Apuntes

Impactos Medioambientales

Primera prueba: atmósfera, combustibles y ciclo de vida

Máster Universitario en Ingeniería de la Energía

ETSI Minas y Energía

Hugo Torres Orejudo

Noviembre 2026

Elaborado con IA a partir del material de la asignatura. Material no oficial.

Índice general

1 Composición atmosférica y clima **2**
1.1 Evolución de la atmósfera . . . 2
1.2 Capas de la atmósfera . . . 2
1.3 Tiempo, clima y corrientes . . . 3

2 Equilibrio radiativo y gases de efecto invernadero **3**
2.1 Balance de energía . . . 3
2.2 Gases de efecto invernadero . . . 3
2.3 Forzamiento radiativo y potencial de calentamiento . . . 4
2.4 Cálculo de emisiones . . . 4

3 Impactos del cambio climático **4**

4 Contaminantes atmosféricos **5**

5 Muestreo y análisis **5**

6 Dispersión de contaminantes **6**
6.1 Estabilidad atmosférica . . . 6
6.2 Perfil de viento y modelos . . . 6

7 Origen y composición de los combustibles **6**
7.1 Relación H/C . . . 7
7.2 Tipos y madurez . . . 7
7.3 Diagrama de Van Krevelen . . . 7
7.4 El petróleo . . . 8

8 Análisis de ciclo de vida **8**
8.1 Fases según ISO 14040 y 14044 . . . 8
8.2 Métodos . . . 8

9 Energía y medio ambiente **9**

El examen progresivo I vale el 65 % de la evaluación progresiva y tiene dos bloques. Para hacer media hace falta al menos un 3,5 en cada uno, y un bloque con 5 o más queda liberado para la ordinaria y la extraordinaria. Entra lo visto hasta el 28 de octubre. El bloque de atmósfera lo da Fernando Barrio y el de combustibles y análisis de ciclo de vida, M.ª Jesús García.

En estos apuntes resumimos las transparencias de clase. Lo que no viene en ellas y añadimos para entender mejor o resolver problemas va marcado con un asterisco*.

1 Composición atmosférica y clima

1.1 Evolución de la atmósfera

La atmósfera primitiva era caliente y reductora, con CO_2, CO, N_2, H_2, NH_3, CH_4 y vapor de agua. Con la radiación solar se formaron las primeras moléculas orgánicas (metanol y formaldehído) y agua. El oxígeno apareció primero por la fotólisis del agua y luego en grandes cantidades por la fotosíntesis. Con oxígeno libre se formó la capa de ozono, que filtra el ultravioleta y permitió la vida fuera del agua.

1.2 Capas de la atmósfera

Las capas se separan por cómo cambia la temperatura con la altura, y cada límite se llama pausa (tropopausa, estratopausa, mesopausa y termopausa). La tabla 1 resume cada una y la figura 1 muestra el perfil.

Tabla 1. Capas de la atmósfera.

Capa	Altura	Temperatura	Rasgos principales
Troposfera	0 km a 11 km	baja con la altura	80 % de la masa, mezcla convectiva, nubes y tiempo
Estratosfera	11 km a 50 km	constante hasta 20 km y luego sube	ozono que absorbe UV, mezcla vertical débil
Mesosfera	50 km a 90 km	baja hasta unos −90 °C	mezcla vertical rápida
Termosfera	90 km a 650 km	sube	ionización por rayos X y gamma, auroras
Exosfera	más de 650 km	casi constante	H, He y O que pueden escapar

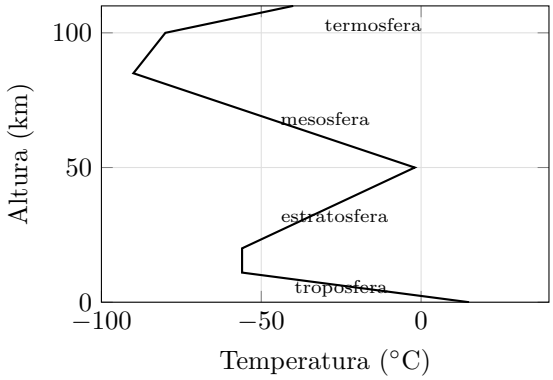


Figura 1. Perfil vertical de temperatura, redibujado de forma aproximada.

1.3 Tiempo, clima y corrientes

El tiempo es el estado de la atmósfera a corto plazo en un sitio concreto y se predice con modelos, satélites y radar. El clima es el patrón medio a largo plazo de una región. Sale de la interacción entre el terreno, los océanos, la atmósfera y los seres vivos, y se estudia con estadística. Las zonas climáticas dependen de la luz que se recibe (latitud) y del régimen de lluvias. Se distinguen cinco clases, que son tropical, seco, templado, continental y polar.

Las corrientes en chorro son vientos de unos 300 km/h entre 9 y 16 km, justo bajo la tropopausa. Separan masas de aire frío y cálido y controlan el tiempo. El Ártico se calienta el doble que el resto del planeta (amplificación ártica).

Los océanos llevan calor de los trópicos a los polos. Las corrientes superficiales se mueven por el viento y la fuerza de Coriolis, y la profunda es la circulación termohalina, que tarda unos 1300 años en cerrar un ciclo. El océano ha absorbido el 90 % del exceso de calor y cerca del 30 % del CO_2 de origen fósil. Por eso se acidifica, pierde oxígeno disuelto y aumentan los fenómenos extremos.

En el examen. Suelen pedir ordenar las capas y explicar por qué sube la temperatura en la estratosfera, diferenciar tiempo y clima, o explicar el papel del océano.

2 Equilibrio radiativo y gases de efecto invernadero

2.1 Balance de energía

El Sol es la fuente de energía del clima. Si la energía que la Tierra devuelve al espacio no es igual a la que recibe, el planeta se calienta o se enfría. Los gases de efecto invernadero (GEI) absorben el infrarrojo que emite la superficie y calientan la troposfera. La diferencia entre lo absorbido y lo reemitido es el desbalance energético terrestre. Su efecto se nota con décadas de retraso porque el océano tiene mucha inercia térmica.

Igualando lo que se absorbe y lo que se emite se obtiene la temperatura de equilibrio radiativo*

$$\frac{S_0}{4}\,(1-\alpha) = \sigma T_e^4 \qquad \Rightarrow \qquad T_e = \left[\frac{S_0\,(1-\alpha)}{4\sigma}\right]^{1/4} \tag{1}$$

donde $S_0 \approx 1361\,\mathrm{W/m^2}$ es la constante solar, $\alpha \approx 0{,}30$ el albedo y $\sigma = 5{,}67 \times 10^{-8}\,\mathrm{W\,m^{-2}\,K^{-4}}$. El factor 4 aparece porque la luz que intercepta un disco se reparte sobre toda la esfera. Sin GEI la Tierra estaría a unos $-18\,^\circ$C y con ellos la media es de $15\,^\circ$C. Venus ($477\,^\circ$C) y Marte ($-53\,^\circ$C) muestran lo que pesa la composición de la atmósfera.

2.2 Gases de efecto invernadero

Cada molécula absorbe en unas frecuencias concretas. El vapor de agua deja ventanas en el infrarrojo por las que escapa energía, y el CO_2 y otros GEI absorben justo en esas ventanas. La tabla 2 recoge las fuentes que se vieron en clase.

Tabla 2. Fuentes de los principales gases de efecto invernadero.

Gas	Fuentes
CO_2	combustión de fósiles en la producción de energía y en el transporte, cambios de uso del suelo
CH_4	humedales, vertederos, ganadería, fugas de gas y del carbón, arrozales
N_2O	suelos agrícolas, fertilizantes nitrogenados y estiércol, combustión, producción de ácido nítrico

El CO_2 ha subido un 40 % desde la época preindustrial. Las manchas solares, con un ciclo de 11 años, cambian la energía que llega en unos $0{,}25\,\mathrm{W/m^2}$, pero durante el último mínimo solar la Tierra acumuló $0{,}58\,\mathrm{W/m^2}$. Por eso el calentamiento no se explica por el Sol.

2.3 Forzamiento radiativo y potencial de calentamiento

El forzamiento radiativo (RF) es el cambio en el balance neto de energía en la tropopausa que produce un agente, respecto a 1750. Se da en $\mathrm{W/m^2}$ y es positivo si calienta. El potencial de calentamiento global (GWP) compara el RF integrado de un pulso de un gas con el del CO_2 en un horizonte T, normalmente de 100 años

$$\mathrm{GWP}_g(T) = \frac{\int_0^T RF_g(t)\,dt}{\int_0^T RF_{\mathrm{CO_2}}(t)\,dt} \tag{2}$$

Tabla 3. Concentraciones preindustriales y GWP a 100 años (IPCC AR4).

Gas	Nivel preindustrial	GWP_{100}	Vida media
CO_2	280 ppm	1	variable
CH_4	700 ppb	25	unos 12 años*
N_2O	270 ppb	298	más de 100 años

2.4 Cálculo de emisiones

Las emisiones pueden ser medidas (concentración por caudal por horas), calculadas con factores de emisión o estimadas a partir de las mejores hipótesis disponibles. Para la combustión se usa

$$E_{ij} = Q_i\, EC_i\, EF_{ij}\,(1 - S_f)\,F \;\approx\; Q_i\, EC_i\, EF_{ij}\, f_{ox} \tag{3}$$

con Q_i el combustible consumido, EC_i su poder calorífico neto, EF_{ij} el factor de emisión del gas j, S_f la fracción de carbono que queda sin oxidar y F el factor de oxidación. Las emisiones en CO_2-eq son la suma de cada gas por su GWP. En España el inventario de 2020 dio 274,7 Mt de CO_2-eq, con el transporte como primer sector.

En el examen. El ejercicio típico es el del camión diésel de clase. Hay que pasar el volumen a masa con la densidad, usar el poder calorífico neto y multiplicar el CH_4 y el N_2O por su GWP antes de sumar.

3 Impactos del cambio climático

La temperatura media de la superficie ha subido más de 1 °C desde 1901 y los fenómenos extremos van a más. En 2021 hubo récords de calor en Canadá e inundaciones en Bélgica, y el verano de 2023 dejó 460 000 ha quemadas en Europa y entre 85 000 y 145 000 muertes por calor. Para Europa se espera más lluvia extrema en el norte y más sequía e incendios en el sur.

Al calentarse la superficie hay más días cálidos y más evaporación. Eso intensifica tanto las sequías como las lluvias torrenciales. En zonas semiáridas lleva a la desertificación. Casi todos los incendios tienen origen humano, pero el calentamiento los hace más grandes y frecuentes. Una combinación típica es un invierno húmedo con mucho pasto seguido de una ola de calor.

Quien planifica una región mira siete sectores y el cambio climático afecta a todos. Son los recursos hídricos, la energía, el transporte, la agricultura, los ecosistemas, la salud y la sociedad. Algunos ejemplos son menos agua en verano y otoño, cuando más se necesita, la subida del nivel del mar (de 30 a 130 cm en 2100) que inunda puertos y carreteras, cereales que crecen más rápido pero cuyo grano no madura, y ciudades que consumen el 78 % de la energía y emiten el 60 % del CO_2.

En el examen. En las preguntas de desarrollo no basta con enumerar. Hay que elegir un sector y explicar el mecanismo de dos o tres impactos.

4 Contaminantes atmosféricos

Un contaminante atmosférico es una sustancia que, emitida en cantidad suficiente, alcanza en el aire concentraciones por encima del nivel normal y produce un efecto medible en personas, animales, plantas, materiales o en la propia atmósfera. Los primarios se emiten tal cual (SO_2, NO, CO, hidrocarburos y partículas) y los secundarios se forman en la atmósfera (O_3, NO_2, PAN y aldehídos). La emisión es lo que sale del foco y la inmisión es la concentración que respiramos después de la dispersión.

Tabla 4. Principales contaminantes vistos en clase.

Contaminante	Origen	Efectos
CO	combustión incompleta, tráfico urbano, oxidación natural del metano	tóxico e inodoro, acaba en CO_2 y genera ozono
SO_x	azufre del combustible (centrales de carbón), volcanes	lluvia ácida, corrosión, problemas respiratorios
NO_x	sobre todo NO, del N del combustible y del N_2 del aire a alta temperatura	NO_2 tóxico, lluvia ácida, precursor del smog fotoquímico
N_2O	microorganismos, fertilizantes, quema de residuos	GEI unas 300 veces más potente que el CO_2, dura unos 170 años
NH_3	residuos animales y fertilizantes amónicos	neutraliza la lluvia pero acidifica el suelo al nitrificarse
Partículas	construcción, minería, agricultura y combustión	PM_{10} es inhalable y $PM_{2,5}$ respirable, llevan metales pesados
COP	síntesis química (PCB, pesticidas, dioxinas, HAP)	poco biodegradables y bioacumulables, viajan lejos

El smog fotoquímico se forma cuando los NO_x reaccionan con hidrocarburos bajo la luz del sol y dan ozono, PAN, aldehídos y cetonas. Empeora con inversión térmica, que puede ser por radiación nocturna, por subsidencia en un anticiclón o marina. Una idea que conviene tener clara es que el SO_2 depende de qué se quema (el azufre del combustible) y los NO_x de cómo se quema (la temperatura de la llama).

5 Muestreo y análisis

En chimeneas se hace muestreo isocinético, aspirando a la misma velocidad que el gas para no sesgar el tamaño de las partículas. Para la inmisión se usan captadores de alto volumen (con impactador si se quiere separar PM_{10} o $PM_{2,5}$), borboteadores donde el contaminante se absorbe en una disolución, adsorción en sólidos para compuestos orgánicos y dosímetros pasivos para exposición laboral. La tabla 5 recoge las técnicas de análisis.

Tabla 5. Técnicas de análisis de contaminantes atmosféricos.

Técnica	Principio	Contaminante
Ionización de llama	señal proporcional al número de átomos de carbono	COV
Absorción infrarroja	absorción en el infrarrojo	CO y CO_2
Absorción atómica	absorción por los átomos presentes	metales como el plomo
Fluorescencia	la muestra reemite la energía de excitación	O_3 y NO_2
Gravimetría	pesada del filtro	PM_{10}
Espectrofotometría	disolución coloreada con un reactivo	SO_2

6 Dispersión de contaminantes

Influyen la presión, la temperatura, el viento, la estabilidad y la topografía, además de los datos de la emisión (altura de chimenea, caudal, velocidad y temperatura de salida).

6.1 Estabilidad atmosférica

Se compara cuánto se enfría el aire con la altura con el gradiente adiabático seco, $\Gamma \approx 0{,}98\,^{\circ}\mathrm{C}$ cada 100 m. Si el aire se enfría más que Γ la atmósfera es inestable y la pluma serpentea. Si se enfría lo mismo es neutra. Si se enfría menos es estable y la pluma sale en abanico. Si la temperatura sube con la altura hay inversión y el contaminante queda atrapado. En los valles el viento sube de día (anabático) y baja de noche (catabático), en la costa hay brisa de día y terral de noche, y los edificios generan turbulencias a sotavento.

6.2 Perfil de viento y modelos

El viento a otra altura se estima con la ley de Deacon

$$\frac{U_2}{U_1} = \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^{\alpha} \tag{4}$$

con α de 0,40 en zona urbana, 0,28 en zona rural y 0,14 en mar abierto.

Los modelos sirven para predecir la calidad del aire, apoyar decisiones y planificar infraestructuras. Pueden ser físicos (túnel de viento), empíricos, estadísticos, numéricos o gaussianos. El índice PSI se obtiene interpolando linealmente entre tramos de concentración, y el modelo de fuente difusa de Gifford y Hanna da $C = C_i\, Q/U$.

En el modelo de caja la ciudad es una caja de longitud L y altura de mezcla H, el viento entra con concentración C_{in} y el suelo emite q_s por unidad de área

$$C_\infty = \frac{q_s\, L}{U\, H} + C_{in} \qquad\qquad C(t) = C_\infty \left(1 - e^{-Ut/L}\right) + C(0)\, e^{-Ut/L} \tag{5}$$

El tiempo característico $\tau = L/U$ es lo que tarda el aire en cruzar la caja.

El modelo más extendido para chimeneas es el gaussiano. Necesita la posición y altura de la emisión, el caudal y la temperatura de salida, el viento, la clase de estabilidad y, si hace falta, la vida media del contaminante. A nivel del suelo y en el eje de la pluma*

$$C(x, 0, 0) = \frac{Q}{\pi\, \sigma_y\, \sigma_z\, u} \exp\left(-\frac{H_e^2}{2\sigma_z^2}\right) \tag{6}$$

con H_e la altura efectiva y σ_y y σ_z sacados de las curvas de Pasquill y Gifford según la clase de estabilidad.

En el examen. Los cálculos más probables son clasificar la estabilidad con dos temperaturas, el viento a otra altura y el modelo de caja.

7 Origen y composición de los combustibles

7.1 Relación H/C

Un sedimento es una mezcla de fracción mineral y fracción orgánica. Todas las estructuras de sostén de los seres vivos son cíclicas, y cuantas más estructuras cíclicas tiene una materia orgánica, menor es su relación atómica H/C. Vale 4 en el metano, cerca de 2 en cadenas largas, menos en anillos y menos aún en aromáticos, hasta llegar casi a 0 en el grafito. Por eso H/C sirve para saber el tipo de materia orgánica (un alga en un lago necesita poco sostén y una planta terrestre mucho) y su madurez (con el enterramiento se pierden las cadenas y los anillos se aplanan).

Los microorganismos solo atacan cadenas lineales. Dejan un residuo cíclico y producen CH_4, CO_2, H_2O y H_2S en medio anaerobio, o CO_2 y H_2O en medio aerobio. El kerógeno es la fracción insoluble en disolventes orgánicos comunes (cerca del 98 %) y el bitumen la soluble, que es la precursora del petróleo.

7.2 Tipos y madurez

Tabla 6. Tipos de kerógeno según Van Krevelen.

Tipo	Medio	Composición	H/C y O/C iniciales
I	lacustre	muchos lípidos y cadenas alifáticas, pocos anillos	H/C muy alto, O/C muy bajo
II	marino	cadenas más cortas, más anillos, azufre	intermedios
III	terrestre	poliaromáticos, cetonas y ácidos	H/C bajo, O/C alto

Los tipos I y II generan sobre todo petróleo y el III carbón y gas. Si se mezclan dos tipos, por ejemplo en el borde de un lago, salen valores intermedios.

El tiempo influye de forma lineal en la madurez y la temperatura de forma exponencial. En la diagénesis (pocos cientos de metros) actúan los microorganismos, salen CH_4 biogénico, CO_2, H_2O y H_2S, que precipita como pirita, y se pierde sobre todo oxígeno. En la catagénesis (varios kilómetros) el calor rompe las cadenas y se generan petróleo y gas húmedo. Es la ventana del petróleo. En la metagénesis solo queda la formación de metano termogénico y el residuo se aromatiza hasta el grafito. Una intrusión volcánica puede madurar el carbón de forma artificial, como en Peñarroya, donde hay hulla y antracita juntas.

7.3 Diagrama de Van Krevelen

Las relaciones se calculan como relaciones atómicas a partir del análisis elemental en masa

$$\frac{H}{C} = \frac{\%H/1}{\%C/12} \qquad \frac{O}{C} = \frac{\%O/16}{\%C/12} \tag{7}$$

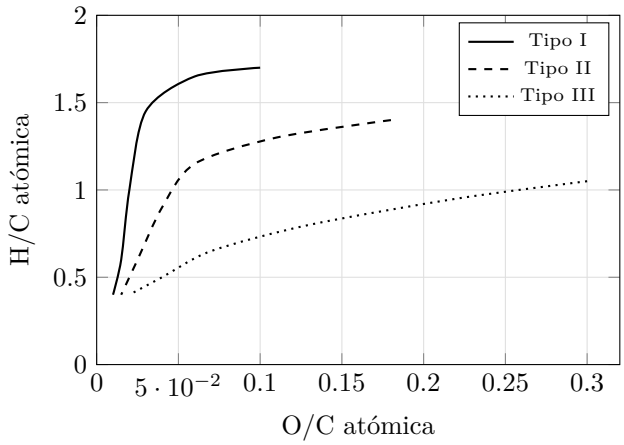


Figura 2. Caminos de evolución en el diagrama de Van Krevelen, redibujados de forma aproximada. Los límites de madurez con la reflectancia de la vitrinita están en la figura de clase.

Perder CO_2 baja O/C y sube H/C, y perder H_2O baja las dos. Al madurar los tres tipos convergen en la misma rama. Por eso hacen falta dos medidas independientes para saber tipo y madurez, y en la metagénesis el diagrama ya no distingue el origen.

7.4 El petróleo

El grado API es $141{,}5/d_{15{,}6} - 131{,}5$. El agua tiene 10 API y cuanto mayor es el valor, más ligero es el crudo. El azufre va desde un 5,5 % en crudos pesados como el Boscán (10 API) hasta un 1,8 % en ligeros como el Arabian Light (33,4 API). El punto de congelación y la viscosidad suben con la densidad. Los no convencionales necesitan técnicas distintas de extracción o transformación. Son los crudos extrapesados y las arenas y pizarras bituminosas (al principio de la ventana del petróleo), el metano en capas de carbón y el shale gas (al final, en la zona de gas), el tight gas, los hidratos de metano y la licuefacción del carbón.

En el examen. El ejercicio de Van Krevelen de clase es el modelo. Hay que calcular H/C y O/C, situar las muestras y justificar tipo, madurez y si son roca madre de petróleo o de carbón. Un error frecuente es usar los porcentajes en masa sin dividir por 12, 1 y 16.

8 Análisis de ciclo de vida

El análisis de ciclo de vida (ACV) mide el impacto ambiental de un producto, proceso o sistema a lo largo de todo su ciclo de vida para buscar cómo reducirlo. Puede ir de la cuna a la tumba, de la cuna a la puerta o de la puerta a la puerta. El alcance importa para no trasladar impactos de una etapa a otra. El caso del aceite de palma lo muestra bien, porque al deforestar turberas se libera el carbono almacenado y se pierde la ventaja frente al gasóleo fósil, cuya referencia en la directiva de renovables es de unos 94 g de CO_2-eq por MJ.

Se usa para tomar decisiones (ecodiseño, compras, regulación), para aprender (encontrar puntos de mejora) y para comunicar (ecoetiquetas y declaraciones ambientales de producto).

8.1 Fases según ISO 14040 y 14044

1. Definición del objetivo y del alcance. El objetivo dice la aplicación, el motivo, el público y si habrá comparaciones públicas. El alcance fija el sistema, sus funciones, la unidad funcional, los límites, la asignación, las hipótesis y la calidad de los datos.
2. Inventario. Se recogen y cuantifican las entradas (materias primas y energía) y las salidas (productos, residuos y emisiones) por unidad funcional. Aquí aparece el problema de asignar las cargas de procesos compartidos.
3. Evaluación de impactos. Son obligatorias la clasificación (asignar cada flujo a sus categorías de impacto sin contar dos veces) y la caracterización (multiplicar por factores respecto a una sustancia de referencia, como el GWP). Son opcionales la normalización, la agrupación y la ponderación, que introducen juicios de valor.
4. Interpretación de los resultados en relación con el objetivo.

La unidad funcional es el flujo de referencia al que se refieren todos los demás, por ejemplo litros de bebida envasada, metros cuadrados de suelo por año o personas por kilómetro. En una comparación todas las alternativas tienen que dar el mismo servicio.

8.2 Métodos

Se puede trabajar con categorías intermedias (midpoint) como cambio climático o acidificación, o con categorías de daño (endpoint) sobre la salud, los ecosistemas y los recursos. El Ecoindicador 99 usa tres categorías de daño y tres perspectivas. El EPS, desarrollado con Volvo, pondera con el coste de cada efecto. Cuanto más se agrega, más fácil es comunicar pero más incertidumbre hay. En 2013 la Comisión Europea adoptó la huella ambiental de producto y de organización (PEF y OEF), basadas en el ACV.

9 Energía y medio ambiente

De la sesión del 21 de octubre conviene quedarse con varias ideas. La técnica ha conseguido bajar contaminantes sin reducir el consumo, como el azufre de los combustibles o el NO_2 de las centrales. El consumo de materias primas minerales crece más deprisa que la población, mientras la ley de los minerales baja y la energía para extraerlos sube. Todas las tecnologías tienen impactos, como el uso del suelo, el consumo de agua (distinto de la extracción que luego se devuelve) o la sismicidad inducida por fracturación hidráulica o por embalses. Para comparar de forma justa, por ejemplo un coche eléctrico y uno de combustión, la herramienta es el ACV.

* Contenido añadido por nosotros que no aparece en las transparencias de clase.