer la lucha ante el calentamiento global. Extraído de https://www.kas.de/documents/273477/273526/7_file_storage_file_20633_4.pdf/6358ddce-5e14-8c8a-9af5-8a87ce58ae54

Tabla 2.6. Emisiones netas de los principales GEI en Uruguay (BUR 2021, MINISTERIO DE AMBIENTE)

Gas	GWP (1995)	2019 (kton CO ₂ -eq)
CO ₂	1	-4.850
CH ₄	21	15.957
N ₂ O	310	8.101
Total (kton CO ₂ -eq)		19.463
Variación respecto 1990		+8,6 %

Dióxido de Carbono (CO₂)

En Uruguay, las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) provienen mayoritariamente de las actividades del sector Energía y las remociones, del sector Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra (designado como AFOLU en el INGEI). En el año 2014, el sector Energía aportó el 91 % del total de emisiones de dicho gas. El subsector que realizó mayor aporte fue el subsector Transporte, que aportó el 56 % de las emisiones del sector y el 50 % de las emisiones nacionales de CO₂. En contrapartida, el sector AFOLU capturó 4.021 kton de CO₂, con lo que el resultado neto fue una emisión de 2.803 kton de CO₂.

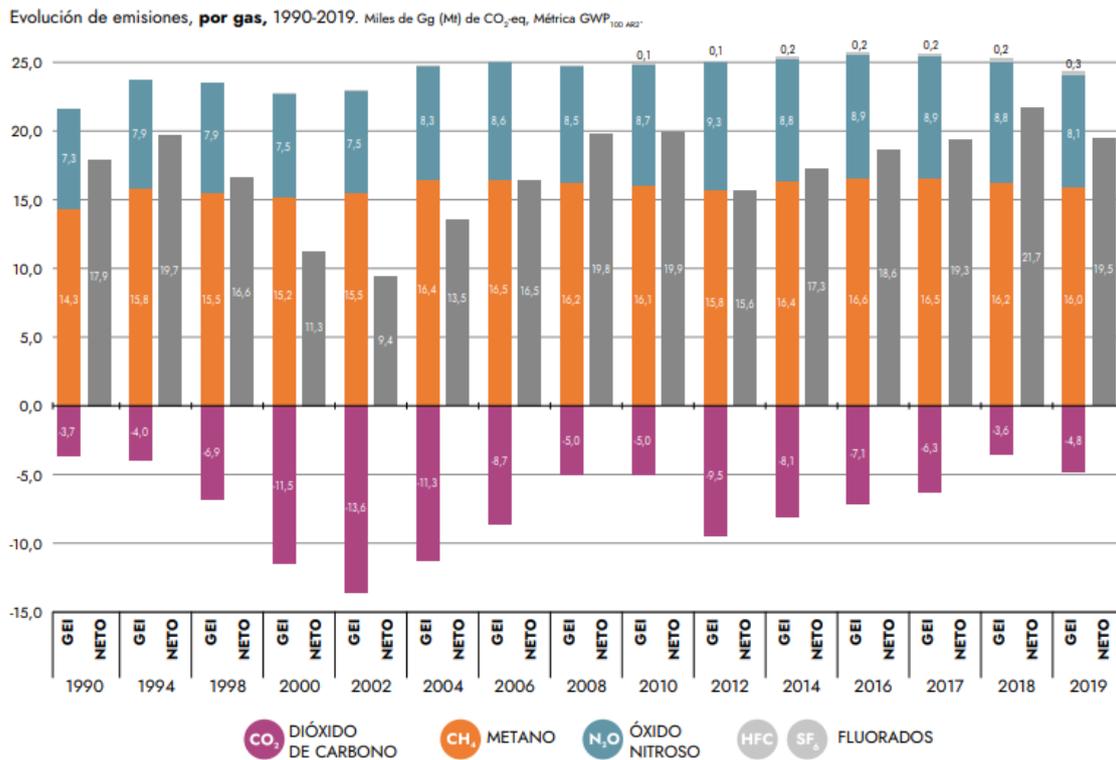


Figura 2.13. Emisiones directas de GEI en Uruguay (INGEI 2019)

Metano (CH₄)

Las emisiones de CH₄ ocupan el segundo lugar en materia de emisiones de GEI en Uruguay. Estas emisiones cobran relevancia en lo que respecta al efecto invernadero, dado que el CH₄ se calcula con un GWP a 100 años de 21⁽⁵⁾. Las principales fuentes de emisiones de este gas provienen del sector AFOLU, que en 2014 alcanzaron casi el 94 % del total de dichas emisiones. Dentro de ellas, la fermentación entérica resulta el aporte más relevante: 96 % de las emisiones del sector y 90 % de las emisiones totales de CH₄. Los factores de emisión de CH₄ para Uruguay son de 58,1 kg CH₄/cabeza/año para ganado no lechero y 72,6 kg CH₄/cabeza/año para ganado lechero.

El Sector Residuos representa menos del 6 % de las emisiones nacionales de metano, y dentro de ellas el 76 % proviene de la disposición de residuos sólidos.

Óxido Nitroso (N₂O)

Pese a que las emisiones de N₂O son cuantitativamente muy inferiores a las de CO₂ y CH₄, su elevado GWP hace que resulten de todos modos relevantes en la contribución nacional al efecto invernadero.

Las emisiones directas de óxido nitroso se generan casi en su totalidad (97 %) en el sector AFOLU, como consecuencia de los procesos de nitrificación y desnitrificación que ocurren en los suelos (99 % de la emisión del sector y 97 % de la emisión nacional de N₂O).

2.6.2 Medidas de mitigación y adaptación al Cambio Climático

Uruguay presentó en 1997 su Comunicación Inicial Nacional en relación a sus políticas y previsiones para reducir las emisiones de GEI. Cumpliendo con los compromisos asumidos, se han presentado ya cuatro Comunicaciones Nacionales, la última de ellas en 2016. Precisamente en la Cuarta Comunicación Nacional

⁵ Actualmente el GWP a 100 años del metano se considera 28 (ver Tabla 2.3).

a la Conferencia de las Partes, se sintetiza de la siguiente manera las acciones y avances llevados adelante por nuestro país:

“A través de la conjunción de las políticas públicas con programas y acciones estratégicas para la adaptación, se ha priorizado fortalecer el desarrollo de comunidades resilientes ante la variabilidad climática y los eventos extremos como base para la reducción de la vulnerabilidad con equidad e inclusión social. También se consideró la adaptación con base en la conservación y gestión sustentable de los recursos naturales y los ecosistemas, acciones fundamentales para asegurar la cobertura de las necesidades básicas de la población y la producción de alimentos, elementos centrales de la política nacional.

En materia de mitigación, Uruguay desplegó un conjunto de acciones tempranas apoyado en un significativo número de inversiones promovidas por variados instrumentos, como los beneficios impositivos de la ley de promoción de inversiones, la incorporación de energías renovables, el subsidio a la forestación y la incorporación de cambios tecnológicos en los sectores de producción ganadera, lechera y de arroz, que permitieran a la vez mejorar la productividad y reducir intensidad de emisiones.”

2.6.3 Modificación de la Matriz Energética

La matriz energética actual de nuestro país muestra una gran diversificación y una fuerte apuesta a las energías renovables, encabezadas por la generación hidráulica, pero con una componente de energía eólica que alcanzó en 2018 los 1523 MW de potencia instalada (Figura 2.14). Esto ha permitido, por ejemplo, retirar de servicio las antiguas calderas de vapor de la Central José Batlle y Ordóñez. En los últimos años se ha integrado una fuerte componente de otras energías renovables que incluyen energía eólica, generación térmica a partir de biomasa y energía solar fotovoltaica. De acuerdo con el Balance Energético 2019 publicado por la Dirección Nacional de Energía del MIEM, en 2018 se alcanzó una generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables del 97 %. En las siguientes figuras se observa cómo a partir del año 2005 aproximadamente hay un aumento de la oferta de energía, lo cual significa que existía una fuerte demanda que no estaba siendo cubierta, este cambio en la gestión de la matriz energética coincide con la aprobación de la Política Energética de Uruguay con objetivos con plazo hasta 2030.

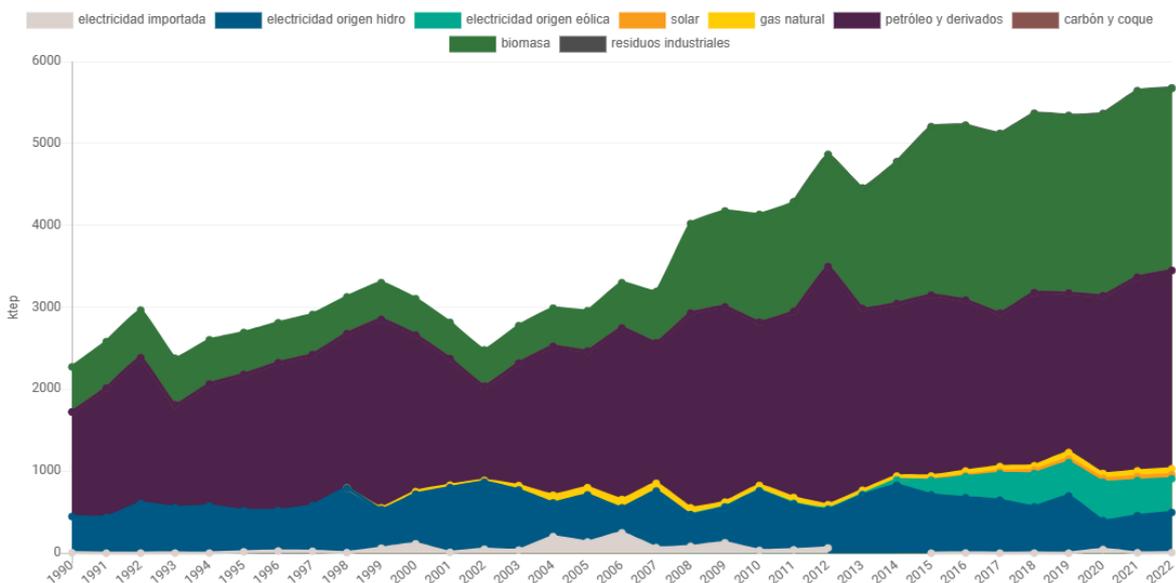


Figura 2.14. Evolución de la matriz energética nacional en el período 1990-2022, MIEM-DNE

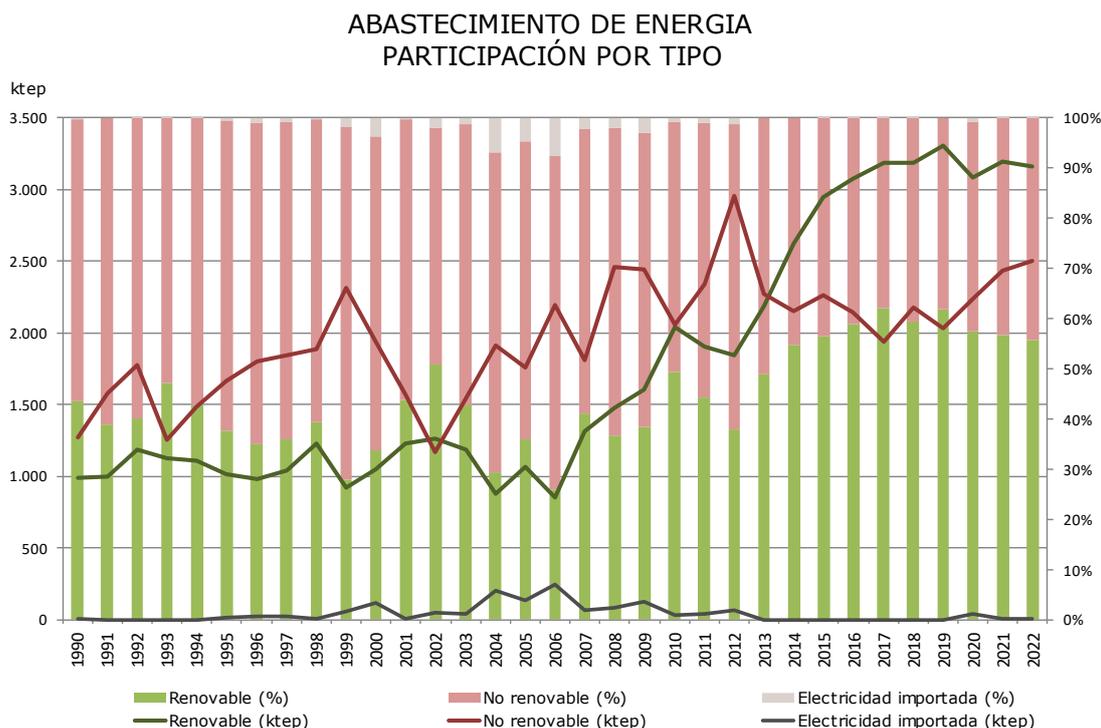


Figura 2.15. Evolución del abastecimiento de energía por tipo de fuente (1990-2022) Extraído de MIEM-DNE

Generación a partir de combustibles fósiles

Los combustibles fósiles comprenden las fuentes de energía que provienen de la descomposición de materia orgánica proveniente de seres vivos durante períodos de tiempo de millones de años, lo que lleva a la generación de productos de gran contenido energético. Entre ellas se encuentran el carbón, el gas natural y el petróleo principalmente. Según las Naciones Unidas los combustibles fósiles comprenden el 80 % de la demanda de energía primaria a nivel mundial.

El carbón se origina de los restos de materia vegetal que son depositados en el suelo, compactados y calentados a través de millones de años. Se encuentra principalmente en las minas y es el combustible fósil más abundante. Su uso ha ido disminuyendo gradualmente por parte de varios países desarrollados que han transitado un cambio hacia el uso de gas natural y petróleo. Sin embargo, su uso se ha duplicado en los últimos 70 años por la demanda que ejercen China e India.

El petróleo proviene de restos de microorganismos marinos que sedimentan hacia el fondo de los océanos donde quedan depositados en las rocas a profundidades desde 600 m a 5000 m. Este proceso puede llevar millones de años. Luego son extraídos por explotación; el crudo de petróleo es una mezcla de hidrocarburos, desde metano hasta moléculas con 40 átomos de carbono. Para poder ser usado, debe ser refinado en un proceso de destilación fraccionada. El problema del petróleo es que su extracción y utilización generan altos niveles de contaminación. Es muy usado como combustible doméstico e industrial, carburante y lubricante, y como materia prima de la industria petroquímica, de donde provienen productos como plástico, disolventes, abonos, entre otros.

Finalmente, el gas natural es también un recurso abundante y, en comparación con el carbón y el petróleo, más limpio. Se origina de la misma forma que el petróleo, pero su uso empezó a ser más habitual hace 30 años. Consiste en metano que quedó confinado en la tierra y es extraído por perforación.

Estos combustibles fósiles están dentro de la clasificación de fuentes energéticas no renovables, ya que su generación excede temporalmente la escala de la vida humana, lo que hace que su uso esté amenazado por la sobreexplotación de forma continua; en consecuencia, el precio del petróleo aumenta. Como principal ventaja se señala su alto contenido energético y, en algunos lugares, éstos se encuentran en abundancia. Pero como principales desventajas tienen que, además de ser recursos no renovables, su uso produce emisión de gases de efecto invernadero.

En Uruguay, su uso para la generación de energía eléctrica fue complementario al de la energía hidroeléctrica. En los últimos años el uso de la generación eléctrica a partir de combustibles fósiles ha disminuido significativamente, en favor de las energías renovables. En el Balance Energético del MIEM para el año 2022, el 1,27 % de energía abastecida en el año fue a través de gas natural, el 42,68 % con petróleo y derivados, y el 0,03 % con carbón y coque.

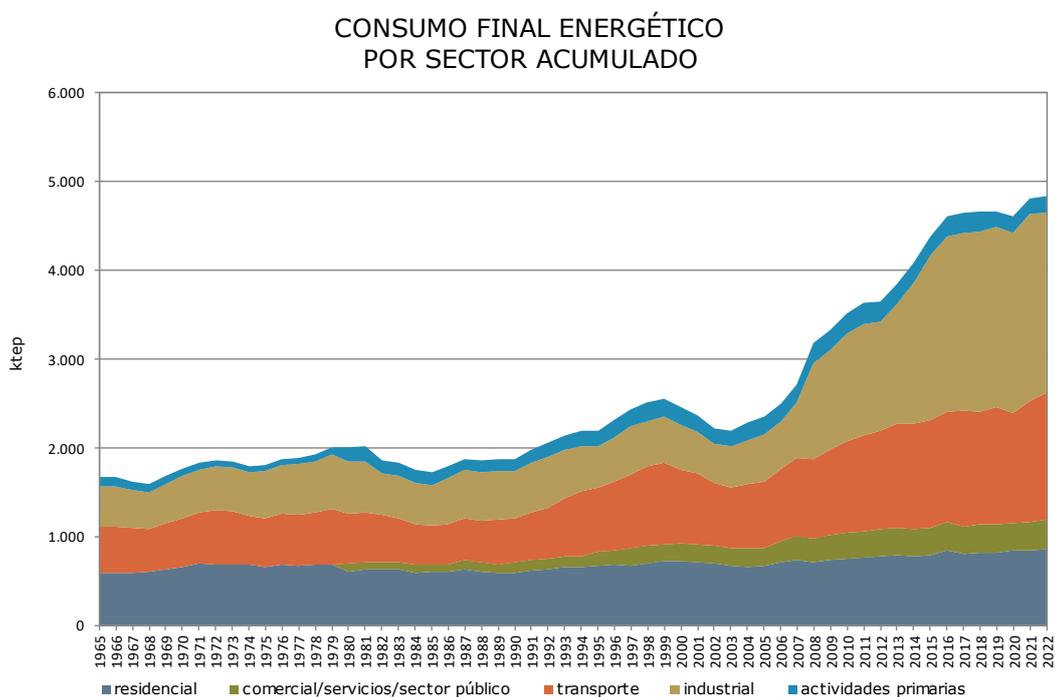


Figura 2.16. Evolución de la demanda energética por sector (1965-2022) Extraído de MIEM-DNE

Energía hidroeléctrica

La energía hidroeléctrica se convirtió en fuente de electricidad a fines del siglo XIX cuando se creó la primera turbina hidráulica moderna por parte del ingeniero británico-estadounidense James Francis, y la primera central hidroeléctrica empezó a funcionar en el Río Fox de Wisconsin Estados Unidos.

Una central hidroeléctrica se compone de una central eléctrica para la producción de electricidad, una presa que puede abrirse o cerrarse para controlar el flujo de agua y un embalse para el almacenamiento de agua. El agua que se encuentra aguas arriba de la presa fluye a través de una toma y empuja las palas de una turbina, haciéndolas girar. Luego, la turbina hace girar un generador, que es el que produce la electricidad. Otros tipos de centrales hidroeléctricas aprovechan el caudal de un curso de agua sin represarlo.

La cantidad de electricidad que se genera depende de la altura o salto de la presa y de la cantidad de agua que circule por el sistema, o sea, depende de la energía potencial y cinética del agua. La electricidad puede

transportarse mediante líneas eléctricas de larga distancia hasta los puntos de consumo (hogares, fábricas, empresas, etc.).

La ventaja de la energía hidroeléctrica es que es una energía limpia una vez que la presa está construida y en funcionamiento porque depende del agua que circula naturalmente por el cauce, la cual es recargada naturalmente por la escorrentía pluvial en la cuenca. Pueden suministrar grandes cantidades de electricidad y cubren las demandas a partir de la regulación de agua que pasa a través de las turbinas. Tiene como desventaja que la construcción de grandes presas puede provocar grandes impactos negativos en los ecosistemas circundantes, por la afectación al flujo del cauce, la inundación de terrenos, se impide la circulación de peces, entre otras.

Este tipo de energía es el más antiguo en el Uruguay, y el más relevante dado que es el que produce la mayor parte de la energía eléctrica del país. Actualmente, el país cuenta con tres represas hidroeléctricas sobre el Río Negro (Gabriel Terra en Rincón del Bonete, Baygorria y Constitución en Palmar) además de la central binacional argentino-uruguaya de Salto Grande instalada sobre el río Uruguay. En el Balance Energético del MIEM de 2022 se informó que 8,63 % de la energía de abastecimiento anual es de origen hidroeléctrico.

Energía eólica

Es la energía obtenida a partir de la energía cinética del viento. Si bien históricamente tuvo otros usos, en la actualidad se utiliza principalmente para la generación de energía eléctrica a partir de aerogeneradores. La energía eólica es un recurso abundante en muchos lugares, es renovable y es considerada una energía limpia. Si bien la implantación de aerogeneradores tiene impactos ambientales, éstos son considerados menores en comparación con la ventaja de que no producen emisiones de gases de efecto invernadero.

La energía eólica existe porque la radiación solar al elevar la temperatura del aire, la tierra y el mar provoca que se genere el viento. Cuando el aire está en movimiento se produce la energía cinética que aprovechan los aerogeneradores, los cuales pueden ser instalados en tierra o en el mar.

Para la transformación de la energía cinética los aerogeneradores cuentan con turbinas que giran cuando el viento mueve las palas, creando energía de rotación que hace rotar un eje que está conectado a un generador, lo que permite producir energía eléctrica, y a su vez, corriente alterna por la acción de un convertidor.

Los aerogeneradores son sistemas de generación muy adecuados para combatir el cambio climático. Existe un acuerdo entre el Global Wind Energy Council (GWEC) y la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) para promover el desarrollo de energías renovables, entre ellas la eólica, en todo el mundo, de modo de avanzar hacia el cumplimiento de los objetivos del Acuerdo de París y la descarbonización del planeta.

En Uruguay, el clima ventoso favoreció en los últimos años el desarrollo e implementación de parques eólicos distribuidos en todo el país. En el Balance Energético del 2022, la DNE-MIEM informa que el 7,26 % de la energía abastecida anual es de origen eólico.

Energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es la producida a partir de la radiación solar mediante un dispositivo semiconductor llamado célula fotovoltaica. Es una fuente de energía renovable, y su gran potencial causó un incremento en la fabricación de células e instalaciones fotovoltaicas. El efecto fotovoltaico consiste en

una propiedad de algunos materiales que al absorber fotones liberan electrones, generando una corriente eléctrica. Para eso se utilizan las células fotovoltaicas, las cuales en general son de silicio monocristalino, policristalino o amorfo, u otros materiales semiconductores de capa fina. Dependiendo de cuál de estos tipos de material sea utilizado, se pueden alcanzar eficiencias de entre 8 % y 20 %.

En los últimos años, este tipo de energía ha crecido sostenidamente en el Uruguay. Las principales plantas de generación fotovoltaica están ubicadas en el norte de nuestro país. En el Balance Energético publicado por el DNE del MIEM en 2022 se informó que, de la energía abastecida en el año, la energía solar fotovoltaica fue el 0,89 %.

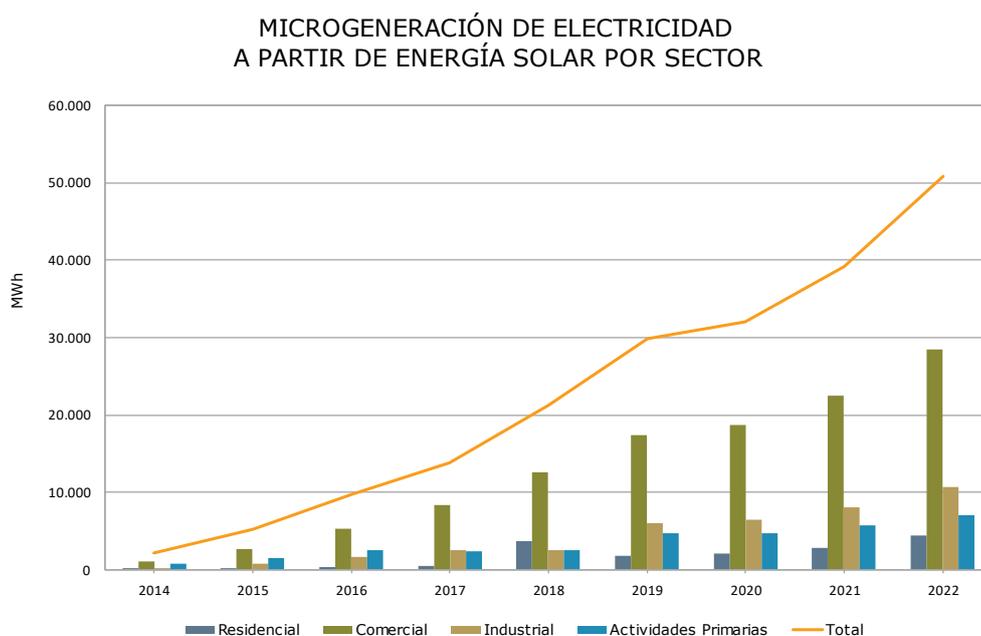
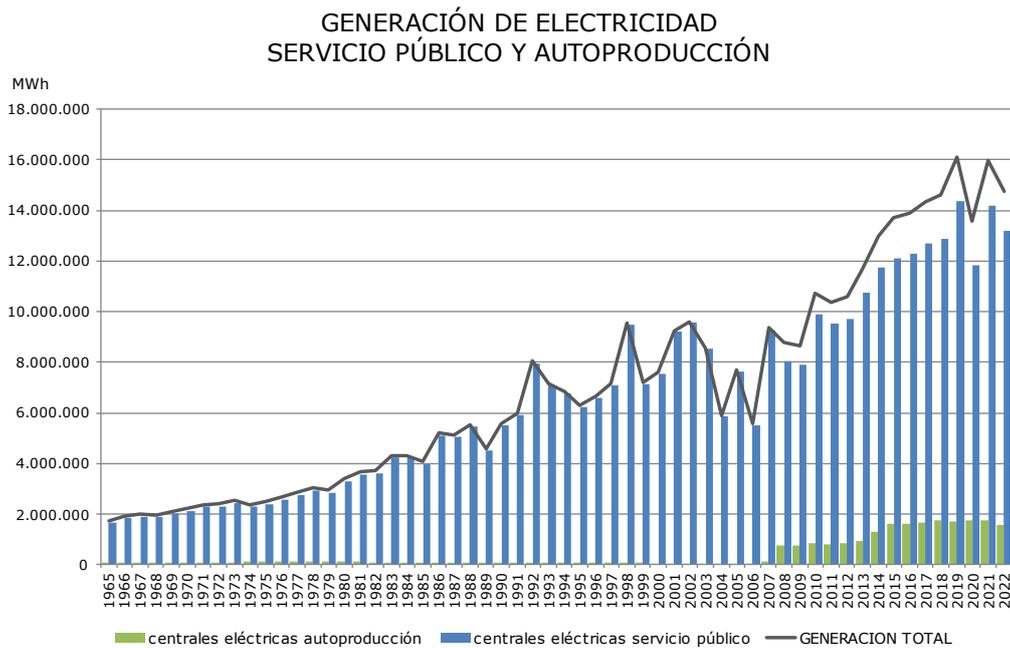


Figura 2.17. Evolución de la generación según tipo de servicio (sup: público o autoabastecimiento; inf.: microgeneración conectada al Sistema Interconectado Nacional) Extraído de <https://ben.miem.gub.uy/oferta5.php>

Biomasa

La bioenergía es la generada a partir de materia orgánica que ya haya sido aprovechada en algún uso o proceso industrial, agroindustrial o agrícola, y residuos domiciliarios. Es generalmente extraída de los residuos de dichos procesos, por lo que se considera una fuente renovable. Luego, el aprovechamiento de la energía de dicha biomasa se realiza de manera directa (por ejemplo, generación de energía térmica por procesos de combustión). Algunos ejemplos de biomasa para la generación de energía eléctrica son leña, desechos forestales, cáscara de arroz, residuos urbanos o industriales, entre otros (Figura 2.18).

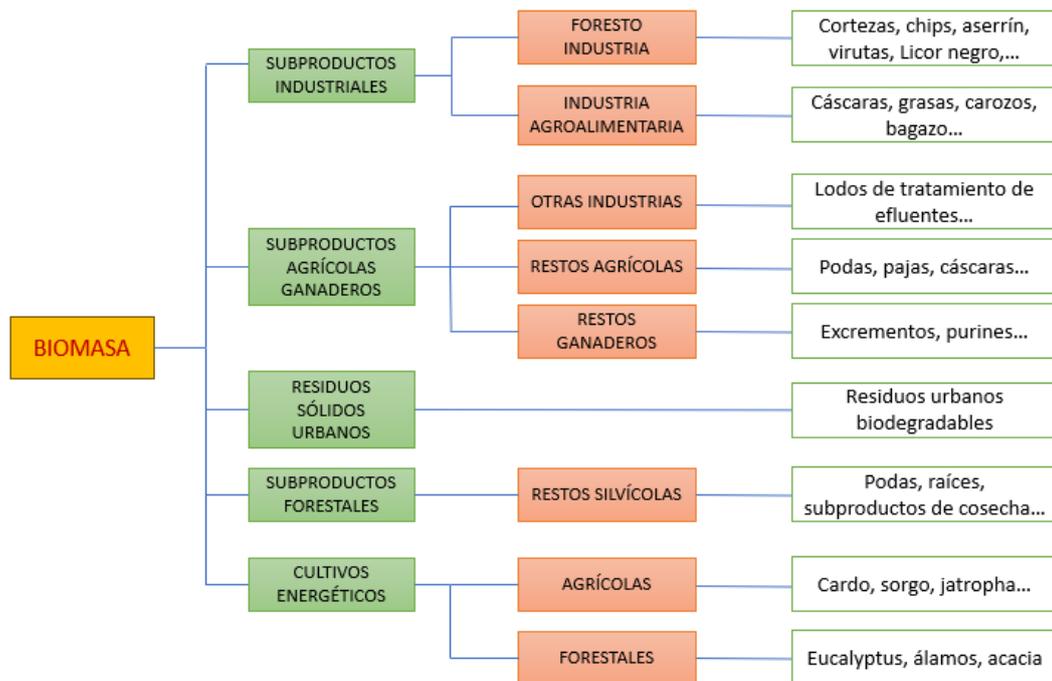


Figura 2.18. Principales fuentes de biomasa para generación energética (Redibujada a partir de Probio <http://www.probio.dne.gub.uy/cms/>)

Dada las diferentes materias primas como biomasa para la generación de energía eléctrica, existen diferentes tecnologías, con distintos avances tecnológicos. En el caso particular de la energía eléctrica generada por esta vía, es una fuente muy valiosa porque a diferencia de la energía eólica o la fotovoltaica, que solo generan cuando hay viento o sol, la biomasa puede generar de forma continua. Dentro de los sistemas se puede encontrar calderas, gasificadoras y reactores. Además, existe la posibilidad de cogeneración, que corresponde a la producción de energía eléctrica y energía térmica de forma simultánea.

En Uruguay, se produjo un importante incremento en la generación de este tipo de energía en los últimos años; según el Balance Energético de 2022 del MIEM, la energía abastecida con esta fuente es del 39 %. Algunas de las principales plantas en operación en Uruguay son:

- ALUR. Empresa formada principalmente por ANCAP y PDVSA (Petróleos de Venezuela, S.A.). Utilizan bagazo (residuo de la producción de azúcar de caña) para la generación de energía eléctrica, a partir de la generación de vapor a alta presión que mueve un sistema de turbinas.
- Bioener. Utiliza subproductos de aserraderos para la generación eléctrica.
- Galofer. Emplea cáscara de arroz para la producción de energía.

- UPM. Recuperación química y energética del licor negro.
- Montes del Plata. Recuperación química y energética del licor negro y residuos de biomasa forestal.

Biocombustibles

Son una alternativa a los combustibles de origen fósil, que se obtienen a partir de fuentes renovables. Al quemarse, al igual que la gasolina y el diésel, liberan CO₂. Tanto los combustibles fósiles como los biocombustibles se obtienen a partir de materias primas vegetales y animales. La diferencia está en que los biocombustibles utilizan materias primas actuales y los combustibles fósiles resultan de materia descompuesta y enterrada hace millones de años.

El término “biocombustible” se refiere a los combustibles líquidos o gaseosos utilizados en el sector de transporte y en la producción de electricidad, que son predominantemente producidos por la biomasa (Demirbas, 2008). Los biocombustibles más usados son el bioetanol y el biodiesel.

En Uruguay se promulgó, en el año 2007, la ley 18.195 de agrocombustibles, cuyo principal objetivo es el fomento y la regulación de la producción, la comercialización y la utilización de los agrocombustibles, definidos como “*todo combustible líquido renovable de origen agropecuario o agroindustrial, que incluyen el alcohol carburante y el biodiesel, entre otros*”.

Una clasificación bastante usual incluye los términos biocombustibles de 1^a, 2^a y 3^a generación; sin embargo, no hay definición técnica estricta para estas categorías. En general, la principal distinción entre ellas es la materia prima utilizada y los avances tecnológicos necesarios para obtenerlos.

Los **Biocombustibles de 1^a generación** son producidos a partir de azúcar, amidas y aceites de una parte específica (frecuentemente comestible) de plantas tradicionales, como por ejemplo caña de azúcar, trigo, maíz, palma de aceite y soja. Esos biocombustibles (etanol y biodiesel) ya son producidos y comercializados en cantidades significativas por diversos países, respondiendo actualmente por 1,5 % del total de combustibles de transporte en el mundo.

Los **Biocombustibles de 2^a generación**, también llamados biocombustibles celulósicos, son producidos a partir de materias primas no alimenticias, como residuos agroindustriales. Su producción es más compleja que la de los biocombustibles de 1^a generación y todavía no son comercializados. Son clasificados según el proceso utilizado en la conversión de la biomasa: **bioquímicos** –producidos por hidrólisis enzimática, fermentación- y **termoquímicos** –producidos por pirólisis, gasificación y síntesis de Fischer-Tropsch. Las tecnologías para una conversión de biomasa celulósica a biocombustibles existen, pero todavía no se aplican en producción de gran escala.

Los **Biocombustibles de 3^a generación** son producidos a partir de materia prima modificada genéticamente, de modo que facilita los procesos subsecuentes. Los agentes de conversión (microorganismos, algas) también son modificados genéticamente para que el proceso sea más eficiente.

Una alternativa cercana, sugerida por Ganduglia (2008) sería de los **Biocombustibles 1.5 generación**, que incluirían aquellos producidos por tecnologías convencionales, pero con materias primas alternativas a las utilizadas actualmente, menos sensibles a la competencia con la producción de alimentos. Entre estas se encontrarían diversas especies arbustivas o arbóreas perenes oleaginosas u otras con potencial de desarrollarse en zonas áridas o semi-áridas de tierras marginales, como la jatrofa o piñón, camelina y microalgas.

Otra clasificación, comúnmente usada es de acuerdo con su estado físico: biocombustibles sólidos, biocombustibles líquidos y biocombustibles gaseosos. A continuación, se describen las principales características de cada uno de estos tipos de biocombustibles:

Biocombustibles sólidos: se refiere a los combustibles que se ha producido a partir de restos de productos vegetales y naturales. Es decir, los biocombustibles sólidos pueden ser considerados como provenientes de biomasa.

Dentro de este grupo se encuentran principalmente los procedentes del sector agrícola y forestal, como, por ejemplo: leña, paja, olivo y frutales, cáscaras de frutos secos.

Biocombustibles líquidos: El bioetanol es un combustible de origen vegetal que se produce a partir de la fermentación de la materia orgánica rica en azúcar, por ejemplo: caña, remolacha o vino, así como de la transformación en azúcar del almidón presente en los cereales como el trigo.

El biodiesel es un combustible producido a partir de grasas animales, aceites vegetales, aceites usados e incluso se están realizando estudios relacionados con el uso de aceites producidos por algas. Cada materia prima se procesa de manera diferente y tiene especificaciones de calidad diferentes. El principal uso del biodiesel es la sustitución parcial o total del diésel de petróleo.

Biocombustibles gaseosos: El biogás es un biocombustible formado principalmente por metano y dióxido de carbono; se obtiene a partir de la degradación de microorganismos en ausencia de oxígeno y puede producirse en entornos naturales o dispositivos específicos. Estos dispositivos son plantas industriales dedicadas en exclusiva a la biodegradación de residuos como estiércol, residuos agrarios u aguas industriales.

A nivel nacional, la producción de biocombustibles está habilitada tanto para el sector público como el privado. Sin embargo, actualmente solo la empresa Alcoholes del Uruguay (ALUR) del grupo ANCAP es la que produce biocombustibles a gran escala. ALUR dispone de cuatro plantas de biocombustibles, dos de ellas para la producción de etanol en Artigas y Paysandú y dos para la producción de biodiesel, en Montevideo.

Las materias primas utilizadas para la producción de biodiesel son soja, canola, girasol, sebo vacuno y aceites vegetales reciclados. Además, se producen harinas proteicas y glicerina. Para la producción de etanol se usa principalmente caña de azúcar y sorgo grano.

La utilización de los residuos sólidos urbanos para la producción de energía es un mecanismo cada vez más utilizado a nivel mundial. Actualmente, más allá de planes piloto llevados a cabo por algunas intendencias, en Uruguay no existen plantas de mediano o gran porte para la transformación de los residuos urbanos en energía. En Maldonado se produce energía eléctrica a partir de la captura y quema de biogás generado en el relleno sanitario de Las Rosas, a partir de un proyecto demostrativo en su momento financiado por el GEF.

Otras energías renovables en fase de análisis

En la actualidad se desarrollan estudios para aprovechar la energía geotérmica (es decir, de la profundidad de la Tierra; se estima que el gradiente geotérmico medio es del orden de unos 30 °C/km de profundidad) y la energía undimotriz (energía de las olas).

2.7 Ejemplo de cálculo de emisiones de GEI: metano en el cultivo de arroz

El arroz es un cultivo que se produce con riego por inundación. El anegamiento provoca intercambio de gases entre el aire y las zonas sumergidas (a través del aerénquima) favoreciendo así la producción de metano por degradación de la materia orgánica, estando relacionadas las emisiones con la biomasa radicular. Por lo tanto, las variedades de arroz y las medidas de manejo son las que influyen en las emisiones de CH₄ (Oyhantcabal et al., 2013).

El esquema a seguir para el cálculo estimativo de las emisiones de metano en cultivos de arroz se muestra en la siguiente figura.

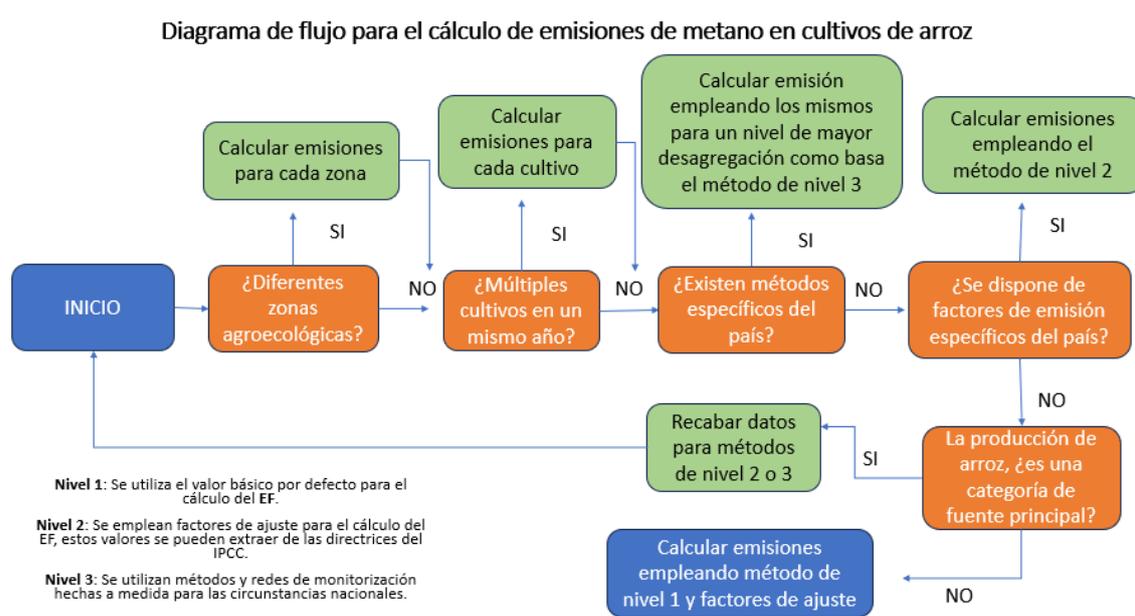


Figura 2.19. Esquema de cálculo de las emisiones de metano para cultivos arroceros. Adaptado del capítulo 5 del Volumen 4 de Directrices del IPCC 2006

Como se indica en la Figura 2.19, existen niveles 2 y 3 de emisiones, pero no serán abordadas en estas notas. Se ejemplificará el cálculo correspondiente a emisiones de nivel 1 (TIER 1). Las emisiones de metano de la producción de arroz se calculan a partir de la ecuación que se muestra a continuación para emisiones difusoras, según el método TIER 1 del Refinamiento de 2019 de las Directrices del IPCC, que utiliza las hectáreas cosechadas y el factor ajustado de emisión diaria (Manrique et al., 2021).

$$CH_4 = \sum_{i,j,k} (EF_{i,j,k} * t_{i,j,k} * A_{i,j,k} * 10^{-6})$$

Donde:

- CH₄ son las emisiones anuales de metano del cultivo de arroz en Gigagramos CH₄ por año;
- EF_{i,j,k} es el factor de emisión diario, medido en kg CH₄ ha⁻¹.día⁻¹; ver capítulo 5 del Volumen 4 de Directrices del IPCC 2006.
- T_{i,j,k} es el período de cultivo del arroz, se mide en días, y de acuerdo al INGEI 2017 se releva de la publicación de Oyhantcabal et al. (2013) para las condiciones i, j y k;

- $A_{i,j,k}$ es la superficie de cosecha anual, medida en ha año⁻¹. Se releva del Anuario Estadístico de DIEA-MGAP (2018);
- i, j, k representa diferentes ecosistemas, regímenes hídricos, tipo y cantidad de enmiendas orgánicas y otras condiciones bajo las cuales las emisiones de CH₄ del arroz pueden variar. Ver capítulo 5 del Volumen 4 de Directrices del IPCC 2006.

El Nivel 1 se aplica a países en los que las emisiones de CH₄ producidas por el cultivo del arroz no constituyen una categoría principal o en los que no existen los factores de emisión específicos del país; en Uruguay la emisión de metano por cultivos arroceros es de un 2 % de las emisiones de este gas. La desagregación de la superficie anual de cosecha de arroz se debe realizar, por lo menos, para tres regímenes hídricos básicos, incluidos los de irrigación, alimentación por lluvia y de tierras altas. En Uruguay se emplea el sistema de irrigación por inundación.

- Diferencias regionales en las prácticas de cultivo del arroz: si el país es grande y tiene regiones agrícolas dispares con diferentes climas y/o sistemas de producción (p. ej., pautas de inundación), se debe realizar un conjunto de cálculos individual para cada región.
- Múltiples cultivos: si se cosecha más de un cultivo en una superficie de tierra dada durante el año, y las condiciones de crecimiento varían entre las temporadas de cultivo, se deben realizar cálculos para cada temporada.
- Régimen hídrico: en el contexto de este capítulo, régimen hídrico se define como la combinación entre (i) el tipo de ecosistema y (ii) las pautas de inundación.

Tipo de ecosistema: como mínimo, deben realizarse cálculos por separado para cada ecosistema arrocero (es decir, irrigado, alimentado por lluvia, y producción de arroz en aguas profundas).

Pauta de inundación: la pauta de inundación de los campos arroceros tiene un efecto significativo sobre las emisiones de CH₄. Los ecosistemas arroceros se pueden clasificar, además, como inundados continua e intermitentemente (arroz irrigado), y con alimentación por lluvias regulares, con tendencia a la sequía, y aguas profundas (alimentados por lluvia), según las pautas de inundación producidas durante el período de cultivo. Asimismo, deben considerarse las pautas de inundación previas al período de cultivo.

- Agregados orgánicos a los suelos: el material orgánico incorporado a los suelos arroceros incrementa las emisiones de CH₄. El impacto de los agregados orgánicos sobre las emisiones de CH₄ depende del tipo y de la cantidad de material aplicado, lo que se puede describir mediante una curva de respuesta a la dosis. El material orgánico que se incorpora al suelo puede ser de orígenes endógeno (paja, estiércol verde, etc.) o exógeno (compost, estiércol de corral, etc.). En los cálculos de las emisiones se debe considerar el efecto de los abonos orgánicos.

Las emisiones para cada subunidad se ajustan multiplicando un factor de emisión básico por defecto (para campos sin inundación de pretemporada de menos de 180 días previos al cultivo del arroz y campos inundados permanentemente sin abonos orgánicos, EF_c) por diversos factores de ajuste, como se muestra en la Ecuación 2. Los cálculos se realizan para cada uno de los regímenes hídricos y abonos orgánicos por separado, como se muestra en la primer Ecuación de esta sección.

$$EF_i = EF_c * SF_w * SF_p * SF_0 * SF_{s,r}$$

Donde:

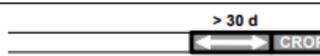
- EF_i factor de emisión diaria ajustado para una superficie de cosecha dada
- EF_c factor de emisión básico para tierras inundadas permanentemente sin abonos orgánicos
- SF_w factor de ajuste para compensar las diferencias del régimen hídrico durante el período de cultivo
- SF_p factor de ajuste para compensar las diferencias del régimen hídrico durante la temporada previa al cultivo
- SF_0 el factor de ajuste deberá variar según el tipo y a cantidad de abono orgánico aplicado
- $SF_{s,r}$ factor de ajuste para tipo de suelo, cultivar del arroz, etc., si está disponible

Como punto de partida, se emplea un factor de emisión básico para campos no inundados durante menos de 180 días previos al cultivo del arroz, permanentemente inundados durante el período de cultivo del arroz y sin abonos orgánicos (EF_c). El valor por defecto del IPCC para EF_c es de 1,3 kg CH_4 há⁻¹ día⁻¹.

Los factores de ajuste se emplean para ajustar el EF_c para dar cuenta de las distintas condiciones que se analizarán en el punteo de régimen hídrico, lo que da como resultado factores de emisión ajustados diariamente (EF_i) para una subunidad en particular de superficie cosechada desagregada según la Ecuación 5.2. Los factores de ajuste más importante, a saber, régimen hídrico durante y antes del período de cultivo y abonos orgánicos, se representan en los Cuadros 5.12, 5.13 y 5.14, respectivamente, mediante valores por defecto.

CUADRO 5.12					
FACTORES DE AJUSTE POR DEFECTO DE LA EMISIÓN DE CH₄ PARA RÉGIMENES HÍDRICOS DURANTE EL PERÍODO DE CULTIVO RELATIVOS A CAMPOS PERMANENTEMENTE INUNDADOS					
Régimen hídrico		Caso agregado		Caso desagregado	
		Factor de ajuste (SF_w)	Rango de error	Factor de ajuste (SF_w)	Rango de error
Tierras altas ^a		0	-	0	-
Irigadas ^b	Inundadas permanentemente	0,78	0,62 – 0,98	1	0,79 – 1,26
	Inundados intermitentemente – aireación simple			0,60	0,46 – 0,80
	Inundados intermitentemente – aireación múltiple			0,52	0,41 – 0,66
Alimentadas a lluvia y aguas profundas ^c	Alimentación regular por lluvia	0,27	0,21 – 0,34	0,28	0,21 – 0,37
	Con tendencia a la sequía			0,25	0,18 – 0,36
	Aguas profundas			0,31	ND

Cuadro de factores de ajuste por diferencias por régimen hídrico. Extraído del capítulo 5 del Volumen 4 de Directrices del IPCC 2006

CUADRO 5.13 FACTORES DE AJUSTE POR DEFECTO DE LA EMISIÓN DE CH ₄ PARA RÉGIMENES HÍDRICOS PREVIOS AL PERÍODO DE CULTIVO				
Régimen hídrico previo al cultivo del arroz (presentación esquemática en la que los períodos de inundación se muestran sombreados)	Caso agregado		Caso desagregado	
	Factor de ajuste (SF _p)	Rango de error	Factor de ajuste (SF _p)	Rango de error
No inundado <180 d pre-temp. 	1,22	1,07 – 1,40	1	0,88 – 1,14
No inundado >180 d pre-temp. 			0,68	0,58 – 0,80
Inundado (>30 d) ^{a,b} pre-temp. 			1,90	1,65 – 2,18

^a Los períodos breves de inundación de menos de 30 días no se consideran en la selección del SF_p
^b En cuanto al cálculo de la emisión pre-temporada, véase más adelante (sección sobre exhaustividad)
Fuente: Yan *et al.*, 2005

Cuadro de factores de ajuste por diferencias por régimen hídrico previo a la temporada. Extraído del capítulo 5 del Volumen 4 de Directrices del IPCC 2006

Es una buena práctica desarrollar factores de ajuste que incorporen información sobre el tipo y la cantidad de abono orgánico aplicado (compost, estiércol de corral, estiércol verde y paja de arroz). Los factores de ajuste dados para el abono orgánico están dados por la siguiente ecuación:

$$SF_0 = (1 + \sum ROA_i * CFOA_i)^{0,59}$$

Donde:

- ROA_i es la tasa de aplicación de abono orgánico i , en peso seco para paja y en peso fresco para los demás, en ton há⁻¹
- $CFOA_i$ es el factor de conversión para abono orgánico i (en términos de su efecto relativo con respecto a la paja aplicada poco antes del cultivo)

CUADRO 5.14 FACTOR DE CONVERSIÓN POR DEFECTO PARA DIFERENTES TIPOS DE ABONOS ORGÁNICOS		
Abono orgánico	Factor de conversión (CFOA)	Rango de error
Paja incorporada poco (<30 días) antes del cultivo ^a	1	0,97 – 1,04
Paja incorporada mucho (>30 días) antes del cultivo ^a	0,29	0,20 – 0,40
Compost	0,05	0,01 – 0,08
Estiércol de corral	0,14	0,07 – 0,20
Estiércol verde	0,50	0,30 – 0,60

^a La aplicación de paja significa que ésta se incorpora al suelo; no incluye el caso en el que la paja se coloca simplemente sobre la superficie de la tierra, ni el de la paja que se quema sobre el terreno.
Fuente: Yan *et al.*, 2005

Cuadro de factores de ajuste por aplicación de abono orgánico. Extraído del capítulo 5 del Volumen 4 de Directrices del IPCC 2006

Ejemplo: Se cultivan 100 hectáreas de arroz en cierta zona del territorio de Uruguay. El período de cultivo empieza el 16 de octubre y se extiende hasta el 28 de febrero, por lo tanto, en total es un período de 135 días. Se pide calcular las emisiones anuales de CH₄.

En primer lugar, se debe calcular el factor de emisión diaria ajustado. Para esto se deben definir las distintas características de régimen hídrico dentro de Uruguay. Por ser un país con territorio pequeño no tiene diversificación en las formas de cultivos por lo que se trabajará con factores de ajuste para el caso agregado; no hay cultivos múltiples porque lo que son cultivos arroceros permanecen así y los que no, descansan como pasturas en la rotación; el régimen hídrico se trata, en el caso de Uruguay, de un ecosistema de irrigación con inundación es permanente.

El valor de EF_c se toma como valor el dado por defecto que es de $1,3 \text{ kg CH}_4 \text{ há}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ya que es un campo permanentemente inundado y sin abonos orgánicos.

El valor de SF_w se extrae de la tabla 5.12, se tiene ecosistema arroceros irrigado, caso agregado; con esto se tiene un valor de 0,78.

El valor de SF_p se extrae de la tabla 5.13, para un caso agregado este tiene un valor de 1,22.

Los agregados orgánicos al suelo no se tienen en cuenta aquí porque en Uruguay es de uso más común la aplicación de químicos en lugar de abono orgánico, por lo que se tomará como hipótesis que la tasa de aplicación de abono orgánica ROA_i es nula, con esto el factor de ajuste de abono orgánico SF_0 es 1.

$SF_{s,r}$ no se tomará en cuenta para estos cálculos por no haber suficiente información disponible y modelos que estén diseñados para tener en cuenta este factor. Para que no sea un factor influyente en el resultado se tomará como 1 su valor.

Con estos valores se puede calcular el valor del factor de emisión diaria ajustado:

$$EF_i = 1,3 * 0,78 * 1,22 * 1 * 1 = 2,23 \text{ kg CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$$

Luego, en el caso propuesto:

$$CH_4 = 2,23 * 135 * 100 * 10^{-6} = 0,30 \frac{\text{Gg CH}_4}{\text{año}}$$

BIBLIOGRAFÍA MENCIONADA EN ESTE EJEMPLO:

- IPCC (2006). Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero.
- IPCC (2006). Volumen 4, Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra.
- IPCC (2006). Capítulo 5, Vol. 4.
- IPCC (2006). Apéndice 3, Vol. 4.
- MA (2021). Inventario Nacional de Gases de efecto invernadero 2019
- Manrique, D.; Torres, C.F.; Gómez, L.; Moreno, H.; Sánchez, A. (2021). Intensidad de emisiones por unidad de producto para la producción de arroz en Colombia. Recuperado de: <https://biocarbono.org/wp-content/uploads/2021/09/04-intensidad-emisiones-unidad-producto-arroz-colombia.pdf>
- Oyhantcabal, Walter; Becona, Gonzalo; Astigarraga, Laura; Roel, Alvaro & Saizar, Carlos. (2013). Primer estudio de la huella de carbono de tres cadenas agroexportadoras del Uruguay: carne vacuna, láctea, arroceros.

3 Debilitamiento de la capa de ozono

3.1 La capa de ozono

La capa de ozono es una zona de la estratósfera ubicada aproximadamente entre los 20 km y 40 km de altura sobre la superficie terrestre (Figura 3.1). Si bien forma parte de la homósfera⁶, es una zona en la que las concentraciones de ozono están incrementadas en forma natural: allí se encuentra cerca del 90 % del ozono atmosférico. De acuerdo con las características de absorción energética del O₂ y el O₃, que es prácticamente total para longitudes de onda de algo más de 300 nm, la capa de ozono actúa como un filtro muy efectivo para la radiación UV (ver Figura 1.3).

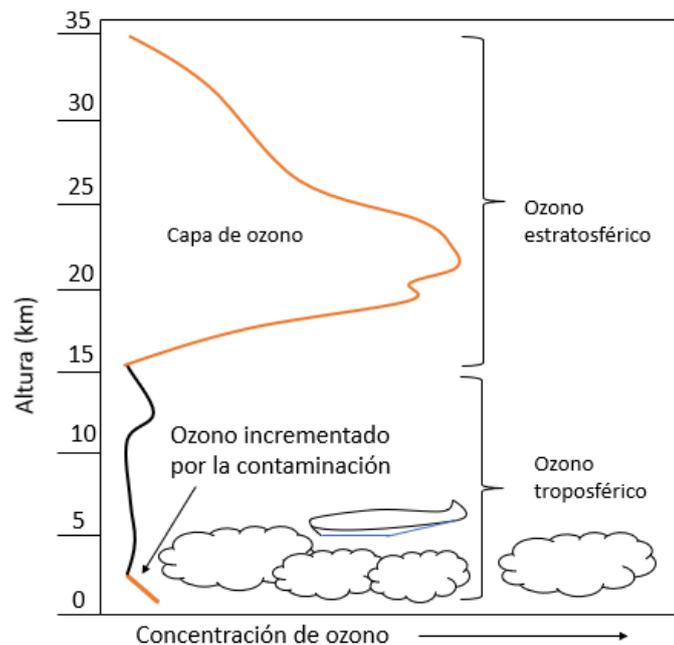


Figura 3.1. Distribución vertical de las concentraciones de ozono en tropósfera y estratósfera. (Elaboración propia)

Dado que las radiaciones UV-C⁽⁷⁾ son retenidas en su mayoría al ingresar a la atmósfera y la capa de ozono absorbe con gran efectividad hasta el sector de UV-B, sólo las radiaciones UV-A deberían llegar a la superficie terrestre. De este modo, los seres vivos y los materiales resultan protegidos de los efectos adversos de las radiaciones UV de mayor energía. Al debilitarse la capa de ozono, hay una mayor penetración de ondas electromagnéticas de baja longitud, en particular un incremento de la cantidad de radiación UV-B que llega a la Tierra.

3.2 Formación y disociación natural del ozono

Oxígeno y ozono son moléculas susceptibles de sufrir *fotodisociación*. Los fotones de alta energía (con λ entre 180 nm y 230 nm) atacan al oxígeno molecular, disociándolo en oxígeno monoatómico.

⁶ La homósfera es la región de la atmósfera en que los principales componentes se encuentran en proporciones volumétricas más o menos constantes, mezclados en forma homogénea. Se extiende desde la superficie terrestre hasta una altura de aproximadamente 100 km.

⁷ Las radiaciones UV se clasifican de acuerdo con su longitud de onda: UV-A corresponde a los UV de mayor longitud de onda (330 a 380 nm); UV-B son radiaciones de longitud de onda media (290 a 330 nm) y UV-C son los UV de onda más corta (250 a 290 nm).

En presencia de radiación de mayor longitud de onda (de 240 nm a 390 nm), el oxígeno monoatómico se puede recombinar para formar O_2 , o combinarse con el O_2 para formar ozono, de acuerdo con las siguientes reacciones. M es una especie química que no reacciona, pero actúa como mediadora desde el punto de vista energético, para equilibrar la reacción. Ambos procesos se esquematizan en la Figura 3.2.

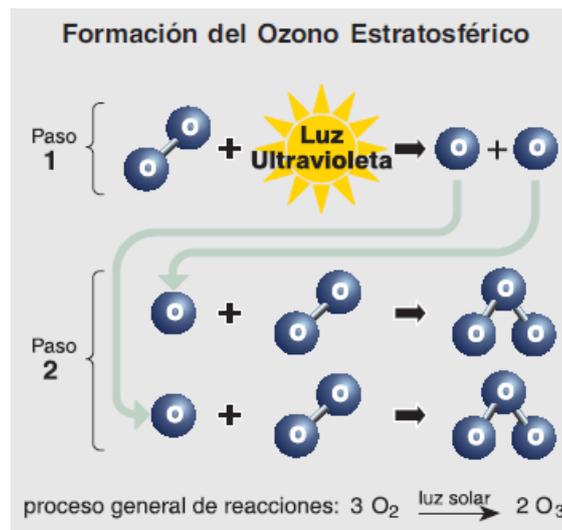
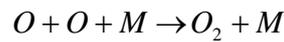
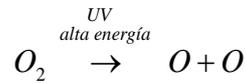
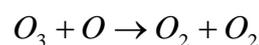
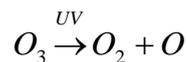


Figura 3.2. Formación de ozono en la estratósfera (tomado de Fahey, 2004)

En la atmósfera, el ozono experimenta los siguientes cambios fotoquímicos:



En la alta estratósfera la eficiencia de la reacción de formación de ozono es baja y hay mucha radiación UV que puede catalizar las reacciones de disociación de éste. El aire es menos denso y tiene menos oxígeno que pueda absorber los rayos ultravioletas para formar ozono. Entonces, las concentraciones de ozono tienden a disminuir según aumenta la altura en la atmósfera.

Por otra parte, cuanto más cerca de la Tierra, los rayos UV habrán atravesado una capa mucho mayor de aire y en consecuencia habrán tenido más oportunidades de haber sido absorbidos por el oxígeno. A unos 20 km de altura, es fácil que ocurra fotodisociación del O_2 . Esto quiere decir que también en las zonas más bajas de la atmósfera las cantidades de ozono tienden a ser considerablemente inferiores.

Globalmente, estas reacciones de formación y disociación del ozono que ocurren en forma natural tenderían a mantener un cierto nivel de equilibrio en las concentraciones de dicho gas en la estratósfera, ya que a cierta altura las dos tendencias (formación y disociación) se compensan; es ahí donde se encuentran las mayores concentraciones de ozono, lo que da lugar a la ocurrencia de la capa de ozono. La mayor densidad de la capa de ozono se sitúa a unos 25 km de altura, donde hay suficiente oxígeno -

atómico y molecular- y especies mediadoras M (como N₂, O₂, etc.) para favorecer la reacción de formación de ozono, pero además no hay exceso de luz UV para disociarlo.

El espesor de la capa de ozono se mide en Unidades Dobson (UD). 1 UD corresponde a una columna de $2,69 \times 10^{16}$ moléculas/cm². El espesor usual oscila entre 200 UD y 500 UD (para dar una idea más tangible, 200 UD corresponderían a una capa de moléculas de ozono puro de 2 mm de espesor). El espesor de la capa de ozono tiene un rol importante en el balance energético terrestre y, en consecuencia, en la temperatura media de la superficie terrestre. Pese al equilibrio que debería naturalmente ocurrir entre las reacciones de formación y disociación, la capa de ozono se ha venido debilitando gradualmente desde el año 1980. Esta pérdida, que excede las variaciones naturales que tiene el ozono, es mucho menor sobre el ecuador y aumenta hacia las latitudes polares. Esto se debe a que el ozono estratosférico es destruido por reacciones en las que intervienen sustancias halogenadas reactivas que resultan de la conversión química de los denominados *gases fuente de halógenos* que llegan hasta la estratósfera.

3.3 Destrucción catalítica del ozono estratosférico

3.3.1 Mecanismo general

La destrucción catalítica del ozono estratosférico se produce a través de ciclos en los que participan algunos gases que se designan como *gases de halógeno reactivos*. Los más reactivos son el monóxido de cloro (ClO) y monóxido de bromo (BrO), y átomos de cloro y bromo (Cl y Br). Un solo átomo de cloro o bromo puede destruir cientos de moléculas de ozono antes de reaccionar con otra sustancia y quedar fuera de esos ciclos. Así, una pequeña cantidad de cloro o bromo reactivo tiene gran impacto en la capa de ozono. En las regiones polares la forma activa del ClO llega a niveles muy altos en invierno y primavera. En la estratósfera también ocurren otros ciclos catalíticos naturales, en los que intervienen sustancias de hidrógeno y nitrógeno activo. Esas reacciones no son tan afectadas por las emisiones antropogénicas como las reacciones en que participan sustancias halogenadas. El esquema general del proceso de destrucción de ozono estratosférico se esquematiza en la Figura 3.3.

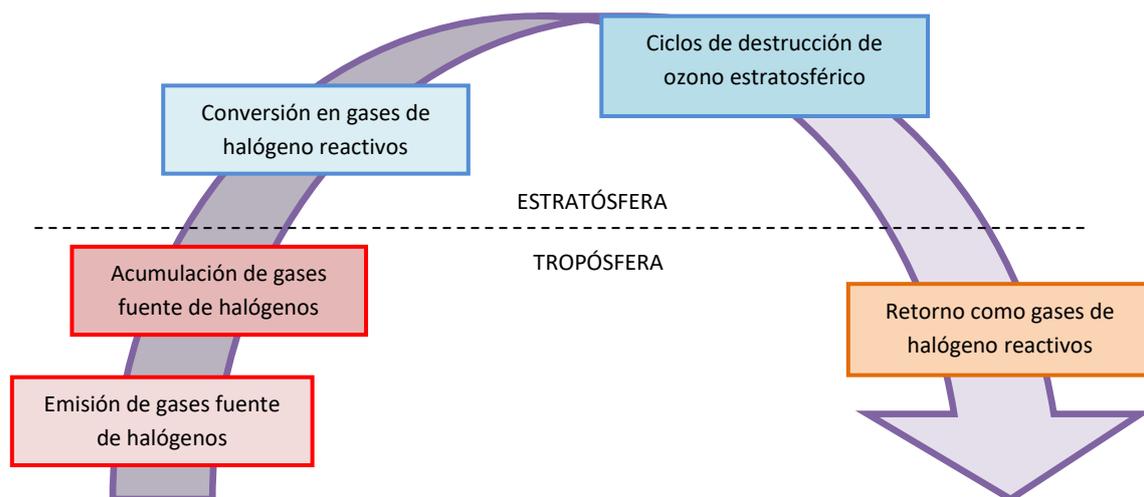


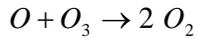
Figura 3.3. Representación esquemática del proceso de destrucción de ozono estratosférico (elaboración propia)

3.3.2 Ciclo principal de destrucción del ozono (Ciclo 1)

Este ciclo consta de dos reacciones básicas:



El resultado del ciclo 1 es la destrucción neta de una molécula de O_3 :



El ciclo 1, que se esquematiza en la Figura 3.4, requiere luz solar porque el oxígeno atómico se forma solamente en presencia de luz ultravioleta. Por eso, es más importante para la estratósfera de latitudes tropicales y medias, donde los rayos solares son más intensos. En condiciones típicas de la estratósfera en latitudes medias y bajas, un solo átomo de cloro puede destruir cientos de moléculas de O_3 antes de quedar inactivo.

3.3.3 Ciclos Polares (Ciclos 2 y 3)

Los ciclos polares son los mecanismos de reacción predominantes que se asocian con la pérdida de ozono que se observa en la estratósfera, sobre los polos ártico y antártico, al final del invierno y en la primavera. Ambos ciclos son muy similares y cada uno de ellos conduce a una destrucción neta de dos moléculas de O_3 . Uno de ellos comienza con la reacción de dos moléculas de ClO , en tanto el otro lo hace con una reacción entre ClO y BrO .

Los ciclos 2 y 3 requieren luz solar para completar sus reacciones, incluida la reposición de ClO . Por eso no ocurren durante el invierno de la estratósfera polar sino a fines del invierno y en primavera, cuando la luz solar vuelve a las regiones polares. Sin embargo, la luz solar que es suficiente para activar estos ciclos no lo es para que se forme O_3 . En consecuencia, el O_3 destruido en ellos no se repone.

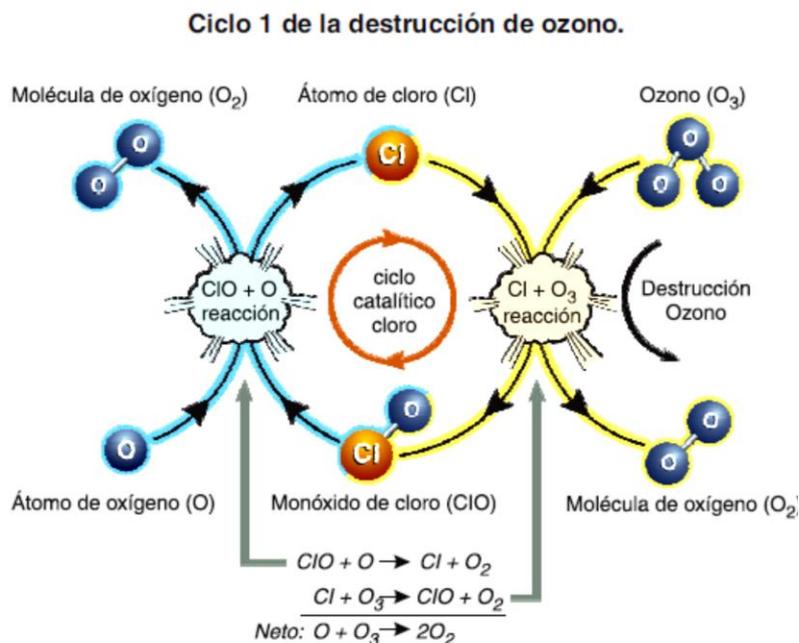
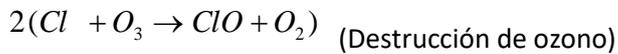
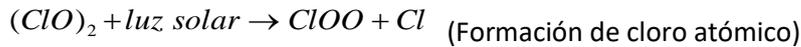
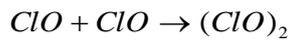


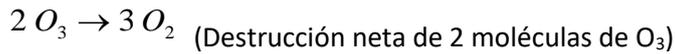
Figura 3.4. Representación esquemática del principal ciclo de destrucción de ozono estratosférico (tomado de Fahey, 2004)

Frente a altas concentraciones de ClO , como ocurre al final del invierno y en primavera al liberarse el que se había formado durante el invierno en la superficie de las nubes estratosféricas polares, la destrucción del ozono es mucho más activa.

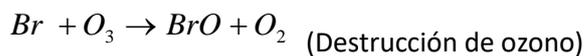
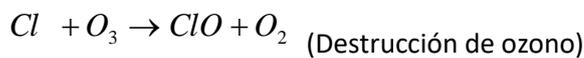
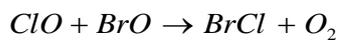
Ciclo 2



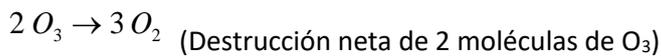
Resultado del ciclo 2:



Ciclo 3



Resultado del ciclo 3:



La incidencia de los ciclos 2 y 3 se manifiesta en las fluctuaciones del contenido de ozono a lo largo del año, como se puede ver en la Figura 3.5.

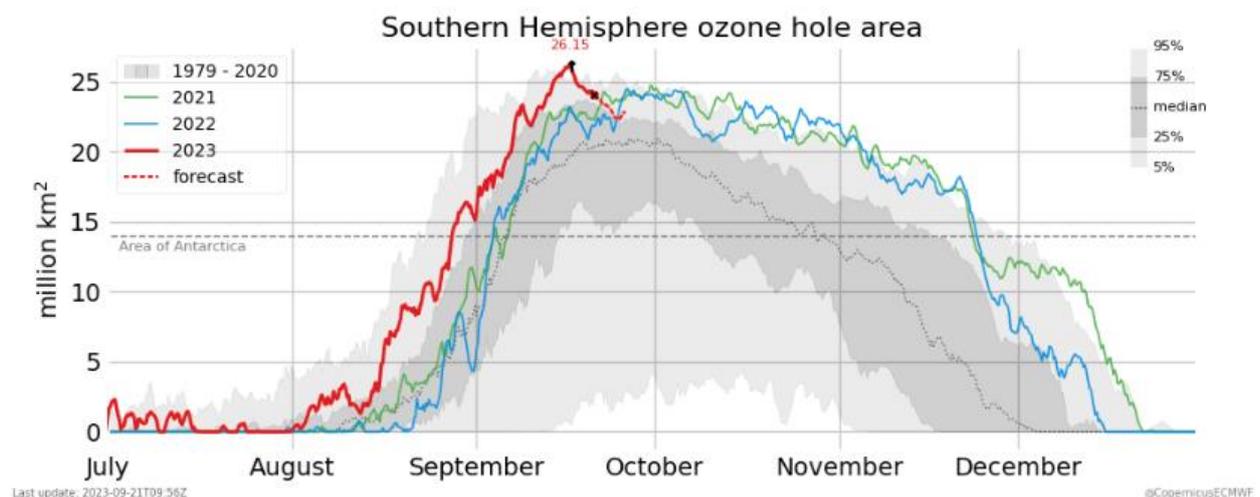


Figura 3.5. Evolución de la superficie del agujero de ozono en el hemisferio sur, expresada en millones de km².

Fuente: CEPMPM/Servicio de Vigilancia Atmosférica de Copernicus (CAMS)

El fenómeno de debilitamiento no ocurre únicamente en el hemisferio sur: en las últimas décadas se ha confirmado un fenómeno similar en el hemisferio norte (ver Figura 3.6).

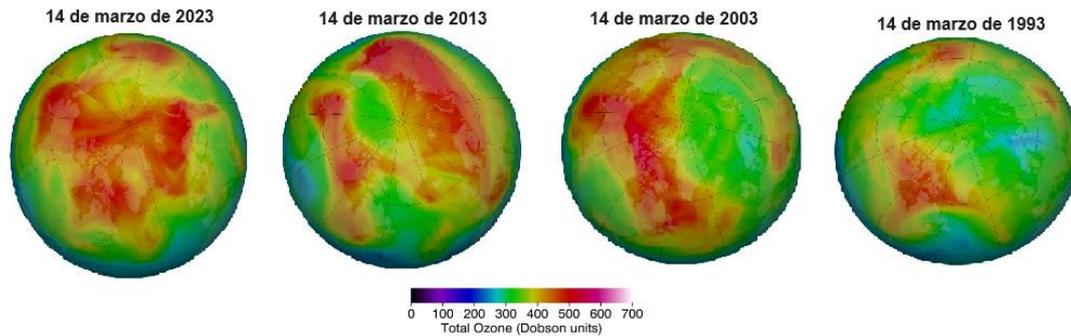


Figura 3.6. Evolución del agujero de ozono en el hemisferio norte entre 1993 y 2023. Fuente: NASA/Severe Weather Europe

3.4 Sustancias Agotadoras de Ozono (SAO)

Se designan como **sustancias agotadoras de ozono** a todas aquellas que pueden **destruir la capa de ozono**, es decir, el **ozono estratosférico**. Se trata de un conjunto de gases que contienen halógenos, especialmente cloro y bromo.

Si bien el yodo y el flúor son potenciales SAO, su participación en la destrucción de la capa de ozono es muy menor en relación a la del cloro y el bromo. El flúor participa en formas químicas que no destruyen el ozono; por su parte el yodo, si bien podría participar en reacciones de destrucción de la molécula de ozono, forma parte de sustancias que en su mayoría son eliminadas por procesos naturales en la tropósfera antes de que logren llegar a la estratósfera, por lo que las reacciones no llegan a producirse.

3.4.1 Tipos de SAO

Las SAO se clasifican en dos grupos: los **gases fuente de halógeno**, que juegan el rol de contaminantes primarios⁸ (es decir, son emitidos por fuentes identificables), y los **gases halogenados reactivos**, que se forman en la estratósfera a partir de éstos.

Son muy pocas las SAO naturales. La amplia mayoría de SAO son moléculas xenobióticas, como los CFC, halones y otras moléculas similares, de las que se fue reduciendo el uso a medida que se fueron conociendo los efectos ambientales negativos de los CFC y halones, para intentar sustituirlos.

Gases fuente de halógenos

Los gases fuente de halógenos son emitidos en la superficie de la Tierra por procesos naturales –por ejemplo, erupciones volcánicas- y por la actividad humana. En el primer caso, los compuestos con cloro que se liberan se disuelven más fácilmente con las precipitaciones y son removidos de la atmósfera antes de que lleguen a la estratósfera, en general disueltos en el agua de lluvia.

En un período de algunos meses, los gases xenobióticos fuente de halógenos se mezclan completamente en el aire troposférico, independientemente de que sean más pesados o más livianos que el aire. El aire de la alta tropósfera ingresa naturalmente a la baja estratósfera por movimientos ascendentes que ocurren en las regiones tropicales. Así, las moléculas de SAO emitidas en diferentes puntos del planeta también ingresan a la estratósfera (Figura 3.7).

⁸ Los contaminantes atmosféricos *primarios* tienen asociada una fuente de emisión y son precursores de los contaminantes secundarios.

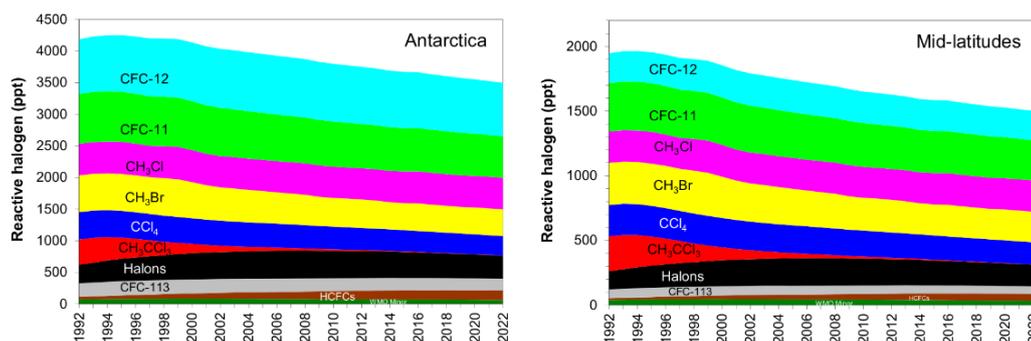


Figura 3.7. Concentraciones atmosféricas de principales SAO en dos latitudes diferentes según US-NOAA (valores hasta 2022). Tomado de <https://www.esrl.noaa.gov>

Gases halogenados reactivos

Los **gases halogenados reactivos** se forman en la estratósfera a partir de los gases fuente de halógeno; en ese sentido, se dice que son contaminantes secundarios⁹. En efecto, una vez que llegan a la estratósfera, los gases fuente de halógenos se convierten químicamente en especies mucho más reactivas, a través de reacciones químicas y de procesos que requieren luz ultravioleta. Las formas más reactivas participan directamente en ciclos de destrucción de ozono. Se trata del monóxido de cloro (ClO) y del monóxido de bromo (BrO), así como de átomos de cloro y de bromo (Cl, Br). Una gran parte del bromo estratosférico se presenta como BrO pero sólo una pequeña parte del cloro estratosférico lo hace como ClO.

3.4.2 Principales SAO

Las SAO son productos químicos halocarbonados, es decir, compuestos de carbono que contienen uno o más elementos del grupo halógeno, comprendidos el flúor, el cloro y el bromo. Las SAO naturales son muy pocas; cabe mencionar cloruro de metilo y bromuro de metilo. Las demás que se listan a continuación son de origen xenobiótico.

Cloruro de metilo CH₃Cl

Se utilizó durante algún tiempo como refrigerante industrial; luego fue sustituido por los CFC.

Bromuro de metilo CH₃Br

Su aplicación principal es como plaguicida agrícola para la fumigación y desinfección de suelos. En la Unión Europea su utilización está controlada y limitada a usos críticos. En Uruguay se logró su completa erradicación en el marco del Plan Nacional para la Reducción Gradual del Consumo de SAO (Decreto 345/004).

Tricloroetano CH₃CCl₃

El 1,1,1-tricloroetano o metilcloroformo se sintetizó por primera vez en 1840 y se utilizó largamente como disolvente para limpieza de metales y como agente espumante. Durante mucho tiempo fue el solvente empleado para los ensayos normalizados de solubilidad para determinar el contenido de asfalto en mezclas asfálticas en caliente, ensayo que se realiza en los laboratorios de control de calidad a pie de obra.

⁹ Los contaminantes atmosféricos *secundarios* no están asociados a ninguna fuente de emisión; se forman en la atmósfera a partir de los contaminantes primarios.

Tetracloruro de Carbono CCl₄

Disolvente sintético usado como desengrasante en la industria, que comenzó a usarse a fines del siglo XIX y se prohibió a mediados de los '90. Entre las alternativas que han aparecido a estos disolventes se encuentran los hidrofluorocarbonos HFC, hidrofluoroéteres HFE, otros disolventes clorados (por ejemplo, tricloroetileno), hidrocarburos y disolventes oxigenados (por ejemplo, metanol).

Clorofluorocarbonos CFC

Los CFC constituyen una familia de sustancias xenobióticas sintetizadas por primera vez en 1928 por Thomas Midgley en USA, quien buscaba alternativas a los refrigerantes que se empleaban entonces: amoníaco NH₃, cloruro de metilo o clorometano CH₃Cl y dióxido de azufre SO₂. Concretamente, Midgley desarrolló el CCl₂F₂, que luego sería conocido como CFC-12 o Freón⁽¹⁰⁾ 12.

Los CFC son moléculas extremadamente estables que corresponden a hidrocarburos lineales en los que los átomos de hidrógeno se sustituyen por cloro y flúor. Además de su aplicación original como refrigerantes, los CFC han sido usados como propelentes en aerosoles de dosis fijas¹¹, disolventes limpiadores para placas electrónicas y agentes espumantes para producir plásticos expandidos.

Halones

Sustancias químicas xenobióticas relacionadas con los CFC pero que contienen bromo en vez de cloro; su uso principal es en extintores de fuego. A altas temperaturas los halones se descomponen liberando átomos de halógeno que se combinan eficazmente con radicales libres que se generan durante la combustión, de modo que, aun en presencia de combustible, oxígeno y temperatura suficiente, la reacción de propagación de la llama se desactiva. Tuvieron una amplia difusión en el siglo pasado, pero actualmente su uso está restringido a aplicaciones críticas (centrales nucleares, aviación y usos militares).

Hidroclorofluorocarbonos HCFC

Familia de sustancias químicas relacionadas con los CFC pero que, a diferencia de aquéllos, siempre contienen hidrógeno en sus moléculas. El hidrógeno reduce su vida atmosférica, por lo que los HCFC son menos peligrosos que los CFC en el largo plazo.

Los HCFC se emplean como agentes espumantes y como propelentes en aerosoles de uso médico, en sustitución de los CFC que se usaban para esas funciones. Como refrigerantes y como disolventes se consideran **sustancias de transición**, lo que quiere decir que su uso estará permitido sólo por un tiempo limitado.

Hidrofluorocarbonos HFC

Familia de sustancias químicas hidrogenadas relacionadas con los CFC pero que no contienen cloro, y, por consiguiente, tienen un Potencial de Agotamiento de Ozono (PAO, ver sección 3.5) mucho menor. Son una alternativa al uso de los HCFC como refrigerantes y como agentes espumantes.

Hidrofluorobromocarbonos HBFC

Familia de sustancias químicas hidrogenadas relacionadas con los halones, pero con un menor potencial de agotamiento de ozono.

¹⁰ Los CFC se suelen designar genéricamente como *freones* debido al nombre comercial inicial de un grupo de ellos.

¹¹ Aerosoles de uso médico para el tratamiento de enfermedades respiratorias como asma, EPOC y otras.

3.5 Potencial de Agotamiento de Ozono (PAO)

El Potencial de Agotamiento de Ozono mide la capacidad de destruir el ozono estratosférico que tiene una sustancia, sobre la base de su permanencia en la atmósfera, su estabilidad, su reactividad y el contenido de elementos que pueden atacar el ozono, como el cloro y el bromo, tomando como referencia el PAO del CFC-11, al que se le asigna el valor 1.

En la Tabla 3.1 se presentan valores de PAO de algunos gases fuente de halógeno. Nótese que los gases de mayor permanencia en la atmósfera y con mayor PAO son xenobióticos.

Tabla 3.1. Algunos valores de PAO de sustancias halogenadas (tomado de Fahey, 2004)

Gas fuente de halógeno	Vida en la atmósfera (años)	PAO
Gases Clorados		
CFC-11	45	1
CFC-12	100	1
CFC-13	640	1
CFC-114	300	1
CFC-115	1700	0,6
Cloruro de metilo ClCH_3	1,3	0,02
Tetracloruro de carbono CCl_4	26	0,73
Metilcloroformo CH_3CCl_3	5	0,12
Gases Bromados		
Halón-1301	65	12
Halón-1211	16	6
Bromuro de metilo BrCH_3	0,7	0,38
HCFC		
HCFC-21	2,0	0,04
HCFC-22	11,8	0,055
HCFC-123	1,4	0,02
HCFC-124	6,1	0,022
HCFC-141b	9,2	0,11
HCFC-142b	18,5	0,065

Otra métrica que suele emplearse es el **Índice de Sustancias Agotadoras de Ozono (ODGI)** por sus siglas en inglés). El ODGI es un índice que computa la US-NOAA y se refiere a la disminución de una SAO en relación a la disminución necesaria para alcanzar la concentración de 1980. Como a ese valor objetivo se le asigna un índice ODGI = 100, el valor ODGI = 78 en la Antártida correspondiente a principios de 2019 indica que en ese momento se había logrado una reducción de $100 - 78 = 22\%$ de los valores de 1980 (Figura 3.8). Se espera alcanzar el objetivo hacia 2070, si las tendencias se mantienen. Los valores actuales de ODGI hacen que el problema del debilitamiento de la capa de ozono se considere en la actualidad (2024) como un problema en vías de solución o parcialmente resuelto.

3.6 Consecuencias del debilitamiento de la capa de ozono

El efecto directo y general del debilitamiento de la capa de ozono estratosférico es el **incremento en la cantidad de radiación UV-B que llega a la superficie terrestre**. Ese exceso de radiación genera a su vez una serie de efectos adversos de índole variada, que se comentan a continuación.

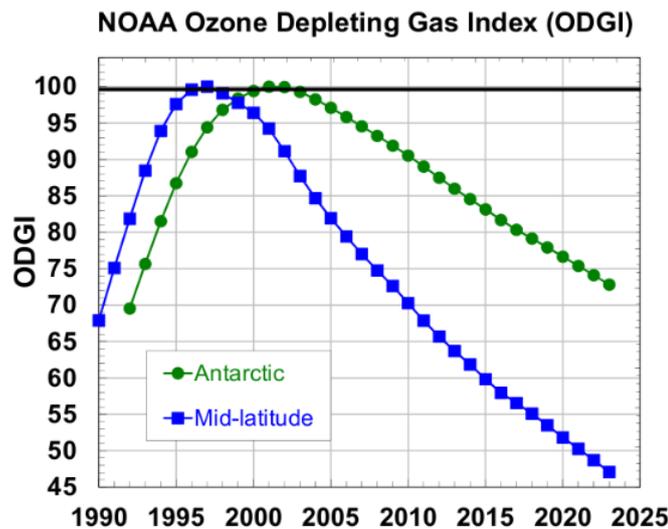


Figura 3.8. Valores del Índice ODGI en dos latitudes diferentes, según US-NOAA (valores hasta 2023). Tomado de <https://www.esrl.noaa.gov>

3.6.1 Efectos sobre seres vivos y ecosistemas

Sobre vegetales

El exceso de radiación UV-B afecta el crecimiento de los vegetales, y puede modificar sus ciclos de floración, con las consiguientes dificultades asociadas para la polinización y reproducción. También puede actuar potenciando condiciones de estrés, con consecuencias muy variadas sobre los ecosistemas, como la modificación de relaciones de competencia, abundancia y dominancia.

El daño directo en los vegetales se observa por medio de un deterioro visible en las hojas. Como ejemplo en lo referente a los cultivos, algunos vegetales muy sensibles al incremento de radiación ultravioleta asociado con el debilitamiento de la capa de ozono son los cítricos, espinacas, tomates y alfalfa, entre otros.

Sobre animales terrestres y avifauna

En animales, la exposición excesiva y acumulativa a las radiaciones de tipo UV-B puede generar afectaciones oculares, cáncer de piel y propensión a enfermedades infecciosas (por vulnerar el sistema inmunológico).

Sobre ecosistemas acuáticos

Se ha constatado una reducción en la productividad primaria del fitoplancton con repercusión en las cadenas tróficas: la supervivencia y el desarrollo de las fases iniciales de peces, moluscos y anfibios se ven afectadas (conviene recordar que la radiación UV-B es biocida).

Se han comprobado tasas de mortalidad elevadas en invertebrados en la zona antártica en épocas de primavera – verano, período en que el agujero de ozono se encuentra en la situación más crítica.

3.6.2 Efectos sobre procesos ambientales

Sobre los ciclos biogeoquímicos

Se ha hablado del desequilibrio en el ciclo natural del oxígeno, que incluye formación y fotodisociación natural de ozono.

Adicionalmente, a través de la afectación a la productividad vegetal y de la incidencia sobre las cadenas tróficas, ocurren efectos no deseados sobre el normal equilibrio de los ciclos biogeoquímicos, en especial los que tienen una poza circulante más compleja y ágil, como los del carbono y el nitrógeno.

Sobre los procesos de esmog fotoquímico

La penetración de mayor cantidad de radiación UV potencia los episodios de esmog fotoquímico, incidiendo sobre los niveles de contaminación atmosférica, especialmente en ambientes urbanos.

3.6.3 Efectos sobre bienes materiales

La radiación UV genera deterioro y decoloración de materiales, particularmente de los plásticos. También puede acelerar su envejecimiento.

Cuando es necesario instalar tuberías a la intemperie (por ejemplo, en los tramos próximos a depósitos elevados de agua potable o en el circuito de ventilación de una instalación de desagües), se debe recurrir a materiales metálicos o a plásticos con tratamiento de protección contra UV.

3.6.4 Efectos sobre la salud humana

Los efectos adversos sobre la salud humana son variados. Entre ellos, merecen ser mencionados:

- Envejecimiento prematuro de la piel.
- Enfermedades oculares (cataratas y daño de retina; ceguera de la nieve).
- Cáncer de piel (melanoma y no melanoma).
- Daños sobre el sistema inmunológico que incrementan la propensión a enfermedades como otros tipos de cáncer.
- Potenciación de enfermedades infecciosas (VIH, herpes simple, enfermedades parasitarias, bacterianas, causadas por hongos).

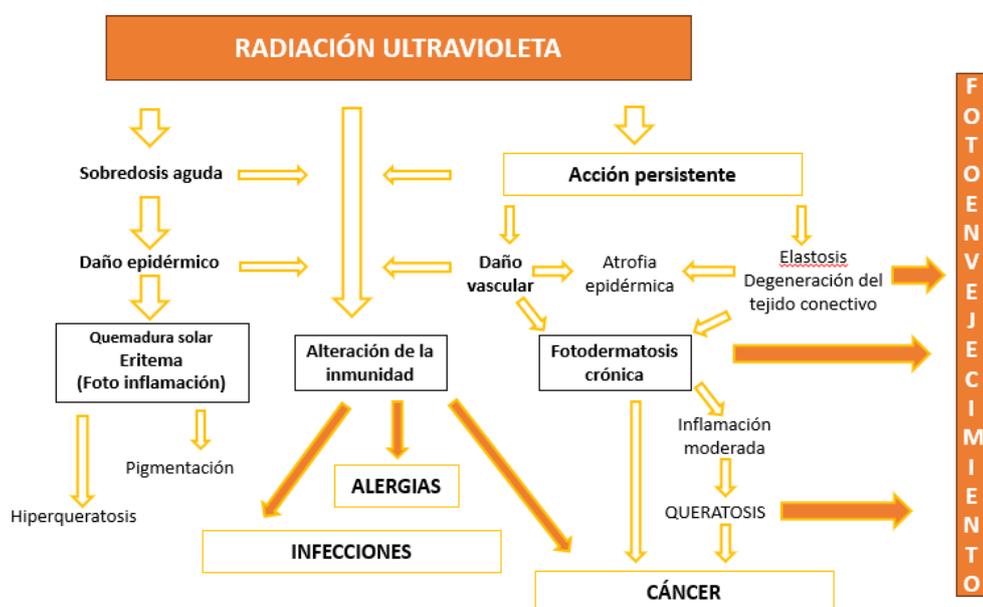


Figura 3.9. Efectos de la radiación ultravioleta sobre las personas (elaboración propia)

La mayor parte de la evidencia acumulada con respecto a la relación entre exposición a la radiación UV solar y el cáncer de piel surge de estudios epidemiológicos observacionales y analíticos y no de estudios experimentales con seres humanos. Esos estudios han demostrado en forma constante que la exposición acumulativa a las radiaciones solares constituye un factor de riesgo para el desarrollo de cáncer de piel no melanoma, particularmente en aquellos individuos con escasa capacidad de bronceado (poca melanina) o en los que han sufrido quemaduras solares.

Algunos autores consideran que los principales factores de la predisposición a desarrollar melanoma podrían ser consecuencia de cambios genómicos inducidos y trasmisibles, determinados por la exposición a la radiación solar recibida por la piel durante la infancia más que con la recibida en la vida adulta, por lo que es recomendable extremar las precauciones en lo referente a exposición al sol durante la niñez.

Las medidas de protección personal son, en este momento, la única forma efectiva de prevenir los efectos adversos sobre la salud derivados del incremento de la radiación UV que llega a la Tierra.

Cuando se trabaja con personal a cargo, especialmente en obras, el ingeniero debe hacerse responsable de la protección de la salud de su equipo humano, apoyándose con instancias de capacitación pero, por sobre todo, “predicando con el ejemplo”.

3.7 Situación de Uruguay

La convención de la ONU sobre la protección de la capa de ozono (Convención de Viena) se realizó en 1985. El 16 de setiembre de 1987 se firmó el Protocolo de Montreal, y entró en vigor el 1º de enero de 1989. Las reuniones de Londres en 1990 y Copenhague en 1992 estrecharon las restricciones que inicialmente imponía el Protocolo. Hoy día, casi 30 años después, este protocolo es el **primer tratado multilateral ambiental con ratificación universal**, es decir, a la fecha ha sido suscrito por todos los países.

El Protocolo controla la producción y el consumo de muchas de las sustancias agotadoras de ozono, en particular las principales sustancias halogenadas. Las **sustancias controladas** en general han tendido a ser eliminadas y sustituidas. Algunas sustancias químicas son autorizadas para su uso como sustituto de sustancias que destruyen el ozono, pero solamente con carácter temporal debido al PAO o la toxicidad de la sustancia. Este tipo de sustancias se designan como **sustancias de transición**.

Nuestro país ha ratificado los convenios y protocolos internacionales referentes a la protección de la capa de ozono. En ese marco, el Plan Nacional para la Reducción Gradual del Consumo de SAO fue sancionado por Decreto 345/004, con el objetivo de lograr el cumplimiento de los acuerdos suscritos. Como resultado de estas acciones, desde 2009 Uruguay no fabrica ni importa CFC. La Dirección Nacional de Cambio Climático del Ministerio de Ambiente es la encargada de la implementación y aplicación de las medidas pertinentes que aseguren el cumplimiento de los compromisos asumidos.

En materia de consumo de HCFC, Uruguay ha logrado una reducción del 10 % del consumo en relación a los valores de consumo nacional promedio en 2009-2010, que son los valores que se toman como referencia. El desafío actual, de acuerdo con los compromisos internacionales asumidos, es lograr reducir el consumo en un 35 % en relación a los valores iniciales de referencia, meta que se esperaba alcanzar en 2020; no se conocen datos oficiales al respecto.

Por otra parte, con el objetivo de concientizar a los consumidores se estableció el sello "Ozono Amigo" (Figura 3.10), otorgado por DINAMA en coordinación con el LATU como organismo certificador de calidad.

El sello “Ozono Amigo” se otorga a productos o equipos que se someten voluntaria y exitosamente a la verificación por parte de ambas instituciones de un conjunto de requisitos en cuanto a no contener ni utilizar SAO.



Figura 3.10. Isologos de la certificación “Ozono Amigo” (tomado del sitio Web de DINAMA)

Se han logrado grandes avances a nivel mundial en materia de eliminación de muchas SAO y de reducción en la fabricación y uso de otras; en la actualidad el decaimiento de la capa de ozono no está dentro de los problemas globales más graves, sino que se cataloga como en vías de solución. De todas maneras, los organismos internacionales consideran que, aun manteniéndose las tendencias actuales, la recuperación de la capa de ozono será lenta: recién hacia 2060 se podría alcanzar niveles de ozono estratosférico similares a los de 1980.

Bibliografía básica, referencias

Augustine, Amanda; Nava, Marcial (2017) Riesgos y oportunidades del cambio climático. Financiando la economía ecológica. BBVA Research, 13 pp. Houston, 3 mayo 2017.

<https://www.bbc.com/>

<https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/>

<http://www.ben.miem.gub.uy/>

Bressler, R.D., Moore, F.C., Rennert, K. *et al.* Estimates of country level temperature-related mortality damage functions. *Sci Rep* **11**, 20282 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99156-5>

Burck, Jan; Marten, Franziska; Bals, Christoph (2016). The Climate Change Performance Index Results 2016. Germanwatch&CAN, www.germanwatch.org/en/ccpi. December 2015, ISBN 978-3-943704-38-9

<http://www.cambioclimatico.gub.uy>

<https://cnnespanol.cnn.com/2017/06/08/estos-son-los-paises-de-america-latina-que-mas-co2-emiten/>

Conexión COP (2016) iNDCs Compromisos climáticos en América Latina

<https://datosmacro.expansion.com/pib/uruguay>

DINAMA (2018). Información sobre la situación de la capa de ozono. 6 pp., 2018.

ENERGÍAS RENOVABLES, Oportunidades de inversión, junio 2020.

European Commission DG Environment News Alert Service (2016) Science for Environment Policy, Issue 455. Edited by SCU, The University of the West of England, Bristol, 06 May 2016.

Erbach, Gregor (2016). The Paris Agreement. A new framework for global climate action. Briefing. European Parliamentary Research Service, January 2016.

<https://www.esrl.noaa.gov>

Fahey, D.W. (1994), Veinte Preguntas y Respuestas sobre la Capa de Ozono: Evaluación Científica del Agotamiento de Ozono: 2002. DINAMA-MVOTMA, Uruguay. ISBN: 9974-7703-2-7

Galdos, André. (2017). Variación estacional de la radiación infrarroja, humedad del suelo y su efecto sobre la

temperatura mínima superficial en el Observatorio de Huancayo, Junín.

Harrison, R.M. El Medio Ambiente. Introducción a la Química Medioambiental y a la Contaminación, 2003.

<https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/que-es-energia-fotovoltaica>

IPCC. Greenhouse Gas Protocol. Global Warming Potential Values

Japan Meteorological Agency (2022). Climate Change Monitoring Report 2021, junio 2022.

CDP Latin America - Programa Regional Seguridad Energética y Cambio Climático en América Latina (EKLA) de la Fundación Konrad Adenauer (KAS). Cambio Climático ¿Cómo los municipios de América Latina están gestionando y reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero? Octubre 2021.

Machado, Cristina M. M. (2010). Situación de los Biocombustibles de 2da y 3era Generación en América Latina y Caribe.

<https://www.miem.gub.uy/>

Ministerio de Ambiente (2021). BUR4 Uruguay 2021, Cuarto Informe Bienal de Actualización a la Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, 2021.

<https://www.miteco.gob.es>

MVOTMA – SNRCC. Cuarta Comunicación Nacional a la Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, Uruguay, 2016.

MVOTMA – SNRCC. Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero 2014. Uruguay, 2017.

MVOTMA – SNRCC. Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero. Serie temporal 1990 – 2014.

MVOTMA – SNRCC. Segundo Informe Bienal de Actualización a la Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, República Oriental del Uruguay, 2017.

Naciones Unidas, Convención Marco sobre el Cambio Climático (2016). Conferencia de las Partes. Informe de la Conferencia de las Partes sobre su 21er período de sesiones, celebrado en París del 30 de noviembre al 13 de diciembre de 2015. Primera Parte: Deliberaciones. FCCC/CP/2015/10. 44 pp. 29 Enero 2016.

<https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/energia-hidroelectrica>

<https://www.nlm.nih.gov/medlineplus/ozone.html>

<https://www.nlm.nih.gov/medlineplus/climatechange.html>

OPP (2019). Presente y futuro de las energías renovables en Uruguay, Hacia una Estrategia Nacional de Desarrollo, Uruguay 2050, Serie de divulgación – Volumen X (Dirección de Planificación Oficina de Planeamiento y Presupuesto) - marzo 2019

Organización Meteorológica Mundial (2022). Reporte OMM-Nº 1295, Estado del Clima en América Latina y el Caribe. © Organización Meteorológica Mundial, julio 2022.

<https://www.prevencionintegral.com>

Prinn R; Weiss R; Arduini J; Arnold T; DeWitt H; Fraser P; Ganesan A; Gasore J; Harth C; Hermansen O; Kim J; Krummel P; Li S; Loh Z; Lunder C; Maione M; Manning A; Miller B; Mitrevski B; Muhle J; O'Doherty S; Park S; Reimann S; Rigby M; Saito T; Salameh P; Schmidt R; Simmonds P; Steele L; Vollmer M; Wang H J; Yao B; Yokouchi Y; Young D; Zhou L (2018). History of chemically and radiatively important atmospheric gases from the Advanced Global Atmospheric Gases Experiment (AGAGE). Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC), Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Oak Ridge, TN (United States). doi:10.3334/CDIAC/ATG.DB1001

<http://www.probio.dne.gub.uy/cms/>

Ralph, Turco & Lew (1990). Air pollution: local, regional and global issues. Department of Atmospheric Sciences, UCLA, 1990.

Vousdoukas, M. I., L. Mentaschi, E. Voukouvalas, M. Verlaan, and L. Feyen (2017). Extreme sea levels on the rise along Europe's coasts, *Earth's Future*, 5, 304–323, doi: 10.1002/2016EF000505

<https://wgms.ch/global-glacier-state/>