Por qué así

TEMARIO DESARROLLADO

Meteorología

Los 59 temas de Meteorología de la oposición a Meteorólogos del Estado (A1), desarrollados

Muestra gratuita · primeras 41 de 769 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.

Contents

1. Tema 1: Estructura física de la atmósfera **33**
1.1. Distribución vertical de variables físicas fundamentales: Densidad, presión y temperatura. 33
1.2. Características principales de las capas de la atmósfera. 36
1.2.1. La Troposfera: El dominio de la convección y la hidrometeorología 36
1.2.2. La Estratosfera: Estabilidad y fotoquímica del ozono 36
1.2.3. La Mesosfera: La región de mínimos térmicos 37
1.2.4. La Termosfera y Exosfera: El límite con el espacio exterior 37
1.2.5. Cuadro Resumen de la Estructura Térmica 37
1.2.6. Análisis de la estabilidad y la transición en la tropopausa 37
1.2.7. Implicaciones del gradiente térmico en la propagación de ondas 38
1.3. Atmósfera estándar y gradientes térmicos verticales asociados. 38
1.3.1. Atmósfera estándar y gradientes térmicos verticales asociados 38

2. Tema 2: Composición química de la atmósfera **43**
2.1. Estructura vertical: homosfera y heterosfera. 43
2.1.1. La homosfera: el dominio del mezclado turbulento 43
2.1.2. La turbopausa o homopausa: el límite físico-químico 43
2.1.3. La heterosfera: separación gravitacional y equilibrio difusivo 44
2.1.4. Estructura de capas en la heterosfera 44
2.1.5. Importancia de la masa molecular media 46
2.2. Evolución de la composición atmosférica terrestre. 46
2.2.1. La protoatmósfera o Atmósfera I: El legado de la nebulosa solar 46
2.2.2. La atmósfera secundaria: Desgasado y condensación (4.4 - 2.5 Ga) 46
2.2.3. La transición hacia una atmósfera oxidante: El Evento de la Gran Oxidación (GOE) 47
2.2.4. Evolución fanerozoica y estabilidad de la Atmósfera III 47
2.2.5. Resumen cronológico de la composición atmosférica 48
2.2.6. Mecanismos de control: Escapes y sumideros 48
2.3. Ozonosfera y reducción estacional de su espesor. 48
2.3.1. Fundamentos de la fotoquímica del ozono: El ciclo de Chapman 49
2.3.2. Ciclos catalíticos y especies interferentes 49
2.3.3. Dinámica y transporte: La Célula de Brewer-Dobson 49
2.3.4. El fenómeno de la reducción estacional: El agujero de ozono antártico 50
2.3.5. Comparativa Hemisférica: Ártico vs. Antártida 51
2.3.6. Cronología de la protección de la ozonosfera 51

3. Tema 3: Contaminación atmosférica **53**
3.1. Definición y clasificación de contaminantes del aire. 53
3.1.1. Definiciones fundamentales y marcos conceptuales 53
3.1.2. Clasificación de los contaminantes según su estado físico 53
3.1.3. Clasificación según su origen y formación 54
3.1.4. Clasificación según la naturaleza química 54
3.1.5. Escalas de impacto de la contaminación 55
3.1.6. Criterios de peligrosidad y regulación 55
3.1.7. Evolución histórica de la problemática: De Londres a Pekín 56
3.2. Contaminantes principales, fuentes y sumideros. 56
3.2.1. Taxonomía de los contaminantes principales 56

3.2.2. Fuentes de emisión: Origen y mecanismos de liberación . . . 57
3.2.3. Mecanismos de sumidero y tiempos de residencia . . . 57
3.2.4. Sumideros específicos y ciclos de retroalimentación . . . 58
3.2.5. Interacción entre fuentes y sumideros en el Antropoceno . . . 59
3.3. Reacciones y ciclos químicos en troposfera y estratosfera. . . . 59
3.3.1. Química de la Troposfera: El Ciclo de Oxidación . . . 59
3.3.2. Química de la Estratosfera: El Equilibrio del Ozono . . . 60
3.3.3. Comparativa de Procesos Químicos . . . 61
3.3.4. Química Heterogénea y el Agujero de Ozono . . . 61
3.3.5. Ciclos del Azufre y Formación de Aerosoles . . . 62
3.3.6. Termodinámica y Tasas de Reacción . . . 62
3.4. Factores meteorológicos y efectos asociados. . . . 62
3.4.1. Estabilidad atmosférica y transporte vertical . . . 63
3.4.2. El campo de vientos: Advección y rugosidad . . . 63
3.4.3. Altura de mezcla y profundidad de la capa límite . . . 63
3.4.4. Efectos de la precipitación y humedad . . . 64
3.4.5. Mecanismos de mesoescala: Brisas y topografía . . . 64
3.4.6. Cuadro comparativo: Estabilidad y morfología de la pluma . . . 64
3.4.7. Influencia de la nubosidad y la radiación solar . . . 65
3.4.8. Resumen de la sinergia meteorología-contaminación . . . 65

4. Tema 4: Termodinámica del aire seco **67**
4.1. Ecuación de estado y constantes del aire seco. . . . 67
4.1.1. La hipótesis del continuo y la naturaleza del aire seco . . . 67
4.1.2. La ecuación de estado de los gases ideales . . . 67
4.1.3. Cálculo de la masa molecular media y la constante R_d . . . 68
4.1.4. Calores específicos y relaciones fundamentales . . . 68
4.1.5. Resumen de constantes para el aire seco . . . 69
4.1.6. Limitaciones y extensiones: Del aire seco al aire húmedo . . . 69
4.1.7. El volumen específico y su relevancia en diagramas termodinámicos . . . 70
4.1.8. Dependencia de las constantes con la altura y la temperatura . . . 70
4.2. Evolución adiabática y estabilidad de la estratificación. . . . 70
4.2.1. Fundamentos termodinámicos de la evolución adiabática . . . 70
4.2.2. El gradiente adiabático seco . . . 71
4.2.3. Teoría de la estabilidad estática: El método de la parcela . . . 72
4.2.4. Frecuencia de Brunt-Väisälä y oscilaciones de gravedad . . . 72
4.2.5. Importancia de la estabilidad en la dispersión de contaminantes y aviación . . . 73
4.2.6. Resumen de criterios de estabilidad para aire seco . . . 74
4.2.7. Evolución adiabática y conservación de la energía . . . 74
4.3. Nivel de equilibrio y oscilaciones verticales. . . . 74
4.3.1. El Nivel de Equilibrio (EL) y el empuje de flotabilidad . . . 74
4.3.2. Dinámica de las oscilaciones verticales: La frecuencia de Brunt-Väisälä . . . 75
4.3.3. Interpretación física y aplicaciones de N . . . 75
4.3.4. Comparativa de estabilidad y parámetros asociados . . . 76
4.3.5. El papel del Nivel de Equilibrio en la transferencia de energía . . . 76
4.3.6. Consideraciones sobre la no linealidad y el rozamiento . . . 77
4.4. Temperatura potencial y análisis isoentrópico. . . . 77
4.4.1. Derivación matemática y la ecuación de Poisson . . . 77
4.4.2. Relación con la entropía y estabilidad estática . . . 78
4.4.3. Coordenadas isoentrópicas y el Potencial de Montgomery . . . 78
4.4.4. Ventajas diagnósticas del análisis isoentrópico . . . 79
4.4.5. Comparativa de sistemas de coordenadas verticales . . . 79
4.4.6. La pendiente de las superficies isoentrópicas . . . 80
4.5. Procesos politrópicos. . . . 80
4.5.1. Definición y formulación matemática . . . 80
4.5.2. Clasificación de los procesos según el índice n . . . 81
4.5.3. Relaciones entre variables de estado en procesos politrópicos . . . 81
4.5.4. El concepto de atmósfera politrópica . . . 82

4.5.5. Trabajo y calor en procesos politrópicos . . . 82
4.5.6. Aplicaciones en la estabilidad de la estratificación . . . 84
4.5.7. Conclusión de la sección . . . 84

5. Tema 5: Termodinámica del aire húmedo 85
5.1. Ecuación de estado y constantes del aire húmedo. . . . 85
5.1.1. Composición y Ley de Dalton . . . 85
5.1.2. Constantes termodinámicas de los componentes . . . 85
5.1.3. Derivación de la ecuación de estado para el aire húmedo . . . 86
5.1.4. Comparativa de parámetros físicos . . . 87
5.1.5. Implicaciones en la densidad y la flotabilidad . . . 87
5.1.6. Límites de validez y correcciones por no-idealidad . . . 88
5.1.7. Resumen de fórmulas clave . . . 88
5.2. Índices de humedad. . . . 88
5.2.1. Presión de vapor (e) . . . 88
5.2.2. Razón de mezcla (w) . . . 89
5.2.3. Humedad específica (q) . . . 89
5.2.4. Humedad absoluta (ρ_v) . . . 90
5.2.5. Humedad relativa (U o RH) . . . 90
5.2.6. Comparativa y propiedades de conservación . . . 90
5.2.7. Relaciones termodinámicas avanzadas . . . 90
5.2.8. El papel de los índices en la asimilación de datos . . . 91
5.3. Evolución adiabática del aire húmedo no saturado. . . . 92
5.3.1. El Primer Principio de la Termodinámica para el aire húmedo . . . 92
5.3.2. Ecuación de estado y constante del aire húmedo . . . 93
5.3.3. Gradiente térmico adiabático del aire húmedo . . . 93
5.3.4. Conservación de la relación de mezcla y evolución de la humedad relativa . . . 94
5.3.5. Comparativa de parámetros de conservación . . . 95
5.3.6. Importancia de la Temperatura Potencial Virtual . . . 95
5.3.7. Consideraciones sobre la reversibilidad . . . 95
5.4. Temperatura virtual y aplicaciones. . . . 95
5.4.1. Derivación analítica de la temperatura virtual . . . 96
5.4.2. Significado físico e interpretación . . . 97
5.4.3. Aplicaciones fundamentales en meteorología dinámica y sinóptica . . . 97
5.4.4. Comparativa de variables termodinámicas . . . 98
5.4.5. Limitaciones y consideraciones en aire saturado . . . 99
5.4.6. Cálculo de la temperatura virtual en diagramas termodinámicos . . . 99
5.4.7. Resumen de fórmulas y constantes clave . . . 99

6. Tema 6: Condensación del aire húmedo I – Procesos isobáricos 101
6.1. Condensación por enfriamiento radiativo. . . . 101
6.1.1. Fundamentos del balance radiativo de onda larga . . . 101
6.1.2. Evolución termodinámica isobárica . . . 101
6.1.3. Mecanismos de nucleación y formación de rocío/escarcha . . . 102
6.1.4. Factores condicionantes del enfriamiento radiativo . . . 102
6.1.5. Cuadro comparativo de meteoros por enfriamiento radiativo . . . 103
6.1.6. Desarrollo de un escenario práctico . . . 103
6.1.7. Consideraciones sobre la fase de la condensación . . . 104
6.1.8. El papel de la higroscopicidad en la condensación incipiente . . . 104
6.1.9. Resumen de la transferencia energética durante la condensación . . . 104
6.2. Temperatura de punto de rocío y escarcha. . . . 104
6.2.1. Definición y fundamentos de la temperatura de punto de rocío (T_d) . . . 104
6.2.2. Temperatura de punto de escarcha (T_f) . . . 105
6.2.3. Relación analítica y formulaciones empíricas . . . 105
6.2.4. El proceso isobárico de formación de rocío y escarcha . . . 106
6.2.5. Importancia de la depresión del punto de rocío . . . 107
6.2.6. Cuadro comparativo: Rocío vs. Escarcha . . . 107
6.2.7. Consideraciones sobre la presión de vapor en la interfase . . . 107
6.3. Nieblas de irradiación y advección. . . . 108

6.3.1. Nieblas de irradiación: El enfriamiento radiativo superficial . . . 108
6.3.2. Nieblas de advección: Dinámica de masas en movimiento . . . 109
6.3.3. Comparativa y dinámica de disipación . . . 109
6.3.4. Microfísica y Propiedades Ópticas . . . 110
6.4. Condensación por evaporación y tipos asociados. . . . 110
6.4.1. Fundamentos físico-matemáticos del proceso . . . 111
6.4.2. Tipología de las nieblas de evaporación . . . 111
6.4.3. Análisis comparativo de procesos de condensación isobárica . . . 112
6.4.4. El papel de los núcleos de condensación (CCN) . . . 112
6.4.5. Consideraciones sobre la visibilidad y microfísica . . . 113
6.4.6. Resumen de condiciones sinópticas favorables . . . 113

7. Tema 7: Condensación del aire húmedo II – Procesos isoentálpicos 115
7.1. Temperatura equivalente y temperatura del termómetro húmedo. . . . 115
7.1.1. La entalpía del aire húmedo como función de estado . . . 115
7.1.2. Temperatura del termómetro húmedo (T_w) . . . 116
7.1.3. Temperatura equivalente (T_e) . . . 116
7.1.4. Comparativa y Propiedades Conservativas . . . 117
7.1.5. Importancia en la estabilidad y procesos de mezcla . . . 118
7.1.6. Consideraciones sobre la fase sólida . . . 118
7.2. Temperaturas potenciales equivalentes. . . . 118
7.2.1. Derivación termodinámica y formulaciones . . . 118
7.2.2. Conservación y propiedades de invarianza . . . 119
7.2.3. La Temperatura Potencial Equivalente de Saturación (θ_{es}) . . . 120
7.2.4. Ejemplo práctico: Análisis de una masa de aire en ascenso orográfico . . . 120
7.2.5. Aplicaciones en el análisis de frentes y estructuras sinópticas . . . 121
7.3. Condensación por mezcla horizontal de masas de aire. . . . 121
7.3.1. Condensación por mezcla horizontal de masas de aire . . . 121
7.4. Nieblas de mezcla. . . . 124
7.4.1. Nieblas de mezcla . . . 124

8. Tema 8: Condensación del aire húmedo III – Procesos adiabáticos 129
8.1. Ascensos forzados y por convección. . . . 129
8.1.1. Mecanismos de ascenso forzado . . . 129
8.1.2. Ascensos por convección libre . . . 130
8.1.3. Análisis comparativo de los mecanismos de ascenso . . . 130
8.1.4. Termodinámica del ascenso adiabático: El camino hacia la saturación . . . 130
8.1.5. Interacción entre ascensos forzados e inestabilidad . . . 131
8.1.6. Implicaciones en la microfísica de nubes . . . 132
8.2. Niveles de condensación y temperatura de saturación. . . . 132
8.2.1. El punto de saturación y la temperatura en el nivel de condensación . . . 132
8.2.2. Nivel de Condensación por Ascenso (LCL) . . . 133
8.2.3. Nivel de Condensación por Convección (CCL) y Temperatura de Convección . . . 133
8.2.4. Comparativa de Niveles de Condensación . . . 134
8.2.5. Aplicación práctica: Análisis de una parcela en ascenso . . . 134
8.2.6. Consideraciones sobre la Temperatura Virtual y el Nivel de Saturación . . . 135
8.2.7. Resumen de transiciones termodinámicas . . . 135
8.3. Evolución pseudoadiabática del aire saturado. . . . 135
8.3.1. Fundamentos termodinámicos y la aproximación pseudoadiabática . . . 136
8.3.2. El gradiente pseudoadiabático (Γ_s) . . . 136
8.3.3. Invariantes termodinámicos: Temperatura potencial equivalente (θ_e) . . . 137
8.3.4. Aplicación práctica y fenomenología: El efecto Föhn . . . 137
8.3.5. Representación en diagramas aerológicos . . . 138
8.4. Gradiente pseudoadiabático. . . . 138
8.4.1. Derivación analítica del gradiente pseudoadiabático . . . 139
8.4.2. Dependencia de la temperatura y la presión . . . 140
8.4.3. Consideraciones termodinámicas: Adiabático saturado vs. Pseudoadiabático . . . 140
8.4.4. Aplicación práctica y cálculo ejemplificado . . . 140
8.4.5. Implicaciones en la estructura vertical de la atmósfera . . . 141

9. Tema 9: Estabilidad atmosférica **143**
9.1. Métodos de la burbuja y de la capa. . . . 143
9.1.1. El método de la burbuja: Teoría de la parcela aislada . . . 143
9.1.2. El método de la capa: La compensación de Bjerknes . . . 144
9.1.3. Comparativa técnica de ambos métodos . . . 144
9.1.4. Análisis de la inestabilidad condicional y el papel del entorno . . . 145
9.1.5. Implicaciones en la parametrización de la convección . . . 146
9.1.6. Estabilidad de la capa como un todo . . . 146
9.1.7. Consideraciones termodinámicas finales . . . 146
9.2. Inestabilidad latente y potencial. . . . 146
9.2.1. Inestabilidad latente: El papel de la energía de flotabilidad . . . 147
9.2.2. Inestabilidad potencial o convectiva: El análisis de la capa . . . 147
9.2.3. Comparativa y sinergias entre tipos de inestabilidad . . . 148
9.2.4. Desarrollo de un caso práctico de análisis de estabilidad . . . 148
9.2.5. Implicaciones en la termodinámica avanzada: El índice de Sherwood y la entalpía . 149
9.2.6. Cuadro resumen de procesos de desestabilización . . . 149
9.3. Mecanismos de cambio de estabilidad. . . . 149
9.3.1. Modificación por forzamientos térmicos en superficie y procesos radiativos . . . 150
9.3.2. Advección diferencial de temperatura y humedad . . . 150
9.3.3. Efectos de los movimientos verticales a gran escala . . . 150
9.3.4. Inestabilidad potencial y su liberación por forzamiento mecánico . . . 151
9.3.5. Cuadro comparativo de mecanismos de modificación . . . 151

10. Tema 10: Diagramas aerológicos **153**
10.1. Características y líneas fundamentales. . . . 153
10.2. Fundamentación termodinámica y equivalencia de áreas . . . 153
10.3. Las líneas fundamentales de los diagramas aerológicos . . . 153
10.3.1. Líneas isobáricas e isotérmicas . . . 153
10.3.2. Adiabáticas secas (Isentrópicas) . . . 154
10.3.3. Adiabáticas saturadas (Pseudoadiabáticas) . . . 154
10.3.4. Líneas de razón de mezcla de saturación (Isohumas) . . . 154
10.4. Comparativa técnica de arquitecturas de diagramas . . . 154
10.5. Análisis de la sensibilidad geométrica . . . 154
10.6. Consideraciones finales sobre la interpretación de las líneas . . . 155
10.7. Diagramas más empleados en meteorología. . . . 156
10.7.1. El Emagrama . . . 156
10.7.2. El Tefigrama . . . 156
10.7.3. El Diagrama de Stüve . . . 157
10.7.4. El Diagrama Oblicuo: Skew-T Log-P . . . 157
10.7.5. Cuadro comparativo de los diagramas aerológicos . . . 157
10.7.6. Aplicación práctica y análisis de un sondeo . . . 157
10.7.7. Consideraciones sobre la representación de la humedad . . . 158
10.8. El diagrama oblicuo y su aplicación. . . . 158
10.8.1. El diagrama oblicuo y su aplicación. . . . 158
10.9. Determinación de niveles y energías. . . . 161
10.9.1. Niveles de condensación y niveles convectivos . . . 162
10.9.2. Análisis de flotabilidad: LFC, EL y niveles de equilibrio . . . 162
10.9.3. Cuantificación energética: CAPE y CIN . . . 162
10.9.4. Cuadro comparativo de parámetros de estabilidad y su interpretación . . . 163
10.9.5. Consideraciones avanzadas: El papel de la temperatura virtual y el entrainment . 163
10.9.6. Análisis del espesor y la relación con la energía . . . 164
10.9.7. Procedimiento sistemático para el análisis de un sondeo . . . 164

11. Tema 11: Radiación atmosférica **167**
11.1. Magnitudes radiativas básicas. . . . 167
11.1.1. Geometría de la radiación: El ángulo sólido . . . 167
11.1.2. Jerarquía de magnitudes radiativas . . . 167
11.1.3. Dependencia espectral y magnitudes monocromáticas . . . 168
11.1.4. Relación entre Radiancia e Irradiancia . . . 168

11.1.5. Resumen de magnitudes y unidades . . . 169
11.1.6. Aplicación práctica: El balance en la cima de la atmósfera . . . 169
11.1.7. Magnitudes adicionales y coeficientes de interacción . . . 170
11.1.8. Evolución histórica y conceptual . . . 170
11.2. Espectros del Sol, Tierra y atmósfera. . . . 170
11.2.1. El espectro solar: Radiación de onda corta . . . 171
11.2.2. El espectro terrestre: Radiación de onda larga . . . 171
11.2.3. Absorción y emisión atmosférica: El papel de los gases traza . . . 171
11.2.4. Cuadro comparativo de las fuentes radiativas . . . 172
11.2.5. Ensanchamiento de las líneas espectrales . . . 172
11.2.6. Estructura espectral de la atmósfera y el balance radiativo . . . 173
11.2.7. Resumen de la evolución temporal de la comprensión espectral . . . 173
11.3. Procesos de absorción, emisión y reflexión. . . . 174
11.3.1. Absorción: Mecanismos moleculares y selectividad . . . 174
11.3.2. Emisión atmosférica y la Ley de Kirchhoff . . . 174
11.3.3. Reflexión y Albedo: Interacción en interfases . . . 175
11.3.4. Integración de procesos: El papel de las nubes . . . 176
11.3.5. Cuadro Comparativo: Absorción vs. Reflexión en la Atmósfera . . . 176
11.3.6. La Reflexión en la superficie: El papel de las microondas y el infrarrojo . . . 177
11.3.7. Conclusión de la dinámica radiativa . . . 177
11.4. Radiación global, directa y difusa. . . . 177
11.4.1. La radiación directa y la ley de Beer-Lambert-Bouguer . . . 177
11.4.2. Naturaleza y génesis de la radiación difusa . . . 178
11.4.3. Radiación Global: El balance total . . . 178
11.4.4. Cuadro comparativo de componentes radiativas . . . 179
11.4.5. Modelización de la fracción difusa . . . 179
11.4.6. Anisotropía de la radiación difusa y superficies inclinadas . . . 180
11.4.7. Factores de turbiedad y su relación con las componentes . . . 180

12.Tema 12: Transferencia radiativa 181
12.1. Ecuación de transferencia radiativa: fundamentos. . . . 181
12.1.1. El balance radiativo elemental . . . 181
12.1.2. La Función Fuente y el Coeficiente de Extinción . . . 182
12.1.3. Naturaleza de la Función Fuente en la atmósfera . . . 182
12.1.4. Geometría plano-paralela y la ecuación de Schwarzschild . . . 182
12.1.5. Solución formal de la ETR . . . 183
12.1.6. Cuadro comparativo de regímenes de transferencia . . . 183
12.1.7. Importancia del Albedo de Dispersión Simple . . . 184
12.1.8. La aproximación de dos flujos (Two-Stream Approximation) . . . 184
12.2. Aplicación a la atmósfera terrestre. . . . 184
12.2.1. La aproximación de atmósfera plano-paralela . . . 184
12.2.2. Transferencia de radiación de onda larga (Térmica) . . . 185
12.2.3. Transferencia de radiación de onda corta (Solar) . . . 185
12.2.4. Funciones de ponderación y sondeo atmosférico . . . 186
12.2.5. Comparativa de regímenes de transferencia . . . 186
12.2.6. Consideraciones sobre medios no gaseosos: Aerosoles y Nubes . . . 187
12.3. Funciones de transmitancia y ponderación. . . . 187
12.3.1. Funciones de transmitancia y ponderación . . . 187
12.4. Linealización de la ecuación. . . . 191
12.4.1. Linealización de la ecuación de transferencia radiativa . . . 191

13.Tema 13: Microfísica de nubes I – Nubes cálidas 195
13.1. Ecuación de Clausius-Clapeyron en equilibrio vapor-agua líquida. . . . 195
13.1.1. Derivación termodinámica desde el potencial de Gibbs . . . 195
13.1.2. Aproximaciones en el contexto atmosférico . . . 196
13.1.3. Dependencia del calor latente con la temperatura . . . 196
13.1.4. Integración y fórmulas semi-empíricas . . . 196
13.1.5. Sensibilidad y el factor de escala de humedad . . . 197
13.1.6. Resumen de la importancia microfísica . . . 198

13.2. Nucleación homogénea y heterogénea en fase líquida. . . . 198
13.2.1. Nucleación homogénea: La barrera del radio crítico . . . 198
13.2.2. Nucleación heterogénea: El papel de los núcleos de condensación (CCN) . . . 199
13.2.3. Nucleación sobre superficies insolubles: El factor geométrico . . . 200
13.2.4. Comparativa y resumen de procesos . . . 200
13.2.5. Cinética de la población de gotas . . . 200
13.3. Velocidad de caída de gotitas. . . . 201
13.3.1. Dinámica de la partícula: Balance de fuerzas . . . 201
13.3.2. El régimen de Stokes (Gotas muy pequeñas) . . . 201
13.3.3. Regímenes intermedios y efectos de la compresibilidad . . . 202
13.3.4. Deformación de la gota y velocidad límite máxima . . . 202
13.3.5. Variación de la velocidad con la altitud . . . 202
13.3.6. Implicaciones en la microfísica de nubes . . . 203
13.3.7. Resumen de factores que afectan a v_t . . . 204
13.4. Colisión y coalescencia. . . . 204
13.4.1. El mecanismo físico de la colisión . . . 204
13.4.2. Eficiencia de colisión (E) . . . 204
13.4.3. Eficiencia de coalescencia (E') y de captura (E_c) . . . 205
13.4.4. El modelo de crecimiento continuo . . . 205
13.4.5. La Ecuación Estocástica de Colección (SCE) . . . 206
13.4.6. Comparativa de procesos de crecimiento . . . 207
13.4.7. Inhibidores y promotores de la colisión . . . 207
13.5. Crecimiento continuo y discreto por captura. . . . 207
13.5.1. El Modelo de Crecimiento Continuo . . . 207
13.5.2. El Modelo de Crecimiento Discreto y Estocástico . . . 208
13.5.3. Comparativa y Transición entre Modelos . . . 209
13.5.4. Desarrollo de un escenario de crecimiento por captura . . . 209
13.5.5. El papel de la turbulencia en la captura . . . 210
13.5.6. Resumen de procesos temporales . . . 210

14. Tema 14: Microfísica de nubes II – Nubes frías **211**
14.1. Equilibrio vapor-hielo y ecuación de Clausius-Clapeyron. . . . 211
14.2. Fundamentos Termodinámicos del Equilibrio Vapor-Hielo . . . 211
14.3. Derivación de la Ecuación de Clausius-Clapeyron para el Hielo . . . 212
14.4. Diferenciación entre Saturación sobre Agua y sobre Hielo . . . 212
14.5. Formulaciones Integradas y Dependencia Térmica . . . 212
14.6. Importancia de la Sobresaturación respecto al Hielo . . . 213
14.7. Consideraciones sobre el Coeficiente de Acomodación . . . 214
14.8. Resumen de Contrastes: Agua vs. Hielo . . . 214
14.9. Nucleación en fase hielo. . . . 214
14.9.1. Nucleación Homogénea . . . 214
14.9.2. Nucleación Heterogénea y sus Modos . . . 215
14.9.3. Naturaleza de las Partículas Nucleantes de Hielo (INPs) . . . 216
14.9.4. Comparativa de Procesos de Nucleación . . . 216
14.9.5. El Papel de la Sobresaturación sobre el Hielo . . . 217
14.10. Crecimiento por deposición y sublimación. . . . 217
14.10.1. Fundamentos termodinámicos y difusión de masa . . . 217
14.10.2. El concepto de capacitancia (C) . . . 218
14.10.3. Balance térmico y la ecuación de crecimiento combinada . . . 218
14.10.4. Hábito cristalino y dependencia de la temperatura . . . 219
14.10.5. Sublimación y su relevancia meteorológica . . . 219
14.10.6. Efecto de la ventilación y factor de forma . . . 220
14.10.7. Cuadros resumen de procesos . . . 220
14.10.8. Implicaciones en la microfísica de nubes mixtas . . . 220
14.10.9. Resumen de la evolución temporal del hábito . . . 220
14.11. Acreción y agregación de cristales de hielo. . . . 221
14.11.1. Acreción: El proceso de escarchado (Riming) . . . 221
14.11.2. Agregación de cristales de hielo . . . 221

14.11.3.Comparativa de procesos de crecimiento . . . 222
14.11.4.Termodinámica de la acreción y el balance de calor . . . 222
14.11.5.Cinética de la agregación y la Ecuación Estocástica de Colección . . . 223
14.11.6.El papel de la fragmentación . . . 223
14.11.7.Resumen de la evolución del hidrometeoro . . . 224

15.Tema 15: Microfísica de nubes III – Nubes mixtas 225
15.1. Teoría de Bergeron-Findeisen. . . . 225
15.1.1. Fundamentos termodinámicos: El diferencial de presión de vapor . . . 225
15.1.2. Dinámica del proceso WBF: Transferencia de fase . . . 226
15.1.3. Ecuación de crecimiento por difusión de un cristal de hielo . . . 226
15.1.4. Cuadro comparativo: Microfísica de nubes cálidas vs. mixtas . . . 227
15.1.5. Evolución histórica de la teoría . . . 227
15.1.6. Límites y retroalimentaciones en la microfísica de fase mixta . . . 227
15.1.7. Implicaciones meteorológicas y climáticas . . . 228
15.2. Tipos e intensidad de precipitación. . . . 228
15.2.1. Clasificación de los hidrometeoros de precipitación . . . 228
15.2.2. Intensidad de la precipitación: Definición y cuantificación . . . 229
15.2.3. Microfísica de la intensidad: Factores determinantes . . . 230
15.2.4. Velocidad terminal y balance de fuerzas . . . 231
15.2.5. Resumen de transiciones de fase en la precipitación . . . 231
15.3. Modificación artificial del tiempo atmosférico. . . . 232
15.3.1. Fundamentos físicos y termodinámicos . . . 232
15.3.2. Agentes de siembra y mecanismos de nucleación . . . 232
15.3.3. Hipótesis de modificación: Estática vs. Dinámica . . . 233
15.3.4. Aplicaciones específicas y fenomenología . . . 233
15.3.5. Línea del tiempo y hitos en MATA . . . 233
15.3.6. Evaluación estadística y desafíos . . . 234
15.3.7. Consideraciones éticas, legales y ambientales . . . 234
15.3.8. Cuadro comparativo: Agentes de siembra . . . 235
15.3.9. Resumen de la eficiencia de precipitación . . . 235

16.Tema 16: Óptica atmosférica 237
16.1. Teoría de la visibilidad y factores modificadores. . . . 237
16.1.1. Fundamentos físicos: El contraste y la extinción . . . 237
16.1.2. Teoría de Koschmieder y el alcance óptico meteorológico . . . 238
16.1.3. Factores modificadores de la visibilidad . . . 238
16.1.4. Ejemplo práctico: Impacto de la higroscopía en un entorno industrial costero . . . 239
16.1.5. Comparativa de regímenes ópticos según la hidrometeoro-composición . . . 239
16.1.6. Efectos de la difracción y la retrodispersión . . . 239
16.1.7. Visibilidad en condiciones de precipitación sólida . . . 240
16.1.8. Resumen de factores psicofísicos . . . 240
16.2. Reflexión, refracción, difusión y difracción. . . . 240
16.2.1. Reflexión: Interacción en interfaces discontinuas . . . 240
16.2.2. Refracción: Gradientes de densidad y curvatura de rayos . . . 241
16.2.3. Difusión (Scattering): El pilar de la radiancia atmosférica . . . 241
16.2.4. Difracción: Desviación por obstáculos . . . 242
16.2.5. Comparativa de Procesos Ópticos . . . 242
16.2.6. Caso de estudio: Curvatura de rayos en condiciones de inversión térmica . . . 242
16.2.7. Interdependencia en el fenómeno del arcoíris . . . 243
16.3. Principales fenómenos ópticos atmosféricos. . . . 243
16.3.1. Fenómenos producidos por gotas de agua: El Arco Iris . . . 244
16.3.2. Fenómenos producidos por cristales de hielo: Halos y Fenómenos Asociados . . . 244
16.3.3. Fenómenos de Difracción: Coronas y Glorias . . . 245
16.3.4. Espejismos y Refracción Terrestre . . . 245
16.3.5. Cuadro Comparativo de Fenómenos Ópticos . . . 246
16.3.6. Consideraciones sobre la Dispersión de Rayleigh y Mie . . . 246
16.3.7. Línea del tiempo de los avances en Óptica Atmosférica . . . 246

17. Tema 17: Electricidad atmosférica e ionosfera **247**
17.1. Naturaleza eléctrica de la atmósfera. . . . 247
17.1.1. El Circuito Eléctrico Global (CEG) . . . 247
17.1.2. Conductividad Atmosférica e Ionización . . . 247
17.1.3. Campo Eléctrico de Buen Tiempo . . . 248
17.1.4. Cuadro Resumen: Evolución del Pensamiento en Electricidad Atmosférica . . . 248
17.1.5. Resistencia Columnar y Tiempo de Relajación . . . 249
17.1.6. Corrientes de Convección y Capa de Electrodo . . . 250
17.1.7. Variabilidad Espacial y Temporal . . . 250
17.1.8. Cuadro Comparativo: Propiedades Eléctricas según el Entorno . . . 250
17.2. Campo magnético terrestre: origen y variabilidad. . . . 251
17.2.1. El origen del campo: La teoría del geodinamo . . . 251
17.2.2. Estructura espacial y representación matemática . . . 252
17.2.3. Variabilidad del campo magnético . . . 252
17.2.4. Cuadros comparativos y resumen de escalas . . . 253
17.2.5. Ejemplo de aplicación: Cálculo de la conductividad y el número de Reynolds magnético . . . 253
17.2.6. Acoplamiento Magnetosfera-Ionosfera-Atmósfera . . . 253
17.2.7. Cronología de hitos en el estudio del geomagnetismo . . . 254
17.3. Estructura y variabilidad de la ionosfera. . . . 254
17.3.1. Mecanismos de formación: La teoría de Chapman . . . 254
17.3.2. Estructura estratificada de la ionosfera . . . 255
17.3.3. Variabilidad ionosférica . . . 255
17.3.4. La anomalía de ionización ecuatorial (EIA) . . . 256
17.3.5. Parámetros de caracterización y medida . . . 256
17.3.6. Fenomenología de las irregularidades: Centelleo ionosférico . . . 257
17.3.7. Conexión con la atmósfera inferior: Acoplamiento vertical . . . 257
17.4. Campo eléctrico de buen tiempo. . . . 258
17.4.1. Fundamentos de la conductividad atmosférica . . . 258
17.4.2. El Circuito Eléctrico Global (CEG) . . . 258
17.4.3. Variabilidad temporal: La Curva de Carnegie . . . 259
17.4.4. El Efecto Electrodo . . . 259
17.4.5. Perfil Vertical del Potencial y Resistencia de Columna . . . 259
17.4.6. Resumen de parámetros comparativos . . . 260
17.4.7. Factores Moduladores: Aerosoles y Capa Límite . . . 260
17.4.8. Conclusiones sobre la novedad en la investigación . . . 260

18. Tema 18: Electricidad de tormentas **261**
18.1. Formación de la célula tormentosa. . . . 261
18.1.1. Mecanismos de iniciación y forzamiento termodinámico . . . 261
18.1.2. El ciclo de vida de la célula unitaria: Modelo de Byers y Braham . . . 261
18.1.3. Factores determinantes: Cizalladura y Entalpía . . . 262
18.1.4. Cuadros resumen de la evolución celular . . . 263
18.1.5. Interacción con el entorno: El papel del entrainment . . . 263
18.1.6. Estructura eléctrica resultante de la formación . . . 263
18.2. Teorías de separación de cargas. . . . 264
18.2.1. Mecanismo Inductivo (Polarización) . . . 264
18.2.2. Mecanismo No Inductivo (Hielo-Hielo) . . . 265
18.2.3. Teorías Convectivas (Transporte de Iones) . . . 265
18.2.4. Comparativa de Mecanismos de Separación . . . 266
18.2.5. Desarrollo de un escenario de transferencia de carga . . . 266
18.2.6. Influencia de los procesos de riming y la descarga química . . . 267
18.2.7. Evolución Temporal de la Separación de Cargas . . . 267
18.3. Distribución espacial de carga. . . . 267
18.3.1. El modelo tripolar clásico . . . 267
18.3.2. Estructura de capas de apantallamiento (Screening Layers) . . . 268
18.3.3. Distribución en sistemas complejos y supercélulas . . . 268
18.3.4. Dependencia con la microfísica y la temperatura de inversión . . . 269

18.3.5. Cuadro Comparativo de los Centros de Carga . . . 269
18.3.6. Evolución temporal de la distribución . . . 269
18.3.7. Implicaciones en la descarga eléctrica . . . 270
18.4. Descargas nube-nube y nube-tierra. . . . 270
18.4.1. El concepto del líder bidireccional . . . 270
18.4.2. Descargas Nube-Tierra (CG) . . . 270
18.4.3. Descargas Intranube e Internube (IC/CC) . . . 271
18.4.4. Comparativa de parámetros físicos . . . 271
18.4.5. Física de la emisión electromagnética . . . 272
18.4.6. Cronología de un rayo nube-tierra negativo . . . 272
18.4.7. Interacción con la Ionosfera y la Alta Atmósfera . . . 273

19. Tema 19: Satélites meteorológicos **275**
19.1. Principios de funcionamiento y tipos de órbita. . . . 275
19.1.1. Principios físicos de la teledetección satelital . . . 275
19.1.2. Mecánica orbital y leyes fundamentales . . . 275
19.1.3. Tipos de órbitas en meteorología operativa . . . 276
19.1.4. Cuadro comparativo de plataformas . . . 277
19.1.5. Perturbaciones y mantenimiento de órbita . . . 277
19.1.6. Estrategias de escaneado y carga útil . . . 278
19.1.7. Evolución histórica y cronología de los satélites meteorológicos . . . 278
19.2. Interpretación multiespectral: visible, IR y microondas. . . . 278
19.2.1. El espectro visible (VIS) e infrarrojo cercano (NIR) . . . 279
19.2.2. El espectro infrarrojo térmico (IR) . . . 279
19.2.3. La región de las microondas (MW) . . . 279
19.2.4. Técnicas multiespectrales y productos RGB . . . 280
19.2.5. Cuadro comparativo de capacidades espectrales . . . 281
19.2.6. Consideraciones sobre la resolución espectral y temporal . . . 281

20. Tema 20: Radares meteorológicos **283**
20.1. Principios físicos y parámetros del radar. . . . 283
20.1.1. Fundamentos de la propagación y bandas de frecuencia . . . 283
20.1.2. El proceso de retrodispersión y la aproximación de Rayleigh . . . 283
20.1.3. Parámetros temporales y espaciales del pulso . . . 284
20.1.4. Límites operativos: Alcance máximo y ambigüedad . . . 284
20.1.5. Geometría del haz y volumen de resolución . . . 284
20.1.6. Poder de resolución y lóbulos secundarios . . . 285
20.2. Ecuación del radar y reflectividad. . . . 286
20.2.1. Ecuación del radar y reflectividad . . . 286
20.3. Estimación de precipitación. . . . 289
20.3.1. Estimación de precipitación. . . . 289
20.4. Fundamentos del radar Doppler. . . . 292
20.4.1. Fundamentos del radar Doppler. . . . 292

21. Tema 21: Fenómenos de impacto para la aviación I **297**
21.1. Cizalladura y turbulencia: tipos y causas. . . . 297
21.1.1. Cizalladura del viento: Definición y magnitudes vectoriales . . . 297
21.1.2. Turbulencia atmosférica: La ruptura del flujo laminar . . . 298
21.1.3. La relación entre cizalladura y turbulencia: El Número de Richardson . . . 298
21.1.4. Inestabilidad de Kelvin-Helmholtz . . . 299
21.1.5. Cuadro comparativo: Fenomenología de la turbulencia . . . 299
21.1.6. Causas dinámicas adicionales: Frentes de racha y frentes de brisa . . . 299
21.2. Turbulencia en aire claro y onda de montaña. . . . 300
21.2.1. Dinámica de la Turbulencia en Aire Claro (CAT) . . . 300
21.2.2. Ondas de montaña y ondas de gravedad orográficas . . . 301
21.2.3. Comparativa de fenómenos de turbulencia . . . 301
21.2.4. Estrategias de predicción y mitigación . . . 302
21.2.5. Impacto estructural y operacional . . . 303
21.3. Corriente en chorro e impacto en aeronaves. . . . 303

21.3.1. Estructura Morfológica y Clasificación Operativa . . . 303
21.3.2. Impacto en la Performance y Planificación de Vuelo . . . 304
21.3.3. Impacto en la Seguridad: Cizalladura y CAT Asociada . . . 304
21.3.4. Interacción con Fenómenos de Mesoescala . . . 305
21.3.5. Cuadros Comparativos de Identificación de Riesgos . . . 305
21.3.6. Navegación en el Siglo XXI: Sistemas de Gestión de Vuelo (FMS) y Datos en Tiempo Real . . . 305
21.3.7. Resumen de la Dinámica del Impacto . . . 306

22. Tema 22: Fenómenos de impacto para la aviación II **307**
22.1. Formación de hielo en aeronaves. . . . 307
22.1.1. Microfísica del Agua Superenfriada y la Nucleación . . . 307
22.1.2. Tipología y Morfología de la Acreción de Hielo . . . 308
22.1.3. Dinámica del Impacto y Eficiencia de Captación . . . 308
22.1.4. Termodinámica del Proceso de Acreción: El Modelo de Messinger . . . 308
22.1.5. Impacto en el Rendimiento Aerodinámico . . . 309
22.1.6. Cuadro Comparativo: Regímenes de Engelamiento . . . 309
22.1.7. Sistemas de Protección y Estrategias Operativas . . . 309
22.2. Reducción de visibilidad y nieblas. . . . 310
22.2.1. Fundamentos ópticos de la visibilidad: La ley de Koschmieder . . . 310
22.2.2. Mecanismos de formación de las nieblas . . . 311
22.2.3. El Alcance Visual de Pista (RVR) . . . 311
22.2.4. Dinámica de la disipación . . . 312
22.2.5. Microfísica y el papel de los aerosoles . . . 312
22.2.6. Resumen de tipos de niebla y su impacto . . . 313
22.3. Tormentas y riesgos asociados. . . . 313
22.3.1. Dinámica del ciclo de vida y peligrosidad asociada . . . 313
22.3.2. Riesgos Cinemáticos: Turbulencia y Microbursts . . . 314
22.3.3. Riesgos Microfísicos: Granizo y Engelamiento . . . 314
22.3.4. Riesgos Eléctricos y de Instrumentación . . . 314
22.3.5. Cuadro comparativo de organización convectiva y riesgos . . . 315
22.3.6. Indices de Inestabilidad y Predicción de Riesgos . . . 315

23. Tema 23: Dinámica atmosférica – Fuerzas y ecuación del momento **317**
23.1. Fuerzas reales y aparentes en la atmósfera. . . . 317
23.1.1. Fuerzas reales o fundamentales . . . 317
23.1.2. Fuerzas aparentes en un sistema rotatorio . . . 318
23.1.3. Ecuación del momento vectorial . . . 319
23.1.4. Comparativa y resumen de fuerzas . . . 319
23.1.5. Consideraciones sobre la escala del movimiento . . . 320
23.2. Ecuación del momento en coordenadas cartesianas en rotación. . . . 320
23.2.1. Transformación cinemática fundamental . . . 320
23.2.2. La ecuación vectorial del movimiento . . . 321
23.2.3. Proyección en coordenadas cartesianas locales . . . 321
23.2.4. Cuadro resumen de términos y escalas . . . 322
23.2.5. Consideraciones sobre la aproximación del plano tangente . . . 323

24. Tema 24: Dinámica en coordenadas esféricas y naturales **325**
24.1. Ecuaciones del movimiento en coordenadas esféricas. . . . 325
24.1.1. Definición de las variables cinemáticas . . . 325
24.1.2. Derivación de la aceleración en un marco curvilíneo . . . 325
24.1.3. La fuerza de Coriolis en coordenadas esféricas . . . 326
24.1.4. Ecuaciones completas del movimiento . . . 326
24.1.5. La Aproximación Tradicional . . . 327
24.1.6. Cuadro comparativo: Términos en la ecuación del momento . . . 328
24.1.7. Conservación del Momento Angular . . . 328
24.1.8. Implicaciones en la vorticidad y el análisis de escala . . . 328
24.2. Coordenadas naturales y análisis de escala. . . . 328
24.2.1. El sistema de coordenadas naturales . . . 329

24.2.2. Ecuaciones del movimiento horizontal en coordenadas naturales . . . 329
24.2.3. Análisis de escala en la atmósfera . . . 330
24.2.4. Comparativa de escalas y regímenes dinámicos . . . 331
24.2.5. Consideraciones sobre la curvatura de la trayectoria vs. líneas de corriente . . . 331
24.2.6. Síntesis de la aproximación de escalado en coordenadas naturales . . . 331
24.3. Aproximaciones geostrófica e hidrostática. . . . 332
24.3.1. La aproximación hidrostática: Análisis de la estabilidad vertical . . . 332
24.3.2. La aproximación geostrófica: El balance horizontal . . . 332
24.3.3. El número de Rossby y los límites de la aproximación . . . 333
24.3.4. La relación entre ambos equilibrios: El viento térmico . . . 334
24.3.5. Limitaciones y el concepto de viento ageostrófico . . . 334
24.3.6. Resumen de implicaciones cinemáticas . . . 335
24.4. Número de Rossby. . . . 335
24.4.1. Definición y derivación matemática mediante análisis de escala . . . 335
24.4.2. El número de Rossby en el contexto de las coordenadas naturales . . . 336
24.4.3. Clasificación de regímenes dinámicos según el número de Rossby . . . 336
24.4.4. Implicaciones en la teoría cuasigeostrófica y ageostrofismo . . . 337
24.4.5. El Número de Rossby y el Ajuste Geostrófico . . . 337
24.4.6. Rossby y la variación latitudinal: El problema de los trópicos . . . 338
24.4.7. Resumen de la importancia diagnóstica del Número de Rossby . . . 338

25. Tema 25: Continuidad y energía en la atmósfera 341
25.1. Ecuación de continuidad en formulación euleriana y lagrangiana. . . . 341
25.1.1. Perspectiva Euleriana: El enfoque de volumen de control . . . 341
25.1.2. Perspectiva Lagrangiana: Seguimiento de la parcela material . . . 342
25.1.3. Equivalencia matemática y cuadro comparativo . . . 342
25.1.4. Implicaciones en la dinámica de la atmósfera . . . 343
25.1.5. Interpretación de la divergencia en el contexto de la compresibilidad . . . 344
25.1.6. Resumen de términos y procesos . . . 344
25.2. Análisis de escala y aproximación de Boussinesq. . . . 345
25.2.1. Análisis de escala de la ecuación de continuidad . . . 345
25.2.2. La aproximación de Boussinesq: Fundamentos y derivación . . . 346
25.2.3. Comparativa de aproximaciones en la ecuación de continuidad . . . 346
25.2.4. Aplicación práctica: Análisis de una celda convectiva . . . 347
25.2.5. Limitaciones y el papel de la flotabilidad . . . 347
25.3. Continuidad en coordenadas isobáricas. . . . 348
25.3.1. El sistema de coordenadas isobáricas y la aproximación hidrostática . . . 348
25.3.2. Derivación formal de la ecuación de continuidad . . . 348
25.3.3. Interpretación física y el carácter incompresible . . . 349
25.3.4. Comparativa entre sistemas de coordenadas . . . 349
25.3.5. Cálculo de la velocidad vertical: El Método Cinemático . . . 350
25.3.6. Limitaciones y consideraciones en la frontera inferior . . . 351
25.3.7. Relación con el análisis de escala . . . 351
25.3.8. Implicaciones en la conservación de la energía . . . 351
25.4. Conservación de la energía y ecuación termodinámica. . . . 351
25.4.1. Fundamentos termodinámicos en sistemas fluidos . . . 352
25.4.2. La ecuación termodinámica de la energía en forma lagrangiana . . . 352
25.4.3. Transformación a coordenadas isobáricas . . . 352
25.4.4. Interpretación física de los términos . . . 353
25.4.5. Relación con la temperatura potencial . . . 353
25.4.6. Cuadro comparativo: Energía en diferentes sistemas de coordenadas . . . 355
25.4.7. El papel de la estabilidad estática (S_p) . . . 355
25.5. Ecuación termodinámica en coordenadas isobáricas. . . . 355
25.5.1. Derivación desde la Primera Ley de la Termodinámica . . . 356
25.5.2. El parámetro de estabilidad estática . . . 356
25.5.3. Interpretación física de los términos . . . 357
25.5.4. Cuadro comparativo: Sistemas de coordenadas . . . 357
25.5.5. Importancia en el diagnóstico de la velocidad vertical . . . 357

25.5.6. Consideraciones sobre el calentamiento diabático . . . 358
25.5.7. Formulación en términos de Geopotencial . . . 358
25.5.8. Efectos de la curvatura y variabilidad de σ . . . 359

26. Tema 26: Equilibrio vertical y campos geopotenciales 361
26.1. Balance vertical de fuerzas y ecuación hidrostática. . . . 361
26.1.1. Análisis de escala de la componente vertical del movimiento . . . 361
26.1.2. Integración de la ecuación y el concepto de Geopotencial . . . 362
26.1.3. Limitaciones y el régimen no hidrostático . . . 362
26.1.4. La estabilidad de la estratificación y la hidrostática . . . 363
26.1.5. Importancia en la modelización atmosférica . . . 364
26.1.6. Conclusiones sobre la estructura vertical . . . 364
26.2. Geopotencial y espesor atmosférico. . . . 364
26.2.1. El concepto de Geopotencial . . . 364
26.2.2. Altura geopotencial y su justificación dinámica . . . 365
26.2.3. La ecuación hipsométrica: Derivación y significado . . . 365
26.2.4. Análisis del Espesor Atmosférico . . . 366
26.2.5. Comparativa entre altitudes . . . 366
26.2.6. Aplicación Práctica: Ejemplo de Cálculo de Espesor y Temperatura Media . . . 366
26.2.7. Implicaciones en la Estructura de los Sistemas de Presión . . . 367
26.2.8. Cuadro Resumen: Relación entre Variables . . . 367
26.3. Fórmulas barométricas. . . . 367
26.3.1. La ecuación hipsométrica: Derivación fundamental . . . 367
26.3.2. Modelos de atmósfera y perfiles de presión . . . 368
26.3.3. Cómputo de la presión reducida a nivel del mar . . . 369
26.3.4. Análisis comparativo de modelos barométricos . . . 369
26.3.5. Determinación de la altura mediante altimetría de presión . . . 369
26.3.6. El espesor $1000 - 500$ hPa y su relevancia diagnóstica . . . 370
26.3.7. Consideraciones sobre la humedad: La temperatura virtual . . . 370
26.3.8. Integración numérica de la fórmula barométrica . . . 370
26.4. Altura geopotencial, dinámica y geométrica. . . . 371
26.4.1. El Geopotencial como fundamento energético . . . 371
26.4.2. Aceleración de la gravedad y su variabilidad . . . 371
26.4.3. Altura Geopotencial (Z) . . . 372
26.4.4. Altura Dinámica y Metros Dinámicos . . . 372
26.4.5. Comparativa y relaciones matemáticas . . . 372
26.4.6. Aplicación práctica en el análisis de niveles isobáricos . . . 373
26.4.7. Resumen de discrepancias y errores sistemáticos . . . 374

27. Tema 27: Movimiento horizontal y vientos ideales 375
27.1. Ecuación del momento en coordenadas de presión. . . . 375
27.1.1. Fundamentos de la transformación isobárica . . . 375
27.1.2. La derivada material y la velocidad vertical isobárica . . . 376
27.1.3. Expresión vectorial de la ecuación del momento . . . 376
27.1.4. Comparativa de sistemas de coordenadas . . . 377
27.1.5. Análisis de escala y aproximación geostrófica . . . 377
27.1.6. Limitaciones y consideraciones sobre la superficie terrestre . . . 378
27.1.7. Vorticidad y divergencia en coordenadas de presión . . . 378
27.2. Configuraciones básicas de flujo. . . . 378
27.2.1. El flujo geostrófico . . . 379
27.2.2. El flujo del gradiente . . . 379
27.2.3. Flujos inerciales y ciclostróficos . . . 380
27.2.4. Comparativa de balances de fuerzas . . . 381
27.2.5. Trayectorias y líneas de corriente: Consideraciones cinemáticas . . . 381
27.2.6. Límite de validez y aplicaciones . . . 381
27.3. Viento geostrófico y del gradiente. . . . 382
27.3.1. El equilibrio geostrófico . . . 382
27.3.2. El viento del gradiente . . . 382
27.3.3. Comparativa y síntesis de regímenes de flujo . . . 384

27.4. Vientos inercial y ciclostrófico. . . . 384
27.4.1. El flujo inercial: Dinámica en ausencia de gradiente de presión . . . 384
27.4.2. El flujo ciclostrófico: Predominio de la curvatura . . . 385
27.4.3. Comparativa de los regímenes de viento ideal . . . 386
27.4.4. Estabilidad y el criterio inercial . . . 387
27.4.5. Aplicaciones y fenomenología asociada . . . 387
27.4.6. Síntesis Matemática de los Balances Horizontales . . . 387
27.5. Trayectorias y líneas de corriente (fórmula de Blaton). . . . 388
27.5.1. Definiciones fundamentales y marcos de referencia . . . 388
27.5.2. Curvatura en coordenadas naturales . . . 388
27.5.3. Derivación de la fórmula de Blaton . . . 389
27.5.4. Interpretación física y casos sinópticos . . . 389
27.5.5. La fórmula de Blaton en el contexto del viento del gradiente . . . 389
27.5.6. Análisis cinemático de la tendencia de la dirección . . . 390
27.5.7. Implicaciones en la predicción numérica y el transporte . . . 391

28. Tema 28: Variación vertical del viento y baroclinidad 393
28.1. Viento térmico y balance térmico. . . . 393
28.1.1. Fundamentos matemáticos y derivación del viento térmico . . . 393
28.1.2. Interpretación física y propiedades del viento térmico . . . 394
28.1.3. Balance térmico y advección de temperatura . . . 394
28.1.4. Cuadro comparativo: Comportamiento del viento con la altura . . . 395
28.1.5. El balance térmico en la escala sinóptica . . . 395
28.1.6. Desarrollo de un ejemplo práctico: Análisis de una capa atmosférica . . . 395
28.1.7. El papel de la estabilidad estática en el balance . . . 396
28.1.8. Consideraciones sobre la ageostrofía . . . 396
28.1.9. Resumen de relaciones cinemáticas . . . 396
28.2. Barotropía y baroclinidad. . . . 396
28.2.1. El estado barotrópico ideal . . . 397
28.2.2. La atmósfera baroclina y la formación de solenoides . . . 397
28.2.3. Clasificación de la baroclinidad y barotropía equivalente . . . 397
28.2.4. Cuadro comparativo de regímenes dinámicos . . . 398
28.2.5. Implicaciones en la ecuación de la vorticidad . . . 398
28.2.6. La baroclinidad como reservorio de energía . . . 399
28.2.7. Consideraciones finales sobre el análisis isobárico . . . 399
28.3. Viento ageostrófico y sus características. . . . 399
28.3.1. Origen dinámico y formulación matemática . . . 400
28.3.2. Descomposición del viento ageostrófico . . . 400
28.3.3. Características y propiedades dinámicas . . . 401
28.3.4. Cuadro comparativo: Viento Geostrófico vs. Ageostrófico . . . 401
28.3.5. El viento ageostrófico en la capa límite y su impacto en la baroclinidad . . . 402

29. Tema 29: Circulación y vorticidad 403
29.1. Teoremas de circulación de Bjerknes y Kelvin. . . . 403
29.1.1. Definición cinemática de la circulación . . . 403
29.1.2. El Teorema de Circulación de Kelvin . . . 403
29.1.3. El Teorema de Circulación de Bjerknes . . . 404
29.1.4. Circulación relativa y absoluta en un marco en rotación . . . 405
29.1.5. Cuadro comparativo y resumen de efectos . . . 406
29.1.6. Interpretación geométrica de los solenoides . . . 406
29.1.7. Limitaciones y consideraciones en la atmósfera real . . . 406
29.2. Concepto de vorticidad y relación con la circulación. . . . 406
29.2.1. Definición cinemática y naturaleza vectorial . . . 407
29.2.2. El Teorema de Stokes: El puente entre lo local y lo global . . . 407
29.2.3. Descomposición de la vorticidad: Curvatura y Cizalladura . . . 407
29.2.4. Vorticidad Absoluta y Planetaria . . . 408
29.2.5. Interpretación mediante la descomposición de Cauchy-Stokes . . . 408
29.2.6. Cuadro comparativo: Circulación vs. Vorticidad . . . 409
29.2.7. Implicaciones en la dinámica de la atmósfera real . . . 409

29.3. Ecuación de la vorticidad en coordenadas cartesianas e isobáricas. . . . 410
29.3.1. Derivación en coordenadas cartesianas . . . 410
29.3.2. Interpretación física de los términos en coordenadas cartesianas . . . 410
29.3.3. Ecuación de la vorticidad en coordenadas isobáricas . . . 411
29.3.4. Análisis de escala y simplificación para la escala sinóptica . . . 411
29.3.5. Comparación entre sistemas de coordenadas . . . 412
29.3.6. Efecto de la curvatura y el cizallamiento . . . 412
29.3.7. El papel de la fricción . . . 413
29.4. Vorticidad potencial y su conservación. . . . 413
29.4.1. Derivación matemática de la vorticidad potencial de Ertel . . . 413
29.4.2. Interpretación física: El mecanismo de conservación . . . 414
29.4.3. Vorticidad potencial en coordenadas isentrópicas . . . 414
29.4.4. El principio de invertibilidad y el paradigma de PV-Thinking . . . 414
29.4.5. Comparativa de formulaciones de vorticidad potencial . . . 415
29.4.6. Procesos no conservativos: El papel de la fricción y el calor . . . 416
29.4.7. La superficie de 2 PVU: La tropopausa dinámica . . . 416
29.4.8. Resumen de propiedades de la PV . . . 416

30. Tema 30: Aproximación cuasigeostrófica 417
30.1. Sistema de ecuaciones cuasigeostróficas. . . . 417
30.1.1. Análisis de escala y aproximaciones fundamentales . . . 417
30.1.2. La ecuación de la vorticidad cuasigeostrófica . . . 417
30.1.3. La ecuación termodinámica cuasigeostrófica . . . 418
30.1.4. Cierre del sistema y Vorticidad Potencial Cuasigeostrófica . . . 418
30.1.5. Comparación de aproximaciones dinámicas . . . 418
30.1.6. Interpretación física de los forzamientos . . . 419
30.1.7. Limitaciones del sistema cuasigeostrófico . . . 419
30.2. Ecuación de tendencia del geopotencial. . . . 420
30.2.1. Derivación matemática en el marco cuasigeostrófico . . . 420
30.2.2. Interpretación física de los forzamientos . . . 421
30.2.3. El papel de la estabilidad estática . . . 421
30.2.4. Cuadro comparativo: Respuesta de χ ante forzamientos sinópticos . . . 421
30.2.5. Consideraciones sobre las condiciones de contorno . . . 422
30.2.6. El concepto de "Acción a distancia" en la ecuación χ . . . 422
30.2.7. Resumen de la evolución sinóptica . . . 423
30.3. Interpretación física de la predicción cuasigeostrófica. . . . 423
30.3.1. El principio de inversión y el papel del Laplaciano . . . 423
30.3.2. Advección de vorticidad absoluta: El motor del movimiento de los sistemas . . . 423
30.3.3. Advección diferencial de temperatura: Desarrollo e intensificación . . . 424
30.3.4. La respuesta de la circulación secundaria . . . 424
30.3.5. Cuadro comparativo de efectos en la tendencia del geopotencial . . . 424
30.3.6. El concepto de desarrollo baroclino y auto-amplificación . . . 425
30.3.7. Estabilidad estática y escala del sistema . . . 425
30.3.8. Limitaciones de la interpretación física QG . . . 426
30.4. Ecuación de la vorticidad potencial cuasigeostrófica. . . . 426
30.4.1. Derivación matemática y unificación de ecuaciones . . . 426
30.4.2. Interpretación física de los componentes de q . . . 427
30.4.3. El principio de inversión y el papel de las condiciones de contorno . . . 427
30.4.4. Interacción de anomalías y desarrollo baroclino . . . 428
30.4.5. La VPCG como trazador atmosférico . . . 429
30.4.6. Resumen de propiedades matemáticas de la VPCG . . . 429

31. Tema 31: Ecuación omega y dinámica baroclina 431
31.1. Obtención de la ecuación omega. . . . 431
31.1.1. Fundamentos y sistema de ecuaciones de partida . . . 431
31.1.2. Procedimiento de derivación matemática . . . 432
31.1.3. Propiedades matemáticas y elipticidad . . . 432
31.1.4. Interpretación de los términos de forzamiento . . . 433
31.1.5. Limitaciones y la necesidad de formulaciones alternativas . . . 433

31.2. Interpretación física de la ecuación omega cuasigeostrófica. . . . 434
31.2.1. Advección diferencial de vorticidad absoluta . . . 434
31.2.2. Advección térmica y el laplaciano de la temperatura . . . 435
31.2.3. El problema de la cancelación y la necesidad de coherencia . . . 435
31.2.4. Efecto de la estabilidad estática . . . 436
31.2.5. Resumen de la respuesta atmosférica . . . 436
31.3. Aproximación de Trenberth. . . . 437
31.3.1. Fundamentación matemática y el problema de la cancelación . . . 437
31.3.2. Derivación técnica y supuestos de escala . . . 437
31.3.3. Interpretación sinóptica y comparación con Sutcliffe . . . 438
31.3.4. Limitaciones de la Aproximación . . . 438
31.3.5. Cuadro Comparativo: Métodos de Diagnóstico de Omega . . . 439
31.3.6. Evolución hacia el Vector Q . . . 439
31.4. Vector Q de Hoskins. . . . 440
31.4.1. Derivación matemática y definición . . . 440
31.4.2. Interpretación física y relación con la frontogénesis . . . 441
31.4.3. Descomposición del vector Q: Componentes normal y tangencial . . . 441
31.4.4. Comparativa de metodologías de diagnóstico . . . 442
31.4.5. Aplicaciones avanzadas: El vector Q y la Vorticidad Potencial . . . 442
31.5. Modelo idealizado de perturbación baroclina. . . . 442
31.5.1. Configuración geométrica y desfase de fase . . . 443
31.5.2. Distribución del movimiento vertical y la advección de vorticidad . . . 443
31.5.3. El papel de la advección térmica y la estructura del espesor . . . 443
31.5.4. Estructura vertical y transporte de calor . . . 444
31.5.5. Ejemplo detallado: Análisis de una onda de Rossby baroclina . . . 444
31.5.6. Implicaciones en la vorticidad potencial . . . 444
31.5.7. Ciclo de vida de la perturbación . . . 445

32. Tema 32: Ondas atmosféricas **447**
32.1. Ondas acústicas, de gravedad e inercia. . . . 447
32.1.1. Fundamentos de la teoría de perturbaciones lineales . . . 447
32.1.2. Ondas acústicas: El papel de la compresibilidad . . . 447
32.1.3. Ondas de gravedad: Flotabilidad y estratificación . . . 448
32.1.4. Ondas de inercia y el efecto Coriolis . . . 448
32.1.5. Ondas inercio-gravitatorias . . . 449
32.1.6. Cuadro comparativo de ondas atmosféricas fundamentales . . . 449
32.1.7. Desarrollo de un caso de estudio: Ondas de montaña y el nivel crítico . . . 449
32.1.8. Implicaciones en la energética atmosférica . . . 449
32.2. Ondas de Kelvin. . . . 450
32.2.1. Fundamentos teóricos y el equilibrio de Taylor . . . 450
32.2.2. Ondas de Kelvin ecuatoriales . . . 451
32.2.3. Propiedades distintivas y comparativa . . . 452
32.2.4. Ejemplo práctico de propagación y ajuste geostrófico . . . 452
32.2.5. Importancia en la estratosfera y ondas de gravedad-inercia . . . 453
32.2.6. Síntesis de la dinámica de ajuste . . . 453
32.3. Ondas de Rossby en atmósfera barotrópica y baroclina. . . . 453
32.3.1. Dinámica en una atmósfera barotrópica no divergente . . . 454
32.3.2. Transición a la atmósfera baroclina: El modelo cuasigeostrófico . . . 454
32.3.3. Comparación entre regímenes barotrópico y baroclino . . . 455
32.3.4. Velocidad de grupo y dispersión de energía . . . 456
32.3.5. Consideraciones finales sobre la onda larga y corta . . . 456
32.4. Dispersión y velocidad de grupo. . . . 457
32.4.1. El concepto físico de dispersión . . . 457
32.4.2. Velocidad de fase frente a velocidad de grupo . . . 457
32.4.3. Dispersión en ondas de Rossby barotrópicas . . . 457
32.4.4. Comparativa de propiedades de propagación . . . 458
32.4.5. Significado dinámico de la velocidad de grupo . . . 458
32.4.6. Desarrollo práctico de un caso de propagación . . . 459

32.4.7. Ondas estacionarias y el número de onda resonante . . . 459
32.4.8. Resumen de la importancia de la dispersión en el pronóstico . . . 460

33.Tema 33: Inestabilidad hidrodinámica 461
33.1. Inestabilidad barotrópica y balance energético. . . . 461
33.1.1. La ecuación de Rayleigh y el problema de autovalores . . . 461
33.1.2. Criterios de inestabilidad: Rayleigh-Kuo y Fjørtoft . . . 462
33.1.3. Balance energético y transferencia de energía cinética . . . 462
33.1.4. Cuadro comparativo: Inestabilidades barotrópica vs. baroclina . . . 463
33.1.5. Consideraciones sobre la saturación y la cascada de energía . . . 464
33.2. Inestabilidad baroclina y energía asociada. . . . 464
33.2.1. Fundamentos físicos: El mecanismo de la convección inclinada . . . 464
33.2.2. El modelo de Eady: Análisis cuantitativo . . . 465
33.2.3. Transformaciones de energía y el ciclo de Lorenz . . . 466
33.2.4. Comparativa de inestabilidades hidrodinámicas . . . 467
33.2.5. La condición de Charney-Stern y la estructura vertical . . . 467
33.2.6. Consideraciones sobre la humedad y la liberación de calor latente . . . 467
33.3. Ciclo de vida de perturbaciones en latitudes medias. . . . 467
33.3.1. Fase I: Crecimiento inicial y desarrollo baroclino . . . 468
33.3.2. Fase II: Madurez y transición no lineal . . . 468
33.3.3. Fase III: Decaimiento y conversión barotrópica . . . 468
33.3.4. Paradigmas de ciclo de vida: LC1 y LC2 . . . 469
33.3.5. Resumen de la evolución energética . . . 469
33.4. Ciclogénesis e inestabilidad baroclina generalizada. . . . 470
33.4.1. Fundamentos de la inestabilidad baroclina generalizada . . . 470
33.4.2. El mecanismo de interacción mutua . . . 470
33.4.3. Dinámica del crecimiento no modal . . . 471
33.4.4. Cuadros comparativos y síntesis de la inestabilidad . . . 472
33.4.5. Procesos diabáticos y asimetría de la ciclogénesis . . . 472

34.Tema 34: Superficies frontales y frontogénesis 473
34.1. Concepto de superficie frontal y discontinuidades. . . . 473
34.1.1. Naturaleza de las discontinuidades atmosféricas . . . 473
34.1.2. Condiciones de contorno y cinemática en la superficie frontal . . . 473
34.1.3. Estructura interna: De la superficie a la zona frontal . . . 474
34.1.4. Cuadro comparativo de tipos de discontinuidades frontales . . . 475
34.1.5. Implicaciones de la discontinuidad en la estabilidad y el tiempo asociado . . . 475
34.2. Condiciones de contorno y fórmula de Margules. . . . 475
34.2.1. Condiciones de contorno en la interfase frontal . . . 476
34.2.2. Derivación de la fórmula de Margules . . . 476
34.2.3. Análisis físico y estabilidad de la pendiente . . . 477
34.2.4. Limitaciones del modelo de Margules . . . 478
34.2.5. Relación con el viento térmico . . . 478
34.3. Función frontogenética. . . . 478
34.3.1. Descomposición cinemática de la función frontogenética . . . 479
34.3.2. Análisis de los mecanismos de deformación . . . 479
34.3.3. El papel de la circulación transversal y el ajuste cuasigeostrófico . . . 480
34.3.4. Cuadro comparativo: Factores contribuyentes a la frontogénesis . . . 480
34.3.5. Ejemplo práctico: Frontogénesis en un punto de silla sobre el Atlántico Norte . . . 480
34.3.6. Frontogénesis y Vorticidad Potencial . . . 481
34.3.7. Efectos diabáticos en la frontogénesis de superficie . . . 481
34.4. Cinemática y termodinámica de la frontogénesis. . . . 482
34.4.1. Componentes cinemáticas: Deformación y divergencia . . . 482
34.4.2. El término de basculamiento (Tilting) y la estructura vertical . . . 482
34.4.3. Termodinámica y procesos adiabáticos/diabáticos . . . 482
34.4.4. Respuesta dinámica: La circulación de Sawyer-Eliassen . . . 483
34.4.5. Cuadros comparativos y síntesis . . . 484

35.Tema 35: Análisis sinóptico de frentes 485

35.1. Tipos de frentes en superficie y sus características. . . . 485
35.1.1. El Frente Frío: Dinámica de la masa de aire polar advectada . . . 485
35.1.2. El Frente Cálido: Deslizamiento ascendente y saturación progresiva . . . 486
35.1.3. Frentes Estacionarios y Frontólisis . . . 486
35.1.4. Sistemas Ocluidos: La complejidad tridimensional . . . 486
35.1.5. Líneas de seco (Drylines) y Frentes Secundarios . . . 487
35.1.6. Análisis de la tendencia barométrica y el viento térmico . . . 487
35.1.7. Consideraciones sobre la estabilidad estática . . . 488
35.2. Anafrentes y catafrentes. . . . 488
35.2.1. Dinámica y estructura de los anafrentes . . . 488
35.2.2. Dinámica y estructura de los catafrentes . . . 488
35.2.3. Comparativa y diagnóstico sinóptico . . . 489
35.2.4. Ejemplo de transición estructural en un sistema frontal . . . 489
35.2.5. Frentes cálidos: Anafrentes y catafrentes cálidos . . . 490
35.2.6. Consideraciones sobre la nubosidad y la física de nubes . . . 490
35.2.7. Resumen de la evolución sinóptica . . . 491
35.3. Frentes en la media y alta troposfera. . . . 491
35.3.1. Dinámica de la frontogénesis en niveles altos . . . 491
35.3.2. El pliegue de la tropopausa y la Vorticidad Potencial . . . 492
35.3.3. Circulaciones ageostróficas y la ecuación de Sawyer-Eliassen . . . 492
35.3.4. Identificación en el análisis operativo . . . 493
35.3.5. Importancia de los frentes de niveles medios en la predicción del tiempo significativo 493

36. Tema 36: Corrientes en chorro **495**
36.1. Aspectos observacionales de las corrientes en chorro. . . . 495
36.1.1. Morfología y dimensiones a escala sinóptica . . . 495
36.1.2. Tipología y distribución global . . . 495
36.1.3. El concepto de Jet Streak o Máximo de Chorro . . . 496
36.1.4. Estructura térmica y la discontinuidad de la tropopausa . . . 496
36.1.5. Manifestaciones nubosas y sensores remotos . . . 497
36.1.6. Variabilidad estacional y climática . . . 497
36.1.7. Sistemas de observación modernos y el futuro . . . 498
36.2. Cinemática y dinámica del chorro. . . . 498
36.2.1. Fundamentos cinemáticos: Cizalladura y vorticidad . . . 498
36.2.2. Dinámica del chorro: El balance del viento térmico . . . 498
36.2.3. Cinemática de los núcleos de velocidad (*Jet Streaks*) . . . 499
36.2.4. Perspectiva de la Vorticidad Potencial (PV) y la Tropopausa . . . 500
36.2.5. Cuadro comparativo de las regiones del *Jet Streak* . . . 500
36.2.6. Interacción con Ondas de Rossby . . . 500
36.3. Análisis cuasigeostrófico aplicado. . . . 501
36.3.1. El marco diagnóstico: Desequilibrio y respuesta ageostrófica . . . 501
36.3.2. Dinámica del Jet Streak: El modelo de los cuatro cuadrantes . . . 501
36.3.3. Advección de vorticidad y su relación con el chorro . . . 502
36.3.4. Cuadro comparativo: Circulaciones en el Jet Streak . . . 502
36.3.5. Uso del Vector Q en la vecindad del chorro . . . 502
36.3.6. Efectos de la curvatura en el análisis QG . . . 503
36.3.7. Consideraciones sobre la estabilidad estática . . . 503

37. Tema 37: Meteorología mesoescalar **505**
37.1. Escalas espaciales y temporales de la mesoescala. . . . 505
37.1.1. Definición y límites del espectro mesoescalar . . . 505
37.1.2. Consideraciones dinámicas y el Número de Rossby . . . 505
37.1.3. Escalas temporales y persistencia . . . 506
37.1.4. Cuadro resumen de las escalas atmosféricas . . . 506
37.1.5. El problema del “hueco” en el espectro de energía . . . 507
37.1.6. Implicaciones en la predictibilidad . . . 507
37.1.7. Interacción con la topografía: Modulación de escalas . . . 507
37.2. Diferencias dinámicas entre escala sinóptica y mesoescala. . . . 507
37.2.1. El Número de Rossby como criterio de demarcación dinámica . . . 508

37.2.2. Ruptura del balance hidrostático y movimientos verticales . . . 508
37.2.3. Vorticidad y Divergencia: el cambio de paradigma . . . 508
37.2.4. El proceso de ajuste geostrófico y el radio de deformación de Rossby . . . 509
37.2.5. Cuadro comparativo de propiedades dinámicas . . . 509
37.2.6. El papel de la advección y el término isalobárico . . . 509
37.2.7. Implicaciones para la modelización numérica . . . 510
37.3. Fenómenos orográficos: forzamiento térmico, ondas de montaña y bloqueos. . . . 510
37.3.1. Forzamiento térmico: Circulaciones de ladera y de valle . . . 510
37.3.2. Ondas de montaña: Dinámica y propagación . . . 511
37.3.3. Bloqueo del flujo y números adimensionales críticos . . . 511
37.3.4. Efectos de la humedad y la rotación . . . 512
37.3.5. El fenómeno de los rotores y la turbulencia asociada . . . 512
37.3.6. Ajuste geostrófico y ondas de inercia-gravedad . . . 513
37.3.7. Resumen de regímenes de flujo según la estabilidad . . . 513

38.Tema 38: Convección profunda 515
38.1. Iniciación y organización de la convección. . . . 515
38.1.1. El proceso de iniciación: Superación de la inhibición . . . 515
38.1.2. Organización de la convección y el papel de la cizalladura . . . 516
38.1.3. Clasificación de los modos convectivos . . . 516
38.1.4. Cuadros comparativos de los regímenes convectivos . . . 517
38.1.5. Interacción con la escala sinóptica . . . 517
38.1.6. Resumen de la evolución temporal de un sistema organizado . . . 517
38.2. Convección multicelular y supercelular. . . . 518
38.2.1. Convección multicelular: El ciclo de regeneración discreta . . . 518
38.2.2. Convección supercelular: Dinámica de rotación y persistencia . . . 518
38.2.3. Comparativa de parámetros ambientales . . . 519
38.2.4. Subtipos de supercélulas . . . 520
38.2.5. El papel de la helicidad relativa a la tormenta ($SREH$) . . . 520
38.3. Sistemas convectivos de mesoescala. . . . 521
38.3.1. Estructura cinemática y dinámica de los SCM lineales . . . 521
38.3.2. Complejos Convectivos de Mesoescala (CCM) y SCM circulares . . . 521
38.3.3. Ecos en arco (*Bow Echoes*) y vientos destructivos . . . 522
38.3.4. Efectos de los SCM en el balance energético global . . . 522
38.3.5. Cuadro comparativo de modos de organización de SCM . . . 523
38.4. Impactos asociados a la convección profunda. . . . 523
38.4.1. Dinámica de las corrientes descendentes y reventones (*downbursts*) . . . 523
38.4.2. Precipitación extrema y avenidas repentinas . . . 524
38.4.3. Granizo y microfísica extrema . . . 524
38.4.4. Tornadogénesis y vorticidad . . . 524
38.4.5. Transporte vertical y efectos a escala global . . . 525
38.4.6. Cuadro resumen de impactos y escalas . . . 525
38.4.7. El papel de la actividad eléctrica . . . 526

39.Tema 39: Capa límite planetaria 527
39.1. Fricción molecular y turbulenta. . . . 527
39.1.1. Fricción molecular: La viscosidad cinemática . . . 527
39.1.2. El régimen turbulento y el Número de Reynolds . . . 528
39.1.3. Descomposición de Reynolds y el Tensor de Esfuerzos de Reynolds . . . 528
39.1.4. Comparativa de mecanismos de fricción . . . 528
39.1.5. La Hipótesis de Boussinesq y la Viscosidad de Remolino . . . 529
39.1.6. Estructura vertical y el papel de la fricción en la dinámica . . . 530
39.2. Ecuaciones del movimiento en la capa límite. . . . 530
39.2.1. Descomposición de Reynolds y promediado . . . 530
39.2.2. Derivación de las ecuaciones del movimiento promediadas (RANS) . . . 530
39.2.3. Aproximaciones de la capa límite . . . 531
39.2.4. El problema del cierre turbulento . . . 531
39.2.5. Cuadro comparativo: Atmósfera libre vs. Capa Límite . . . 532
39.2.6. Balance de energía cinética turbulenta (ECT) . . . 532

39.2.7. Estructura vertical de la tensión de cizalladura . . . 533
39.2.8. Consideraciones finales sobre la advección turbulenta . . . 533
39.3. Tensor de Reynolds y número de Richardson. . . . 533
39.3.1. Definición y Estructura del Tensor de Reynolds . . . 533
39.3.2. El Problema del Cierre y la Parametrización . . . 534
39.3.3. El Número de Richardson: Fundamentos Físicos . . . 534
39.3.4. Valores Críticos y Transición de Flujo . . . 535
39.3.5. Cuadro Comparativo: Regímenes de la CLP según Ri . . . 535
39.3.6. El Número de Richardson Global (Bulk Richardson Number) . . . 536
39.3.7. Implicaciones en la Estructura de la CLP . . . 536
39.4. Teoría de la longitud de mezcla. . . . 537
39.4.1. Fundamentos Físicos y Analogía Cinética . . . 537
39.4.2. Derivación Matemática del Modelo de Prandtl . . . 537
39.4.3. La Longitud de Mezcla en la Capa de Superficie . . . 538
39.4.4. Extensiones de la Teoría: Estabilidad y Capa Límite Profunda . . . 539
39.4.5. Comparativa entre Difusión Molecular y Turbulenta . . . 539
39.4.6. Limitaciones Críticas y el Paradigma No Local . . . 540
39.4.7. Resumen de Aplicabilidad . . . 540
39.5. Estructura del viento y espiral de Ekman. . . . 540
39.5.1. El Balance de Fuerzas en la Capa de Ekman . . . 541
39.5.2. Derivación Matemática de la Espiral . . . 541
39.5.3. Características Físicas de la Capa de Ekman . . . 542
39.5.4. Limitaciones del Modelo Clásico . . . 542
39.5.5. Influencia de la Baroclinidad en la Estructura del Viento . . . 543
39.5.6. Estructura del Viento en la Capa Límite Estable y el Chorro de Bajos Niveles . . . 543
39.5.7. Resumen de la Estructura Vertical . . . 544

40. Tema 40: Meteorología tropical **545**
40.1. Movimientos a gran escala en la zona ecuatorial. . . . 545
40.1.1. El Plano β Ecuatorial y el Análisis de Escala . . . 545
40.1.2. Ondas Ecuatoriales Atrapadas . . . 545
40.1.3. Circulaciones Zonales y Meridionales: Hadley y Walker . . . 546
40.1.4. La Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) . . . 546
40.1.5. El Modelo de Matsuno-Gill . . . 546
40.1.6. Cuadro Comparativo de las Ondas Ecuatoriales . . . 547
40.1.7. La Oscilación de Madden-Julian (MJO) . . . 547
40.1.8. Acoplamiento Dinámico-Convectivo . . . 547
40.1.9. Consideraciones Finales sobre la Estabilidad en el Ecuador . . . 548
40.2. Análisis de escala en regiones tropicales. . . . 548
40.2.1. Escalas de Movimiento y el Colapso del Equilibrio Geostrófico . . . 548
40.2.2. Escalamiento de las Ecuaciones de Momento Horizontal . . . 549
40.2.3. La Aproximación de Gradiente de Temperatura Débil (WTG) . . . 549
40.2.4. Escalamiento de la Continuidad y la Velocidad Vertical . . . 549
40.2.5. Cuadro Comparativo de Órdenes de Magnitud . . . 550
40.2.6. Ejemplo Práctico: Análisis de Escala de una Onda del Este en el Atlántico . . . 550
40.2.7. Consideraciones sobre la Estabilidad Estática y la Humedad . . . 551
40.2.8. Implicaciones para el Pronóstico Numérico . . . 551
40.3. Perturbaciones ecuatoriales. . . . 551
40.3.1. El modelo de Matsuno y la Guía de Ondas Ecuatorial . . . 551
40.3.2. Tipología de Ondas Ecuatoriales . . . 552
40.3.3. Acoplamiento Convectivo: Las CCEW . . . 552
40.3.4. La Oscilación de Madden-Julian (MJO) . . . 553
40.3.5. Interacción entre Escalas y Ciclogénesis Tropical . . . 553
40.3.6. Perturbaciones de Escala Menor y Ondas de Este . . . 553
40.3.7. Estructura Vertical y Modos Verticales . . . 554
40.4. Ciclones tropicales: estructura y dinámica. . . . 554
40.4.1. Estructura morfológica y campos de viento . . . 554
40.4.2. Dinámica del equilibrio y conservación del momento angular . . . 555

40.4.3. Estructura térmica: El núcleo cálido . . . 555
40.4.4. Teorías de intensificación: CISK vs. WISHE . . . 555
40.4.5. El ciclo de Carnot y la Intensidad Potencial Máxima (MPI) . . . 555
40.4.6. Resumen comparativo: Ciclones Tropicales vs. Extratropicales . . . 556
40.4.7. Análisis de la estabilidad inercial . . . 556
40.4.8. Interacción con la capa límite oceánica . . . 557
40.4.9. Evolución y Transición Extratropical (ET) . . . 557

41. Tema 41: Dinámica de la estratosfera **559**
41.1. Estructura térmica y circulación zonal y meridional. . . . 559
41.1.1. Estructura térmica: El balance entre el ozono y el dióxido de carbono . . . 559
41.1.2. Circulación Zonal: El Viento Térmico y la Reversión Estacional . . . 560
41.1.3. Circulación Meridional: La Célula de Brewer-Dobson . . . 560
41.1.4. Comparativa Estacional de la Dinámica Estratosférica . . . 561
41.1.5. La Importancia del Flujo de Eliassen-Palm . . . 561
41.2. Célula de Brewer-Dobson. . . . 562
41.2.1. Origen histórico y paradojas observacionales . . . 562
41.2.2. Mecanismo dinámico: El bombeo extratropical . . . 562
41.2.3. Formalismo de la Circulación Residual (TEM) . . . 563
41.2.4. Estructura de la célula: Ramas somera y profunda . . . 563
41.2.5. La Edad Media del Aire (Age of Air) . . . 564
41.2.6. Cuadro Resumen: Comparativa de Ramas de la BDC . . . 564
41.2.7. Impacto del Cambio Climático en la BDC . . . 564
41.2.8. Conexión con la variabilidad interanual . . . 565
41.3. Ondas planetarias y calentamientos súbitos estratosféricos. . . . 565
41.3.1. Propagación vertical de ondas de Rossby . . . 565
41.3.2. Interacción onda-flujo medio: El vector de Eliassen-Palm . . . 565
41.3.3. Calentamientos Súbitos Estratosféricos (SSW) . . . 566
41.3.4. Morfología de los SSW: Desplazamiento vs. División . . . 567
41.3.5. Acoplamiento estratosfera-troposfera . . . 567
41.3.6. Resumen de la evolución temporal de un SSW . . . 568
41.4. Oscilación cuasibienal. . . . 568
41.4.1. Fenomenología y características observacionales . . . 568
41.4.2. Mecanismo dinámico: La interacción onda-flujo medio . . . 568
41.4.3. Efectos secundarios y teleconexiones . . . 570
41.4.4. Cuadro Comparativo: Fases de la QBO . . . 570
41.4.5. Disrupciones recientes y cambio climático . . . 570
41.4.6. Influencia en la troposfera tropical . . . 571

42. Tema 42: Modelización numérica atmosférica **573**
42.1. Método de diferencias finitas. . . . 573
42.1.1. Fundamentos matemáticos: Expansión en series de Taylor . . . 573
42.1.2. Estructura de la malla y discretización temporal . . . 574
42.1.3. Análisis de error y consistencia . . . 574
42.1.4. Cuadro comparativo de esquemas de diferenciación . . . 575
42.1.5. Desafíos avanzados: Dispersión y disipación . . . 575
42.1.6. El problema de los contornos y mallas no uniformes . . . 576
42.1.7. Resumen de la evolución histórica del MDF en meteorología . . . 576
42.2. Esquemas explícitos e implícitos. . . . 576
42.2.1. Definición y formulación matemática . . . 576
42.2.2. Análisis comparativo y estabilidad . . . 577
42.2.3. Esquemas semi-implícitos: El estándar en la predicción numérica . . . 578
42.2.4. Consideraciones sobre el anclaje de fase y errores de dispersión . . . 579
42.2.5. Resumen de la evolución histórica y tendencias actuales . . . 579
42.3. Consistencia, estabilidad y condición CFL. . . . 579
42.3.1. Consistencia y error de truncamiento . . . 580
42.3.2. Estabilidad numérica y análisis de Von Neumann . . . 580
42.3.3. La condición de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) . . . 581
42.3.4. Teorema de Equivalencia de Lax . . . 581

42.3.5. Cuadros comparativos de estabilidad y consistencia . . . 582
42.3.6. Estabilidad no lineal y efectos de la resolución . . . 582
42.4. Método espectral y modelos de ecuaciones primitivas. . . . 583
42.4.1. Fundamentos del método espectral en la esfera . . . 583
42.4.2. Tipos de truncamiento y resolución . . . 583
42.4.3. El método de transformación de Orszag-Eliasen . . . 584
42.4.4. Modelos de ecuaciones primitivas . . . 584
42.4.5. Comparativa de métodos numéricos . . . 585
42.4.6. Cronología del desarrollo de modelos espectrales . . . 585
42.4.7. Consideraciones sobre la difusión numérica y la resolución efectiva . . . 585
42.4.8. Formulación vertical y coordenadas híbridas . . . 586

43.Tema 43: Asimilación de datos y predicción **587**
43.1. Ciclo de asimilación de datos. . . . 587
43.1.1. Componentes fundamentales del sistema de asimilación . . . 587
43.1.2. La formulación variacional y la función de coste . . . 587
43.1.3. Estructura temporal del ciclo de asimilación . . . 588
43.1.4. Comparativa de metodologías en el ciclo . . . 588
43.1.5. El papel de la matriz de covarianza de errores del background (B) . . . 588
43.1.6. Desafíos técnicos: No linealidad y No gaussianidad . . . 589
43.1.7. El concepto de ventana de asimilación . . . 590
43.1.8. Importancia de la estabilidad del ciclo . . . 590
43.2. Predicción determinista y probabilista. . . . 590
43.2.1. El paradigma determinista: Integración de la trayectoria única . . . 590
43.2.2. El paradigma probabilista: Evolución de la densidad de probabilidad . . . 591
43.2.3. Estrategias para la generación de perturbaciones . . . 591
43.2.4. Cuadro comparativo: Determinismo vs. Probabilismo . . . 592
43.2.5. Interpretación de productos probabilistas . . . 592
43.2.6. Verificación de la predicción probabilista . . . 593
43.2.7. El límite de la predecibilidad y el caos . . . 593
43.3. Predecibilidad y limitaciones. . . . 593
43.3.1. Fundamentos teóricos: El legado de Lorenz . . . 594
43.3.2. Crecimiento del error y exponentes de Lyapunov . . . 594
43.3.3. Dependencia de la escala y espectro de potencia . . . 594
43.3.4. Limitaciones prácticas y errores del sistema . . . 595
43.3.5. Cuantificación de la incertidumbre: El papel de la entropía . . . 595
43.3.6. Cuadro resumen de factores de limitación . . . 596
43.3.7. El horizonte de predictibilidad práctica frente al teórico . . . 596
43.4. Sistemas de predicción por conjuntos. . . . 596
43.4.1. Fundamentación teórica: La ecuación de Liouville . . . 596
43.4.2. Generación de perturbaciones en las condiciones iniciales . . . 597
43.4.3. Representación de la incertidumbre del modelo . . . 597
43.4.4. Estadística y verificación de conjuntos . . . 597
43.4.5. Cuadros comparativos y síntesis . . . 598
43.4.6. Métricas de verificación probabilística . . . 598
43.4.7. Evolución temporal de la predicción por conjuntos . . . 598

44.Tema 44: Concepto de clima **601**
44.1. Evolución histórica del concepto de clima. . . . 601
44.1.1. Las raíces etimológicas y la visión astronómica de la Antigüedad . . . 601
44.1.2. La revolución instrumental y el paradigma estadístico-descriptivo . . . 601
44.1.3. La institucionalización del periodo de 30 años y la Climatología Clásica . . . 602
44.1.4. La Revolución de la Dinámica y la Teoría de Sistemas . . . 602
44.1.5. El concepto contemporáneo: El Sistema Tierra . . . 602
44.1.6. Clima frente a Tiempo: La perspectiva de las condiciones de contorno . . . 603
44.1.7. Cuadro comparativo: Estacionariedad vs. No-Estacionariedad . . . 603
44.2. Componentes del sistema climático. . . . 604
44.2.1. La Atmósfera: El motor termodinámico y componente de respuesta rápida . . . 604
44.2.2. La Hidrosfera: El volante de inercia térmico . . . 604

44.2.3. La Criosfera: El modulador del albedo y el almacenamiento de agua dulce 605
44.2.4. La Biosfera: El regulador biogeoquímico 605
44.2.5. La Litosfera: La frontera inferior y el forzamiento geológico 605
44.2.6. Interacciones y Escalas de Tiempo 605
44.2.7. Ejemplo de interacción sistémica: El evento de Heinrich 605
44.2.8. Acoplamientos y Retroalimentaciones 606
44.3. Variabilidad natural y estados de equilibrio. 607
44.3.1. Naturaleza de la variabilidad climática 607
44.3.2. Estados de equilibrio y la teoría de sistemas dinámicos 607
44.3.3. El modelo estocástico de Hasselmann 607
44.3.4. Estabilidad y retroalimentaciones: El papel del equilibrio energético 608
44.3.5. Escalas temporales de variabilidad y respuesta 609
44.3.6. Puntos de inflexión (Tipping Points) y bifurcaciones 609
44.3.7. Resumen de conceptos clave 609
44.4. Cambio climático y variabilidad climática. 610
44.4.1. El concepto de señal y ruido en la detección climática 610
44.4.2. Forzamiento radiativo y sensibilidad climática 610
44.4.3. Escalas temporales de variabilidad y cambio 610
44.4.4. No linealidad y puntos de inflexión (Tipping Points) 611
44.4.5. Mecanismos de retroalimentación y transiliencia 612
44.4.6. Resumen de forzamientos climáticos 612

45.Tema 45: Paleoclimatología 613
45.1. Fuentes de datos paleoclimáticos. 613
45.1.1. Registros históricos y documentales 613
45.1.2. Archivos biogénicos: Dendrocronología y Corales 613
45.1.3. Archivos criosféricos: Testigos de hielo 614
45.1.4. Registros geológicos: Sedimentos y Espeleotemas 614
45.1.5. Fundamentos físico-químicos: El fraccionamiento isotópico 615
45.1.6. Comparativa de las principales fuentes de datos 615
45.1.7. El papel de los biomarcadores moleculares 616
45.1.8. Integración y síntesis de datos 616
45.2. Registros históricos y proxies climáticos. 616
45.2.1. Naturaleza y metodología de los registros históricos 616
45.2.2. Fundamentos de los indicadores indirectos o proxies climáticos 617
45.2.3. Cuadro comparativo de los principales proxies climáticos 618
45.2.4. Fraccionamiento isotópico y el modelo de destilación de Rayleigh 618
45.2.5. Proxies biológicos marinos y geoquímica de carbonatos 619
45.2.6. Integración de datos y el problema de la no-estacionariedad 619
45.3. Evolución del clima terrestre. 619
45.3.1. El clima del Precámbrico: Paradojas y glaciaciones globales 619
45.3.2. El Fanerozoico: Ciclos de Greenhouse e Icehouse 620
45.3.3. Forzamientos y retroalimentaciones: El termostato de silicato 620
45.3.4. El Cuaternario: Ciclicidad orbital y variabilidad milenaria 620
45.3.5. Cuadro resumen de la evolución climática 621
45.3.6. Dinámica de las transiciones: Puntos de inflexión y umbrales 622

46.Tema 46: Distribución global atmosférica 623
46.1. Distribución media de presión y geopotencial. 623
46.1.1. Fundamentos físico-matemáticos: Del campo de presión al geopotencial 623
46.1.2. Distribución media de la presión al nivel del mar (MSLP) 624
46.1.3. Variabilidad estacional y centros de acción 624
46.1.4. Estructura del geopotencial en la troposfera media y alta 624
46.1.5. Análisis dinámico de la distribución vertical 625
46.1.6. El transporte meridional de momento y su relación con el geopotencial 625
46.1.7. Conclusiones sobre la climatología del campo de masas 626
46.2. Variabilidad espacial y temporal de temperatura y precipitación. 626
46.2.1. Determinantes de la variabilidad espacial de la temperatura 626
46.2.2. Dinámica de la variabilidad temporal de la temperatura 627

46.2.3. Distribución y variabilidad de la precipitación global . . . 627
46.2.4. Variabilidad temporal de la precipitación: Del Monzón a la escala sinóptica . . . 628
46.2.5. Cuadros comparativos de regímenes globales . . . 628
46.2.6. La relación Clausius-Clapeyron y el cambio climático . . . 628
46.3. Evaporación y balance atmosférico global. . . . 629
46.3.1. Fundamentos termodinámicos y físicos de la evaporación . . . 629
46.3.2. Distribución global de la evaporación . . . 629
46.3.3. El balance atmosférico de humedad . . . 630
46.3.4. Flujo de calor latente y balance energético global . . . 630
46.3.5. Análisis comparativo por zonas climáticas . . . 631
46.3.6. Implicaciones del cambio global en la evaporación . . . 631

47. Tema 47: Distribución global oceánica **633**
47.1. Temperatura, salinidad y densidad oceánicas. . . . 633
47.1.1. Estructura térmica y balance radiativo . . . 633
47.1.2. Salinidad: Definición y distribución global . . . 633
47.1.3. La densidad y la ecuación de estado (TEOS-10) . . . 634
47.1.4. Interacción T-S y formación de masas de agua . . . 634
47.1.5. Variabilidad espacial y temporal . . . 635
47.1.6. Importancia de la compresibilidad y la temperatura potencial . . . 635
47.2. Variabilidad espacial y temporal. . . . 635
47.2.1. Variabilidad espacial de gran escala: Asimetrías zonales y meridionales . . . 636
47.2.2. Variabilidad temporal: Del ciclo diurno a la variabilidad secular . . . 636
47.2.3. La dinámica de la Capa de Mezcla: Un análisis cuantitativo . . . 636
47.2.4. Variabilidad de Mesoescala: El "tiempo meteorológico" del océano . . . 637
47.2.5. Cuadros comparativos y resumen de escalas . . . 637
47.2.6. Variabilidad en la salinidad: El balance $E - P$ y el transporte de agua dulce . . . 637
47.2.7. Impacto de la variabilidad en la estructura de densidad . . . 638

48. Tema 48: Clasificación climática **639**
48.1. Clasificación de Köppen. . . . 639
48.1.1. Fundamentos y arquitectura del sistema . . . 639
48.1.2. El Grupo B: El balance entre precipitación y evapotranspiración . . . 639
48.1.3. Subdivisiones de los climas A, C y D . . . 640
48.1.4. Climas de hielo y alta montaña (Grupo E y H) . . . 640
48.1.5. Análisis Crítico y Cuadro Comparativo . . . 641
48.1.6. Significancia climática de las fronteras de Köppen . . . 641
48.2. Clasificación de Thornthwaite. . . . 641
48.2.1. El concepto de Evapotranspiración Potencial (ETP) . . . 642
48.2.2. Los cuatro índices fundamentales . . . 642
48.2.3. El Balance Hídrico como metodología operativa . . . 643
48.2.4. Cuadro comparativo de tipos climáticos hídricos . . . 644
48.2.5. Crítica y aplicaciones contemporáneas . . . 644
48.3. Aplicación a la península ibérica y Canarias. . . . 644
48.3.1. Distribución según la clasificación de Köppen-Geiger . . . 644
48.3.2. Análisis bajo la metodología de Thornthwaite . . . 645
48.3.3. Cuadros comparativos y síntesis regional . . . 646
48.3.4. Particularidades de la aplicación en Canarias: El factor de la condensación oculta 646
48.3.5. Evolución temporal y cambio climático en la clasificación . . . 646

49. Tema 49: La Tierra y su geografía física **649**
49.1. Movimientos de la Tierra. . . . 649
49.1.1. Rotación Terrestre: El Día Sidéreo y la Dinámica de Coriolis . . . 649
49.1.2. Traslación y Geometría Orbital: Las Leyes de Kepler en el Sistema Climático . . . 649
49.1.3. Movimientos de Precesión y Nutación . . . 650
49.1.4. Ciclos de Milankovitch y Variabilidad Paleoclimática . . . 650
49.1.5. Cuadro Resumen de los Movimientos Terrestres . . . 651
49.1.6. La Ecuación del Tiempo y la Meridiana . . . 651
49.1.7. Consideraciones sobre la Estabilidad del Eje . . . 651

49.2. Proyecciones cartográficas en meteorología. . . . 651
49.2.1. Propiedades fundamentales y requisitos meteorológicos . . . 652
49.2.2. Tipología de proyecciones en el análisis atmosférico . . . 652
49.2.3. Impacto de la proyección en las ecuaciones del movimiento . . . 653
49.2.4. Comparativa de proyecciones meteorológicas . . . 653
49.2.5. Ejemplo detallado: Aplicación del factor de escala en una malla de predicción numérica . . . 653
49.2.6. Consideraciones sobre la convergencia de meridianos . . . 654
49.2.7. Proyecciones no conformes: El caso de la proyección Gnomónica . . . 654
49.2.8. Resumen de la métrica en el plano del mapa . . . 655
49.3. Relieve y cuencas hidrográficas de España. . . . 655
49.3.1. Unidades estructurales y morfológicas del relieve español . . . 655
49.3.2. Análisis dinámico de las vertientes y cuencas hidrográficas . . . 655
49.3.3. Parámetros morfométricos y regímenes fluviales . . . 656
49.3.4. Resumen de características por demarcación hidrográfica . . . 657
49.3.5. El papel de los sistemas béticos y el efecto pantalla . . . 657

50. Tema 50: Balance energético global **659**
50.1. Balance energético en la cima de la atmósfera. . . . 659
50.1.1. La Irradiancia Solar Incidente (S) . . . 659
50.1.2. Albedo Planetario y Reflexión de Onda Corta . . . 660
50.1.3. Radiación de Onda Larga Saliente (OLR) . . . 660
50.1.4. Distribución Latitudinal del Balance Neto . . . 660
50.1.5. Papel de la Nubosidad: Efecto Radiativo de las Nubes (CRE) . . . 661
50.1.6. Medición y Monitorización Satelital . . . 661
50.1.7. Desequilibrio Energético de la Tierra (EEI) y Cambio Climático . . . 662
50.1.8. Influencia de la Composición Atmosférica en el Perfil de Emisión . . . 662
50.2. Balance energético en superficie. . . . 662
50.2.1. Componentes de la Radiación Neta (R_n) . . . 663
50.2.2. Flujos de Calor Turbulento: H y LE . . . 663
50.2.3. Flujo de Calor en el Suelo (G) . . . 663
50.2.4. Ejemplo Práctico: Balance Energético en un Oasis vs. Desierto Circundante . . . 664
50.2.5. Cuadros Comparativos de Superficies Típicas . . . 664
50.2.6. Variabilidad Espacial y Temporal . . . 664
50.2.7. Implicaciones en el Cambio Climático . . . 664
50.3. Variaciones diurnas y estacionales. . . . 665
50.3.1. El ciclo diurno: Respuesta transitoria y forzamiento radiativo . . . 665
50.3.2. El ciclo estacional: Oblicuidad y almacenamiento a gran escala . . . 666
50.3.3. Modelización de la partición de flujos: El papel del índice de Bowen . . . 666
50.3.4. Modulación por factores geofísicos y meteorológicos . . . 667
50.3.5. Consideraciones sobre el almacenamiento térmico estacional . . . 667
50.4. Transporte meridional de energía. . . . 667
50.4.1. Fundamentos del balance latitudinal y la necesidad de transporte . . . 668
50.4.2. Componentes y partición del transporte de energía . . . 668
50.4.3. Mecanismos atmosféricos de transporte . . . 668
50.4.4. Interacción Océano-Atmósfera y la Compensación de Bjerknes . . . 669
50.4.5. El papel del calor latente y su distribución latitudinal . . . 670
50.4.6. Variabilidad y cambio climático . . . 670

51. Tema 51: Circulación general atmosférica **671**
51.1. Modelo tricelular. . . . 671
51.1.1. La célula de Hadley: Motores térmicos y transporte de momento . . . 671
51.1.2. La célula de Ferrel: Una circulación térmicamente indirecta . . . 672
51.1.3. La célula Polar y el Frente Polar . . . 672
51.1.4. Análisis comparativo de las células de circulación . . . 672
51.1.5. Restricciones dinámicas y el límite de la célula de Hadley . . . 672
51.1.6. Estructura vertical y tropopausa . . . 673
51.1.7. Consideraciones finales sobre el balance de momento angular . . . 673
51.2. Variaciones estacionales y asimetrías zonales. . . . 674

51.2.1. Dinámica de la migración estacional . . . 674
51.2.2. Asimetrías zonales: El papel de los continentes y la orografía . . . 674
51.2.3. El sistema monzónico como síntesis de asimetrías . . . 675
51.2.4. Cuadros comparativos y resumen de estructuras . . . 675
51.2.5. Transporte de calor y ondas de Rossby estacionarias . . . 675
51.2.6. Balance de momento angular en presencia de asimetrías . . . 676
51.2.7. Conclusión de la sección . . . 676
51.3. Balance de momento angular. . . . 676
51.3.1. Definición del momento angular absoluto . . . 676
51.3.2. Conservación y fuentes de torque . . . 677
51.3.3. Mecanismos de transferencia: El papel de los Alisios y los vientos del Oeste . . . 677
51.3.4. Transporte meridional de momento angular . . . 677
51.3.5. Cuadro comparativo de torques superficiales . . . 679
51.3.6. Balance en la atmósfera libre: Convergencia y el Chorro . . . 679

52. Tema 52: Circulación oceánica general **681**
52.1. Corrientes oceánicas. . . . 681
52.1.1. Forzamiento por tensión del viento y transporte de Ekman . . . 681
52.1.2. Equilibrio de Sverdrup y la circulación interior . . . 682
52.1.3. Teoría de la intensificación hacia el oeste . . . 682
52.1.4. Estructura comparativa de las corrientes de contorno . . . 683
52.1.5. Dinámica de mesoescala: Meandros y Anillos . . . 683
52.1.6. Línea del tiempo de los hitos en la teoría de corrientes oceánicas . . . 684
52.1.7. Interacción con la topografía y el flujo geostrófico . . . 684
52.2. Transporte de Ekman. . . . 684
52.2.1. Transporte de Ekman y la Dinámica de la Capa de Mezcla . . . 684
52.3. Circulación termohalina. . . . 687
52.3.1. Fundamentos Dinámicos: La Ecuación de Estado y la Flotabilidad . . . 687
52.3.2. Centros de Formación de Aguas Profundas . . . 688
52.3.3. El Modelo de Stommel-Arons y la Dinámica de la Circulación Profunda . . . 688
52.3.4. La “Cinta Transportadora” Global (Great Ocean Conveyor) . . . 689
52.3.5. Cuadros Comparativos y Resumen de Masas de Agua . . . 689
52.3.6. Importancia Climática y Estabilidad . . . 690
52.3.7. Resumen de Procesos en la Circulación General Oceánica . . . 690
52.4. Papel del hielo marino. . . . 690
52.4.1. Modulación del flujo de flotabilidad: Rechazo de salmuera y formación de aguas profundas . . . 690
52.4.2. El hielo marino como aislante térmico y su impacto en el flujo de calor sensible . . . 691
52.4.3. El albedo y la retroalimentación hielo-albedo . . . 691
52.4.4. Transporte de agua dulce y forzamiento mecánico . . . 692
52.4.5. Comparativa estructural y funcional entre hemisferios . . . 692
52.4.6. Interacción con el oleaje y la transferencia de momento . . . 693
52.4.7. Estabilidad de la AMOC y flujos de agua dulce inducidos por el deshielo . . . 693
52.4.8. El ciclo estacional del hielo y el almacenamiento de energía . . . 693

53. Tema 53: Ciclo hidrológico **695**
53.1. Balance hídrico global. . . . 695
53.1.1. Ecuación fundamental de continuidad y balance de masa . . . 695
53.1.2. Reservorios y tiempos de residencia . . . 696
53.1.3. Distribución latitudinal y flujos meridionales . . . 696
53.1.4. Cierre del balance y el papel de la escorrentía . . . 697
53.1.5. El balance hídrico bajo el cambio climático: Intensificación del ciclo . . . 697
53.1.6. Firma isotópica en el balance hídrico . . . 698
53.1.7. Resumen de los flujos globales estimados . . . 698
53.2. Evaporación y transpiración. . . . 698
53.2.1. Fundamentos físicos de la evaporación . . . 698
53.2.2. La transpiración y el continuo suelo-planta-atmósfera (SPAC) . . . 699
53.2.3. Modelización de la Evapotranspiración: La ecuación de Penman-Monteith . . . 699
53.2.4. Variaciones latitudinales y factores geográficos . . . 700

53.2.5. Técnicas de medición y estimación avanzada . . . 701
53.2.6. El papel de la ET en el cambio climático . . . 701
53.3. Variaciones latitudinales. . . . 701
53.3.1. Distribución meridional de la precipitación (P) . . . 702
53.3.2. Distribución meridional de la evaporación (E) . . . 702
53.3.3. El balance hídrico neto ($P - E$) . . . 703
53.3.4. Transporte meridional de humedad y su importancia climática . . . 703
53.3.5. Resumen de características por bandas latitudinales . . . 703
53.3.6. Implicaciones del cambio climático en las variaciones latitudinales . . . 703

54. Tema 54: Ciclo del carbono **705**
54.1. Ciclos geológico y biológico. . . . 705
54.1.1. El ciclo biológico: Transferencia rápida y flujos metabólicos . . . 705
54.1.2. El ciclo geológico: El termostato de la Tierra . . . 705
54.1.3. Integración y retroalimentaciones: El ejemplo del acoplamiento quimiostático . . . 706
54.1.4. Cuadro comparativo de reservorios y escalas de tiempo . . . 706
54.1.5. Intersección: El Enterramiento de Carbono Orgánico . . . 707
54.1.6. El ciclo del carbono en el Antropoceno: Alteración de flujos . . . 707
54.2. Balance atmosférico de CO2. . . . 707
54.2.1. El reservorio atmosférico: Cuantificación y unidades . . . 708
54.2.2. La ecuación de continuidad del carbono atmosférico . . . 708
54.2.3. La Fracción Aerotransportada (Airborne Fraction, AF) . . . 708
54.2.4. Intercambio Océano-Atmósfera: Control termodinámico y químico . . . 708
54.2.5. El sumidero terrestre y la fertilización por CO2 . . . 709
54.2.6. Variabilidad estacional y gradientes hemisféricos . . . 709
54.2.7. Cuadros comparativos y escalas de tiempo . . . 710
54.2.8. Firmas isotópicas en el balance de CO2 . . . 710
54.2.9. Resumen de flujos actuales (Promedio 2012-2021) . . . 710
54.3. Fuentes y sumideros principales. . . . 711
54.3.1. Fuentes antropogénicas: La perturbación del sistema . . . 711
54.3.2. Fuentes naturales: El metabolismo del planeta . . . 711
54.3.3. Sumideros terrestres: El papel de la biosfera . . . 711
54.3.4. Sumideros oceánicos: La bomba físico-química . . . 712
54.3.5. Sumideros geológicos: El ciclo del silicato-carbonato . . . 712
54.3.6. Cuadros comparativos y resumen de flujos . . . 713
54.3.7. Consideraciones sobre el tiempo de residencia y ajuste . . . 713
54.3.8. Resumen de la jerarquía de sumideros por escala temporal . . . 713

55. Tema 55: Modelos climáticos **715**
55.1. Jerarquía de modelos climáticos. . . . 715
55.1.1. Modelos de Balance de Energía (EBM) . . . 715
55.1.2. Modelos Radiativo-Convectivos (RCM) . . . 716
55.1.3. Modelos de Complejidad Intermedia (EMICs) . . . 716
55.1.4. Modelos de Circulación General (GCM) y Modelos del Sistema Tierra (ESM) . . . 716
55.1.5. Cuadro comparativo de la jerarquía de modelos . . . 717
55.1.6. Desafíos en la modelización: El problema de la parametrización . . . 717
55.1.7. Línea de evolución temporal de los modelos climáticos . . . 717
55.2. Modelos acoplados y del sistema Tierra. . . . 718
55.2.1. La evolución hacia el acoplamiento: AOGCM . . . 718
55.2.2. Del AOGCM al ESM: La inclusión de la Biogeoquímica . . . 718
55.2.3. Arquitectura Numérica y Desafíos de Sincronización . . . 719
55.2.4. Cronología de la Modelización Climática . . . 719
55.2.5. Formalismo Matemático en el Acoplamiento . . . 720
55.2.6. Incertidumbres y Parametrizaciones en ESM . . . 720
55.2.7. El papel de los modelos acoplados en la atribución del cambio climático . . . 721
55.2.8. Resumen de la Estructura de un ESM Moderno . . . 721
55.3. Ecuaciones fundamentales y parametrizaciones. . . . 721
55.3.1. El núcleo dinámico: Las ecuaciones primitivas . . . 721
55.3.2. La necesidad de las parametrizaciones . . . 722

55.3.3. El problema del ajuste y la incertidumbre . . . 723
55.3.4. Comparación entre componentes del modelo . . . 723
55.3.5. Tendencias actuales: Parametrizaciones estocásticas y Super-parametrización . . . 724
55.3.6. Parametrización de la transferencia de momento por ondas de gravedad . . . 724

56. Tema 56: Forzamiento radiativo **725**
56.1. Temperatura efectiva y efecto invernadero. . . . 725
56.1.1. El concepto de Temperatura Efectiva (T_e) . . . 725
56.1.2. Fundamentos físicos del efecto invernadero . . . 726
56.1.3. Comparativa interplanetaria y sensibilidad . . . 726
56.1.4. Dinámica del ajuste radiativo-convectivo . . . 727
56.1.5. Línea del tiempo de la comprensión del Efecto Invernadero . . . 728
56.1.6. Profundidad óptica y forzamiento instantáneo . . . 728
56.2. Sensibilidad climática. . . . 728
56.2.1. Definiciones y marcos temporales . . . 729
56.2.2. Formulación matemática de la respuesta radiativa . . . 729
56.2.3. Análisis de los mecanismos de retroalimentación . . . 729
56.2.4. Estimación de la ECS: De Charney a CMIP6 . . . 730
56.2.5. Restricciones observacionales y evidencia paleoclimática . . . 731
56.2.6. Implicaciones termodinámicas de una alta sensibilidad . . . 731
56.3. Procesos de retroalimentación. . . . 731
56.3.1. La retroalimentación fundamental de Planck . . . 732
56.3.2. Retroalimentación del vapor de agua y del gradiente térmico . . . 732
56.3.3. Retroalimentación del albedo superficial . . . 732
56.3.4. Retroalimentación de las nubes: la mayor incertidumbre . . . 733
56.3.5. Cuadro comparativo de parámetros de retroalimentación . . . 733
56.3.6. Interacciones no lineales y retroalimentaciones biogeoquímicas . . . 734
56.3.7. Consideraciones termodinámicas sobre la estabilidad . . . 734

57. Tema 57: Variabilidad interanual **735**
57.1. ENSO y retroalimentación de Bjerknes. . . . 735
57.1.1. El paradigma de Bjerknes: El lazo de retroalimentación positiva . . . 735
57.1.2. Análisis formal de los componentes de la retroalimentación . . . 735
57.1.3. El papel de las ondas ecuatoriales y la transición de fase . . . 736
57.1.4. Cuadro comparativo: Estados del sistema ENSO . . . 736
57.1.5. Interacción con el ciclo estacional y el “Spring Predictability Barrier” . . . 737
57.1.6. Consideraciones sobre la diversidad del ENSO . . . 737
57.1.7. Impacto en la variabilidad global . . . 738
57.2. NAO y PDO. . . . 738
57.2.1. La Oscilación del Atlántico Norte (NAO): Dinámica y Teleconexiones . . . 738
57.2.2. La Oscilación Decadal del Pacífico (PDO): El latido del Pacífico Norte . . . 739
57.2.3. Comparación y Sinergias entre NAO y PDO . . . 740
57.2.4. Interacción con la Variabilidad Global . . . 740
57.2.5. Consideraciones sobre la Predictibilidad . . . 740

58. Tema 58: Forzamientos naturales **743**
58.1. Ciclos de Milankovich. . . . 743
58.1.1. Fundamentos de la Mecánica Celeste y Perturbaciones Gravitatorias . . . 743
58.1.2. La Hipótesis de Milankovich: El Criterio del Verano en Latitudes Altas . . . 744
58.1.3. Cuadro Comparativo de los Ciclos Orbitales . . . 745
58.1.4. No-linealidades, Retroalimentaciones y el Problema de los 100,000 Años . . . 745
58.1.5. Impacto en los Sistemas Monzónicos . . . 746
58.2. Variabilidad solar. . . . 746
58.2.1. La Naturaleza de la Emisión Solar: TSI y SSI . . . 746
58.2.2. Ciclos de Actividad Magnética . . . 746
58.2.3. Mecanismos de Forzamiento Climático . . . 746
58.2.4. Evidencia Paleoclimática: Grandes Mínimos y Máximos . . . 747
58.2.5. Ejemplo Práctico: Estimación del Impacto Térmico por Variabilidad de TSI . . . 748
58.2.6. Integración de la Variabilidad Solar en Modelos Climáticos (CMIP6) . . . 748

58.3. Impacto volcánico en el clima. . . . 749
58.3.1. Mecanismos de Inyección y Transformación Química . . . 749
58.3.2. Forzamiento Radiativo: El Balance entre Onda Corta y Onda Larga . . . 749
58.3.3. Perturbaciones Dinámicas y el Fenómeno de "Winter Warming" . . . 749
58.3.4. Impacto en la Química del Ozono . . . 750
58.3.5. Cronología de Impactos Históricos Significativos . . . 750
58.3.6. Efectos en el Ciclo Hidrológico y la Circulación Monzónica . . . 750
58.3.7. Limitaciones y el Efecto de Auto-limitación (Self-limiting) . . . 751
58.3.8. Resumen de la Cascada de Efectos . . . 751

59. Tema 59: Forzamientos antropogénicos 753
59.1. Gases de efecto invernadero. . . . 753
59.1.1. Fundamentos Espectroscópicos y Mecanismos de Forzamiento . . . 753
59.1.2. Dióxido de Carbono (CO_2): El Forzador Dominante . . . 753
59.1.3. Metano (CH_4) y Óxido Nitroso (N_2O) . . . 754
59.1.4. Gases Halogenados y Especies Sintéticas . . . 754
59.1.5. Dinámica de la Ventana Atmosférica y Solapamiento de Bandas . . . 754
59.1.6. Evolución Temporal y Forzamiento Radiativo Total . . . 755
59.1.7. La Diferencia entre GWP y GTP . . . 755
59.1.8. Distribución Vertical del Calentamiento . . . 756
59.1.9. Efecto de la Saturación Espectral y el Desplazamiento de la Altura de Emisión . . . 756
59.2. Aerosoles antropogénicos. . . . 756
59.2.1. El Efecto Directo: Propiedades Ópticas y Forzamiento Radiativo . . . 756
59.2.2. Taxonomía de los Aerosoles Antropogénicos . . . 757
59.2.3. Interacciones Aerosol-Nube (Efectos Indirectos) . . . 757
59.2.4. Ejemplo Práctico: Impacto de la Normativa IMO 2020 en el Forzamiento Regional 757
59.2.5. Cuadro Comparativo: Propiedades de los Aerosoles Antropogénicos . . . 758
59.2.6. Incertidumbres y Desafíos en la Modelización . . . 758
59.3. Cambios de uso del suelo. . . . 758
59.3.1. Mecanismos Biogeofísicos: Albedo, Rugosidad y Flujos Térmicos . . . 759
59.3.2. Mecanismos Biogeoquímicos: Ciclo del Carbono y Precursores . . . 759
59.3.3. Cuadro Comparativo de Impactos según el Tipo de Cambio de Uso . . . 759
59.3.4. Ejemplo Práctico: Modelización de la Conversión de Estepa a Regadío . . . 760
59.3.5. Línea del Tiempo de la Influencia Antropogénica en el Suelo . . . 760
59.3.6. Forzamiento Radiativo Global de los LULCC . . . 761
59.3.7. Incertidumbres y Desafíos en la Modelización . . . 761
59.4. Comparación entre forzamientos naturales y antropogénicos. . . . 761
59.4.1. Magnitud y Escalas Temporales: El Contraste Decadal . . . 761
59.4.2. Eficacia del Forzamiento y Firmas Verticales . . . 762
59.4.3. Cuadro Comparativo de Características Técnicas . . . 763
59.4.4. Variabilidad Interna vs. Forzamiento Externo . . . 763
59.4.5. Mecanismos de Retroalimentación y Sinergias . . . 763

Chapter 1

Tema 1: Estructura física de la atmósfera

1.1. Distribución vertical de variables físicas fundamentales: Densidad, presión y temperatura.

La atmósfera terrestre se comporta como un fluido compresible sujeto a la fuerza de la gravedad, lo que determina una estructura vertical caracterizada por variaciones extremas en sus propiedades termodinámicas. Para el profesional de la meteorología y la física atmosférica, el estudio de la distribución vertical de la presión, la densidad y la temperatura no es solo una cuestión de descripción estática, sino la base fundamental para comprender la estabilidad, la dinámica de fluidos a gran escala y la transferencia radiativa. Esta sección analiza las leyes físicas que gobiernan estas distribuciones y las interdependencias que emergen al considerar el equilibrio hidrostático y la ecuación de estado de los gases ideales.

En una aproximación de primer orden, la atmósfera se encuentra en un estado de cuasi-equilibrio hidrostático. Este balance se establece entre la fuerza del gradiente vertical de presión, que actúa hacia arriba (desde las altas presiones en superficie hacia el vacío del espacio), y la fuerza de la gravedad, que actúa hacia el centro de la Tierra. Matemáticamente, para un elemento de fluido de espesor dz y área de sección transversal A, el balance de fuerzas se expresa mediante la ecuación fundamental de la hidrostática:

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

Donde P representa la presión, ρ la densidad del aire y g la aceleración de la gravedad. El signo negativo es consustancial a la naturaleza del sistema: la presión disminuye monótonamente con la altitud. Es imperatriz notar que, aunque g varía ligeramente con la latitud y la altitud, en estudios de la baja y media atmósfera suele tratarse como una constante efectiva ($g_0 \approx 9.81$ m s^{-2}), o bien se introduce el concepto de altura geopotencial para simplificar los cálculos energéticos.

La presión en cualquier nivel z puede interpretarse físicamente como el peso por unidad de superficie de la columna de aire que se extiende desde ese nivel hasta el límite exterior de la atmósfera ($z \to \infty$):

$$P(z) = \int_z^\infty \rho(z')g dz'$$

Esta relación subraya que la presión es una variable integral de la distribución de masa por encima del observador. En contraste, la densidad y la temperatura son variables puntuales que reflejan el estado termodinámico local del fluido. Para cerrar el sistema de ecuaciones, empleamos la ecuación de estado para el aire seco, asumiendo un comportamiento de gas ideal:

$$P = \rho R_d T$$

Donde R_d es la constante específica para el aire seco (287.05 J kg^{-1} K^{-1}) y T es la temperatura absoluta en Kelvin. La interdependencia entre estas variables es tal que cualquier variación en el perfil térmico altera inmediatamente la distribución vertical de densidad y, por ende, la tasa de decaimiento de la presión con la altura.

Si consideramos el caso simplificado de una atmósfera isoterma (donde $T = T_0$ constante), la sustitución de la densidad en la ecuación hidrostática nos conduce a una ecuación diferencial lineal de primer orden:

$$\frac{dP}{dz} = -\frac{Pg}{R_d T_0}$$

Cuya solución es el perfil exponencial de presión:

$$P(z) = P_0 \exp\left(-\frac{z}{H}\right)$$

Aquí, $H = \frac{R_d T_0}{g}$ se define como la "altura de escala" (scale height). Físicamente, H representa la distancia vertical sobre la cual la presión disminuye en un factor de $1/e$ (aproximadamente un 37 % de su valor original). Para una temperatura media de 273 K, H tiene un valor cercano a los 8 km. Este concepto es vital en la navegación aérea y el diseño de sensores remotos, ya que proporciona una medida de la compresibilidad y la extensión vertical de la masa atmosférica.

Sin embargo, la atmósfera real no es isoterma. El perfil vertical de temperatura está dominado por procesos de absorción de radiación y transporte convectivo. En la troposfera, la temperatura disminuye de manera general con la altitud. Definimos el gradiente térmico vertical (lapse rate) como $\Gamma = -dT/dz$. Si asumimos un gradiente constante (atmósfera politrópica), la temperatura se expresa como $T(z) = T_0 - \Gamma z$. Al integrar la ecuación hidrostática bajo esta premisa, obtenemos:

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

Esta expresión demuestra que el decaimiento de la presión es más pronunciado en una atmósfera fría que en una cálida. Este fenómeno tiene implicaciones profundas en la meteorología sinóptica: las superficies de presión constante (isobaras) se hunden en regiones de aire frío y se elevan en regiones de aire cálido, generando los gradientes de presión horizontales que impulsan la circulación general de la atmósfera.

La densidad (ρ), por su parte, sigue un comportamiento similar al de la presión pero con matices críticos. A partir de la ecuación de estado, $\rho = P/(R_d T)$. En una atmósfera isoterma, la densidad decae exactamente al mismo ritmo exponencial que la presión. No obstante, en la troposfera estándar, donde la temperatura disminuye con la altura, la densidad decae más lentamente de lo que lo haría si la temperatura fuera constante, debido a que el enfriamiento tiende a aumentar la densidad, compensando parcialmente la caída debida a la reducción de presión. Aun así, la reducción de presión es el factor dominante, y la densidad disminuye drásticamente; a unos 18 km de altitud (estratosfera baja), la densidad es aproximadamente un 10 % de su valor al nivel del mar.

Ejemplo 1.1. Consideremos un escenario de análisis para una operación de transporte en la alta montaña. Un meteorólogo necesita estimar la densidad del aire en la cima del Aconcagua (aprox. 7000 m sobre el nivel del mar) para calcular la sustentación de un helicóptero de rescate. Datos iniciales en superficie ($z = 0$): $P_0 = 1013.25$ hPa, $T_0 = 288.15$ K. Se asume un gradiente térmico estándar de $\Gamma = 0.0065$ K/m y una constante $R_d = 287$ J/(kg K).

Primero, calculamos la temperatura en la cima:

$$T(7000) = 288.15 - (0.0065 \cdot 7000) = 242.65 \text{ K} \quad (\approx -30.5^\circ\text{C})$$

A continuación, determinamos la presión en la cima utilizando la fórmula barométrica para gradiente constante:

$$P(7000) = 1013.25 \left(\frac{242.65}{288.15}\right)^{\frac{9.81}{287 \cdot 0.0065}}$$

El exponente es $\frac{9.81}{1.8655} \approx 5.258$.

$$P(7000) = 1013.25 \cdot (0.8421)^{5.258} \approx 1013.25 \cdot 0.407 \approx 412.39 \text{ hPa}$$

Finalmente, calculamos la densidad local en la cima mediante la ecuación de estado:

$$\rho = \frac{P}{R_d T} = \frac{41239 \text{ Pa}}{287 \text{ J/kgK} \cdot 242.65 \text{ K}} \approx 0.592 \text{ kg/m}^3$$

Comparado con la densidad en superficie ($\rho_0 \approx 1.225$ kg/m^3), el valor en la cima es inferior a la mitad. Esto ilustra el impacto crítico de la altitud en la física del vuelo y la oxigenación, ya que la masa de aire por unidad de volumen se ha reducido un 51.7 %.

Es fundamental resumir las diferencias en el comportamiento de estas variables según el modelo atmosférico adoptado. La siguiente tabla comparativa presenta el comportamiento del gradiente vertical para diferentes perfiles térmicos:

- **Atmósfera Isoterma ($dT/dz = 0$):** La presión y la densidad decaen exponencialmente con la misma altura de escala H. Es un modelo útil para la estratosfera baja.
- **Atmósfera con Gradiente Constante ($dT/dz = -\Gamma$):** La presión sigue una ley de potencia respecto a la temperatura. La densidad decae más lentamente que en el caso isotermo si $\Gamma > 0$.
- **Atmósfera Homogénea ($\rho =$ constante):** Un modelo teórico donde la presión disminuye linealmente con la altura. En este caso, la atmósfera tendría un tope definido a una altura $H = P_0/(\rho_0 g)$, aproximadamente 8 km. Aunque irreal, sirve para definir la altura de una atmósfera equivalente de igual presión en superficie.

Desde una perspectiva de postgrado, debemos mencionar la influencia de la composición. La presencia de vapor de agua reduce la densidad del aire (el peso molecular del H_2O es 18 g/mol, frente a los ≈ 29 g/mol del aire seco). Para mantener la validez de la ecuación de estado del aire seco, los meteorólogos utilizan la temperatura virtual (T_v), definida como la temperatura que tendría el aire seco para tener la misma densidad que el aire húmedo a la misma presión.

$$T_v \approx T(1 + 0.61q)$$

Donde q es la humedad específica. Al sustituir T por T_v en la ecuación hidrostática y la ecuación de estado, obtenemos la fórmula hiptométrica, que relaciona el espesor geopotencial (ΔZ) entre dos niveles de presión (P_1, P_2) con la temperatura virtual media ($\bar{T}_v$) de la capa:

$$\Delta Z = Z_2 - Z_1 = \frac{R_d \bar{T}_v}{g_0} \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$$

Esta relación es la piedra angular del análisis de mapas de altura (como los de 500 hPa o 300 hPa). El espesor de una capa es directamente proporcional a su temperatura media. Por tanto, la distribución vertical de las variables físicas no es solo un perfil estático, sino un indicador dinámico del contenido energético de la atmósfera.

En resumen, la estructura vertical de la atmósfera está regida por una lucha constante entre la agitación térmica y la gravedad. Mientras que la temperatura presenta una estructura compleja en capas (que se tratará en la siguiente sección), la presión y la densidad muestran un decaimiento cuasi-exponencial ininterrumpido. La comprensión precisa de estos perfiles es esencial para corregir lecturas barométricas, modelar la dispersión de contaminantes y entender los procesos termodinámicos que dan lugar a los fenómenos meteorológicos.

- El **equilibrio hidrostático** es la aproximación dominante para la escala sinóptica, fallando únicamente en casos de convección profunda o turbulencia severa.
- La **presión** es una función del peso total de la columna superior, mientras que la **densidad** depende de la presión y la temperatura locales.
- La **altura de escala** proporciona una medida natural del espesor de la atmósfera y varía proporcionalmente con la temperatura absoluta.

- El **gradiente térmico vertical** real de la atmósfera se aleja del teórico debido a forzamientos radiativos y cambios de fase del agua.

1.2. Características principales de las capas de la atmósfera.

Una vez establecida la base hidrostática y la distribución de las variables de estado, es imperativo abordar la compartimentación de la atmósfera no como una mera división geométrica, sino como una estratificación física y química resultante del balance energético radiativo y los procesos de transporte. La clasificación más extendida y funcional para la física atmosférica se fundamenta en el perfil térmico vertical, caracterizado por el gradiente térmico vertical o "lapse rate" ($\Gamma = -dT/dz$). A continuación, se analizan con rigor las distintas regiones que componen la envoltura gaseosa terrestre.

1.2.1. La Troposfera: El dominio de la convección y la hidrometeorología

La troposfera es la capa inferior de la atmósfera, extendiéndose desde la superficie hasta una altitud variable que oscila entre los 8 km en las regiones polares y los 17-18 km en el cinturón ecuatorial. Su característica definitoria es la disminución sistemática de la temperatura con la altura, con un gradiente medio en la atmósfera libre de aproximadamente 6.5 K/km, aunque este valor está sujeto a fuertes variaciones espaciotemporales.

Físicamente, la troposfera se mantiene en un estado de equilibrio radiativo-convectivo. La superficie terrestre, al absorber la radiación solar de onda corta, se convierte en la principal fuente de calor para la base de la atmósfera a través de procesos de conducción, calor sensible y, fundamentalmente, liberación de calor latente mediante la evaporación. Esta transferencia de energía genera una inestabilidad térmica que fomenta el transporte vertical de masa. En esta capa se concentra aproximadamente el 80 % de la masa atmosférica total y la práctica totalidad del vapor de agua, lo que la convierte en el escenario exclusivo de los fenómenos meteorológicos significativos.

Dentro de la troposfera, es crucial distinguir dos subregiones:

- **Capa Límite Planetaria (CLP):** Es la zona en contacto directo con la superficie (primeros 500 m a 3 km), donde la fricción mecánica y el forzamiento térmico generan una turbulencia intensa que domina el transporte de momento, calor y humedad.
- **Troposfera Libre:** Situada por encima de la CLP, donde los efectos de la fricción superficial son despreciables y el movimiento del aire se aproxima al equilibrio geostrófico.

El límite superior, la **tropopausa**, no es una superficie rígida, sino una zona de transición o discontinuidad donde el gradiente térmico se anula o incluso se invierte. Desde una perspectiva dinámica, la tropopausa se define a menudo mediante la vorticidad potencial (VP), situándose frecuentemente en el nivel de 2 unidades de VP (PVU).

1.2.2. La Estratosfera: Estabilidad y fotoquímica del ozono

Sobre la tropopausa se extiende la estratosfera, alcanzando aproximadamente los 50 km de altitud. A diferencia de la troposfera, la temperatura aquí aumenta con la altura (inversión térmica), lo que confiere a esta capa una estabilidad hidrostática extrema que inhibe los movimientos verticales a gran escala.

Este incremento térmico es consecuencia directa de la presencia de la capa de ozono (O_3). El ozono absorbe de manera eficiente la radiación ultravioleta (UV) solar, particularmente en las bandas de Hartley (200-310 nm) y Huggins (310-350 nm). La energía fotónica absorbida se convierte en energía cinética de las moléculas circundantes, elevando la temperatura ambiental. El máximo térmico se alcanza en la **estratopausa**, donde la temperatura puede aproximarse a los 0 °C, un valor notablemente superior a los −50 °C o −80 °C de la tropopausa.

En la estratosfera, el transporte de constituyentes químicos no se rige por la convección, sino por la circulación de escala global conocida como la Célula de Brewer-Dobson, que transporta aire desde los niveles tropicales hacia las latitudes altas. La escasez de vapor de agua (del orden de ppm) limita la formación de nubes, restringiéndolas a las nubes estratosféricas polares (PSC), fundamentales en los procesos de activación del cloro y la destrucción del ozono.

1.2.3. La Mesosfera: La región de mínimos térmicos

La mesosfera se sitúa entre la estratopausa y la mesopausa ($\approx$ 85 km). En esta región, la temperatura vuelve a descender con la altitud debido a la disminución de la densidad de ozono y al enfriamiento radiativo por parte de las moléculas de CO_2 en el infrarrojo térmico.

La mesosfera es la región menos comprendida de la atmósfera, a menudo denominada "ignorósfera" debido a la dificultad de su muestreo *in situ* (demasiado alta para globos meteorológicos y aviones, demasiado baja para satélites en órbita estable). Presenta las temperaturas más bajas de todo el sistema terrestre, pudiendo alcanzar los 130 K (-143 °C) cerca de la mesopausa durante el solsticio de verano en latitudes altas. A pesar de la bajísima densidad, la energía cinética de las ondas de gravedad que se propagan desde la troposfera rompe en esta capa, depositando momento y energía que impulsan una circulación meridional extrema de polo a polo.

1.2.4. La Termosfera y Exosfera: El límite con el espacio exterior

La termosfera comienza por encima de la mesopausa y se extiende hasta varios cientos de kilómetros (entre 500 y 1000 km según la actividad solar). En esta región, la temperatura aumenta de forma asintótica con la altura debido a la absorción de radiación solar de energía extrema (X-rays y UV extremo) por parte del oxígeno y nitrógeno atómicos.

Es fundamental distinguir aquí entre temperatura cinética y calor sensible. Aunque las temperaturas cinéticas pueden superar los 2000 K, la densidad es tan baja que la capacidad calorífica del medio es despreciable; un objeto físico en esta capa no "sentiría" calor en el sentido macroscópico convencional. En esta región se localiza la ionosfera (que se estudiará en el Tema 17), donde la fotoionización crea una población significativa de electrones libres.

Finalmente, la **exosfera** representa la transición definitiva al espacio interplanetario. El concepto de temperatura se desvanece a medida que el camino libre medio de las partículas supera la escala de altura de la atmósfera, permitiendo que las moléculas con suficiente velocidad de escape abandonen el campo gravitatorio terrestre.

1.2.5. Cuadro Resumen de la Estructura Térmica

A continuación se presenta un cuadro comparativo que sintetiza las propiedades geofísicas de las capas descritas:

Capa	**Altitud aprox. (km)**	**Signo de dT/dz**	**Fenómeno Dominante**
Troposfera	0 - 12	Negativo (-6.5 K/km)	Convección, Ciclo Hidrológico
Estratosfera	12 - 50	Positivo	Absorción UV por O_3, Estabilidad
Mesosfera	50 - 85	Negativo	Enfriamiento por CO_2, Ondas Gravedad
Termosfera	85 - 600	Positivo	Fotodisociación, Ionización solar
Exosfera	> 600	N/A	Escape balístico de partículas

1.2.6. Análisis de la estabilidad y la transición en la tropopausa

Para comprender la importancia de estas capas en la práctica profesional, consideremos el siguiente escenario de análisis de estabilidad vertical.

Ejemplo 1.2. Un radio-sondeo lanzado en latitudes medias detecta un perfil térmico donde la temperatura en superficie ($z = 0$) es de 288 K. Se observa un gradiente térmico constante de 7.2 K/km hasta los 11 km de altitud. A partir de ese nivel, la temperatura se mantiene constante a 208.8 K durante 2 km adicionales, para luego aumentar a razón de 2 K/km.

El objetivo es determinar la frecuencia de Brunt-Väisälä (N) justo por encima de la tropopausa térmica y evaluar la capacidad de esta capa para actuar como barrera al transporte vertical de contaminantes. La frecuencia de Brunt-Väisälä se define como:

$$N = \sqrt{\frac{g}{\theta}\frac{\partial \theta}{\partial z}}$$

Donde θ es la temperatura potencial. En una capa isotérmica, como la detectada entre los 11 y 13 km, la relación se simplifica. Si recordamos que $\theta = T(P_0/P)^{R/c_p}$ y aplicamos la diferenciación logarítmica respecto a z, obtenemos:

$$\frac{1}{\theta}\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{1}{T}\left(\frac{\partial T}{\partial z} + \Gamma_d\right)$$

Donde $\Gamma_d \approx 9.8$ K/km es el gradiente adiabático seco. Para la capa isotérmica ($\partial T/\partial z = 0$):

$$N^2 = \frac{g}{T}\Gamma_d \approx \frac{9.81 \text{ m/s}^2}{208.8 \text{ K}}(0.0098 \text{ K/m}) \approx 4.6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$$

$$N \approx 0.021 \text{ rad/s}$$

Este valor positivo de N indica una estratificación fuertemente estable. El periodo de oscilación de una burbuja de aire desplazada sería $\tau = 2\pi/N \approx 300$ segundos (5 minutos). Esta estabilidad explica por qué la tropopausa actúa como un "techo" dinámico: cualquier masa de aire que intente ascender desde la troposfera se encontrará rápidamente en un entorno más cálido (menos denso) que ella misma, sufriendo una fuerza de flotabilidad negativa que la devuelve a su posición original. En el contexto de la contaminación atmosférica, este fenómeno garantiza que los aerosoles troposféricos queden confinados, a menos que existan procesos de inyección forzada como erupciones volcánicas explosivas o eventos de plegamiento de la tropopausa ("tropopause folds").

1.2.7. Implicaciones del gradiente térmico en la propagación de ondas

La transición entre estas capas no solo afecta al transporte de masa, sino también a la propagación de energía en forma de ondas. La estratosfera, con su gradiente positivo, actúa como una guía de ondas para las ondas planetarias de Rossby. Sin embargo, solo aquellas ondas con longitudes de onda suficientemente grandes (números de onda zonales 1 y 2) pueden propagarse verticalmente a través de los vientos del oeste estacionales de la estratosfera, un fenómeno descrito por el criterio de Charney-Drazin.

En la mesosfera, el gradiente negativo de temperatura vuelve a favorecer cierta inestabilidad, permitiendo que las ondas de gravedad que han logrado atravesar la estratosfera aumenten su amplitud debido a la disminución de la densidad ($\rho(z) = \rho_0 e^{-z/H}$). Cuando estas ondas alcanzan una amplitud crítica, se vuelven inestables y rompen, de forma análoga a las olas del mar al llegar a la costa. Este proceso es fundamental para entender el balance de momento en la alta atmósfera, ya que la fuerza de arrastre generada por la rotura de ondas es lo que mantiene la mesopausa estival mucho más fría de lo que predeciría el equilibrio radiativo puro.

Es esta interconexión entre la estructura térmica (capas), la composición química (especies absorbentes) y la dinámica (ondas y transporte) lo que define la complejidad del sistema atmosférico. Para el post-graduado, es vital reconocer que las fronteras entre estas capas (tropopausa, estratopausa, mesopausa) son en realidad regiones de acoplamiento físico donde se producen los intercambios de energía más críticos para el clima global.

1.3. Atmósfera estándar y gradientes térmicos verticales asociados.

1.3.1. Atmósfera estándar y gradientes térmicos verticales asociados

La complejidad intrínseca de la dinámica atmosférica, caracterizada por una variabilidad espaciotemporal multiescala, exige la definición de un modelo de referencia que sirva como sustrato para la normalización de medidas, el calibrado de instrumentación aeronáutica y el diseño de vehículos aeroespaciales. Este modelo es la denominada Atmósfera Estándar Internacional (ISA, por sus siglas en inglés), codificada por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) y la ISO 2533. La ISA no pretende representar un estado instantáneo real de la atmósfera, sino un promedio global anual simplificado que asume una estructura hidrostática y una composición gaseosa constante hasta la base de la heterosfera.

Fundamentos físicos y postulados de la ISA

La construcción físico-matemática de la atmósfera estándar se fundamenta en tres pilares esenciales que permiten cerrar el sistema de ecuaciones para las variables de estado (P, T, ρ):

1. **Ecuación de estado de los gases ideales:** Se asume que el aire seco se comporta como un gas ideal, cumpliendo la relación $P = \rho R_d T$, donde R_d es la constante específica para el aire seco (287.0528 J kg^{-1} K^{-1}).
2. **Equilibrio Hidrostático:** Se postula que la atmósfera se encuentra en un balance perfecto entre la fuerza de gradiente de presión vertical y la fuerza de la gravedad, definido por $dP = -\rho g dZ$.
3. **Geopotencial y Gravedad:** Para simplificar los cálculos, se utiliza la altura geopotencial (H) en lugar de la altura geométrica (z). La relación se define de modo que $g_0 dH = g(z)dz$, donde g_0 es la aceleración de la gravedad estándar a nivel del mar (9.80665 m s^{-2}). Esto permite tratar a la gravedad como una constante efectiva en las integraciones verticales.

Bajo estos preceptos, la atmósfera estándar se define a partir de valores de referencia al nivel medio del mar (MSL):

- Presión estándar (P_0): 1013.25 hPa (o mb).
- Temperatura estándar (T_0): 288.15 K (15 °C).
- Densidad estándar (ρ_0): 1.2250 kg m^{-3}.

El Gradiente Térmico Vertical (Γ) y la estratificación térmica

El parámetro crítico que define la arquitectura de la atmósfera estándar es el gradiente térmico vertical o "lapse rate" (Γ), definido como la tasa de variación de la temperatura con respecto a la altitud: $\Gamma = -dT/dH$. La ISA modeliza la atmósfera como una sucesión de capas con gradientes térmicos constantes (procesos politrópicos o isotermos), lo que facilita la integración analítica de las variables.

En la troposfera inferior (hasta los 11 km geopotenciales), la ISA establece un gradiente positivo de $\Gamma = 6.5$ K/km (o 0.0065 K/m). Es vital notar que, en meteorología, un gradiente positivo implica una disminución de la temperatura con la altura. Este valor de 6.5 K/km es un compromiso estadístico entre el gradiente adiabático seco ($\Gamma_d \approx 9.8$ K/km) y los gradientes saturados medios, representando una atmósfera condicionalmente inestable o neutra en promedio global.

A continuación se presenta la tabla de los niveles de quiebre ("break points") y los gradientes asociados según el modelo U.S. Standard Atmosphere (que extiende la ISA):

Capa	**Altitud Geopotencial (H, km)**	**Gradiente (Γ, K/km)**	**Estado Térmico**
Troposfera	0.0 a 11.0	+6.5	Disminución (Lapse)
Tropopausa	11.0 a 20.0	0.0	Isotermia
Estratosfera inferior	20.0 a 32.0	−1.0	Inversión (Aumento)
Estratosfera superior	32.0 a 47.0	−2.8	Inversión (Aumento)
Estratopausa	47.0 a 51.0	0.0	Isotermia
Mesosfera inferior	51.0 a 71.0	+2.8	Disminución (Lapse)
Mesosfera superior	71.0 a 84.8	+2.0	Disminución (Lapse)

Tabla 1.1: Estructura térmica vertical de la Atmósfera Estándar.

Derivación matemática de los perfiles de presión y densidad

La capacidad de predecir la presión a una altura dada es fundamental. Combinando la ecuación hidrostática y la de estado, obtenemos la ecuación diferencial fundamental:

$$\frac{dP}{P} = -\frac{g_0}{R_d T(H)} dH$$

El comportamiento de esta ecuación depende de la naturaleza de $T(H)$.

Caso 1: Capas con gradiente térmico constante ($\Gamma \neq 0$) Si definimos $T = T_b - \Gamma(H - H_b)$, donde el subíndice b indica el nivel base de la capa, la integración resulta en la ley de potencias:

$$\frac{P}{P_b} = \left(\frac{T}{T_b}\right)^{\frac{g_0}{R_d \Gamma}}$$

Para la densidad, utilizando la relación de los gases ideales, se obtiene:

$$\frac{\rho}{\rho_b} = \left(\frac{T}{T_b}\right)^{\frac{g_0}{R_d\Gamma}-1}$$

En la troposfera ($\Gamma = 0.0065$ K/m), el exponente hidrostático $\frac{g_0}{R_d\Gamma}$ toma un valor aproximado de 5.25588. Esto implica que la presión disminuye mucho más rápidamente que la temperatura con la altura.

Caso 2: Capas isotermas ($\Gamma = 0$) En regiones como la baja estratosfera, donde $T = T_b =$ constante, la integración de la ecuación diferencial conduce a un decaimiento exponencial (Ley de Laplace):

$$P = P_b \exp\left[-\frac{g_0(H - H_b)}{R_d T_b}\right]$$

Aquí, el concepto de "escala de altura" ($H_s = R_d T_b/g_0$) cobra relevancia, representando la distancia vertical en la cual la presión se reduce en un factor de $1/e$. Para una temperatura de 216.65 K (estándar en la tropopausa), $H_s \approx 6.3$ km.

Implicaciones de los gradientes térmicos en la estabilidad

El gradiente térmico de la atmósfera estándar ($\Gamma_{ISA} = 6.5$ K/km) sirve como umbral de referencia para el análisis de la estabilidad estática de la atmósfera real (Γ_{env}). Se presentan tres escenarios fundamentales:

- **Superadiabático:** $\Gamma_{env} > \Gamma_d$ (9.8 K/km). Característico de capas muy cercanas a superficies fuertemente calentadas. La flotabilidad es positiva para cualquier desplazamiento vertical.
- **Subadiabático:** $\Gamma_{env} < \Gamma_d$. Es el estado más frecuente. Si además $\Gamma_{env} < \Gamma_s$ (gradiente adiabático saturado), la atmósfera es absolutamente estable.
- **Inversión térmica:** $\Gamma_{env} < 0$. La temperatura aumenta con la altura. Actúa como una "tapadera" dinámica que impide el desarrollo de la convección y atrapa contaminantes en la capa límite planetaria.

Ejemplo 1.3. Consideremos un escenario de análisis para un ingeniero de ensayos en vuelo que opera en un aeródromo situado en una meseta a 1000 metros sobre el nivel del mar. En un día de verano intenso, la presión en superficie se mide en 900 hPa y la temperatura en el exterior es de 35 °C. Se requiere calcular la "altitud de densidad", un parámetro crítico para las actuaciones de despegue, comparándola con la atmósfera estándar.

1. **Identificación de desviaciones:** La temperatura estándar a 1000 m ($H = 1$ km) según la ISA sería:

$$T_{std} = T_0 - \Gamma H = 288.15 - (6.5 \times 1) = 281.65 \text{ K } (8.5\ ^\circ\text{C})$$

La temperatura medida es $T_{real} = 308.15$ K (35 °C). La desviación es $\Delta T = +26.5$ K.

2. **Cálculo de la presión de altitud (H_p):** Es la altitud en la atmósfera estándar que corresponde a la presión medida de 900 hPa. Usamos la fórmula inversa del Caso 1:

$$H_p = \frac{T_0}{\Gamma}\left[1 - \left(\frac{P}{P_0}\right)^{\frac{R_d\Gamma}{g_0}}\right]$$

$$H_p = \frac{288.15}{0.0065}\left[1 - \left(\frac{900}{1013.25}\right)^{0.19026}\right] \approx 988.5 \text{ m}$$

3. **Cálculo de la densidad real:**

$$\rho_{real} = \frac{P}{R_d T_{real}} = \frac{90000 \text{ Pa}}{287.05 \times 308.15} \approx 1.017 \text{ kg m}^{-3}$$

4. **Determinación de la altitud de densidad (H_d):** Es la altitud ISA donde la densidad es 1.017 kg m^{-3}. Usando la relación para la densidad:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \left(1 - \frac{\Gamma H_d}{T_0}\right)^{\frac{g_0}{R_d \Gamma} - 1}$$

$$\frac{1.017}{1.225} = \left(1 - \frac{0.0065 H_d}{288.15}\right)^{4.25588}$$

Resolviendo para H_d:

$$H_d \approx \frac{T_0}{\Gamma}\left[1 - \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{\frac{1}{4.25588}}\right] \approx 1920 \text{ m}$$

Este resultado es de vital importancia: aunque el avión está físicamente a 1000 m, debido al bajo gradiente térmico real (aire muy caliente y presión baja), el motor y las superficies aerodinámicas "sienten" que están volando a casi 2000 m. La reducción en el empuje y la sustentación es drástica, ilustrando por qué la ISA es el marco de referencia indispensable para cuantificar estas desviaciones.

Limitaciones y extensiones: La atmósfera real frente a la ISA

Es imperativo reconocer que el gradiente de 6.5 K/km es una abstracción. En la atmósfera real, el perfil térmico está gobernado por:

- **Balances radiativos locales:** La presencia de nubes o aerosoles altera la absorción de onda corta y la emisión de onda larga, modificando el gradiente local.
- **Advección térmica:** El transporte horizontal de masas de aire de distintas latitudes puede generar perfiles extremadamente complejos, incluyendo múltiples capas de inversión.
- **Contenido de humedad:** Como se estudiará en los temas de termodinámica del aire húmedo, la liberación de calor latente durante la condensación reduce el gradiente térmico efectivo, tendiendo hacia el gradiente pseudoadiabático ($\Gamma_s \approx 4$ a 7 K/km, dependiendo de T y P).

Además, la altura de la tropopausa varía significativamente. Mientras que la ISA la fija en 11 km, en el ecuador puede alcanzar los 18 km con temperaturas de hasta -80 °C, mientras que en los polos puede descender a 8 km. Estas discrepancias son críticas para la meteorología sinóptica, ya que la altura de la tropopausa está íntimamente ligada a la intensidad del chorro polar y a la profundidad de los sistemas meteorológicos.

Resumen de ecuaciones de navegación barométrica

Para aplicaciones prácticas en meteorología y aviación, se suelen emplear formas simplificadas de las ecuaciones derivadas de la ISA. La más notable es la aproximación para la baja troposfera: una reducción de presión de aproximadamente 1 hPa por cada 9 metros (27 pies) de ascenso, y una disminución de temperatura de 2 °C por cada 1000 pies (304.8 m). Si bien estas reglas de oro son útiles en entornos operativos, el análisis académico exige el uso de las formas integrales para capturar la naturaleza no lineal de la distribución de masa en el campo gravitatorio terrestre.

- **Fórmula de la presión (ISA, Troposfera):** $P = P_0(1 - 0.0000225577H)^{5.25588}$
- **Fórmula de la temperatura (ISA, Troposfera):** $T = T_0 - 0.0065H$

Estas expresiones permiten que cualquier instrumento de medida de presión (barómetro) pueda ser graduado en unidades de longitud (altímetro), siempre bajo la premisa de que la atmósfera se comporta según los gradientes estándar definidos en esta sección.