Índice general

Introducción **1**

1. La atmósfera **3**
1.1. Introducción 4
1.2. Composición de la atmósfera 4
1.3. La estructura de la atmósfera 8
1.3.1. La temperatura atmosférica 8
1.3.2. El campo eléctrico 11
Resumen 11
Cuestiones y problemas 13

2. La Radiación Solar **15**
2.1. El espectro electromagnético 16
2.2. La radiación térmica 18
2.3. Las leyes de la radiación 21
2.3.1. Ley de Kirchhoff 21
2.3.2. Ley de Planck 23
2.4. La radiación solar 24
2.4.1. La constante solar 26
2.5. La atmósfera y la radiación solar 27
2.5.1. Absorción 28
2.5.2. Dispersión 30
2.5.2.1. Dispersión Rayleigh 30
2.5.2.2. Dispersión Mie 32
2.5.3. Reflexión 33
2.6. La radiación terrestre 35
2.7. El equilibrio térmico y la temperatura de la Tierra . . . 37

2.7.1. El efecto invernadero 41
2.8. Balance de energía detallado 42
Resumen 44
Cuestiones y Problemas 46

3. La temperatura **49**
3.1. La insolación 50
3.1.1. Excentricidad de la órbita 50
3.1.2. Inclinación del eje de rotación 51
3.1.3. La altura solar 54
3.1.4. Los trópicos 55
3.1.5. La atmósfera 56
3.2. Balance de radiación según la latitud 56
3.3. Los ciclos de la temperatura 60
3.3.1. Factores determinantes de la temperatura . . . 61
Resumen 63
Cuestiones y problemas 65

4. La estabilidad atmosférica **67**
4.1. La Presión 68
4.1.1. Medida de la presión 71
4.2. Gradiente adiabático de temperatura 72
4.2.1. Temperatura potencial 74
4.3. Humedad 76
4.3.1. Presión de vapor 76
4.3.2. Índices de humedad 77
4.3.3. Medida de la humedad atmosférica 81
4.4. El aire húmedo 82
4.4.1. Temperatura virtual 82
4.4.2. Gradiente adiabático saturado 84
4.5. Estabilidad Atmosférica 86
4.5.1. Estabilidad absoluta 87
4.5.2. Inestabilidad absoluta 90
4.5.3. Estabilidad condicional 91
4.6. Modos de alcanzar la saturación en la atmósfera. Nieblas 93
4.7. Condensación 96
4.7.1. Nucleación de gotas 96

4.7.2. Crecimiento de gotas 99
Resumen 100
Cuestiones y problemas 103

5. Dinámica atmosférica 107
5.1. El viento 108
5.2. Fuerzas en la atmósfera 108
5.3. Fuerza bárica 109
5.3.1. Concepto de vector gradiente 109
5.3.2. Fuerza bárica 111
5.4. Fuerza de Coriolis 114
5.4.1. Viento geostrófico 118
5.4.2. Viento de gradiente 121
5.5. Fuerza de fricción 124
Resumen 128
Cuestiones y problemas 131

6. La circulación en la atmósfera 137
6.1. Escalas de la circulación atmosférica 138
6.2. La circulación general 138
6.2.1. Modelo de una celda 140
6.2.2. Modelo de tres celdas 142
6.2.3. Corriente en chorro 145
6.2.4. Sistemas de presión semipermanentes 147
6.3. Circulación mesoescalar 149
6.3.1. Monzones 149
6.3.2. Vientos orográficos 150
6.3.2.1. Ondas de montaña 151
6.3.2.2. Efecto Foehn 151
6.3.3. Circulación térmica 153
Resumen 156
Cuestiones y problemas 158

7. Masas y Frentes 159
7.1. Masas de aire 160
7.2. Frentes 163
7.2.1. Frente cálido 164
7.2.2. Frente frío 165

7.2.3. Frente estacionario 166
7.2.4. Frentes ocluidos 166
7.3. Borrascas ondulatorias 167
7.4. Sistemas nubosos 168
Resumen 170
Cuestiones y Problemas 172

8. El Océano y el clima 173
8.1. Introducción 174
8.2. Estructura del océano 177
8.2.1. Salinidad 177
8.2.2. Temperatura y densidad 178
8.3. La circulación general del océano 179
8.3.1. Flujo geostrófico 180
8.3.2. Corrientes superficiales 181
8.3.3. Salinidad y circulación del océano 182
8.4. Dinámica cerca de la superficie 184
8.4.1. El Niño 185
Resumen 187
Cuestiones y Problemas 191

9. Clasificación climática 193
9.1. Introducción 194
9.2. Clasificación climática 195
9.2.1. Clasificaciones genéticas 195
9.2.1.1. Factores climáticos 196
9.2.2. Clasificaciones empíricas 197
9.2.2.1. Clasificación climática en función de la temperatura 198
9.2.2.2. Clasificación climática en función de la precipitación 198
9.2.2.3. Clasificación climática en función de índices 199
9.2.2.4. El climograma 200
9.3. Sistema de Koeppen 201
9.3.1. Climas secos (grupo B) 206
9.3.2. Climas templados (grupo C) 208

9.3.3. Climas fríos (Grupo D) . . . 211
9.3.4. El clima polar (E) . . . 212
9.3.5. Climas de montaña . . . 214
Resumen . . . 214
Cuestiones y Problemas . . . 216

10. Cambio Climático **219**
10.1. Introducción . . . 220
10.2. El sistema climático . . . 221
10.3. Historia del clima . . . 222
10.3.1. Datos . . . 222
10.4. Causas naturales de la variación del clima . . . 225
10.4.1. Variaciones de la órbita terrestre . . . 225
10.4.2. Deriva de los continentes . . . 227
10.4.3. Cambios en la composición de la atmósfera . . . 228
10.4.4. Cambios de la actividad solar . . . 229
10.5. Mecanismos de realimentación . . . 232
10.5.1. Interacción atmósfera-océano . . . 232
10.5.2. Cambios en la circulación oceánica . . . 232
10.5.3. Absorción de gases por el océano . . . 233
10.6. Calentamiento Global . . . 234
10.6.1. Los datos . . . 234
10.6.2. Las causas . . . 235
10.6.3. La consecuencias . . . 238
10.6.4. El IPCC . . . 241
Resumen . . . 242
Cuestiones y Problemas . . . 243

Bibliografía **245**

Índice analítico **247**

2.1. El espectro electromagnético

Aunque por su origen, efectos y aplicaciones puedan parecer muy diferentes, todas las ondas electromagnéticas están formadas por un campo eléctrico y un campo magnético perpendiculares entre sí, que oscilan con la misma frecuencia ν, ver figura 2.1. Se propagan en el vacío con la velocidad de la luz, $c = 3 \times 10^8$ m/s, de manera que las ondas electromagnéticas se pueden caracterizar también por su longitud de onda λ ya que $c = \lambda\nu$. Desde un punto de vista cuántico la onda electromagnética está formada por fotones o cuantos de energía $E = h\nu$, donde $h = 6{,}6262 \times 10^{-34}$ J s es la llamada constante de Planck. Así pues, lo único que distingue a las distintas ondas electromagnéticas es su energía o, de forma equivalente, su frecuencia o su longitud de onda.

Se llama **radiación** al transporte de energía por ondas electromagnéticas. Naturalmente los efectos que produce la radiación dependen de la energía de la misma.

La clasificación de las ondas electromagnéticas según su frecuencia, energía o longitud de onda se conoce como espectro electromagnético. La frecuencia se mide en ciclos por segundo o herzios (Hz), la longitud de onda en metros (m) y la energía en electrón voltios (eV)[1]. Se mantiene esta triple descripción tanto por razones históricas como de uso en los distintos campos de la ciencia. Se usan generalmente las unidades y sus correspondientes múltiplos que dan lugar a números sencillos. Así, para medir la longitud de onda se utiliza, entre otros, la micra μm $= 10^{-6}$ m y el nanómetro nm $= 10^{-9}$ m.

De menor a mayor frecuencia (todas las unidades se dan en Hz) se pueden distinguir los siguientes rangos:

- **Radioondas** ($10^3 < \nu < 10^9$). Se utilizan en comunicaciones especialmente en radio y televisión. En el universo se producen por turbulencia de gases ionizados en las estrellas. En una antena se generan con corrientes alternas.

- **Microondas** ($10^9 < \nu < 3\ 10^{11}$). En este rango se encuentran las ondas de radar y las utilizadas en hornos y en comunicaciones

[1] $1\text{ eV} = 1{,}6 \times 10^{-19}$ J

telefónicas. En astronomía, la radiación de fondo que contiene información del origen de universo está comprendida en este rango del espectro.

- **Infrarrojo** ($3 \times 10^{11} < \nu < 4 \times 10^{14}$). Se suele dividir en infrarrojo lejano, $3 \times 10^{11} < \nu < 10^{13}$, medio $10^{13} < \nu < 10^{14}$ y cercano $10^{14} < \nu < 4 \times 10^{14}$, haciendo referencia a la proximidad al visible. Al incidir la radiación infrarroja sobre un cuerpo induce movimientos de vibración y rotación en las moléculas produciendo calentamiento. La radiación en el infrarrojo cercano tiene energía suficiente para causar transiciones electrónicas en los átomos. El cuerpo humano emite en este rango por lo que puede ser detectada su presencia en la oscuridad mediante sensores de infrarrojos.

- **Visible** (4×10^{14}, rojo, $< \nu < 8 \times 10^{14}$, violeta). A este rango del espectro corresponde lo que llamamos luz. Esta radiación tiene energía suficiente para producir transiciones electrónicas en átomos y moléculas y produce importantes efectos en los seres vivos, tales como la fotosíntesis y la visión humana. La mayor parte de la radiación solar se produce en este rango y es también el tipo de radiación que se observa con los telescopios tradicionales cuando se explora el universo.

- **Ultravioleta** ($8 \times 10^{14} < \nu < 10^{16}$). También se suele dividir en cercano, medio y lejano. El Sol, las estrellas y otros objetos calientes emiten rayos UV. A otra escala, un gas en el que se produce una descarga eléctrica emite radiación UV y visible, como ocurre en un tubo fluorescente. Este rango del espectro se suele medir por su energía en unidades de electrón-voltio, porque están comprendidas entre 1 y 100 eV. Una exposición prolongada a rayos UV produce quemaduras en la piel y puede dar lugar a cáncer. Son absorbidos en la atmósfera, especialmente en la capa de ozono.

- **Rayos X** ($3 \times 10^{16} < \nu < 3 \times 10^{19}$), se dividen en blandos, hasta 10^{18}, y duros a partir de esa frecuencia. En energía, el rango está comprendido entre 100 eV y 100 keV. La longitud

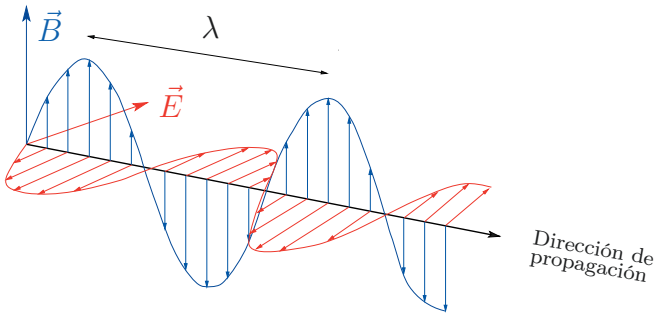

Figura 2.1: Esquema de una onda electromagnética mostrando los campos eléctrico, $\vec{E}$, y magnético, $\vec{B}$, oscilando en planos perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación.

de onda varía entre los 10^{-11} m y 10^{-9} m, que es la distancia típica entre los átomos en los tejidos animales blandos, por lo que se utilizan para identificar cuerpos más densos como huesos y dientes. En astronomía, el análisis de la radiación X proporciona información de procesos de elevada energía como formación de supernovas o explosiones estelares. En el laboratorio se generan por bombardeo con electrones de una lámina metálica.

- **Rayos** γ ($\nu > 10^{19}$). Se producen por transiciones nucleares en reactores nucleares y explosiones atómicas. De forma natural los materiales radiactivos emiten este tipo de radiación, que también se encuentra en el universo. Tienen energías superiores a los 100 keV y son letales para los tejidos vivos.

2.2. La radiación térmica

Se llama **radiación térmica** a la que emiten los cuerpos debido a su temperatura. Cuando la temperatura del cuerpo es baja, la radiación emitida es infrarroja y, por tanto, no visible. Si vemos los objetos no es por la radiación térmica emitida sino por la luz que reflejan. Sin embargo, al aumentar la temperatura los cuerpos terminan emitiendo luz visible como ocurre, por ejemplo, con un trozo de hierro al rojo vivo o el filamento de una lámpara incandescente.