Por qué así

HANDBOOK

Meteorología

Los 59 temas de Meteorología en esquemas y fórmulas para el repaso final

Muestra gratuita · primeras 5 de 90 páginas

Juan Carlos del Río

Temario de Meteorología de la oposición al Cuerpo Superior de Meteorólogos del Estado (A1)

porqueasi.com · noviembre de 2026

Material de estudio elaborado de forma independiente a partir del temario. No es material oficial del organismo convocante ni de ninguna Administración, ni está avalado por ellos. Elaborado por el autor con ayuda de herramientas de inteligencia artificial; si encuentras un error, escribe a hola@porqueasi.com.

Tema 1: Estructura física de la atmósfera

1. Distribución vertical de variables físicas: Presión, Densidad y Temperatura

1.1. Leyes Fundamentales y Equilibrio Hidrostático

La atmósfera se modela como un fluido en equilibrio hidrostático, donde la fuerza del gradiente de presión vertical se compensa con la gravedad.

$$\frac{dP}{dz} = -\rho g$$

- P: Presión atmosférica (Pa).
- z: Altitud geométrica (m).
- ρ: Densidad del aire (kg/m^3).
- g: Aceleración de la gravedad ($\approx 9{,}81$ m/s^2).

1.1.1. Ecuación de Estado del Aire Seco

Para cerrar el sistema, se asume un comportamiento de gas ideal.

$$P = \rho R_d T$$

- R_d: Constante específica del aire seco (287,05 J kg^{-1} K^{-1}).
- T: Temperatura absoluta (K).

1.2. Modelos de Distribución Vertical

1.2.1. Atmósfera Isoterma (Caso Teórico)

Si la temperatura es constante ($T = T_0$), la presión decae de forma exponencial según la altura de escala (H).

$$P(z) = P_0 \exp\left(-\frac{z}{H}\right) \quad ; \quad H = \frac{R_d T_0}{g}$$

- P_0: Presión al nivel de referencia (Pa).
- H: Altura de escala (m), donde la presión cae un factor $1/e$.

1.2.2. Atmósfera con Gradiente Térmico Constante (Γ)

En la troposfera, la temperatura varía linealmente: $T(z) = T_0 - \Gamma z$.

$$P(z) = P_0 \left(\frac{T_0 - \Gamma z}{T_0}\right)^{\frac{g}{R_d \Gamma}}$$

- Γ: Gradiente térmico vertical ($-\partial T/\partial z$).

1.3. Conceptos de Aire Húmedo y Espesor

- **Temperatura Virtual (T_v):** Ajuste de T para usar la constante R_d en aire húmedo ($T_v \approx T(1 + 0{,}61q)$).
- **Fórmula Hipsométrica:** Relaciona la distancia geopotencial entre dos capas con su temperatura media.

$$\Delta Z = \frac{R_d \bar{T}_v}{g_0} \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$$

- ΔZ: Espesor de la capa (m).
- $\bar{T}_v$: Temperatura virtual media de la capa (K).

1.4. Ejemplo Clarificador

Enunciado: Calcular la presión en la cima de una montaña de 3000 m si en la base (0 m) hay 1013 hPa y 288 K, con $\Gamma = 0{,}0065$ K/m.

Resolución: 1. Calcular exponente: $n = g/(R_d\Gamma) = 9{,}81/(287 \cdot 0{,}0065) \approx 5{,}26$.

2. Temperatura en cima: $T = 288 - (0{,}0065 \cdot 3000) = 268{,}5$ K.

3. Aplicar fórmula: $P = 1013 \cdot (268{,}5/288)^{5{,}26} \approx 1013 \cdot (0{,}932)^{5{,}26} \approx 701$ hPa.

1.5. Trucos y Reglas de Examen

- **Regla del 9:** En la baja troposfera, la presión cae ≈ 1 hPa cada 9 metros. Útil para descartar opciones en tests.
- **Densidad:** Recuerda que el aire húmedo es **menos denso** que el aire seco (el peso molecular del H_2O es menor).
- **Unidades:** Siempre convierte la presión a Pascales (1 hPa = 100 Pa) antes de usar la ecuación de estado.

2. Características de las Capas de la Atmósfera

2.1. Troposfera

- **Límite:** 0 a 11-18 km (finaliza en la Tropopausa).
- **Dinámica:** Capa convectiva, contiene el 80 % de la masa y casi todo el vapor de agua.
- **Gradiente:** Temperatura decrece con la altura ($\Gamma \approx 6{,}5$ K/km).

2.2. Estratosfera

- **Límite:** Tropopausa hasta ≈ 50 km (Estratopausa).
- **Inversión Térmica:** La temperatura **aumenta** con la altura debido a la absorción UV por el ozono (O_3).
- **Estabilidad:** Gran estabilidad vertical (inhibe la convección).

2.3. Mesosfera y Termosfera

- **Mesosfera:** Mínimo térmico de la atmósfera (≈ -143 °C).
- **Termosfera:** Altas temperaturas cinéticas por radiación X y UV extremo, pero densidad casi nula.

3. Atmósfera Estándar (ISA)

3.1. Definición y Valores de Referencia (MSL)

Modelo idealizado para calibración aeronáutica y normalización.

- $P_0 = 1013{,}25$ hPa.
- $T_0 = 15$ °C (288,15 K).
- $\rho_0 = 1{,}225$ kg/m^3.

3.2. Estructura Térmica ISA

Capa	Altitud (H)	Gradiente (Γ)
Troposfera	0 - 11 km	+6,5 K/km
Tropopausa	11 - 20 km	0,0 (Isoterma)
Estratosfera	20 - 32 km	−1,0 K/km (Inversión)

3.3. Altitud de Densidad

Es la altitud geométrica en la ISA que corresponde a una densidad medida.

- **Truco de Examen:** Si hace más calor que en la ISA ($T_{real} > T_{std}$), la altitud de densidad es **mayor** que la real. El avión rinde peor (como si estuviera más alto).

Esquema de Guía Oral

- La presión siempre disminuye con la altura porque depende del peso de la columna de aire superior.
- El equilibrio hidrostático asume que la fuerza de gravedad y el gradiente de presión están balanceados.
- La altura de escala ($H \approx 8$ km) indica la compresibilidad de la atmósfera en modelos isotermos.
- La troposfera es la capa meteorológica por excelencia; su límite superior (tropopausa) varía con la latitud.
- En la estratosfera, el ozono causa una inversión térmica que actúa como tapadera para los movimientos verticales.
- La atmósfera estándar (ISA) es un promedio global necesario para calibrar altímetros y comparar vuelos.
- Un aumento de temperatura o humedad disminuye la densidad del aire, afectando negativamente la sustentación.

Tema 2: Composición química de la atmósfera

4. Estructura vertical: homosfera y heterosfera

La atmósfera se divide según su composición y régimen de transporte en dos dominios separados por la turbopausa.

4.1. La homosfera: El dominio del mezclado turbulento

Se extiende desde la superficie hasta los 85-100 km (troposfera, estratosfera y mesosfera).

- **Características**: Composición química constante para gases permanentes (N_2, O_2, Ar).
- **Mecanismo**: La difusión turbulenta (K_z) domina sobre la molecular (D).

$$\phi_i = -n\left[D_i\left(\frac{1}{n_i}\frac{\partial n_i}{\partial z} + \frac{1}{H_i}\right) + K_z\left(\frac{1}{n_i}\frac{\partial n_i}{\partial z} + \frac{1}{H_{avg}}\right)\right]$$

- ϕ_i: Flujo vertical del constituyente i.
- n, n_i: Densidad numérica total y de la especie i.
- D_i, K_z: Coeficientes de difusión molecular y turbulenta.
- H_i, H_{avg}: Altura de escala de la especie i y del aire promedio.

4.2. La turbopausa y la heterosfera

La **turbopausa** es el nivel donde $D \approx K_z$. Por encima de 100 km (heterosfera), las colisiones son infrecuentes y domina el equilibrio difusivo (Ley de Dalton).

$$H_i = \frac{RT}{M_i g} \quad ; \quad n_i(z) = n_i(z_0)\exp\left(-\frac{\Delta z}{H_i}\right)$$

- H_i: Altura de escala de la especie i (m).
- R: Constante universal de los gases.
- T: Temperatura cinética (K).
- M_i: Masa molecular de la especie i (kg/mol).
- g: Aceleración de la gravedad.

4.2.1. Estructura de capas en la heterosfera

Debido a que $H_i \propto 1/M_i$, los gases se estratifican por peso:

- **Capa de** N_2: Hasta 200 km.
- **Capa de** O: 200-1000 km (por fotodisociación del O_2).
- **Capa de** He: 1000-3000 km.
- **Capa de** H: >3000 km (exosfera).

- **Truco para examen**: En la homosfera, usa siempre $M \approx 28{,}96$ g/mol. En la heterosfera, recuerda que a mayor masa molecular (M), menor es la altura de escala (H) y más rápido cae la concentración con la altura.
- **Ejemplo**: A 300 km de altura, el cociente O/N_2 aumenta drásticamente (aprox. 16 veces respecto a la turbopausa) porque el O es más ligero y su densidad decae más lentamente que la del N_2.

5. Evolución de la composición atmosférica terrestre

5.1. Etapas evolutivas

- **Atmósfera I (Protoatmósfera)**: H_2, He. Perdida por escape de Jeans y viento solar.
- **Atmósfera II (Secundaria)**: CO_2, N_2, H_2O. Originada por desgasado volcánico. Reductora/Neutra.
- **Atmósfera III (Actual)**: Rica en O_2 y N_2. Oxidante.

5.2. El Evento de la Gran Oxidación (GOE)

Hace 2.4 Ga, la fotosíntesis oxigénica saturó los sumideros superficiales (hierro oceánico).

- **Consecuencia**: Formación de la capa de ozono y reducción del metano (CH_4), provocando glaciaciones globales.

$$CaSiO_3 + CO_2 \longrightarrow CaCO_3 + SiO_2$$

- **Reacción de Urey**: Meteorización de silicatos que regula el CO_2 a escala geológica.

- **Regla de memoria**: El enterramiento de carbono orgánico (lignina en el Carbonífero) actúa como fuente neta de O_2 atmosférico al evitar la respiración/oxidación del tejido vegetal.

6. Ozonosfera y reducción estacional

6.1. Ciclo de Chapman (Oxígeno puro)

- **Formación**: $O_2 + h\nu \rightarrow O + O$ y $O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$.
- **Destrucción**: $O_3 + h\nu \rightarrow O_2 + O$ y $O + O_3 \rightarrow 2O_2$.

6.2. Agujero de ozono antártico

Proceso estacional (primavera austral) basado en química heterogénea:

1. **Vórtice Polar**: Aísla el aire frío y permite $T < 193$ K.
2. **Nubes Estratosféricas Polares (PSC)**: Tipo I (ácido nítrico) y Tipo II (hielo).
3. **Activación**: Las PSC convierten reservorios inertes ($HCl, ClONO_2$) en Cl_2.
4. **Fotólisis**: Al llegar la primavera, el sol disocia el Cl_2 en $Cl\cdot$, iniciando ciclos catalíticos.

Neto: $O + O_3 \xrightarrow{X} 2O_2$

- X: Catalizador (radicales Cl, NO, OH, Br). No se consume en la reacción.

- **Ejemplo**: Una pérdida del 2 % diario de O_3 durante 20 días de primavera reduce la concentración local un 33 % (proceso exponencial: $0{,}98^{20}$).
- **Truco de examen**: La asimetría hemisférica se debe a que el Antártico es más frío y estable (menos orografía), facilitando más PSCs que el Ártico.

Esquema de Repaso Oral

- **Homosfera vs Heterosfera**: El límite es la turbopausa (100 km). En la primera domina el mezclado; en la segunda, la separación por masa molecular.
- **Altura de escala (H)**: Define la caída de presión y densidad. Es mayor para gases ligeros (H, He) y alta temperatura (T).
- **Evolución atmosférica**: La Atmósfera I se perdió por baja gravedad; la II fue volcánica (CO_2); la III es biológica (O_2).
- **GOE**: La fotosíntesis cambió el balance químico global hace 2.4 Ga, creando la capa de ozono y enfriando el clima por eliminación de metano.
- **Ciclo de Chapman**: Modelo básico de ozono en oxígeno puro. Insuficiente para explicar la realidad sin los ciclos catalíticos (Cl_x, NO_x).
- **Agujero de Ozono**: Requiere tres factores: frío extremo (Vórtice), superficie sólida (PSC) y luz solar (activación de cloro en primavera).
- **Denitrificación**: La sedimentación de PSC-I elimina NO_x, impidiendo que el cloro sea secuestrado, lo que maximiza la destrucción de ozono.

Tema 3: Contaminación atmosférica

7. Definición y clasificación de contaminantes del aire

7.1. Conceptos fundamentales

- **Contaminación atmosférica:** Alteración de la composición química del aire con concentraciones superiores a los niveles de fondo (*background*) y tiempos de residencia suficientes para causar efectos adversos.
- **Emisión:** Masa de contaminante liberada por una fuente por unidad de tiempo (g/s, kg/h).
- **Inmisión (Calidad del Aire):** Concentración de contaminantes en la baja troposfera, a nivel de receptor ($\mu g/m^3$, ppm, ppb).

7.2. Clasificación taxonómica

7.2.1. Según estado físico

- **Gases y vapores:** Mezcla molecular con el aire (fácil transporte). Ej: SO_2, NO_x, CO, O_3.
- **Material Particulado (PM):** Aerosoles clasificados por su diámetro aerodinámico (D_p):
  - **PM10:** $D_p < 10\mu m$ (Origen mecánico, sedimentación significativa).
  - **PM2.5:** $D_p < 2{,}5\mu m$ (Combustión, formación secundaria).
  - **PM0.1 (Ultrafinas):** Gran superficie específica, alta toxicidad.

7.2.2. Según origen y formación

- **Primarios:** Vertidos directamente (ej. SO_2, hollín, CO).
- **Secundarios:** Formados en la atmósfera por reacciones químicas (ej. O_3, H_2SO_4, sales de amonio).

7.2.3. Escalas de impacto

- **Local:** Microescala (calles), contaminantes de vida corta (CO, NO_x).
- **Regional:** Smog fotoquímico, lluvia ácida (cientos de km).
- **Global:** Efecto invernadero y capa de ozono (vida media de años).

7.3. Ejemplo y reglas de examen

Ejemplo: En un entorno costero con tráfico, el NO_2 se fotoliza para formar O_3. Simultáneamente, el SO_2 industrial se oxida en gotas de agua para formar aerosoles de sulfato, reduciendo la visibilidad.

Truco para minimizar cálculos: En problemas de dilución, recuerda la relación inversa: si la velocidad del viento (u) se duplica, la concentración (C) se reduce a la mitad ($C \propto 1/u$). **Regla mnemotécnica:** *Emisión* es lo que "sale" de la chimenea (fuente); *Inmisión* es lo que "entra" en el pulmón (receptor).

8. Contaminantes principales, fuentes y sumideros

8.1. Dinámica de contaminantes

La concentración depende del balance entre fuentes y sumideros, definido por el tiempo de residencia.

Tiempo de Residencia Atmosférica

$$\tau = \frac{M}{R}$$

- τ: Tiempo de residencia (s o días).
- M: Masa total del contaminante en la atmósfera (kg).
- R: Tasa de remoción total (sumideros) (kg/s).

8.2. Tipología de Fuentes

- **Puntuales:** Chimeneas (alta entalpía, elevación del penacho).
- **Lineales:** Autopistas (función de la densidad de tráfico).
- **Difusas/Área:** Calefacciones, agricultura (NH_3).

8.3. Mecanismos de Sumidero

- **Transformación Química:** Oxidación por radical hidroxilo ($OH^\bullet$) (diurno) o radical nitrato (NO_3) (nocturno).
- **Deposición Seca:** Transferencia directa a superficies gobernada por la velocidad de deposición (v_d).
- **Deposición Húmeda:**
  - *Rainout:* Nucleación dentro de la nube.
  - *Washout:* Lavado por debajo de la nube.

9. Reacciones y ciclos químicos

9.1. Química Troposférica

El radical OH es el "detergente atmosférico". Su formación depende de la fotólisis del ozono.

Equilibrio de Ozono (Estado Estacionario de Leighton)

$$[O_3] = \frac{k_1[NO_2]}{k_3[NO]}$$

- $[O_3], [NO_2], [NO]$: Concentraciones de las especies.
- k_1: Tasa de fotólisis del NO_2.
- k_3: Constante de velocidad de la reacción $O_3 + NO$.

9.2. Química Estratosférica

Regida por el Ciclo de Chapman y la destrucción catalítica ($X = Cl, Br, NO, OH$):

- $X + O_3 \rightarrow XO + O_2$
- $XO + O \rightarrow X + O_2$

9.3. Cinética Química

Ley de Arrhenius

$$k(T) = A \cdot e^{\frac{-E_a}{RT}}$$

- $k(T)$: Constante de velocidad.
- A: Factor preexponencial.
- E_a: Energía de activación.
- R: Constante universal de los gases.
- T: Temperatura absoluta (K).

10. Factores meteorológicos y efectos asociados

10.1. Estabilidad Atmosférica

Comparación entre el gradiente ambiental (γ) y el adiabático seco ($\Gamma_d = 9{,}8K/km$):

- **Inestable ($\gamma > \Gamma_d$):** Gran dispersión vertical.
- **Estable / Inversión ($\gamma < \Gamma_d$):** Dispersión inhibida, acumulación de contaminantes.

10.2. Transporte y Dispersión

El viento sigue un perfil logarítmico por el rozamiento superficial:

Perfil Logarítmico del Viento

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right)$$

- $u(z)$: Velocidad a la altura z.
- u_*: Velocidad de fricción.
- κ: Constante de von Kármán ($\approx 0{,}41$).
- d: Desplazamiento del plano cero.
- z_0: Longitud de rugosidad (depende del terreno).

10.3. Elevación de la Pluma (Ejemplo de ejercicio)

Copia del enunciado: *Determinar la altura efectiva de emisión dada una chimenea de 120m con gases a 450K.*

Fórmula de Holland (Condiciones Neutras)

$$\Delta h = \frac{v_s d}{u}\left(1{,}5 + 2{,}68 \cdot 10^{-3} P \frac{T_s - T_a}{T_s} d\right)$$

- Δh: Sobreelevación de la pluma (m).
- v_s: Velocidad de salida de gases (m/s).
- d: Diámetro de la chimenea (m).
- u: Velocidad del viento (m/s).
- P: Presión atmosférica (mb).
- T_s, T_a: Temp. de salida y ambiental (K).

10.4. Morfología de la pluma

- **Looping:** Inestabilidad fuerte (impactos locales).
- **Fanning (Abanico):** Inversión térmica (transporte horizontal largo).
- **Fumigation (Fumigación):** Crítico. Inversión arriba, inestable abajo (transporte masivo al suelo).

Esquema de Guía Oral

- **Diferencia clave:** Emisión es el flujo en la fuente (g/s); Inmisión es la concentración ambiental ($\mu g/m^3$).
- **Partículas:** Clasificadas por diámetro (D_p). PM2.5 son más peligrosas por su capacidad de penetración respiratoria profunda.
- **Secundarios:** El ozono no se emite, se forma por reacción fotoquímica entre NO_x y COV.
- **Sumideros:** El radical OH elimina gases de día; la deposición húmeda (lluvia) es el sumidero más eficiente tras episodios de lluvia.
- **Tiempo de residencia:** $\tau = M/R$. Define si un problema es local (horas) o global (años).
- **Química estratosférica:** Dominada por el ciclo de Chapman (O_x) y destruida por catalizadores como el Cloro de los CFC.
- **Estabilidad:** Las inversiones térmicas son "tapas" que impiden la mezcla vertical, disparando la contaminación en superficie.
- **Morfología:** La "fumigación" ocurre al amanecer cuando la capa de mezcla alcanza la pluma atrapada en la noche.

Tema 4: Termodinámica del aire seco

11. Ecuación de estado y constantes del aire seco

El aire seco se define como una mezcla de gases permanentes (principalmente N_2 y O_2) cuya composición es constante en la homosfera. Se trata macroscópicamente mediante la hipótesis del continuo.

11.1. Ecuación de estado de los gases ideales

Para condiciones atmosféricas estándar, el aire seco se comporta casi como un gas ideal ($Z \approx 1$).

Ecuación de estado: $p = \rho R_d T$

- p: Presión (Pa).
- ρ: Densidad (kg/m^3).
- R_d: Constante específica del aire seco ($287{,}058\, J\, kg^{-1} K^{-1}$).
- T: Temperatura absoluta (K).

Constante específica: $R_d = \dfrac{R^*}{M_d}$

- R^*: Constante universal ($8{,}314\, J\, mol^{-1} K^{-1}$).
- M_d: Masa molecular media del aire seco ($\approx 28{,}96\, g/mol$).

11.2. Relaciones termodinámicas fundamentales

Relación de Mayer: $c_{p,d} - c_{v,d} = R_d$

Índice adiabático: $\gamma = \dfrac{c_{p,d}}{c_{v,d}} \approx 1{,}4$

- $c_{p,d}$: Calor específico a presión constante ($\approx 1005\, J\, kg^{-1} K^{-1}$).
- $c_{v,d}$: Calor específico a volumen constante ($\approx 718\, J\, kg^{-1} K^{-1}$).

- **Truco para examen**: Para cálculos rápidos, recuerda que $R_d \approx 287$. Si te piden densidad, despeja $\rho = p/(R_d T)$. Asegúrate siempre de pasar T a Kelvin ($T =^\circ C + 273{,}15$).

12. Evolución adiabática y estabilidad de la estratificación

Una transformación es adiabática si no hay intercambio de calor ($dq = 0$). En la atmósfera, esto ocurre en movimientos rápidos de parcelas aisladas.

12.1. Gradiente adiabático seco (Γ_d)

Representa el enfriamiento de una parcela de aire seco al ascender por expansión adiabática.

$$\Gamma_d = \frac{g}{c_p} \approx 9{,}8\, K/km$$

- g: Aceleración de la gravedad ($\approx 9{,}81\, m/s^2$).
- c_p: Calor específico a presión constante.

12.2. Criterios de estabilidad estática

Se basan en la comparación entre el gradiente ambiental (Γ) y el adiabático seco (Γ_d):

- **Inestabilidad absoluta**: $\Gamma > \Gamma_d$. La parcela desplazada hacia arriba es más cálida que el entorno y sigue ascendiendo.