

# **PROYECTO DOCENTE**

*Romualdo Romero March*



# **FÍSICA DE LA ATMÓSFERA EN EL CONTEXTO DEL GRADO Y EL MÁSTER/DOCTORADO EN FÍSICA (UIB)**

Presentado por **ROMUALDO ROMERO MARCH**  
para:

Concurso de acceso número 18/2011 de una  
plaza de catedrático de universidad del área de  
conocimiento de Física de la Tierra (UIB)

Palma de Mallorca, Octubre de 2011

*"The principal task of any meteorological institution of education and research must be to bridge the gap between the mathematician and the practical man, that is to make the weather man realize the value of a modest theoretical education and to induce the theoretical man to take an occasional glance at the weather map"*

*C. G. Rossby (1934)*

# ÍNDICE

| Capítulo                                                         | Página    |
|------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Introducción</b>                                           | <b>2</b>  |
| <b>2. Ámbito de estudio de la Meteorología</b>                   | <b>6</b>  |
| 2.1 Meteorología Física                                          | 7         |
| 2.2 Meteorología Dinámica                                        | 9         |
| <b>3. Física de la Atmósfera en el Grado en Física de la UIB</b> | <b>18</b> |
| 3.1 Contenido del plan de estudios                               | 20        |
| 3.2 Relación entre Física de la Atmósfera y otras materias       | 27        |
| 3.3 Otros mecanismos de formación                                | 31        |
| <b>4. Objetivo y guía del proyecto docente</b>                   | <b>33</b> |
| 4.1 Guía docente de la asignatura                                | 34        |
| <b>5. Organización de la enseñanza</b>                           | <b>48</b> |
| 5.1 Actividades de aula                                          | 49        |
| 5.2 Otras actividades                                            | 52        |
| 5.3 Evaluación                                                   | 53        |
| <b>6. Programa de la asignatura</b>                              | <b>55</b> |
| 6.1 Contenidos teóricos                                          | 55        |
| 6.2 Prácticas                                                    | 62        |
| 6.3 Seminarios                                                   | 66        |
| <b>7. Continuidad en el Máster y Doctorado de la UIB</b>         | <b>67</b> |
| 7.1 Máster universitario en Física                               | 67        |
| 7.2 Especialización en Física de la Atmósfera                    | 75        |
| 7.3 Inicio de la actividad investigadora y doctorado             | 77        |
| 7.4 Otros aspectos de la formación                               | 79        |
| <b>8. Bibliografía</b>                                           | <b>81</b> |

## ***Capítulo 1***

### ***INTRODUCCIÓN***

Con el presente documento se pretende no solo satisfacer las expectativas de un proyecto docente para un concurso de acceso de esta naturaleza, sino que también se persigue construir una guía verdaderamente útil para la planificación futura de la enseñanza de Física de la Atmósfera -como asignatura del Grado en Física de la Universidad de les Illes Balears (UIB)- y para la tutorización adecuada de aquellos estudiantes que ingresen en el Grado con el deseo primordial de desarrollar un perfil lo más completo posible en Física de la Atmósfera -como disciplina en su sentido más amplio-. Por lo tanto, para el diseño de este proyecto se ha tenido en cuenta el contexto en que se enmarca la impartición de dicha asignatura, el plan de estudios del recientemente implantado Grado en Física en el que Física de la Atmósfera se sitúa como una asignatura optativa de tercer o cuarto curso, y también se ha considerado la continuidad de la formación hacia el Máster y Doctorado actualmente en vigor.

Inevitablemente, muchos aspectos y consideraciones del presente proyecto poseen un carácter provisional que pueden requerir revisión posterior. La razón es que aún no se han acumulado experiencias suficientes sobre el funcionamiento del nuevo Grado (los primeros titulados surgirán tras el curso 2012-2013) y, además, el Máster actual deberá extinguirse para volver de nuevo a caminar a partir de 2013-2014 una vez adaptado al Grado. Aún así, se intentará tener en cuenta estas circunstancias en la medida de lo posible. Por ejemplo, el

candidato participa como representante de la línea de Meteorología en una comisión preliminar para la elaboración y diseño del nuevo plan de Máster, por lo que se puede permitir acotar en cierto grado las incertidumbres existentes sobre la evolución futura de los estudios de Postgrado.

Se intentará también diseñar un proyecto docente que sea realista, es decir, acorde con las posibilidades temporales de la asignatura (6 créditos ECTS) y con las facilidades e infraestructuras disponibles en el Departamento de Física. Que sea además consistente con la distribución de otras enseñanzas afines o complementarias disponibles a lo largo del Grado. Y finalmente, que se centre en el interés del estudiante, en el sentido de transmitirle unos fundamentos teóricos y prácticos que se acoplen a las exigencias del mercado laboral en el sector del Medio Ambiente (ejemplos muy concretos serían la Agencia Estatal de Meteorología y los diversos servicios meteorológicos regionales que operan en España) y a las líneas de investigación en Meteorología más probables en el caso de continuar con unos estudios de doctorado en el seno del Grupo de Meteorología de la UIB.

Esencialmente, un programa de Física de la Atmósfera ha de tener como objetivo el estudio de la física, dinámica y composición química de la atmósfera, incluyendo los efectos relacionados con la presencia de la superficie terrestre y los intercambios energéticos entre el sistema y el exterior. Aunque se sobreentiende que nos estamos refiriendo a la atmósfera terrestre, los principios básicos de Física de Fluidos que en ella se aplican serían también válidos para otras atmósferas planetarias. El fin último que persigue esta rama del conocimiento es la comprensión completa y predicción precisa de los fenómenos atmosféricos. Evidentemente, una Física de la Atmósfera comprende o depende de un gran número de disciplinas, con fronteras cada vez más difusas según van emergiendo nuevos problemas cuya solución necesita de un enfoque multidisciplinar. Sirva de ejemplo el cambio climático, cuyo estudio implica la interacción constante entre disciplinas clásicas como la dinámica atmosférica y oceánica, la radiación, la química, la biología o la geología.

Tradicionalmente, las ciencias atmosféricas se han dividido en dos grandes ramas: *Meteorología* y *Climatología* (Wallace y Hobbs, 1977). La primera se preocupa de los fenómenos atmosféricos que definen el tiempo meteorológico

y de su evolución temporal, incluyendo la génesis, desarrollo y disipación de dichos fenómenos; la segunda se encarga de las propiedades de la atmósfera que de un modo estadístico, a través del tiempo, definen el clima (descrito éste por los valores medios, variabilidad y frecuencia de los distintos parámetros meteorológicos, tales como temperatura, viento o precipitación). Tal división responde más al desarrollo histórico más o menos independiente que han sufrido estas materias que a una división real entre sus contenidos actuales (Wallace y Hobbs, 2006). Está claro que el clima, en todas sus escalas, está determinado por procesos meteorológicos, y que es también una característica cambiante, por lo que debe también ser tratado como un problema dinámico dependiente del tiempo. Dada esta situación de cierta indefinición, y puesto que ya existe en el plan de estudios del Grado en Física de la UIB otra asignatura denominada Física del Clima, me **voy a** permitir en este proyecto docente **identificar Física de la Atmósfera fundamentalmente con Meteorología**, en coherencia además con unas competencias, resultados del aprendizaje y contenidos para *Física de la Atmósfera* que son estrictamente meteorológicos, según se verá en la discusión del plan de estudios.

Fue tradicional dividir a la Meteorología, a su vez, en tres subdisciplinas principales: *Meteorología Física*, *Meteorología Sinóptica* y *Meteorología Dinámica* (Wallace y Hobbs, 1977). La Meteorología Física se restringe al ámbito de esa ciencia no explícitamente relacionado con el movimiento atmosférico. Estudia la estructura y composición de la atmósfera, la transferencia de radiación electromagnética y ondas acústicas a través de ella, los procesos físicos implicados en la formación de nubes y precipitación, la electricidad atmosférica, y cualquier problema atmosférico en general que esté relacionado con las disciplinas de la física y la química. La Meteorología Sinóptica trata de la descripción, análisis y predicción del movimiento atmosférico de gran escala, y estuvo originalmente basada en los modelos empíricos sobre análisis y predicción del tiempo que surgieron a raíz de la disponibilidad, a principios del siglo pasado, de una red de observaciones simultáneas, es decir, sinópticas. Finalmente, la Meteorología Dinámica estudia también el movimiento y su evolución temporal, pero utilizando un enfoque basado en los principios de la dinámica de fluidos. Hoy en día, la distinción entre Meteorología Sinóptica y Meteorología Dinámica es ya muy tenue, pues ambas materias convergen en el empleo de unas mismas redes de observación (radiosondeos, satélite, radar, etc),



herramientas teóricas (basadas en aproximaciones analíticas a las ecuaciones que gobiernan el comportamiento de la atmósfera) y técnicas de modelización (a través de modelos numéricos que resuelven dichas ecuaciones).

En el capítulo segundo de esta memoria se describen en mayor detalle los principales campos de estudio en que se diversifican las disciplinas anteriores. Esto debiera ayudar a construir un proyecto docente de Física de la Atmósfera bajo un enfoque conjunto de la materia, a pesar de que el proyecto no pretende en absoluto cubrir, aunque sea mínimamente, todas las áreas de estudio potencialmente candidatas. Un objetivo como ese solo podría formularse en el contexto de un programa de estudios específicos sobre Ciencias Atmosféricas, inexistentes actualmente en esta universidad. El contexto presente, el Grado en Física, aparece explicado en el capítulo tercero a través de su plan de estudios, prestando especial atención a la relación entre Física de la Atmósfera y otras asignaturas o materias del plan. En el capítulo cuarto se define el objetivo concreto de este proyecto docente y se presenta la guía docente de la asignatura, la cual se desarrolla y complementa en el resto del documento. Así, el capítulo quinto explica cómo se organizaría la enseñanza de la asignatura para un máximo provecho del estudiante y el sexto desarrolla en detalle el contenido teórico y práctico y la estructuración en unidades docentes. Finalmente, tal como se ha resaltado al principio de esta introducción, en el capítulo séptimo se explorará la continuidad de la formación en el Máster actual y los nexos existentes entre las competencias y destrezas adquiridas y un potencial doctorado o investigación realizados en el seno del Grupo de Meteorología de la UIB.

## ***Capítulo 2***

### ***ÁMBITO DE ESTUDIO DE LA METEOROLOGÍA***

Como ya se recalcó en la introducción, no siempre resulta fácil establecer una nítida separación entre los distintos procesos físicos que operan en la atmósfera. Esto es debido a que para muchos fenómenos, la interacción entre los procesos puede ser tan importante como la acción individual de cada uno de ellos. Pensemos, por ejemplo, en la transferencia radiativa. Ésta controla la estructura térmica de la atmósfera, la cual determina por mecanismos dinámicos la circulación atmosférica, pero esta última, a su vez, influye en la distribución de sustancias activas desde el punto de vista radiativo como son el vapor de agua, el ozono y el agua de nube. En vista de tales interdependencias, un estudio riguroso de la atmósfera demanda la integración de principios físicos muy diversos, es decir, un tratamiento global del problema. A pesar de ello, resulta práctico dividir el estudio de la atmósfera en distintas disciplinas más o menos específicas. Las más usuales en el ámbito de la Meteorología se resumen a continuación, con mayor énfasis en Meteorología Dinámica por ser ésta el eje fundamental del proyecto docente presentado.

## 2.1 Meteorología Física

La *Termodinámica Atmosférica* aplica las ideas y leyes de la termodinámica para el estudio de los procesos atmosféricos sujetos a flujos de calor y cambios en el contenido de energía. El aire puede considerarse como un gas ideal, y al ser su movimiento vertical lo suficientemente lento, es aplicable la hipótesis de reversibilidad. En contraste con los sistemas termodinámicos únicamente formados por componentes gaseosos, sin embargo, en el caso de la atmósfera es crucial incorporar los efectos de los cambios de fase del agua al estudiar la evolución de partículas húmedas, especialmente cuando se trata de ascensos o descensos. De particular importancia en termodinámica atmosférica es el análisis de la estabilidad de estratificación y el desarrollo de nubes por elevación, para lo que se hace un uso extensivo de diagramas termodinámicos y sondeos en la vertical de presión, temperatura y humedad. Conceptos utilizados para la caracterización de las masas de aire como la temperatura potencial, temperatura potencial del termómetro húmedo, temperatura potencial equivalente y punto de rocío son exclusivos de la termodinámica atmosférica.

La *Radiación Atmosférica* examina la absorción, emisión y dispersión de radiación electromagnética (solar y terrestre) en el seno de la atmósfera; la naturaleza y distribución de la radiación solar incidente en la cima de la atmósfera; y la reflexión y emisión desde la superficie terrestre. La gran importancia de la radiación atmosférica en Meteorología radica en dos motivos principales: por una parte, el efecto primordial del calentamiento o enfriamiento radiativo sobre la distribución de temperaturas, definiéndose de esta manera la estructura básica de la circulación general; por otra parte, el uso que puede hacerse de la información espectral, angular o de polarización contenida en las medidas de radiación para la determinación de propiedades de la atmósfera o de la superficie terrestre (*Teledetección*). En este último sentido, cabe destacar las relativamente modernas disciplinas *Meteorología por Radar* y *Meteorología por Satélite*. La primera permite la caracterización de los sistemas nubosos o de precipitación a partir del radar, un sensor activo. La segunda utiliza satélites artificiales orbitando alrededor de la Tierra (sensores pasivos) para la caracterización de sistemas atmosféricos, oceánicos y terrestres. La información derivada no se limita a la de tipo cualitativo que contienen las imágenes, sino que la aplicación de algoritmos numéricos construidos en base a la teoría de la

transferencia radiativa puede ofrecer información cuantitativa muy útil de temperatura, viento y concentración de vapor de agua.

La *Óptica Atmosférica* estudia las características ópticas de la atmósfera y los fenómenos asociados que en ella tienen lugar. Considerando únicamente la radiación visible, se definiría la *Óptica Meteorológica*, que estudia los meteoros resultantes de la reflexión, refracción, difusión y difracción de la luz en la atmósfera, tales como el propio color del cielo, el arco iris, los halos, o las glorias y coronas. También se encarga del estudio y medida de la visibilidad meteorológica.

La *Acústica Atmosférica* se aplica al estudio de los distintos fenómenos derivados de la propagación del sonido en la atmósfera, tales como la absorción molecular dependiente de la frecuencia, la refracción por gradientes de viento y temperatura, difracción por la topografía u otros elementos superficiales, y la dispersión debido a la turbulencia. Una aplicación interesante de estos principios es el sodar, empleado para la medición, hasta una altura de unos 1500 m, de velocidad y dirección del viento, humedad, inversiones de temperatura y turbulencia. Esta disciplina también se interesa por algunos sonidos de origen atmosférico como los generados por las tormentas.

La *Electricidad Atmosférica* estudia los procesos eléctricos que ocurren en la atmósfera. Estos fenómenos abarcan no sólo manifestaciones tan notables como la descarga de rayos en las tormentas, sino también otras menos perceptibles como la ionización atmosférica o la corriente aire-tierra de buen tiempo. Se sabe que el campo eléctrico atmosférico de fondo, que tiende a ser destruido por la corriente aire-tierra, es mantenido gracias al efecto colectivo de las tormentas. Sin embargo, los procesos de separación de cargas en estos sistemas nubosos son todavía poco entendidos, por lo que la electrificación de las tormentas constituye un área de investigación muy activa dentro de esta disciplina.

La *Física de Nubes* se ocupa de las propiedades físicas de las nubes y los procesos que ocurren en su seno. En un sentido amplio, considera no únicamente los procesos de condensación y precipitación, sino también la transferencia radiativa, los fenómenos ópticos y eléctricos, y una gran variedad de procesos

hidrodinámicos y termodinámicos peculiares de las nubes naturales. El interés inicial en esta materia fue motivado por el papel de las nubes, en especial las convectivas, sobre la seguridad aérea a través de los procesos de congelación y turbulencia. También por el descubrimiento de la modificación artificial de las nubes y sus productos de precipitación mediante técnicas de bombardeo con partículas microscópicas. Por otra parte, la formación de precipitación y la influencia de las nubes en los procesos radiativos de la atmósfera confieren a esta disciplina un papel fundamental en el estudio del clima global. La subdisciplina *Microfísica de Nubes* se encarga de los procesos que tienen lugar a escala de las partículas individuales de aerosol o precipitación (crecimiento de gotitas de agua o cristales de hielo, evaporación, etc.), permitiendo derivar parametrizaciones físicas de estos procesos aptas para la modelización numérica de nubes convectivas o de sistemas nubosos de mayor escala (sistemas convectivos, frentes, etc.). Cuando el estudio se concentra en la estructura y evolución de los sistemas nubosos y la precipitación en base a las propiedades macroscópicas visibles, o inferidas a partir de satélite y radar, se está en el ámbito de la *Dinámica de Nubes*.

### 2.2 **Meteorología Dinámica**

Las disciplinas anteriores pertenecen a la Meteorología Física y no consideran de forma explícita el movimiento atmosférico. Este último es el objeto principal de estudio de la *Meteorología Dinámica*, que lo interpreta como solución al sistema cerrado de ecuaciones fundamentales de la termohidrodinámica u otros sistemas de ecuaciones apropiados para situaciones especiales, como los empleados en la *Teoría Estadística* de la turbulencia. Las ecuaciones fundamentales son: las ecuaciones del movimiento en un sistema de referencia no inercial como el terrestre, la ecuación de continuidad, la ecuación de la energía o termodinámica, la ecuación de estado para un gas ideal, y las ecuaciones de continuidad para las sustancias de agua. Para algunos problemas simples, se puede prescindir de algunas de estas ecuaciones. Para un flujo bidimensional homogéneo e incompresible, por ejemplo, la energía cinética es la única forma de energía, y con sólo las ecuaciones del movimiento horizontal y la de continuidad se tiene un sistema cerrado. Aplicaciones elementales de las ecuaciones del movimiento a casos ideales (flujo geostrófico, flujo inercial, flujo ciclostrófico o

flujo del gradiente) pueden ayudar a elucidar aspectos cualitativos del delicado balance de fuerzas que rige el movimiento atmosférico real. En otras ocasiones, es preferible utilizar ecuaciones alternativas derivadas de las fundamentales, como las ecuaciones de vorticidad y de la divergencia para el estudio del movimiento bidimensional de escala sinóptica. En cualquier caso, cualquier teoría encaminada a la explicación de los sistemas de circulación atmosférica debe construirse sobre aproximaciones y simplificaciones de las ecuaciones básicas, pues en caso contrario no sería factible un tratamiento analítico de éstas ni una interpretación clara de los principales procesos que controlan la circulación. Particularmente útil es el *Análisis de Escala*, método que en base a las ecuaciones adimensionales determina que términos son los dominantes para un fenómeno o situación particular de escala conocida, de tal forma que los términos menores pueden ser eliminados y se obtienen así conjuntos simplificados de ecuaciones (p.e. las ecuaciones cuasigeoestróficas).

Otro método muy potente es el *Método de las Perturbaciones*, el cual permite encontrar a partir de la ecuación o ecuaciones diferenciales que describen un determinado problema, originalmente no lineales, una versión linealizada de éstas. Esto se consigue tratando cada variable dependiente como la suma de una componente básica no perturbada más una pequeña perturbación o desviación de ese estado medio, y se asume que el producto de dos perturbaciones es despreciable comparado con los términos de primer orden en las perturbaciones o los de las variables no perturbadas. El sistema lineal de ecuaciones así resultante contiene las perturbaciones de las variables como las nuevas variables dependientes, y en muchos casos es posible determinar su solución analítica. Este método permite resolver y analizar distintos tipos de ondas atmosféricas, tales como las ondas sonoras, ondas gravitatorias, ondas inerciales-gravitatorias, ondas frontales y ondas de Rossby, incluyendo el efecto de factores externos como la orografía. También se emplea para el estudio de inestabilidades hidrodinámicas, una propiedad del flujo básico según la cual ciertas perturbaciones que en él se introduzcan crecerán en magnitud a costa de la energía contenida en el flujo básico. Entre estas inestabilidades podemos mencionar la inestabilidad de Kelvin-Helmholtz, la inestabilidad barotrópica y la baroclina.

Para el estudio de ciertas inestabilidades hidrodinámicas, como la inercial y la simétrica, pero sobre todo para el estudio de las inestabilidades estáticas, es decir, inestabilidades a los desplazamientos verticales de una partícula en un fluido que está en equilibrio hidrostático, tales como la *Inestabilidad Absoluta, Latente o Condicional y Potencial o Convectiva*, se suele emplear el *Método de la Partícula*. En este método se supone que sólo la partícula o estrato que se desplaza es afectado por el proceso, pero no el ambiente básico, y se establecen los criterios según los cuales la partícula desplazada se alejará de su posición de equilibrio. Para el análisis de la estabilidad estática, por ejemplo, la partícula sufre cambios de temperatura adiabáticos o consecuencia de los intercambios de calor latente, y se determinan las características de la estratificación básica que harían aparecer fuerzas de flotabilidad sobre la partícula tendientes a alejarla de su nivel de partida. Un método modificado para el estudio de la estabilidad estática que responde aún mejor a la realidad es el *Método de la Lámina*, en el que el ambiente no permanece inmutable, sino que responde sobre una región limitada al desplazamiento de la partícula con un movimiento vertical ascendente o descendente compensatorio en virtud de la ley de continuidad de masa. Procesos de mezcla entre la partícula y el ambiente, si embargo, sólo se contemplan en métodos más avanzados.

En el estudio de la circulación atmosférica, es costumbre considerar tres escalas principales para el movimiento. La *Macroescala* se refiere aquellos sistemas de circulación que abarcan miles de kilómetros y comprende, por lo tanto, fenómenos de escala climatológica o planetaria como las ondas ultra-largas de Rossby, y sistemas de escala sinóptica como los ciclones extratropicales de origen baroclino o incluso los ciclones tropicales. Desde un punto de vista dinámico, son sistemas significativamente influidos por la rotación terrestre, es decir, con un número de Rossby (relación adimensional entre las fuerzas inerciales y de Coriolis), menor que 1. La *Mesoescala* se refiere a los fenómenos con escalas horizontales comprendidas entre unos pocos kilómetros y los cientos de kilómetros, e incluye las tormentas, líneas de turbonada, frentes, bandas de precipitación de ciclones extratropicales y tropicales, ondas inerciales-gravitatorias, sistemas meteorológicos generados topográficamente como las ondas de montaña y las brisas de mar y tierra, etc. Desde una perspectiva dinámica, son sistemas con números de Rossby superiores a 1 pero inferiores a 200. Aunque se trata de estructuras que escapan a los análisis sinópticos

tradicionales por la limitada resolución de la red de observación sinóptica, resultan evidentes en los análisis más finos (los llamados mesoanálisis), los cuales incorporan observaciones adicionales y modelos conceptuales sobre la circulación asociada a estructuras detectadas en las imágenes de satélite y radar. Los movimientos atmosféricos con números de Rossby superiores a 200, o con escalas espaciales inferiores a los 2 km, corresponden a la *Microescala*, y así pues comprenden fenómenos como los tornados, células convectivas, térmicas, ondas gravitatorias cortas y turbulencia. En base a la anterior clasificación general para las escalas del movimiento, podría muy bien hablarse de una *Macrometeorología*, *Mesometeorología* y *Micrometeorología*, respectivamente. La primera es cuasigeostrófica e hidrostática; la segunda no es geostrófica pero es hidrostática; y la tercera no es geostrófica ni hidrostática, sino turbulenta.

Comenzando por los aspectos de mayor escala del movimiento atmosférico, la *Circulación General* se encarga de hacer una descripción estadística en base a los datos diarios. Esa descripción se fija no sólo en los flujos medios temporales y espaciales (p.e. vientos zonales del oeste o del este), sino también en las otras propiedades medias del flujo atmosférico (p.e. ondas semipermanentes y células meridionales) que junto a las primeras conforman la circulación general. También se incluyen estadísticas de mayor orden para la medición de la variabilidad de la atmósfera necesaria para entender su estado medio (p.e. los cambios estacionales o los efectos de los ciclones transitorios).

Para el estudio de los movimientos de escala sinóptica, es decir, los sistemas migratorios de alta y baja presión que ocurren en la troposfera con longitudes de onda típicas de 1000-4000 km y que definen en primera instancia el tiempo en superficie, se ha desarrollado una teoría simple pero bastante precisa en latitudes extratropicales conocida como la *Teoría Cuasigeostrófica*. En la aproximación cuasigeostrófica, los vientos horizontales se sustituyen por sus valores geostróficos en los términos de aceleración horizontal presentes en las ecuaciones de momento, y la advección horizontal en la ecuación termodinámica se aproxima por la advección geostrófica. Además, se desprecia la advección vertical de momento y se sustituye el parámetro de estabilidad estática cuatro-dimensional por un valor básico que es función de la coordenada vertical únicamente. La combinación de las ecuaciones de vorticidad, divergencia y termodinámica cuasigeostróficas expresadas en coordenadas isobáricas permite



derivar ecuaciones de diagnóstico y pronóstico muy útiles para la interpretación del comportamiento de los sistemas sinópticos extratropicales. En concreto, la ecuación  $\omega$  (en sus formulaciones clásicas o en términos del vector  $Q$ ), la cual permite diagnosticar ascensiones y descendencias; y las ecuaciones de la tendencia o de la vorticidad potencial, útiles para pronosticar el movimiento y desarrollo de los sistemas. Esta última no es más que una versión simplificada para una atmósfera cuasigeostrófica de la vorticidad potencial de Ertel, que emerge al discutir la circulación y vorticidad en la atmósfera. Se trata de una propiedad muy deseable en Meteorología, en primer lugar por su carácter conservativo bajo la acción de un movimiento adiabático y libre de fricción (aproximación a menudo aceptable en la atmósfera), y en segundo lugar, por el principio de invertibilidad que puede aplicársele y que permite asociar un flujo de balance a una distribución de vorticidad potencial dada. Esto ha hecho surgir un enfoque alternativo a la teoría cuasigeostrófica para la interpretación de los desarrollos ciclónicos de latitudes medias, basado en la interacción lateral y vertical entre elementos de vorticidad potencial. Es el llamado "*PV thinking*".

Un estudio completo de los sistemas de escala sinóptica exige, además, una consideración de los procesos responsables de la ciclogénesis. Ésta puede ser consecuencia de *Inestabilidad Barotrópica*, pero fundamentalmente de *Inestabilidad Baroclina*. La primera resulta de ciertas distribuciones de vorticidad en un flujo bidimensional no divergente, las cuales derivan en una transferencia de energía cinética desde el flujo básico hacia la perturbación. Una condición bien conocida necesaria para la activación de la inestabilidad barotrópica es que el gradiente de vorticidad absoluta del flujo básico presente ambos signos en el dominio, algo factible cerca de las corrientes en chorro del oeste y del este características de latitudes medias y tropicales, respectivamente. La inestabilidad baroclina es resultado de la existencia de un gradiente meridional de temperatura, y por lo tanto de cizalladura vertical del flujo básico, o viento térmico, en una atmósfera en equilibrio cuasigeostrófico y estable estáticamente. Para valores razonables de los parámetros atmosféricos, la longitud de onda con máxima inestabilidad coincide con la escala característica de los sistemas de escala sinóptica. Tales sistemas crecen y se mantienen mediante conversión de energía potencial del flujo básico en energía cinética de la perturbación inestable. Como se mencionó anteriormente, el estudio de ambos tipos de inestabilidad

puede realizarse mediante el método de las perturbaciones, aplicado precisamente al sistema de ecuaciones cuasigeostróficas.

Mientras que los sistemas sinópticos extratropicales son fundamentalmente adiabáticos y cuasigeostróficos, los sistemas tropicales son menos tratables mediante las técnicas cuasigeostróficas y están a menudo muy influidos por fuentes de calor diabático, como el debido a la convección por cúmulos o a los flujos superficiales de calor sensible y latente. De hecho, muchas circulaciones tropicales están directamente reguladas por el acoplamiento entre atmósfera y océano. Ejemplos importantes de sistemas tropicales incluyen las circulaciones de Hadley y Walker, monzones, ciclones tropicales, la oscilación de Madden-Julian, ondas del este y el ENSO. El estudio de todos estos fenómenos pertenece al ámbito de la *Dinámica Tropical*, si bien no pueden olvidarse las fuertes interacciones existentes entre los sistemas de circulación tropicales y extratropicales.

La troposfera contiene alrededor del 85% de la masa total de la atmósfera y prácticamente toda el agua, y no hay duda de que los procesos que tienen lugar en su seno son los principales responsables de las perturbaciones meteorológicas y la variabilidad climática. Sin embargo, el estudio de la dinámica atmosférica de gran escala no puede olvidar lo que sucede en la atmósfera media (estratosfera y mesosfera). Algunos ejemplos son los calentamientos repentinos de la estratosfera que ocurren en las zonas polares, la oscilación de largo período del viento zonal medio en la zona ecuatorial, conocida como la oscilación cuasibienal, y el agujero antártico de la capa de ozono. La troposfera y la atmósfera media están conectadas a través de procesos radiativos y dinámicos, y además intercambian sustancias muy importantes para la fotoquímica de la capa de ozono. Estos procesos deben ser representados en los modelos climáticos y de predicción global, y su estudio constituye el objeto de la *Dinámica de la Atmósfera Media*.

La teoría cuasigeostrófica funciona relativamente bien para explicar movimientos atmosféricos de escala sinóptica o superior, para los que el número de Rossby es menor que 1. Sin embargo, no puede describir con tanto acierto algunas estructuras atmosféricas subsinópticas que se desarrollan a lo largo de zonas específicas de los ciclones baroclinos de mayor escala, debido a que los

efectos advectivos del viento ageostrófico no pueden despreciarse. Entre estas estructuras, podemos mencionar desarrollos ciclónicos intensos de pequeña escala, jets y frentes. Los jets son corrientes atmosféricas relativamente confinadas que presentan vientos fuertes. Los frentes son interfases o zonas de transición entre dos masas de aire de diferente densidad. Al ser la distribución de temperatura el principal determinante de la densidad atmosférica, no es ambiguo decir que un frente separa dos masas de aire de diferente temperatura. En virtud de la relación del viento térmico, jets y frentes son fenómenos por lo general simultáneos en los ambientes baroclinos. Para su estudio se utiliza una teoría alternativa a la cuasigeostrófica conocida como la *Teoría Semigeostrófica*. Sus ecuaciones se escriben utilizando las llamadas coordenadas geostróficas y se basa en una menos restrictiva aproximación a las ecuaciones primitivas conocida como la del momento geostrófico, la cual incorpora los efectos de la advección ageostrófica. Su aplicación permite deducir e interpretar las circulaciones transversales secundarias que acompañan a los procesos frontogénéticos o frontolíticos o a la presencia de un jet streak en altura.

Además de frentes y jet streaks, que pueden considerarse estructuras mesoescalares en su dirección transversal, existen otros muchos fenómenos de mesoescala, al fin y al cabo los principales agentes en la definición del tiempo local, que son relativamente bien comprendidos desde el punto de vista teórico. Por citar algunos ejemplos, la *Inestabilidad Simétrica* (una especie de inestabilidad inercial isentrópica en condiciones de estabilidad estática e inercial), o más precisamente la *Inestabilidad Simétrica Condicional* (que incorpora los efectos de la liberación de calor latente por condensación), permiten explicar determinadas bandas nubosas y de precipitación que suelen desarrollarse a lo largo de los frentes, aunque a cierta distancia de ellos. Las ecuaciones linealizadas bidimensionales para las ondas gravitatorias internas, resultantes de aplicar el método de las perturbaciones a las ecuaciones de Boussinesq (en las que la densidad se trata como una constante excepto en el término de flotabilidad de la ecuación del momento vertical), permiten explicar muchos de los aspectos observados de las ondas de montaña, incluso para perfiles verticales de viento y estabilidad no constantes, si bien son necesarios formalismos más complejos para explicar efectos no lineales como el desarrollo de temporales de viento a sotavento, o para resolver las estructuras tridimensionales forzadas por montañas aisladas (recirculaciones de sotavento,

etc.). La *Dinámica de Tormentas* puede explicar muchos de los modos de organización mesoescalar de la convección (tormentas multicelulares, supercélulas, líneas de turbonada, complejos convectivos de mesoescala, etc.) en base a parámetros termodinámicos del ambiente de mayor escala, como la CAPE o la helicidad. También puede explicar muchos de los mecanismos que regulan la circulación interna en dichos sistemas convectivos; por ejemplo, las causas de la rotación y escisión de las tormentas supercelulares. Finalmente, se han construido algunas teorías para la explicación del desarrollo de los huracanes, como el *CISK* (Inestabilidad condicional de segunda especie), o la *Teoría de Interacción Aire-Mar*.

El tratamiento teórico de los problemas de microescala es difícil por su carácter no hidrostático y turbulento. Pensemos, por ejemplo, en la estructura y dinámica de las células convectivas que componen las tormentas. Éstas contienen distintas entidades de aire que asciende por flotabilidad, llamadas térmicas. Su comportamiento es no hidrostático, no estacionario y altamente turbulento. En su ascenso incorporan aire del ambiente dando lugar a procesos de mezcla, y también sufren el arrastre de los productos de la condensación. A pesar de que el movimiento turbulento presenta escalas espacio-temporales mucho más pequeñas de las que pueden resolver las redes de observación, y de que su naturaleza caótica lo hace impredecible en los detalles, sí que es posible identificar distintas propiedades estadísticas de la turbulencia que permiten tener en cuenta su efecto sobre las circulaciones de mayor escala. De ello se encarga la disciplina *Turbulencia Atmosférica*.

De particular importancia es lo que ocurre en la *Capa Fronteriza Planetaria*, por ser ésta la porción de la atmósfera en la que el flujo interacciona fuertemente con la superficie terrestre. Los remolinos turbulentos originados por la fuerte cizalladura del viento cerca de la superficie o como consecuencia de la convección forzada por el calentamiento superficial, son mecanismos muy efectivos para la transferencia de momento hacia la superficie (fricción) y para la incorporación a la atmósfera de calor sensible y latente desde la superficie. Estos flujos de momento y calor son imprescindibles para entender el balance global de momento y energía, a la vez que influyen directamente sobre las circulaciones de escala sinóptica (p.e. el decaimiento de los ciclones por la fricción en la capa fronteriza), las circulaciones de mesoescala (p.e. formación de brisas por

calentamiento diferencial entre superficies de distinto tipo), y sobre las propias condiciones meteorológicas en la capa fronteriza (p.e. formación de nieblas en su parte inferior en régimen estable, o formación de calles de cúmulos y estratocúmulos en su parte superior en condiciones de suficiente humedad). Distintas teorías ajustadas mediante observaciones, como la *Teoría de Similitud* de Monin-Obukhov, permiten modelar el efecto estadístico de esos remolinos turbulentos sobre el transporte de momento, calor sensible y humedad.

Finalmente, una disciplina muy importante que se alimenta directamente de los conocimientos de la Meteorología Física y Dinámica es la *Predicción Numérica del Tiempo*. Esa es la herramienta más importante que nos puede proporcionar la Meteorología, por su capacidad para informarnos sobre la evolución futura de la circulación atmosférica, y por derivarse de su aplicación un conocimiento cada vez más preciso de los complejos procesos que regulan la mayoría de los fenómenos atmosféricos (más que de predicción, debería hablarse en este segundo caso de *Simulación Numérica*). Hacer predicción o simulación numérica consiste en integrar las ecuaciones de gobierno termohidrodinámicas por métodos numéricos, sujetos a la especificación de unas condiciones iniciales, con el fin de obtener su solución aproximada, pues soluciones exactas para casos reales no son posibles dada la complejidad y no linealidad de las ecuaciones. Desde el primer intento fallido de predicción numérica por parte de L. F. Richardson hacia 1920, un mejor conocimiento de los esquemas numéricos de integración y la potencia creciente de las computadoras y redes de observación, han ayudado a evolucionar con éxito a través, primero, de los modelos de balance (válidos aproximadamente para el movimiento cuasigeostrófico), hasta los modelos actuales de ecuaciones primitivas. Estos últimos son capaces de resolver con gran precisión circulaciones mesoescalares e incluso inferiores (p.e. modelos de nube y LES), al poder ejecutarse con resoluciones muy altas e incorporar parametrizaciones muy realistas de muchos de los procesos físicos mencionados anteriormente.

## ***Capítulo 3***

# ***FÍSICA DE LA ATMÓSFERA EN EL GRADO EN FÍSICA DE LA UIB***

La UIB ofrece los nuevos títulos oficiales de grado adaptados al espacio europeo de educación superior (EEES), de acuerdo con el Real Decreto 1393/2007 de 29 de octubre por el que se establece la ordenación de las enseñanzas universitarias oficiales en nuestro país. El propósito del EEES es favorecer el reconocimiento de títulos, la movilidad del alumnado y una educación superior de calidad en un espacio europeo común. Esto se consigue, entre otras acciones, mediante la adopción de una misma estructura de títulos (grado, máster y doctorado), la implantación en todas las universidades europeas de una misma unidad de medida centrada en el trabajo del alumno, denominada crédito europeo o crédito ECTS\*, y la expedición por parte de las universidades del Suplemento al Título. La oferta actual de estudios de grado en la Facultad de Ciencias comprende los títulos de Biología, Bioquímica, Química y Física.

El Grado en Física proporciona una formación general en una disciplina básica que fundamenta la ciencia y la tecnología. Las aportaciones de la Física han determinado la comprensión de la realidad, han mejorado el modo de vida de las

---

\* 1 crédito ECTS = 25 horas de trabajo del alumno.

personas sucesivamente a lo largo de la historia y sustentan grandes progresos de otras áreas científicas y técnicas de manera habitual. El nuevo título, implantado desde el curso 2009-2010, sustituye a la Licenciatura en Física que ha tenido una afluencia ininterrumpida de estudiantes desde que se implantó en 1981. El plan de estudios se modificó siguiendo las reformas generales universitarias en 1994 y 1997. La existencia de una licenciatura en Física en la UIB ha sido la base desde la que se han formado profesionales, docentes e investigadores y ha ayudado a la creación de varios institutos de investigación que, junto con la universidad, sustentan la investigación en las Islas Baleares. Los objetivos generales del grado son:

- Conocer los fenómenos físicos fundamentales, las teorías y las leyes físicas que los rigen y los modelos que los explican, y dominar los métodos matemáticos y numéricos más comúnmente utilizados.
- Capacitar para evaluar y discernir entre los órdenes de magnitud, reconocer situaciones que son físicamente diferentes, pero que muestran analogías y aplicar soluciones conocidas en la resolución de problemas nuevos.
- Capacitar para identificar los elementos esenciales de un fenómeno, aplicar un modelo que permita su descripción y valorar la concordancia de los resultados obtenidos con la realidad Física.
- Capacitar para trabajar en el laboratorio, individualmente y en equipo, y usar la instrumentación y los métodos experimentales más usados, realizar experimentos de manera independiente y describir, analizar y evaluar críticamente los datos y resultados obtenidos.
- Preparar para posteriores estudios especializados, tanto en una disciplina Física como en cualquier ciencia que requiera buenos fundamentos físicos.

En el grado se adquieren competencias transversales, como las capacidades de analizar y sintetizar o comprender, hablar y escribir en lengua inglesa; y específicas, como las capacidades de saber describir el mundo físico usando las matemáticas, o comparar críticamente los resultados de un cálculo basado en un modelo físico con las conclusiones de observaciones y

experimentos. En los siguientes apartados se ofrece una visión general del plan de estudios, con mayor énfasis en la asignatura de Física de la Atmósfera y su relación con otras asignaturas del plan.

### 3.1 Contenido del plan de estudios

El plan de estudios del Grado en Física de la UIB se inspira en el Libro Blanco "Título del Grado en Física" editado por la ANECA en 2004 y quedó configurado a instancias de la Comisión de Elaboración y Diseño del nuevo título (CED) en la que éste concursante participó como vocal. La distribución de créditos ECTS entre materias de formación básica, obligatorias y optativas sobre el total de 240 conducentes a la obtención del título, es la siguiente:

DISTRIBUCIÓN POR TIPO DE MATERIA:

| Tipo de Materia      | Créditos ECTS |
|----------------------|---------------|
| Formación básica     | 60            |
| Obligatorias         | 144           |
| Optativas            | 30            |
| Prácticas externas   | (*)           |
| Trabajo fin de grado | 6             |
| Total                | 240           |

(\*) Las prácticas externas se contemplan con un máximo de 6 créditos optativos.

Debe hacerse notar que para la obtención del título los alumnos deben además demostrar, al acabar los estudios, que han alcanzado un nivel de conocimiento de la lengua inglesa equivalente como mínimo al B2 establecido en el Marco europeo común de referencia para las lenguas (MECR). Se contemplan diferentes mecanismos para el cumplimiento de dicho requisito, entre ellos el haber cursado con éxito una asignatura específica de inglés del plan de estudios (ver asignaturas optativas).

El grado se estructura en cuatro cursos de 60 ECTS, 30 ECTS en cada semestre. La distribución de las asignaturas por cursos y semestres se muestra en la siguiente tabla:



### 3. Física de la Atmósfera en el Grado en Física de la UIB

---

#### DISTRIBUCIÓN DE LAS ASIGNATURAS POR CURSOS Y SEMESTRES:

| Curso   | Primer Semestre                  | Segundo Semestre               |
|---------|----------------------------------|--------------------------------|
| Primero | Matemáticas I                    | Matemáticas II                 |
|         | Física general I                 | Física general II              |
|         | Química I                        | Química II                     |
|         | Análisis de datos experimentales | Laboratorio de física general  |
|         | Física asistida por ordenador    | Cálculo vectorial              |
| Segundo | Ecuaciones diferenciales I       | Ecuaciones diferenciales II    |
|         | Mecánica clásica                 | Mecánica analítica             |
|         | Termodinámica                    | Óptica                         |
|         | Circuitos eléctricos             | Física experimental I          |
|         | Variable compleja                | Instrumentación electrónica    |
| Tercero | Electromagnetismo I              | Electromagnetismo II           |
|         | Física de medios continuos       | Física estadística             |
|         | Física cuántica                  | Mecánica cuántica              |
|         | Espacios de funciones            | Física experimental II         |
|         | Física computacional             | Optativa 1                     |
| Cuarto  | Física del estado sólido         | Electrónica física             |
|         | Física atómica y molecular       | Física nuclear y de partículas |
|         | Mecánica estadística             | Optativa 4                     |
|         | Optativa 2                       | Optativa 5                     |
|         | Optativa 3                       | Trabajo fin de grado           |

Todas las asignaturas básicas y obligatorias del grado son de 6 ECTS en cumplimiento del Reglamento de ordenación de las enseñanzas universitarias de grado de la UIB (Acuerdo Normativo de 6 de febrero de 2008). De acuerdo con dicha normativa, el primer curso está formado íntegramente por asignaturas de materias básicas, por lo que las materias obligatorias se despliegan a partir del segundo curso. El trabajo fin de grado aparece programado en el segundo semestre de dicho curso como parece más lógico.

---

### 3. Física de la Atmósfera en el Grado en Física de la UIB

---

Las asignaturas optativas son de 6 o 3 ECTS, de acuerdo con las directrices dictadas por el Consejo de Dirección durante el proceso de diseño de los títulos de grado. En la tabla anterior puede observarse que el grueso de optativas se desarrolla en el cuarto curso. A continuación se listan por orden alfabético las asignaturas optativas ofertadas actualmente por el Departamento de Física:

#### ASIGNATURAS OPTATIVAS DEL PLAN DE ESTUDIOS:

| Optativa                         | Créditos ECTS |
|----------------------------------|---------------|
| Acústica                         | 6             |
| Astrofísica                      | 6             |
| Biofísica                        | 6             |
| Cálculo tensorial y grupos       | 3             |
| Econofísica                      | 3             |
| Electromagnetismo aplicado       | 3             |
| Electrónica digital              | 6             |
| English for Science              | 6             |
| Física de la atmósfera           | 6             |
| Física de la materia condensada  | 6             |
| Física de materiales             | 6             |
| Física del clima                 | 6             |
| Física del medio ambiente        | 3             |
| Física experimental III          | 6             |
| Física médica                    | 6             |
| Fotónica: Láseres y aplicaciones | 6             |
| Instrumentación aplicada         | 6             |
| Mecánica de sólidos              | 6             |
| Nanoestructuras                  | 3             |
| Oceanografía física              | 6             |
| Prácticas externas               | 6             |
| Relatividad y cosmología         | 6             |
| Sistemas dinámicos               | 6             |

Finalmente se reseñan las asignaturas del plan de estudios cuyos contenidos considero más relevantes por su interacción con mi proyecto docente de Física de la Atmósfera. Esas interacciones se discutirán posteriormente. Para las asignaturas en cuestión se incluye una breve descripción de sus contenidos:

ASIGNATURAS DE FORMACIÓN BÁSICA MÁS RELEVANTES

**Física asistida por ordenador** (6 ECTS, Primer curso)

- Introducción a un lenguaje de manipulación simbólica (p.e. Mathematica).
- Programación básica en un lenguaje de alto nivel (p.e. Fortran).
- Introducción a un software de representación gráfica de datos y funciones (p.e. GnuPlot).
- Solución numérica de ecuaciones algebraicas.
- Interpolación y diferenciación numérica.
- Integración numérica.
- Tratamiento computacional de problemas sencillos de Física.

**Cálculo vectorial** (6 ECTS, Primer curso)

- Cálculo en varias variables.
- Curvas y superficies.
- Integrales múltiples. Integrales de línea, de superficie y de volumen.
- Operadores vectoriales. Teoremas de Green, Gauss y Stokes.

ASIGNATURAS OBLIGATORIAS MÁS RELEVANTES

**Ecuaciones diferenciales I** (6 ECTS, Segundo curso)

- Ecuaciones lineales. Sistemas oscilatorios. Amortiguamiento y forzamiento.
- Ecuaciones no lineales: separables, exactas, reducibles a exactas, etc.
- Resolución por series de potencias: funciones de Airy y de Bessel.
- Sistemas dinámicos. Puntos críticos. Estabilidad.

**Ecuaciones diferenciales II** (6 ECTS, Segundo curso)

- Series de Fourier. Integral de Fourier. Convergencia.
- La ecuación de difusión unidimensional: solución general (Fourier). Disipación.
- La ecuación de ondas unidimensional: solución general (características). Transporte.

- La ecuación de Laplace tridimensional. Separación en coordenadas esféricas.
- Armónicos esféricos. Polinomios de Legendre. Problemas de equilibrio.

#### **Termodinámica** (6 ECTS, Segundo curso)

- Sistemas termodinámicos. Variables de estado. Interacción térmica: Principio cero. Interacción mecánica. Ecuaciones de estado.
- Primer Principio de la termodinámica. Energía interna, trabajo adiabático y calor.
- Segundo Principio de la termodinámica. Entropía y temperatura absoluta.
- Formalismo termodinámico. Potenciales termodinámicos.
- Condiciones de equilibrio y estabilidad.
- Transiciones de fase. Puntos críticos.
- Sistemas multicomponentes. Regla de las fases.
- Fenómenos de bajas temperaturas. Tercer Principio de la termodinámica.

#### **Física de medios continuos** (6 ECTS, Tercer curso)

- Propiedades generales de los fenómenos ondulatorios.
- Medios continuos: Elasticidad y fluidos.
- Ondas mecánicas.
- Estática, termodinámica y atributos cinemáticos de los fluidos. Circulación y vorticidad.
- Leyes de conservación de masa, momento y energía. Ecuación de Navier-Stokes y aplicaciones a flujos académicos.
- Flujos viscosos, efectos de capa límite y turbulencia.
- Dinámica de fluidos geofísicos. Ondas e inestabilidades.

#### **Física experimental II** (6 ECTS, Tercer curso)

- Preparación de dispositivos experimentales; conocimiento de la instrumentación; documentación y evaluación del proceso de medida; comparación con modelos teóricos.
- Experimentos de fenómenos relevantes en Electromagnetismo, Física Cuántica y Fluidos: Electromagnetismo (Circuitos RC, RCL en corriente alterna, campo e inducción magnética...); Física Cuántica (Efecto

fotoeléctrico, determinación de la constante de Rydberg, espectros atómicos de emisión...); Fluidos (Ondas en canales, fluidos en rotación, turbulencia, inestabilidades...).

#### **Física computacional** (6 ECTS, Tercer curso)

- Solución numérica de ecuaciones diferenciales ordinarias.
- Ecuaciones en derivadas parciales: Introducción a la discretización en diferencias finitas.
- Convergencia, consistencia y estabilidad.
- Ecuaciones elípticas en 1D y 2D.
- Ecuaciones parabólicas en 1D y 2D.
- Ecuaciones hiperbólicas en 1D.
- Aplicación a problemas prototipo de Física.

#### ASIGNATURAS OPTATIVAS MÁS RELEVANTES

#### **Física de la atmósfera** (6 ECTS, Tercer-Cuarto curso)

- Composición y estructura atmosférica.
- Estructura y evolución de los sistemas meteorológicos de latitudes medias.
- Termodinámica atmosférica.
- El movimiento atmosférico.
- La ecuación de vorticidad.
- Teoría cuasigeostrófica.
- Predicción numérica del tiempo.

#### **Física del clima** (6 ECTS, Tercer-Cuarto curso)

- Introducción al sistema climático.
- Balance global de energía.
- Circulación general atmosférica y oceánica.
- El problema de la variabilidad climática.
- Sensibilidad del sistema climático.
- Simulación del clima.

#### **Física del medio ambiente** (3 ECTS, Tercer-Cuarto curso)

- El ozono atmosférico.
- Variables atmosféricas. Estabilidad de estratificación. Categorías de estratificación.
- Turbulencia atmosférica.
- Contaminantes atmosféricos. Emisión y difusión de contaminantes. Vigilancia.
- Modelos sencillos de difusión de contaminantes.
- Intercambios atmósfera-suelo. Efectos de la vegetación. Capa límite.
- Circulaciones inducidas por intercambios. Brisas.
- Clima urbano. Isla de calor.

#### ***Oceanografía física*** (6 ECTS, Tercer-Cuarto curso)

- Propiedades físicas del océano y su medida. Concepto de masa de agua. Intercambio de propiedades atmósfera-océano.
- Ecuaciones fundamentales de la dinámica marina. Escalado de las ecuaciones. Números adimensionales.
- Circulación sin fricción; equilibrio geostrófico.
- Océano barotropo: ecuaciones de aguas poco profundas; vorticidad potencial.
- Océano estratificado: concepto de altura dinámica; viento térmico.
- Formulación isopícnica: vorticidad potencial isopícnica.
- Ajuste geostrófico; energía potencial disponible y energía cinética.
- Teoría Cuasi-geostrófica.
- Estructura vertical inducida por viento: la capa de Ekman.
- Afloramientos costeros.
- Estructura horizontal de los grandes giros subtropicales y subpolares.
- Circulación termohalina.

#### ***Sistemas dinámicos*** (6 ECTS, Tercer-Cuarto curso)

- Teoría cualitativa de las ecuaciones dinámicas y los sistemas dinámicos.
- Estabilidad de sistemas dinámicos.
- Teoría de bifurcaciones.
- Caos y atractores extraños.
- Universalidad en la transición al caos.
- Geometría fractal y análisis de señales caóticas.
- Aplicaciones específicas de la teoría de los sistemas dinámicos y caos.

- Realización de experimentos de laboratorio con circuitos electrónicos no lineales, sistemas mecánicos, fluidos y reacciones químicas que ilustren la presencia de los fenómenos estudiados en la teoría y permitan la recolección y análisis de datos utilizando las nociones aprendidas.

#### **English for Science** (6 ECTS, Tercer-Cuarto curso)

- Se incluye en la lista esta asignatura por su valor para los estudiantes que la cursen de acreditar unos conocimientos suficientes de lengua inglesa cuando no puedan hacerlo de otra manera (p.e. a través de un título oficial). Dichos conocimientos son obligados para una posible actividad investigadora o meramente profesional en el ámbito de la Meteorología. Además, la mayor parte de la bibliografía de referencia de este proyecto docente solo está disponible en inglés, por lo que una mínima comprensión de dicho idioma se hace necesaria.

#### **Prácticas externas** (6 ECTS, Cuarto curso)

### **3.2 Relación entre Física de la Atmósfera y otras materias**

Como se ha visto en el plan de estudios anterior, la asignatura de Física de la Atmósfera, como materia independiente, está contemplada como una asignatura optativa de tercer o cuarto curso, semestral, a la que corresponden 6 créditos ECTS. El proyecto docente deberá adaptarse, por lo tanto, a tales circunstancias. No obstante, los estudiantes interesados en recibir una formación más profunda en ciencias atmosféricas disponen de un conjunto adicional de asignaturas básicas o afines desde los primeros años del grado, especialmente algunas optativas\*, que les posibilitarían diseñar la línea de estudios más conveniente. Dichas asignaturas son las que se han resaltado en el plan de estudios precedente, y que ahora paso a comentar.

---

\* Debo aquí hacer notar que la mayoría de asignaturas optativas de Física, incluyendo *Física de la Atmósfera*, no se imparten necesariamente con una periodicidad anual. Las optativas que se ofertan cada curso académico dependen de un sondeo previo acerca de las preferencias de los estudiantes.

Lógicamente, es exigible disponer de una base matemática suficiente para seguir la formulación descriptiva o deductiva de los distintos procesos físicos que ocurren en la atmósfera. Éste es, de hecho, un requisito común para cualquier asignatura de unos estudios de Física, y en el presente plan de estudios se cumple mediante la asignatura de formación básica *Cálculo vectorial* y las asignaturas obligatorias de segundo curso *Ecuaciones diferenciales I y II*. Especialmente relevantes para el estudio de Meteorología Dinámica son los temas de análisis vectorial (gradiente, divergencia, rotacional, integrales multidimensionales, de línea y superficie, teoremas de Green, Stokes y Gauss) y los temas sobre tipología y solución de ecuaciones diferenciales.

Aunque una consideración explícita de Termodinámica Atmosférica (seca y húmeda) parece obligada en la enseñanza de Física de la Atmósfera, muchos de los conocimientos que con carácter más general se adquieren en la asignatura obligatoria de segundo curso *Termodinámica* son directamente aprovechables. En particular, los conocimientos sobre variables y ecuaciones de estado, primer y segundo principios de la Termodinámica y transiciones de fase.

Una asignatura fundamental para establecer el marco de una Física de la Atmósfera es *Física de los medios continuos*, asignatura obligatoria de tercer curso. Es aquí donde el alumno adquiere sus primeros conocimientos sobre Física de Fluidos, lógicamente aplicables a un fluido geofísico como es la atmósfera. En esta asignatura se hace una introducción fenomenológica a la mecánica de fluidos, introduciendo conceptos como la viscosidad o el número de Reynolds para la caracterización de flujos laminares y turbulentos. Se presentan también conceptos básicos de la cinemática de fluidos como la función de corriente, potencial de velocidad, circulación y vorticidad, flujos estacionario, incompresible e irrotacional, etc. Se introducen las ecuaciones fundamentales de Navier-Stokes, incluyendo algunas soluciones para casos sencillos. En la parte de ondas, además de explicar los conceptos físicos y matemáticos para su caracterización, se estudian casos concretos como son las ondas sonoras y vibraciones en fluidos. Por último, el temario contempla una introducción específica a las ondas e inestabilidades características de los fluidos geofísicos (atmósfera y océano): ondas de gravedad, de Kelvin y de Rossby; inestabilidades barotrópica, baroclina y de Kelvin-Helmholtz. Los contenidos teóricos de ésta asignatura se complementan en el laboratorio con la asignatura del mismo curso



*Física experimental II*, en la que se experimenta con fenómenos en fluidos (ondas en canales, fluidos en rotación, turbulencia, inestabilidades, etc.).

Aún cuando muchas veces los conceptos físicos son explicables a través de modelos sencillos que admiten solución analítica, la naturaleza no lineal de las distintas ramas de la Física exige un dominio de las técnicas del cálculo numérico. La enseñanza de dichas técnicas está contemplada en el plan estudios a través de las asignaturas de primer y tercer curso Física asistida por ordenador y Física computacional, respectivamente. En *Física asistida por ordenador*, se introduce al alumno en la programación en lenguaje Fortran y en softwares para el análisis y representación de resultados. Ambos serán útiles durante el resto del grado. En esta asignatura también se presentan métodos para la solución numérica de ecuaciones algebraicas, interpolación, derivación e integración numérica. La otra asignatura, *Física computacional*, está todavía más relacionada con un programa de Física de la Atmósfera como el que se va a presentar, donde la realización de prácticas numéricas sobre teoría cuasigeostrófica y predicción numérica del tiempo, utilizando diferencias finitas, es parte fundamental. En efecto, en Física Computacional se analizan múltiples métodos en diferencias finitas para la resolución de ecuaciones elípticas, parabólicas e hiperbólicas. Aún teniendo esta asignatura un alto contenido práctico, conceptos teóricos como convergencia, consistencia y estabilidad se tratan en profundidad igualmente.

En el ámbito de las materias optativas, existe una colección de asignaturas que en su conjunto permitirían al alumno recibir una formación básica destacable en Ciencias Atmosféricas. *Física del medio ambiente* se centra en el estudio de la composición y estructura de la atmósfera, introduciendo conceptos como la estabilidad de estratificación y su análisis, escalas del movimiento, frentes, etc. También pone especial énfasis en los fenómenos de la capa límite, rural y urbana, y en los agentes contaminantes, estudiándose la modelización de su dispersión en la atmósfera mediante modelos sencillos. Esta asignatura podría cursarse en el tercer curso mientras que el resto de optativas relevantes deberían dejarse para el cuarto curso del grado. Entre ellas, *Sistemas dinámicos* sería útil para asimilar la base teórica sobre el caos, la cual permite caracterizar un sistema dinámico tan complejo como es la atmósfera. *Oceanografía física* es una asignatura obligada como complemento a una formación en Física de la Atmósfera. Muchos de los fenómenos tratados en

Oceanografía Física cuando se estudian sistemas de circulación, inestabilidades, frentes y ondas, responden, de hecho, a la misma naturaleza física que sus análogos atmosféricos. Por otra parte, los procesos de intercambio atmósfera-océano resultan fundamentales para entender cualquiera de los dos sistemas.

Una asignatura optativa directamente relacionada con un programa de estudios atmosféricos es *Física del clima*. Se puede ver que su contenido se centra en el estudio del sistema y subsistemas climáticos y los procesos que determinan el clima. Se estudian los factores que configuran el balance global de energía, el ciclo hidrológico y la estructura observada de la circulación general en la atmósfera y el océano. También se introduce al alumno en el tema de la simulación climática, herramienta imprescindible para el estudio del cambio climático, y se realizan algunos ejercicios con modelos sencillos del clima (modelos de balance energético).

En el contexto anterior, cabe preguntarse si los actuales descriptores de *Física de la atmósfera* (especificados en la sección anterior) conjugan unas áreas de formación que se acoplan a los temas ya estudiados en las asignaturas comentadas. También si entre todas se está ofreciendo una formación consistente en el contexto de una Física de la Atmósfera en su sentido más amplio (estudio de los procesos físicos responsables de la estructura y comportamiento del sistema atmosférico). Es decir, si se cubren los temas esenciales y no quedan grandes lagunas, todo ello en el marco de unas restricciones obligadas en cuanto a la cantidad de créditos asignados por tratarse de un subprograma dentro de un programa mucho más amplio de Física. Las respuestas a ambas cuestiones me parecen afirmativas. Piénsese, por un lado, que los descriptores de Física de la Atmósfera contemplan una mayoría de temas exclusivos de ésta, como termodinámica atmosférica (en lo que se refiere al efecto del agua), sistemas sinópticos de latitudes medias, teoría cuasigeostrófica y predicción numérica del tiempo. Otros aspectos de Meteorología Dinámica, tales como los conceptos y teoremas de circulación y vorticidad o incluso la teoría cuasigeostrófica, pueden ser coincidentes con el temario de otras asignaturas que tratan con fluidos geofísicos, pero la propia flexibilidad del profesor a la hora de organizar la enseñanza puede permitir otro tipo de enfoque más focalizado en las situaciones atmosféricas. Por otro lado, un examen detallado de las materias que se enseñarían durante el grado bajo una elección óptima de materias optativas y

durante el máster posterior para quien desee prolongar sus estudios (ver capítulo 7), permite concluir que muchas de las grandes áreas de Meteorología que fueron descritas en el capítulo 2 aparecen contempladas, con algunas excepciones importantes como Teledetección, Física de Nubes, Electricidad, Acústica u Óptica Atmosférica. No obstante, existen algunas posibilidades durante los estudios de grado de suplir las posibles carencias en la formación. Estas opciones se mencionan a continuación.

### 3.3 Otros mecanismos de formación

Con el grado, la UIB pone en funcionamiento un *Plan de Acción Tutorial*. Este plan abarca diversas actividades con el objetivo de contribuir a informar, formar, prevenir, orientar y ayudar a adoptar decisiones de carácter académico, profesional, social y administrativo del alumnado y, en consecuencia, facilitar la adaptación, el desarrollo y la finalización de una vida académica universitaria provechosa. En particular, mediante la denominada *Tutoría de carrera* el alumnado dispone de un tutor durante toda su vida académica en la UIB que le podrá guiar y ayudar a implementar con éxito la cadena de asignaturas comentada en la sección anterior y a elegir los complementos de formación (en este caso sobre Ciencias Atmosféricas) más convenientes. Entre éstos, destaco los tres siguientes:

(i) *Programas de intercambio con otras universidades*: La UIB, mediante el Servicio de Relaciones Internacionales, ofrece a sus estudiantes la oportunidad de hacer parte de sus estudios en otra universidad española, de la Unión Europea o de otros lugares del mundo. Entre los programas que ofrece el servicio destacan por su tradición el programa Erasmus con la Unión Europea y el programa SICUE-Séneca con universidades del ámbito nacional.

(ii) *Prácticas externas*: Con un cómputo de 6 ECTS, el alumno tiene la opción en el cuarto curso de realizar prácticas externas en empresas o instituciones bajo la supervisión de un tutor asignado por el centro receptor. Este tutor se encarga de guiar adecuadamente al alumno y de evaluar el progreso de su trabajo y de su adquisición de competencias. Las prácticas están limitadas a los centros con los que exista un convenio específico de cooperación educativa para recibir

estudiantes del Grado en Física. Centros adecuados en el ámbito que nos ocupa podrían ser el centro regional de la AEMET en Baleares y diferentes empresas u organismos que desarrollan su actividad en el sector del Medio Ambiente.

(iii) *Trabajo fin de grado*: El trabajo de 6 ECTS con el que concluye el Grado en Física consiste en una investigación teórica o teórico-práctica sobre un tema de interés para el alumno de entre los propuestos por la titulación para ese año académico o incluso propuesto por el propio alumno. El tutor asignado se encarga de guiarle adecuadamente y evaluar el progreso alcanzado. Al final de curso el alumno debe entregar una memoria del trabajo por escrito y exponerlo públicamente. La realización de este trabajo permite una profundización en temas relacionados con el ejercicio futuro profesional o investigador y fomenta dos actitudes muy deseables: la iniciativa propia y la habilidad de comunicación.

## **Capítulo 4**

### **OBJETIVO Y GUÍA DEL PROYECTO DOCENTE**

El objetivo que ha tenido en mente este concursante a la hora de desarrollar su proyecto docente, ha sido el de posibilitar a los alumnos que completen unos estudios de Física en la UIB la adquisición de unos conocimientos y destrezas sobre Física de la Atmósfera, tanto teóricos como prácticos, que se ajusten en la mayor medida posible a las necesidades actuales del ámbito laboral o de investigación afín. Todo ello, respetando los descriptores de la asignatura en el plan de estudios del Grado y teniendo en cuenta su dotación de 6 ECTS, lo que hace imposible cubrir con mínima calidad el amplio espectro de disciplinas que conforman esta materia. En definitiva, se ha concentrado el contenido de la asignatura sobre aquellos temas que parecen más esenciales de cara a las dos vías que tradicionalmente han tomado los alumnos licenciados -en un futuro próximo graduados- que han deseado continuar su labor en el campo de la Meteorología: (i) Oposiciones a los cuerpos de ayudantes y meteorólogos de la AEMET; y (ii) Actividad investigadora en el seno del Grupo de Meteorología de la UIB, normalmente encaminada a la obtención de una tesis doctoral.

Los aspectos concretos del diseño de la asignatura para conseguir dicho objetivo se exponen en la sección siguiente, manteniendo un formato muy similar al de las guías docentes que se suministran a los estudiantes de grado a comienzo

de curso. De hecho, se ha intentado aquí construir una guía breve y concisa para hacerla atractiva a los estudiantes. El desarrollo mucho más exhaustivo de sus apartados se deja para los capítulos 5 y 6 de esta memoria.

## **4.1 Guía docente de la asignatura**

### **IDENTIFICACIÓN DE LA ASIGNATURA**

Asignatura: 21049 - Física de la Atmósfera

Materia: Dominios de aplicación de la Física

Carácter: Optativa

Créditos: 2.4 presenciales (60 horas)

3.6 no presenciales (90 horas)

6 totales (150 horas)

Titulación donde se imparte: Grado en Física

### **CONTEXTUALIZACIÓN**

El fin específico de esta asignatura es la formación básica de los estudiantes en Meteorología Dinámica y su aplicación numérica, a través de la caracterización de los sistemas meteorológicos de latitudes medias, la presentación de los principales elementos físico-matemáticos que los describen, la derivación y aplicación de las teorías clásicas que permiten explicar su comportamiento y evolución, y una introducción teórica y práctica al problema de la predicción numérica del tiempo.

La oferta laboral relacionada con Física de la Atmósfera (p.e. oposiciones a los cuerpos de ayudantes y meteorólogos de la Agencia Estatal de Meteorología) y gran parte de la actividad investigadora afín, exigen, hoy en día, un importante bagaje en dichas materias. En particular, la labor de seguimiento y predicción de situaciones meteorológicas adversas en las oficinas meteorológicas requiere la elaboración de productos numéricos de diagnóstico y pronóstico de las circulaciones atmosféricas de escala sinóptica y mesoescala, productos que

deben ser interpretados, con un razonamiento físico, en base a los conceptos que nos enseña la Meteorología Dinámica (estructura y evolución de las borrascas y anticiclones, corrientes verticales ascendentes inducidas por frentes de temperatura o corriente en chorro, formación de nubes y precipitación, ambientes característicos para el desarrollo de ciclones intensos o sistemas de tormentas, perturbaciones inducidas por la orografía, etc.). Todas esas habilidades podrán ser adquiridas por el estudiante que curse esta asignatura.

### REQUISITOS

No hay requisitos especiales, aunque algunos contenidos de *Física de medios continuos* y *Física computacional* son muy útiles para esta asignatura.

### COMPETENCIAS

La materia a la que pertenece la asignatura de Física de la Atmósfera (Dominios de Aplicación de la Física) tiene el propósito de contribuir a la adquisición de las competencias que se indican a continuación, las cuales forman parte del conjunto de competencias establecidas en el plan de estudios de la titulación en Física:

#### - **Básicas:**

B1: Demostrar poseer y comprender conocimientos en el área de la Física que parte de la base de la educación secundaria general, a un nivel que, si bien se apoya en libros de texto avanzados, incluye también algunos aspectos que implican conocimientos procedentes de la vanguardia de la Física.

B2: Saber aplicar sus conocimientos a su trabajo o vocación de una forma profesional y poseer las competencias que suelen demostrarse por medio de la elaboración y defensa de argumentos y la resolución de problemas de Física.

#### - **Transversales:**

T1: Capacidad de análisis y síntesis.

T4: Capacidad de organizar y planificar.

T8: Motivación por la calidad.

**- Específicas:**

E1: Ser capaz de evaluar claramente los órdenes de magnitud, de desarrollar una clara percepción de las situaciones que son físicamente diferentes, pero que muestran analogías, por lo tanto permitiendo el uso de soluciones conocidas a nuevos problemas.

E2: Comprender lo esencial de un proceso/situación y establecer un modelo de trabajo del mismo; el graduado debería ser capaz de realizar las aproximaciones requeridas con el objeto de reducir el problema hasta un nivel manejable; pensamiento crítico para construir modelos físicos.

E3: Tener una buena comprensión de las teorías físicas más importantes, localizando en su estructura lógica y matemática, su soporte experimental y el fenómeno físico que puede ser descrito a través de ellos.

E4: Saber describir el mundo físico usando las matemáticas, entender y saber usar los modelos matemáticos y las aproximaciones.

E5: Saber comparar críticamente los resultados de un cálculo basado en un modelo físico con los de experimentos u observaciones.

E12: Saber escribir programas con un lenguaje de programación científico, utilizar programas de cálculo simbólico y usar programas para el análisis de datos y la presentación de informes.

Específicamente, las competencias trabajadas se traducirán en los resultados del aprendizaje siguientes:



- Conocer los principales rasgos de la estructura y dinámica atmosférica, especialmente de la troposfera de latitudes medias.
- Saber formular la termodinámica del aire seco y húmedo e identificar las variables físicas conservadas en evoluciones ideales de las partículas de aire.
- Ser capaz de analizar y calcular las propiedades de un sondeo termodinámico y los grados de estabilidad de estratificación.
- Ser capaz de describir matemáticamente el movimiento atmosférico utilizando distintas coordenadas verticales (altura, presión y temperatura potencial) así como sus distintas aproximaciones: viento geostrófico, viento térmico, flujos de balance, etc...
- Saber analizar el movimiento atmosférico a partir de la ecuación de vorticidad, incluyendo los efectos de la fricción turbulenta (Ekman pumping).
- Conocer la formulación de la teoría cuasigeostrófica (ecuación omega, ecuación de la tendencia y vorticidad potencial).
- Dominar la aplicación cualitativa y cuantitativa de la teoría cuasigeostrófica al diagnóstico de los sistemas sinópticos de latitudes medias.
- Saber aplicar diferentes métodos para el diagnóstico de la velocidad vertical en los sistemas meteorológicos de latitudes medias, identificando las ventajas e inconvenientes de cada uno: método cinemático, método de la vorticidad y las distintas formulaciones de la ecuación omega cuasigeostrófica.
- Conocer de manera introductoria la problemática de la predicción numérica del tiempo y saber formular modelos numéricos sencillos: modelos barotrópico y barotrópico equivalente.

## CONTENIDOS

### - *Contenidos temáticos:*

**Tema 1. Termodinámica atmosférica**

- 1.1 Estructura y composición de la atmósfera
- 1.2 Índices de humedad
- 1.3 Termodinámica del aire seco y aire húmedo no saturado
- 1.4 Curvas de equilibrio para las fases del agua
- 1.5 Saturación en la atmósfera
- 1.6 Termodinámica del aire húmedo: procesos pseudoadiabáticos
- 1.7 Estabilidad: el método de la partícula
- 1.8 Diagrama termodinámico oblicuo

**Tema 2. El movimiento atmosférico**

- 2.1 Cinemática del campo de viento
- 2.2 Ecuaciones básicas
- 2.3 Coordenada vertical generalizada: Casos isobárico e isentrópico
- 2.4 Coordenadas naturales: Aplicación a un flujo de balance
- 2.5 Análisis de escala para movimientos de escala sinóptica en latitudes medias
- 2.6 Geostrofia, balance hidrostático y viento térmico
- 2.7 Viento ageostrófico: Componentes isalobárica e inercial-advectiva
- 2.8 Velocidad vertical: Método cinemático y método adiabático
- 2.9 Presión superficial: Ecuación de la tendencia hidrostática

**Tema 3. Vorticidad y Circulación**

- 3.1 Ecuación de vorticidad en coordenadas de altura:  
Vorticidad potencial barotrópica de Rossby
- 3.2 Teoremas de la circulación
- 3.3 Efecto de la fricción turbulenta en la capa fronteriza:  
Perfil de Ekman y “pumping” / “succión”
- 3.4 Ecuación de vorticidad en coordenadas isobáricas
- 3.5 Velocidad vertical: Método de la ecuación de vorticidad
- 3.6 Ecuación de vorticidad en coordenadas isentrópicas:  
Vorticidad potencial baroclina de Ertel

**Tema 4. Teoría Cuasigeostrófica**

- 4.1 Características de la circulación de escala sinóptica en latitudes medias
- 4.2 Aproximación cuasigeostrófica: Ecuaciones de vorticidad y termodinámica
- 4.3 Ecuación de la tendencia cuasigeostrófica: Interpretación matemática y física
- 4.4 Ecuación  $\omega$  cuasigeostrófica: Interpretación matemática y física
- 4.5 Ecuación  $\omega$ : Formulación de Tremberth y del vector Q
- 4.6 Ecuación de la vorticidad potencial cuasigeostrófica: Principios de conservación e invertibilidad
- 4.7 “PV thinking” de los desarrollos sinópticos extratropicales

**Tema 5. Predicción Numérica del Tiempo**

- 5.1 Objetivo y desarrollo histórico
- 5.2 Base física de los modelos filtrados: modelos cuasigeostróficos
- 5.3 Modelo barotrópico
- 5.4 Modelo barotrópico equivalente
- 5.5 Modelo baroclinio multinivel

**- Prácticas numéricas:**

**Práctica 1. Análisis automático de un sondeo observado:**

Estudio de la inestabilidad convectiva y latente

**Práctica 2. Determinación de la velocidad vertical por el método cinemático:**

Ajuste de O'Brien

**Práctica 3. Teoría cuasigeostrófica I:**

Cálculo numérico de vorticidades y advecciones geostroficas

**Práctica 4. Teoría cuasigeostrófica II:**

Resolución de la ecuación  $\omega$  según la formulación de Holton

**Práctica 5. Predicción numérica:**

Modelo barotrópico

## **METODOLOGÍA DOCENTE**

En este apartado se describen las actividades de trabajo presencial y no presencial previstas en la asignatura con el objeto de poder desarrollar y evaluar las competencias establecidas anteriormente.

La asignatura tendrá por una parte un carácter teórico y por otra parte el de aplicación de los conocimientos teóricos mediante la resolución de problemas analíticos o conceptuales y la realización de prácticas numéricas en el laboratorio de informática. El contenido teórico se presentará a través de clases presenciales, siguiendo la bibliografía de referencia, que servirán para fijar los conocimientos ligados a las competencias previstas y dar paso a las clases de problemas, en las que se aplicarán las definiciones y propiedades expuestos en las clases teóricas, de modo que en estas clases prácticas los estudiantes se inicien en las competencias previstas. En estas clases prácticas los estudiantes podrán compartir con sus compañeros y con el profesor las dudas que encuentren y se trabajará sobre problemas o cuestiones previamente asignados a los alumnos. El objetivo de las cinco prácticas es trabajar desde un punto de vista numérico con algunos de los fenómenos y teorías vistos en las clases teóricas e implicarán la programación de un código informático para la obtención de resultados, los cuales deberán ser convenientemente graficados e interpretados.

Finalmente, los estudiantes tendrán que desarrollar por su parte un trabajo personal de estudio y asimilación de la teoría, resolución de los problemas planteados y realización de un informe de las prácticas numéricas para alcanzar las competencias previstas.

De todo ello los estudiantes tendrán que responder, mediante la exposición de los ejercicios propuestos, la elaboración del informe de prácticas y la realización de exámenes parcial y global. La asignatura es susceptible de participar en el proyecto Campus Extens promovido por la UIB, dedicado a la enseñanza flexible y a distancia, que incorpora el uso de la telemática en la enseñanza universitaria, a través de la herramienta Moodle.

### **- Actividades de trabajo presencial:**

| Modalidad             | Nombre                                                         | Descripción                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Clases teóricas       | Clases magistrales                                             | Mediante el método expositivo soportado en transparencias y documentos electrónicos, el profesor establecerá los fundamentos teóricos, así como la ejemplificación práctica de los principios y fundamentos físicos de los temas de la asignatura. Además, se dará información, para cada unidad didáctica, sobre el material que tendrá que utilizar el alumnado para preparar de forma autónoma los contenidos.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Clases prácticas      | Resolución de cuestiones y problemas analíticos o conceptuales | Mediante el método de resolución de ejercicios y cuestiones previamente asignados, el alumno pondrá en práctica los fundamentos teóricos expuestos en las clases de teoría. Se aplicarán los modelos conceptuales teóricos de análisis de las masas de aire e interpretación de la estructura y evolución de los sistemas sinópticos de latitudes medias considerando situaciones meteorológicas ideales. El profesor y los propios compañeros asistirán discutiendo y resolviendo las dudas teórico-prácticas que surjan durante la actividad.                                                                                                                                                                                                 |
| Clases de laboratorio | Realización de prácticas numéricas                             | Realización por parte del alumno de 5 prácticas numéricas en el laboratorio de informática bajo la supervisión del profesor, considerando situaciones meteorológicas ideales y reales. Las prácticas conllevan la elaboración de productos numéricos de diagnóstico y pronóstico de las circulaciones atmosféricas de escala sinóptica y mesoescala y la interpretación de dichos productos con un razonamiento físico en base a los conceptos vistos en teoría. Previamente, el profesor habrá explicado en clase el objetivo, introducción teórica e implementación numérica de cada práctica en base a un guión proporcionado a los alumnos. Los estudiantes elaborarán un informe de los resultados de cada una de las prácticas numéricas. |
| Evaluación            | Examen parcial                                                 | A mitad del semestre el alumno realizará un examen parcial consistente en la resolución de cuestiones teóricas y problemas analíticos o conceptuales. El examen comprenderá aproximadamente la mitad del temario. Esta evaluación continuada permitirá saber si el alumno conoce y sabe aplicar los conocimientos impartidos y permitirá eliminar materia del examen global.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |

|            |               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|------------|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Evaluación | Examen global | Se realizará un examen global correspondiente a la convocatoria oficial, consistente en la resolución de cuestiones teóricas y problemas analíticos o conceptuales. Este examen deberá ser realizado en su totalidad por los alumnos que no hayan realizado o superado el examen parcial. Quien hubiera superado el parcial, tendrá la opción de examinarse únicamente de la segunda mitad del temario. |
|------------|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

**- Actividades de trabajo no presencial:**

| Modalidad                             | Nombre                                   | Descripción                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|---------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Estudio y trabajo autónomo individual | Preparación de las unidades didácticas   | Después de la exposición por parte del profesor de las clases teóricas y ejercicios prototipo, el alumno tendrá que profundizar en la materia desde el punto de vista teórico y práctico. Para facilitar esta tarea, se indicará, para cada una de las unidades didácticas, las páginas correspondientes de las referencias bibliográficas de la materia y se propondrán colecciones específicas de problemas. |
| Estudio y trabajo autónomo individual | Realización de los informes de prácticas | Tras haber realizado las prácticas numéricas los alumnos deberán elaborar un informe científico-técnico de cada una de ellas, sobre el que deberán trabajar de manera autónoma.                                                                                                                                                                                                                                |

**ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE TRABAJO**

En la tabla siguiente se presenta la distribución en horas según las diferentes actividades de trabajo presencial y no presencial (o autónomo) planificado, y su equivalencia en créditos europeos o ECTS (1 crédito ECTS = 25 horas de trabajo del estudiante).

| Modalidad                                | Nombre                                                         | Horas     | ECTS       | %         |
|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------|------------|-----------|
| <b>Actividades de trabajo presencial</b> |                                                                | <b>60</b> | <b>2.4</b> | <b>40</b> |
| Clases teóricas                          | Clases magistrales                                             | 33        | 1.32       | 22        |
| Clases prácticas                         | Resolución de cuestiones y problemas analíticos o conceptuales | 7.5       | 0.3        | 5         |

|                                             |                                          |            |            |            |
|---------------------------------------------|------------------------------------------|------------|------------|------------|
|                                             |                                          |            |            |            |
| Clases de laboratorio                       | Realización de prácticas numéricas       | 15         | 0.6        | 10         |
| Evaluación                                  | Examen parcial                           | 1.5        | 0.06       | 1          |
| Evaluación                                  | Examen global                            | 3          | 0.12       | 2          |
| <b>Actividades de trabajo no presencial</b> |                                          | <b>90</b>  | <b>3.6</b> | <b>60</b>  |
| Estudio y trabajo autónomo individual       | Preparación de las unidades didácticas   | 50         | 2          | 33.3       |
| Estudio y trabajo autónomo individual       | Realización de los informes de prácticas | 40         | 1.6        | 26.7       |
| <b>Total</b>                                |                                          | <b>150</b> | <b>6</b>   | <b>100</b> |

Al inicio del semestre estará a disposición de los estudiantes el cronograma de la asignatura a través de la plataforma UIBdigital. Este cronograma incluirá al menos las fechas en las que se realizarán las pruebas de evaluación continua y las fechas de entrega de los trabajos. Asimismo, el profesor informará a los estudiantes si el plan de trabajo de la asignatura se realizará a través del cronograma o mediante otra vía, incluida la plataforma Campus Extens.

## EVALUACIÓN DEL APRENDIZAJE DEL ESTUDIANTE

Las competencias establecidas en la asignatura serán valoradas mediante la aplicación de una serie de procedimientos de evaluación. En la tabla siguiente se describe, para cada procedimiento de evaluación, los criterios de evaluación y su peso en la calificación de la asignatura. Uno de los procedimientos de evaluación es la presentación oral de la solución a los problemas y cuestiones asignados. Los otros procedimientos son el examen parcial y global en los que los estudiantes tendrán que responder a cuestiones teóricas y resolver problemas analíticos o conceptuales, demostrando las competencias previstas, y la entrega de un informe de las prácticas.

El sistema de calificaciones se expresará mediante calificación numérica entre 0 y 10 para cada actividad evaluativa, la cual será ponderada según su peso a fin de obtener la calificación global de la asignatura. Es muy importante tener en cuenta lo siguiente:

- Además de exigirse que la media ponderada anterior sea igual o mayor que 5, es requisito indispensable para poder superar la asignatura haber obtenido un mínimo de un 4 en cada una de las actividades evaluativas (examen, problemas e informe de prácticas).
- El examen parcial permitirá eliminar materia (únicamente para el examen global de Febrero, no para el de Septiembre) si su calificación es igual o superior a 4, contribuyendo en tal caso a la mitad de la nota del examen global.
- El carácter "no presentado" de la asignatura vendrá dado por la no comparecencia al examen global. La no realización de los otros elementos de evaluación (problemas e informe) será valorada con un 0.
- Es obligatorio realizar todas las prácticas numéricas en el laboratorio.
- Los alumnos "no presentados" o que no hayan superado la asignatura en Febrero podrán hacerlo en Septiembre mediante la repetición obligatoria de las actividades que no hayan alcanzado un 5 en Febrero y tras la aplicación de los mismos criterios anteriores.
- No se acepta la posibilidad de subir nota en Septiembre de actividades ya superadas en Febrero.

| Resolución de cuestiones y problemas analíticos o conceptuales |                                                                                                                                                                                                                            |
|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Modalidad                                                      | Clases prácticas                                                                                                                                                                                                           |
| Técnica                                                        | Pruebas orales ( <b>Recuperable</b> )                                                                                                                                                                                      |
| Descripción                                                    | Mediante el método de resolución de cuestiones y problemas de diferente nivel de dificultad, el alumno pondrá en práctica los fundamentos teóricos expuestos en las clases de teoría. El profesor y los propios compañeros |



#### 4. Objetivo y Guía del Proyecto Docente

|                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                     | asistirán discutiendo y resolviendo las dudas teórico-prácticas que surjan durante la actividad.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Criterios de evaluación             | Mediante el planteamiento de cuestiones y problemas relacionados con la materia expuesta en clase y su resolución en las clases prácticas por parte de los estudiantes, se valorará la adecuación de los procedimientos aplicados para resolver los ejercicios propuestos y la exactitud de los resultados obtenidos, así como la eficacia de la presentación, la claridad de la exposición y el grado de preparación de la materia.                                           |
| Porcentaje de la calificación final | <b>20 %</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Examen parcial</b>               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Modalidad                           | Evaluación                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Técnica                             | Pruebas objetivas <b>(No recuperable)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Descripción                         | A mitad del semestre el alumno realizará un examen parcial consistente en la resolución de cuestiones teóricas y problemas que comprenderá aproximadamente la mitad del temario. Esta evaluación continuada permitirá saber si el alumno conoce y sabe aplicar los conocimientos impartidos y permitirá eliminar materia del examen global.                                                                                                                                    |
| Criterios de evaluación             | Mediante el planteamiento de cuestiones teóricas y problemas relacionados con la materia expuesta en clase y los procedimientos de resolución de las clases prácticas, se valorará el conocimiento teórico del estudiante y su habilidad para aplicar a nivel práctico los fundamentos teóricos y los procedimientos trabajados. Se valorará la adecuación de los procedimientos aplicados para resolver los ejercicios propuestos y la exactitud de los resultados obtenidos. |
| Porcentaje de la calificación final | <b>20 % (si se elimina materia)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>Examen global</b>                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Modalidad                           | Evaluación                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Técnica                             | Pruebas objetivas <b>(Recuperable)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Descripción                         | Se realizará un examen global correspondiente a la convocatoria oficial, consistente en la resolución de cuestiones teóricas y problemas. Este examen deberá ser realizado en su totalidad por los alumnos que no hayan realizado o superado el examen parcial. Quien hubiera superado el                                                                                                                                                                                      |

|                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                 | parcial, tendrá la opción de examinarse únicamente de la segunda mitad del temario.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Criterios de evaluación                         | Mediante el planteamiento de cuestiones teóricas y problemas relacionados con la materia expuesta en clase y los procedimientos de resolución de las clases prácticas, se valorará el conocimiento teórico del estudiante y su habilidad para aplicar a nivel práctico los fundamentos teóricos y los procedimientos trabajados. Se valorará la adecuación de los procedimientos aplicados para resolver los ejercicios propuestos y la exactitud de los resultados obtenidos. |
| Porcentaje de la calificación final             | <b>40 % (20 % si se había eliminado materia)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Realización de los informes de prácticas</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Modalidad                                       | Estudio y trabajo autónomo individual                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Técnica                                         | Informes o memorias de prácticas <b>(Recuperable)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Descripción                                     | Tras haber completado todas las prácticas numérica cada alumno deberá elaborar y entregar un informe detallado de las mismas, sobre el que tendrá que trabajar de manera autónoma. El informe deberá al menos recoger los aspectos sobre los que ha trabajado el estudiante: código informático producido, características de los experimentos, resultados obtenidos e interpretación/discusión de los mismos.                                                                 |
| Criterios de evaluación                         | El estudiante entregará un documento científico-técnico relativo a la realización de las prácticas numéricas. Con este informe se evaluará la habilidad del estudiante para aplicar a nivel práctico los conocimientos adquiridos durante el curso así como la eficacia del formato de presentación, la claridad de ideas y el grado de preparación de la materia.                                                                                                             |
| Porcentaje de la calificación final             | <b>40 %</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |

## RECURSOS, BIBLIOGRAFÍA Y DOCUMENTACIÓN COMPLEMENTARIA

### - Bibliografía básica:

Bluestein, H. B., 1992: *Synoptic-dynamic meteorology in midlatitudes*, Volumen I y Volumen II, Oxford University Press.

Emanuel, K. A., 1994: *Atmospheric convection*, Oxford University Press.

Haltiner, G. J. y R. T. Williams, 1980: *Numerical prediction and dynamic meteorology*, John Wiley & Sons.

Ramis, C., 1996: *Prácticas de meteorología*, Universitat de les Illes Balears.

**- Bibliografía complementaria:**

Carlson, T. N., 1991: *Mid-latitude weather systems*, HarperCollins Academic.

Holton, J. R., 1992: *An introduction to dynamic meteorology*, 3<sup>rd</sup> Edition, Academic Press.

Iribarne, J. V. y W. L. Godson, 1981: *Atmospheric thermodynamics*, 2<sup>nd</sup> Edition, D. Reidel Publishing Company.

**- Otros recursos:**

Colecciones de problemas, guiones de las prácticas numéricas y apuntes de la asignatura, suministrados por el profesor a través de la web.

## Capítulo 5

### ORGANIZACIÓN DE LA ENSEÑANZA

Al ser Física de la Atmósfera una asignatura de 6 créditos ECTS con un 40% de carga presencial (es decir, 60 h) según se ha visto en el capítulo anterior, su desarrollo exige la dedicación de unas 4 horas semanales a las actividades presenciales durante el cuatrimestre en que se imparte, teniendo en cuenta que éste suele comprender unas 15 semanas útiles. La cuantificación en horas de tales actividades aparece en la tabla inferior:

| <b>Actividades de trabajo presencial</b><br>60 h |                                                                       |                                           |                       |                      |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------|----------------------|
| <i>Clases magistrales</i>                        | <i>Resolución de cuestiones y problemas analíticos o conceptuales</i> | <i>Realización de prácticas numéricas</i> | <i>Examen parcial</i> | <i>Examen global</i> |
| 33 h                                             | 7.5 h                                                                 | 15 h                                      | 1.5 h                 | 3 h                  |

En promedio, se dedicarían 2.5 horas semanales a clases magistrales, 0.5 horas a la resolución de cuestiones y problemas analíticos o conceptuales y 1 hora a la explicación y realización de las prácticas numéricas. Por cuestiones logísticas y para un óptimo aprovechamiento del estudiante, sin embargo, las semanas no serían idénticas entre sí, sino que convendría agrupar las clases de problemas en sesiones de 1 h cada dos semanas y abordar las cinco prácticas numéricas en sesiones de 3 h cada dos o tres semanas. Lógicamente, los

exámenes parcial y global programados en esta asignatura deberían realizarse en las fechas y horas designadas por el Consejo de Estudios. En definitiva, cabe contemplar dos tipos de actividades para el desarrollo de la enseñanza de la asignatura: (i) Actividades de aula (tanto el aula tradicional como el aula de informática), donde se desarrollarían las explicaciones del profesor, la resolución de problemas y la realización de las prácticas; y (ii) Otras actividades, casi siempre fuera del ámbito del aula y que podrían incluir seminarios, visitas del grupo a centros profesionales externos, y discusiones sobre situaciones meteorológicas notables. Este último grupo de actividades no se ha contemplado explícitamente en la guía docente presentada y su carga horaria es de difícil cuantificación al depender de las circunstancias y posibilidades de cada curso, pero aún así se ha decidido comentarlas bajo una interpretación flexible de la guía docente.

### 5.1 Actividades de Aula

La explicación de los contenidos teóricos por parte del profesor y su consolidación mediante problemas tipo es una parte fundamental para una acumulación ordenada, consistente y crítica de conocimientos. La secuencia temporal de temas sobre Meteorología que conforman la *explicación en el aula* se especificó en la guía docente de la asignatura y aparece detallada en el capítulo siguiente. Al inicio de cada tema o parte de la asignatura, es oportuno comunicar a los estudiantes la bibliografía que se va a seguir, con el fin de que éstos puedan recurrir a ella en cualquier momento para la aclaración de conceptos o la profundización en aspectos de su interés. En este sentido, no hay que olvidarse de la oportunidad excelente que para los estudiantes suponen las horas de tutoría. En la medida de lo posible, se seguiría un método de explicación basado en documentos electrónicos (PDF o PPT), por la comodidad que ello supone para el alumno y profesor y porque permite una ganancia de tiempo sobre el método clásico de plasmar los desarrollos sobre la pizarra. Dicho material estaría disponible para los estudiantes en la página web de la asignatura, listo para su descarga y posible impresión. En mi opinión, supone una ventaja importante para el alumno disponer directamente del guión de cada tema a través de los apuntes que sigue el profesor, al poder así concentrar mucho más la atención en las explicaciones del mismo, tan necesarias para la correcta interpretación y

complementación de la información resumida en los apuntes. Como docente de la asignatura, este concursante solicitaría una participación activa del estudiante en el transcurso de las explicaciones, lógicamente dentro de unos límites prácticos. Esto significa dar la clase de cara a los alumnos, interaccionando con ellos y provocando su participación a través, por ejemplo, de preguntas hacia la audiencia. Me parece también importante planificar un desarrollo del temario que sea flexible, es decir, que se adapte constantemente a las necesidades reales de los estudiantes. Ya hemos visto en el capítulo tercero las importantes interacciones e incluso ciertas coincidencias que pueden existir entre los contenidos de Física de la Atmósfera y otras asignaturas que puedan estar cursándose, o se hayan cursado, como parte de los estudios de grado. El profesor debe estar al corriente de tales circunstancias, lo cual suele ser inmediato pues por lo general, la docencia de las asignaturas de una misma área se distribuye entre los miembros de un mismo grupo, entre los que casi siempre existe fluida comunicación. Teniendo en cuenta los conocimientos concretos que ya han adquirido los estudiantes por otras fuentes en el momento de atender sus explicaciones, el profesor puede incorporar ciertas variaciones en el programa que le permitan hacer un uso óptimo del siempre escaso tiempo de clase. Asimismo, me parece importante mantener un equilibrio entre los desarrollos puramente matemáticos y la interpretación y discusión física de los conceptos estudiados. Es evidente que fundamentar la asignatura principalmente en su cuerpo matemático resultaría poco útil para el estudiante, y probablemente bastante aburrido. Más bien, soy partidario de reducir al mínimo imprescindible el número de demostraciones matemáticas durante el tiempo de clase, en favor de la discusión física de las hipótesis empleadas y los resultados obtenidos, incorporando para ello ejemplos y esquemas. Las demostraciones no explicadas en tiempo de clase por no ser esenciales quedarían para el propio estudiante como ejercicio durante su trabajo autónomo individual.

Las clases de *problemas* constituyen el marco más usual para el repaso y aplicación de los conceptos explicados en clase. Estas clases se realizarían una vez finalizado cada tema (1 hora cada 2 semanas, aproximadamente), y consistirían en la resolución de ejercicios analíticos o conceptuales por parte del *alumno* bajo la supervisión del profesor. Obviamente, el alumno habría recibido con anterioridad suficiente una copia de los enunciados de los problemas o, preferiblemente, éstos estarían disponibles en la página web de la asignatura. Es

importante confeccionar una colección de problemas realista, en el sentido de poder resolverse los más representativos al ritmo propio del alumno durante el tiempo asignado a esta tarea. Se evitaría, por lo tanto, dejar problemas importantes en el aire. Si la participación principal durante las clases de problemas correspondería al alumno, y así se tendría en cuenta para la evaluación final, considero también muy útil que sea el *profesor* quien durante la explicación del temario vaya dedicando pequeños intervalos de tiempo a la resolución de problemas típicos ilustrativos de los conceptos que se explican, los cuales servirían, además, como modelo para los problemas asignados a los alumnos.

La docencia de Física de la Atmósfera sería incompleta si no abarcara un importante contenido práctico al margen de los propios problemas. Como se mencionó anteriormente, se dedican a esta actividad unas 15 horas del trabajo presencial. Ya se comentó que se pretende realizar cada una de las cinco *prácticas numéricas* programadas en sesiones de 2 horas cada 2-3 semanas, teniendo además en cuenta que el profesor deberá haberla explicado previamente en base a un guión que estaría a disposición de los alumnos en la web. Dichas prácticas se realizarían y discutirían en el aula de informática bajo la supervisión directa del profesor, aunque es evidente que la finalización de las mismas requeriría trabajo adicional del estudiante. Idealmente, una serie de prácticas sobre Meteorología Dinámica comprendería tanto unas prácticas de tipo manual o interpretativo (p.e. transcripción y análisis de un sondeo termodinámico, análisis subjetivo de campos meteorológicos, interpretación de estructuras nubosas a partir de imágenes de satélite, etc.), como unas prácticas de tipo numérico (p.e. cálculo automático de variables termodinámicas, análisis objetivo, formulación numérica de la teoría cuasigeostrófica, predicción numérica del tiempo, etc.). Sin embargo, un enfoque global como ese requeriría, a mi juicio, una extensión anual de la asignatura como mínimo. En base a los requerimientos actuales de la Meteorología Operativa, dominada por la automatización y el uso de productos numéricos tal como se mencionó en el capítulo anterior, he elegido para este proyecto docente enfocar las sesiones de prácticas hacia la programación de distintos algoritmos numéricos que apliquen muchos de los conceptos vistos en clase. En el capítulo siguiente, se incluye la lista de prácticas numéricas que se propone realizar en sincronía con el

desarrollo temporal del temario teórico, las cuales serían lógicamente de carácter obligatorio para los estudiantes.

Finalmente, quisiera recalcar la conveniencia de no centrar las actividades del aula únicamente en un simple despliegue de conceptos y teorías para su acumulación más o menos “ciega” por parte del estudiante. Es importante permitir que éste vea más allá de los conocimientos específicos que está adquiriendo. Debe establecerse en todo momento el contexto de aplicación de las aproximaciones utilizadas, así como contrastarse los resultados obtenidos con la realidad, reconociendo las limitaciones actuales de la Meteorología y repasando los numerosos problemas que quedan aún por resolver. De esta forma, por encima de la formación meramente académica, se estimularía en el estudiante el cultivo de su espíritu crítico y el desarrollo de sus propias inquietudes.

### 5.2 Otras actividades

Al margen de las actividades regulares, se proponen otras posibles acciones cuyo fin es complementar o profundizar sobre los conocimientos específicos del temario de la asignatura. Por una parte, se incluyen los ya mencionados *seminarios*. No es posible prefijar un calendario para éstos ni los temas concretos que abarcarían, aunque en el capítulo siguiente se proponen algunos temas de interés. Se intentaría aprovechar los buenos contactos que tienen los miembros del Grupo de Meteorología con investigadores nacionales o extranjeros con los que se ha colaborado en el pasado, solicitándoles la preparación de algún seminario sobre un tema de su especialidad aprovechando sus estancias en la universidad. Alguno de estos seminarios podría perfectamente formar parte del ciclo de conferencias “Ciencia y Sociedad” que viene organizando la Facultad de Ciencias desde hace varios años. Otros podrían ser parte de eventos científicos o divulgativos ajenos a la propia universidad. Por ejemplo, la celebración del Día Meteorológico Mundial, que tradicionalmente ha incorporado una conferencia inaugural sobre algún tema de actualidad designado por la OMM. En caso de coincidir alguno de los seminarios con las horas lectivas de la asignatura, el contenido de éstos podría muy bien verse reflejado sobre alguna pregunta de examen. Evidentemente, el alumno debería estar al corriente de tal posibilidad.



Propongo también como una actividad muy didáctica una *visita* en grupo a la *Delegación Territorial de la AEMET* en Baleares, aprovechando la buena relación que siempre ha existido entre los profesionales del Centro y los miembros del Grupo de Meteorología. De hecho, ésta es una actividad que ya se ha realizado en cursos anteriores, y permite conocer en vivo las infraestructuras y *modus operandi* de la Meteorología Operativa.

Otra actividad que podría realizarse, la cual pienso que podría despertar un gran interés en los estudiantes, sería la *discusión* en términos de los conceptos aprendidos en clase *de una situación meteorológica* excepcional (p.e. de viento fuerte, convección severa o lluvia intensa) acaecida en las propias Baleares en fechas muy cercanas a la actividad. La discusión sería principalmente de tipo cualitativo, empleándose para ello la gran cantidad de información meteorológica (análisis isobáricos, sondeos, imágenes de satélite y radar, etc.) disponibles en tiempo real a través de la web (se incluyen algunos ejemplos en la bibliografía). Lo más oportuno sería esperar hasta finales del cuatrimestre para escoger una de tales situaciones, con el propósito de realizar un análisis de la situación lo más completo posible. No hace falta indicar que una actividad como ésta es una excelente oportunidad para que el alumno descubra la sorprendente aplicabilidad que tienen las teorías más básicas de la Meteorología Dinámica (p.e. la teoría de la partícula o la teoría cuasigeostrofica) para explicar los fenómenos que día a día ocurren a su alrededor.

Finalmente, se incluirían como otras actividades a tener en cuenta en el proceso de evaluación, la realización de trabajos voluntarios. En concreto, podría proponerse alguna práctica numérica complementaria a las del programa, algún problema que entrañe una dificultad algo superior a lo normal, o incluso algún pequeño trabajo de investigación.

### 5.3 Evaluación

Un proyecto docente debe también incluir unos criterios en los que se base la evaluación final de los alumnos. En la guía docente presentada se ha intentado ser especialmente nítido en la explicación de los mecanismos y

elementos de la evaluación, evitando de esta manera posibles conflictos con los estudiantes ante una interpretación incompleta o interesada de los criterios evaluativos. Se propone por una parte el método tradicional de realizar un examen al final del cuatrimestre, comprendiendo cuestiones sobre desarrollos teóricos y en proporción similar, problemas de aplicación de los conceptos vistos en clase. No estaría permitido el uso de material bibliográfico pero el profesor podría permitir un pequeño formulario. La realización de un examen parcial a mitad de cuatrimestre permitiría eliminar materia de cara a la evaluación global. Por otra parte, el nivel de los conocimientos prácticos se juzgaría a partir de los informes de cada una de las prácticas numéricas realizadas, que cada individuo debería entregar al final del cuatrimestre. Se valoría tanto la ejecución y claridad de las mismas, como la interpretación y discusión de los resultados. El peso sobre la nota final de examen en informes sería el mismo, de un 40% (ver la guía docente). El 20% restante procede de la evaluación continuada de cada uno de los alumnos, la cual es perfectamente factible dado que el número de estudiantes matriculados en las asignaturas optativas es normalmente bajo. Específicamente, se tendría en cuenta el nivel de participación y acierto del alumno en las clases de problemas o en las discusiones sobre los resultados de las prácticas y, por supuesto, la realización por parte de éste de los trabajos voluntarios.

## **Capítulo 6**

### **PROGRAMA DE LA ASIGNATURA**

#### **6.1 Contenidos teóricos**

Los contenidos que se incluyen en la guía docente de la asignatura se han estructurado en 5 grandes temas, que serían cubiertos a razón de unas 2-3 semanas de clase por tema, aproximadamente. Esto significa, de acuerdo con el sistema de organización de la enseñanza que se detalló en el capítulo anterior, una dedicación a cada tema de unas 6-7 horas para las explicaciones y problemas del profesor, y 1.5 horas para la resolución de problemas por parte de los alumnos. Se ha intentado incluir una cantidad de material que no excesiva, con el objeto de posibilitar su explicación en ese número de horas de clase con el rigor deseable y a pesar de estar sacrificando aspectos importantes de Meteorología Dinámica de Latitudes Medias (p.e. el estudio de ondas, inestabilidades, frontogénesis y muchas circulaciones de mesoescala). Es preferible, a mi juicio, dedicarse en profundidad a unos pocos temas que plantearse abarcar, de un modo inevitablemente superficial, un gran número de ellos. La primera opción me parece la única capaz de garantizar la adquisición de unos fundamentos sólidos. Aquellos temas importantes para un futuro profesional específico o para un perfil investigador que no hayan sido explicados en el grado, podrán ser cubiertos en el máster posterior (ver capítulo próximo).

A continuación se especifican los contenidos de cada uno de los 5 temas, que como podrá observarse, no son independientes. Es decir, cada uno de ellos utiliza muchos de los conceptos vistos en temas o secciones anteriores, y por consiguiente, es clave respetar el orden temporal del temario propuesto. Se incluye, como información adicional, una breve descripción de cada uno de los temas y la bibliografía principal que se seguirá:

### ***Tema 1. Termodinámica atmosférica***

- 1.1 Estructura y composición de la atmósfera
- 1.2 Índices de humedad
- 1.3 Termodinámica del aire seco y aire húmedo no saturado
- 1.4 Curvas de equilibrio para las fases del agua
- 1.5 Saturación en la atmósfera
- 1.6 Termodinámica del aire húmedo: procesos pseudoadiabáticos
- 1.7 Estabilidad: el método de la partícula
- 1.8 Diagrama termodinámico oblicuo

Bibliografía: Emanuel (1994), Iribarne y Godson (1981).

Se comienza con algunos apuntes sobre la estructura y composición de la atmósfera, con especial énfasis sobre el gran papel del vapor de agua en los procesos radiativos, formación de nubes, e intercambios de energía con los océanos. En el apartado 1.2 se definen las principales variables para la cuantificación del contenido de vapor de agua: proporción de mezcla, humedad específica, presión de vapor y humedad relativa. En 1.3 se aplica la primera ley de la termodinámica para formular las evoluciones adiabáticas del aire seco, apareciendo conceptos como la temperatura potencial y su conservación. También se incorporan los efectos del vapor de agua pero para evoluciones que no alcanzan la saturación (concepto de temperatura potencial virtual, etc). En 1.4 se discuten las curvas de equilibrio entre las diferentes fases del agua, se presenta la ecuación de Clausius-Clapeyron para el equilibrio vapor-líquido y a partir de ella se deducen expresiones aproximadas para la presión de vapor saturante (p.e. fórmula de Tetens). En el apartado 1.5 se explican los procesos básicos conducentes a saturación en la atmósfera: enfriamiento diabático a presión constante, enfriamiento y humidificación por evaporación, saturación

por mezcla isobárica, y el más importante, enfriamiento por expansión adiabática por ascenso (en este tema aparecerían conceptos como el punto de rocío o el nivel de condensación por elevación). La evolución por movimiento vertical de partículas húmedas en régimen de saturación es el objeto de estudio del apartado 1.6. Se empieza por comparar la evolución adiabática seca con la húmeda, derivando para ello los coeficientes de enfriamiento adiabático para el aire seco y húmedo, respectivamente. A continuación se considera la aproximación pseudoadiabática y se derivan e interpretan variables termodinámicas que se conservan para esos procesos, como la temperatura potencial equivalente y la temperatura potencial del termómetro húmedo. El importante tema de estabilidad al movimiento vertical se estudia en la sección 1.7. En primer lugar se caracteriza la estabilidad bajo desplazamientos infinitesimales de una partícula húmeda no saturada y de una partícula saturada en el seno de una nube, a través de la correspondientes frecuencias de Brunt-Väisälä. A partir de éstas, se definen los criterios para estratificación estable, inestable y neutra. A continuación se estudia, utilizando el método de la partícula, la estabilidad de atmósferas no saturadas bajo desplazamientos de amplitud finita que dan lugar a nubes. Se estudia la inestabilidad latente o condicional y la inestabilidad potencial o convectiva, apareciendo términos tales como el nivel de convección libre, nivel de equilibrio, nivel de cima de la nube, energía potencial convectiva disponible (CAPE) y energía de inhibición convectiva. Por supuesto, es preferible ilustrar la mayoría de los conceptos anteriores mediante un uso gráfico de diagramas termodinámicos, para lo que se considera el de tipo oblicuo (apartado 1.8).

## ***Tema 2. El movimiento atmosférico***

- 2.1 Cinemática del campo de viento
- 2.2 Ecuaciones básicas
- 2.3 Coordenada vertical generalizada: Casos isobárico e isentrópico
- 2.4 Coordenadas naturales: Aplicación a un flujo de balance
- 2.5 Análisis de escala para movimientos de escala sinóptica en latitudes medias
- 2.6 Geostrofia, balance hidrostático y viento térmico
- 2.7 Viento ageostrófico: Componentes isalobárica e inercial-advectiva
- 2.8 Velocidad vertical: Método cinemático y método adiabático
- 2.9 Presión superficial: Ecuación de la tendencia hidrostática

Bibliografía: Bluestein Vol. I (1992), Holton (1992)

Previamente a la manipulación de las ecuaciones de gobierno del movimiento atmosférico, en el primer apartado de este tema se estudian los atributos cinemáticos del campo de velocidad. Se empieza por considerar una descomposición lineal del campo de viento, lo cual da lugar a las contribuciones por traslación, divergencia, vorticidad y deformación, las cuales se interpretan. Después se repasan los conceptos de trayectoria y línea de corriente. En el apartado 2.2 se recuperan las leyes de conservación para la atmósfera en coordenadas  $(x,y,z,t)$ , ya introducidas en *Física de Medios Continuos*: ecuaciones del movimiento para un sistema de referencia en rotación, ecuación de continuidad y ecuación termodinámica, ligadas éstas por la ecuación de estado. Resulta también conveniente extender su expresión a coordenadas esféricas y a las coordenadas en el plano bajo una proyección terrestre, por ser éstas las maneras en que se implementan las ecuaciones básicas en los modelos numéricos para fenómenos reales. Algunas aplicaciones elementales, como por ejemplo la ecuación hipsométrica, se explicarían también en este apartado. En 2.3 las ecuaciones de gobierno se escriben para una coordenada vertical generalizada, estudiándose los casos isobárico e isentrópico, para los que aparecen los conceptos de geopotencial y función de Montgomery, respectivamente. Se resaltarían las ventajas e inconvenientes de cada una de las dos formulaciones. En el apartado 2.4 se aplican las ecuaciones del movimiento, expresadas en coordenadas naturales, al estudio de movimientos elementales de balance: flujo geostrófico, flujo inercial, flujo ciclostrófico y flujo de gradiente. En 2.5 se explica el método de análisis de escala de las ecuaciones, aplicándose para los sistemas de escala sinóptica de latitudes medias, para los que el número de Rossby es sensiblemente menor que uno y los cuales son parte fundamental de estudio en la asignatura. El balance geostrófico e hidrostático que se deriva de tal análisis se analiza en detalle en el apartado 2.6, así como el concepto ligado de viento térmico. Se establecen aquí las diferencias entre los estados barotrópico y baroclino de la atmósfera. El papel del viento ageostrófico se estudia en 2.7 mediante la descomposición del viento en sus componentes geostrófica y ageostrófica, y sustituyendo en las ecuaciones del movimiento. Aparecen así conceptos como el viento isalobárico y el viento inercial-advectivo. La relación entre velocidad vertical en coordenadas de altura e isobáricas y su magnitud para

la escala sinóptica se explican en 2.8. También se detallan los métodos cinemático y adiabático para su determinación, así como las limitaciones de éstos. Análogamente, en el apartado 2.9 se deriva la ecuación de tendencia de la presión hidrostática, la cual sirve para interpretar el comportamiento de los sistemas de presión de escala sinóptica a pesar de las limitaciones prácticas de su aplicación.

**Tema 3. Vorticidad y Circulación**

- 3.1 Ecuación de vorticidad en coordenadas de altura:  
Vorticidad potencial barotrópica de Rossby
- 3.2 Teoremas de la circulación
- 3.3 Efecto de la fricción turbulenta en la capa fronteriza:  
Perfil de Ekman y “pumping” / “succión”
- 3.4 Ecuación de vorticidad en coordenadas isobáricas
- 3.5 Velocidad vertical: Método de la ecuación de vorticidad
- 3.6 Ecuación de vorticidad en coordenadas isentrópicas:  
Vorticidad potencial baroclina de Ertel

Bibliografía: Bluestein Vol. I (1992), Holton (1992)

En el apartado 3.1 se deriva la ecuación de vorticidad (componente vertical) en coordenadas de altura, tanto en términos de la vorticidad absoluta como de la relativa. En ella aparecen los importantes términos solenoidal, de divergencia, de “tilting” y el debido a la fricción, los cuales se interpretan. Se particulariza la aplicación de la ecuación de vorticidad para los sistemas de escala sinóptica de tipo barotrópico, resultando así la ecuación de vorticidad barotrópica, o si se acepta velocidad vertical, la menos restrictiva ecuación de conservación de la vorticidad potencial de Rossby, la cual permite interpretar el efecto de la orografía sobre la circulación atmosférica de gran escala. En el apartado 3.2 se explica la relación entre circulación y vorticidad y se derivan los teoremas de circulación de Bjerknes y Kelvin. El efecto de la fricción en la capa fronteriza sobre la vorticidad en la atmósfera libre se estudia en el apartado 3.3. En primer lugar, se deriva la distribución vertical de viento en la capa fronteriza según un perfil de Ekman, después de haber introducido la simple teoría K para la representación de los flujos turbulentos de momento. A continuación, se

incorpora en la ecuación de vorticidad el efecto de la convergencia (divergencia) en la capa fronteriza de Ekman en áreas de baja (alta) presión, demostrándose que de esta forma se obtiene un tiempo característico para el decaimiento de los sistemas de escala sinóptica mucho más realista que sin incorporar la fricción turbulenta. De hecho, es posible encontrar una solución analítica a este problema para el caso barotrópico. Los mismos conceptos explicados en el apartado 3.1, se derivan en 3.4 para un sistema de coordenadas de presión, comprobándose, por ejemplo, como desaparece de la ecuación de vorticidad el término solenoidal. En 3.5 se explica como podrían emplearse versiones simplificadas de la ecuación de vorticidad para determinar, no sin dificultades, la velocidad vertical a partir de análisis continuos de viento y vorticidad (método de la ecuación de vorticidad). Finalmente, en 3.6 se deriva la ecuación de vorticidad para coordenadas isentrópicas. Combinándola con la ecuación de continuidad, se llega a una ecuación para la tendencia de la vorticidad potencial de Ertel. Se discute el importante principio de conservación de la vorticidad potencial para un movimiento adiabático y libre de fricción.

**Tema 4. Teoría Cuasigeostrófica**

- 4.1 Características de la circulación de escala sinóptica en latitudes medias
- 4.2 Aproximación cuasigeostrófica: Ecuaciones de vorticidad y termodinámica
- 4.3 Ecuación de la tendencia cuasigeostrófica: Interpretación matemática y física
- 4.4 Ecuación  $\omega$  cuasigeostrófica: Interpretación matemática y física
- 4.5 Ecuación  $\omega$ : Formulación de Tremberth y del vector Q
- 4.6 Ecuación de la vorticidad potencial cuasigeostrófica: Principios de conservación e invertibilidad
- 4.7 “PV thinking” de los desarrollos sinópticos extratropicales

Bibliografía: Bluestein Vols I y II (1994), Carlson (1991)

Se empieza por una descripción cualitativa de los sistemas baroclinos de latitudes medias: frente polar y jet stream; zonas preferentes para la ciclogénesis y su movimiento; influencia de la orografía y las corrientes oceánicas; fases en el



desarrollo de los ciclones; estructura vertical de las ondas baroclinas; frentes, jet streaks y organización nubosa asociada; concepto de inestabilidad baroclina, etc. En 4.2 se presenta la aproximación cuasigeostrófica, basada en el análisis de escala para el movimiento de escala sinóptica. Surgen así las ecuaciones cuasigeostróficas de vorticidad y termodinámica, base para la derivación de una ecuación de pronóstico del geopotencial (ecuación de la tendencia; apartado 4.3), y de una ecuación de diagnóstico para la velocidad vertical (ecuación  $\omega$ ; apartado 4.4). A partir de estas ecuaciones es posible interpretar de un modo relativamente simple la estructura y evolución de los sistemas sinópticos. Se consideran los distintos términos del forzamiento cuasigeostrófico por separado (relacionados éstos con la advección térmica y la advección de vorticidad), y por razonamientos matemáticos, puede estudiarse cual ha de ser su efecto sobre la tendencia y la velocidad vertical. La interpretación puede ser también estrictamente física, es decir, en términos del mantenimiento de los balances geostrófico e hidrostático (esto es, de la relación del viento térmico), inherentes ambos a las circulaciones de escala sinóptica. También es posible interpretar de modo cualitativo cual sería el efecto de la estabilidad, de fuentes diabáticas de calor (p.e. liberación de calor latente por condensación o calentamiento desde la superficie), e incluso de la fricción. En el apartado 4.5 se derivan formulaciones alternativas a la ecuación  $\omega$  clásica (a la que podemos referirnos como en su formulación de Holton). En particular, se considera la formulación alternativa de Tremberth, para la que el forzamiento dominante se escribe en función de la advección de vorticidad geostrófica por el viento térmico, y la formulación del vector  $Q$ , conceptualmente muy elegante. Es preciso, de nuevo, interpretar el significado físico de tales ecuaciones así como ensayar de un modo cualitativo su aplicación a distintas configuraciones de la circulación. Partiendo de nuevo de las ecuaciones cuasigeostróficas de vorticidad y termodinámica, en el apartado 4.6 se deriva una ecuación para la vorticidad potencial cuasigeostrófica. Se resalta su papel de trazador del flujo geostrófico para una atmósfera adiabática y sin fricción (principio de conservación), así como la posibilidad de recuperar el campo de geopotencial a partir de una distribución de vorticidad potencial cuasigeostrófica cuya evolución en el tiempo puede predecirse (principio de invertibilidad). Se caracterizarían, de esta forma, las anomalías positivas de vorticidad potencial (asociadas a circulación ciclónica y estabilidad aumentada al nivel de la anomalía), y las anomalías negativas (circulación anticiclónica y estabilidad reducida). Ello permite explicar los desarrollos baroclinos a partir de

la interacción de distintas anomalías de vorticidad potencial. Es el llamado “PV thinking”, el cual se ilustra mediante esquemas gráficos en el apartado 4.7.

**Tema 5. Predicción Numérica del Tiempo**

- 5.1 Objetivo y desarrollo histórico
- 5.2 Base física de los modelos filtrados: modelos cuasigeostróficos
- 5.3 Modelo barotrópico
- 5.4 Modelo barotrópico equivalente
- 5.5 Modelo baroclinio multinivel

Bibliografía: Haltiner y Williams (1980), Holton (1992)

Se comienza con una introducción al problema de la predicción numérica del tiempo, repasando la evolución que ha sufrido esta materia a lo largo del siglo pasado en función del crecimiento de las redes de observación, disponibilidad de una potencia de cálculo cada vez mayor, y un conocimiento creciente sobre técnicas numéricas y los procesos físicos de la atmósfera. Tras ello, el apartado 5.2 se concentra en presentar los primeros modelos que se utilizaron, los llamados modelos filtrados, diseñados para la escala sinóptica y en los cuales se filtran como posibles soluciones las ondas rápidas, permitiéndose de esta forma pasos de tiempo elevados y el empleo de esquemas numéricos sencillos. Se estudian únicamente tres modelos cuasigeostróficos (barotrópico, barotrópico equivalente y baroclinio multinivel) en perfecta conexión con los contenidos teóricos de los temas anteriores. Se explica tanto su base física y formulación, como la estrategia numérica para su resolución, aunque esto último puede también quedar para las jornadas de prácticas.

## 6.2 Prácticas

Como se indicó en el capítulo anterior, se propone realizar 5 trabajos prácticos consistentes en implementar numéricamente algunos de los conceptos explicados en los temas anteriores. La organización de la asignatura contempla una dedicación de 3 horas en el aula de informática a cada una de las prácticas, de realización individual, las cuales deberían lógicamente concluirse mediante el

trabajo autónomo de los alumnos. Los informes a presentar a final de cuatrimestre deberían estructurarse en una presentación de los fundamentos teóricos de los ejercicios prácticos, la inclusión del programa informático desarrollado, ilustración gráfica de los resultados, y discusión física de éstos, estableciendo su relación con los conceptos vistos en clase cuando ello fuera pertinente. El desarrollo de las prácticas sigue el orden temporal que se estableció en la sección anterior para las explicaciones teóricas, con lo cual se aseguraría un paralelismo entre créditos teóricos y prácticos de la asignatura. A continuación se especifican las 5 prácticas del programa, además de una adicional que tendría carácter voluntario. Las prácticas 1, 2, 3 y 4 se han tomado de Ramis (1996), con la salvedad de que en ese libro la práctica 1 está concebida como un ejercicio de tipo manual, no numérico. Las prácticas 5 y voluntaria son de elaboración propia del concursante, como parte de la impartición de la asignatura durante los últimos años:

***Práctica 1. Análisis automático de un sondeo observado:***

*Estudio de la inestabilidad convectiva y latente*

A partir de un sondeo de tipo convectivo tomado en la estación de radiosondeos de Palma, se calcularían una serie de parámetros termodinámicos siguiendo la formulación vista en el Tema 1. Por ejemplo, los distintos índices de humedad, agua precipitable, frecuencia de Brunt-Väisälä, temperatura potencial, temperatura potencial equivalente y del termómetro húmedo, y para una evolución pseudoadiabática de una partícula de superficie, se calcularía la CAPE, la energía inhibidora de la convección, y los niveles de condensación, convección libre, equilibrio y cima de la nube. Se representarían gráficamente todos estos parámetros, discutiéndose la estabilidad seca de estratificación y las inestabilidades convectiva y latente. En principio, se utilizaría un diagrama de representación ( $\log P, T$ ) por su sencillez, aunque este concursante dispone de las subrutinas necesarias para realizar una representación según un diagrama de tipo oblicuo.

***Práctica 2. Determinación de la velocidad vertical por el método cinemático:***

*Ajuste de O'Brien*

A partir de los perfiles de viento observados por tres sondeos dispuestos en forma de triángulo, se aplicaría el método cinemático (basado en la evaluación de la divergencia y la integración de la ecuación de continuidad), a fin de calcular el perfil de velocidad vertical. Para el cálculo del perfil de divergencia se aplicaría el método de Bellamy, y para la integración de la ecuación de continuidad se emplearía el ajuste de O'Brien. Los cálculos y representación gráfica de los resultados se harían para dos tríos distintos de sondeo (p.e. Palma, Madrid y Nimes; y Palma, Nimes y Cagliari) que comprendieran áreas con condiciones sinópticas diferentes (subsistencia y ascenso marcados, por ejemplo). Los resultados podrían contrastarse con la información de nubosidad suministrada por imágenes de satélite.

### ***Práctica 3. Teoría cuasigeostrófica I:***

#### *Cálculo numérico de vorticidades y advecciones geostróficas*

Los elementos de la teoría cuasigeostrófica se llevarían a la práctica para una situación meteorológica analítica (p.e. las funciones de Lai, incluidas en Ramis (1996)) y para una situación real seleccionada por este concursante. En esta primera aplicación de la teoría cuasigeostrófica se evaluarían por diferencias finitas, en los niveles troposféricos de 300, 500 y 700 hPa, la vorticidad geostrófica y las advecciones geostróficas de vorticidad y temperatura. Dichos campos se representarían gráficamente para cada nivel junto al campo de geopotencial y temperatura (o espesor), y con esos elementos se discutiría la estructura de la onda baroclina.

### ***Práctica 4. Teoría cuasigeostrófica II:***

#### *Resolución de la ecuación $\omega$ según la formulación de Holton*

Como continuación del ejercicio anterior, en esta práctica se calcularían de modo numérico los dos términos del forzamiento cuasigeostrófico para la velocidad vertical según la formulación de Holton: el término ligado a la advección diferencial de vorticidad, y el término ligado a la advección de temperatura. Éstos se representarían gráficamente y a partir de su estructura se

deduciría, de un modo cualitativo, las características del campo asociado de velocidad vertical. Este último se calcularía numéricamente a partir de la resolución por diferencias finitas de la ecuación  $\omega$ , y se representaría gráficamente para así completar el diagnóstico de la situación. En caso de trabajarse con la situación meteorológica real, los resultados obtenidos mediante la formulación cuasigeostrófica podrían muy bien compararse con los obtenidos por el método cinemático en la práctica 2 (lógicamente, deberían haberse tomado en esta última sondeos del mismo día).

**Práctica 5. Predicción numérica I:**

*Modelo barotrópico*

Este ejercicio consiste en programar el modelo barotrópico cuasigeostrófico y correrlo para las situaciones meteorológicas analítica y observada que se consideraron en las dos prácticas anteriores. Se haría una predicción de 2-4 días para la onda de geopotencial a 500 hPa, pudiéndose también considerar los niveles de 300 y 700 hPa (que poseen un flujo básico más y menos intenso que a 500 hPa, respectivamente) con el objeto de comparar la velocidad de propagación de las anomalías de geopotencial. Los resultados de la predicción se representarían gráficamente y se analizarían en términos de la conservación de la vorticidad absoluta, y para el caso real, podrían además compararse con los análisis observados de geopotencial, disponibles cada 6 horas, comprobándose así la bondad de un simple modelo barotrópico para describir la evolución de la circulación sinóptica en la troposfera media.

**Práctica voluntaria. Predicción numérica II:**

*Modelo barotrópico equivalente*

Como una sofisticación del ejercicio anterior, en esta práctica voluntaria se repetirían las predicciones a 500 hPa con el modelo de balance cuasigeostrófico barotrópico equivalente. Además de la evolución del campo de geopotencial, se diagnosticaría el campo de velocidad vertical asociado. Ello permitiría constatar la relación existente entre ascensos y descensos de escala sinóptica y la advección diferencial de vorticidad geostrófica en la vertical. Puede

además incorporarse, en este modelo, el efecto de la orografía a través de la condición de contorno inferior para la velocidad vertical. Así pues, para el caso analítico se diseñarían simulaciones consistentes en incorporar en el dominio una cadena montañosa, pudiéndose a partir de los resultados estudiar el efecto orográfico sobre la circulación (p.e. ciclogénesis a sotavento).

### 6.3 Seminarios

Por la naturaleza de esta actividad no es posible fijar, a priori, los títulos de los seminarios que sería factible realizar en cada curso académico. Sin embargo, me he permitido incluir a continuación una pequeña lista de posibles seminarios relacionados con el temario de la asignatura que considero interesantes para la formación de los alumnos, y que en algunos casos se basan en temas de máxima actualidad:

- *Sistemas de observación meteorológica*
- *¿Cómo funciona la Meteorología Operativa?*
- *Meteorología mediterránea: Particularidades de las Islas Baleares*
- *Riesgos de origen meteorológico y climático*
- *Ciclogénesis mediterránea y lluvias intensas*
- *Tempestades de las latitudes medias: Ciclogénesis explosiva*
- *Organización de la convección y su relación con el tiempo severo*
- *El efecto de la orografía sobre las circulaciones atmosféricas*
- *Tiempo vs Clima: Predicción del tiempo y Simulaciones climáticas*
- *Predicción probabilística vs Predicción determinista: Predicción por conjuntos*

## **Capítulo 7**

# **CONTINUIDAD EN EL MÁSTER Y DOCTORADO DE LA UIB**

### **7.1 Máster universitario en Física**

Los estudios oficiales de postgrado de la UIB comprenden las enseñanzas conducentes al título de máster o de doctor. Por definición, los másters son las enseñanzas dedicadas a la formación avanzada y tienen como finalidad la especialización del estudiante en su formación académica, profesional o investigadora. El Real Decreto 1393/2007 de 29 de octubre regula los estudios de postgrado en el marco de la adaptación al espacio europeo de educación superior (EEES). En la UIB, corresponde al Centro de Estudios de postgrado (CEP) la misión de centralizar y coordinar la oferta formativa de los estudios de este tipo y su gestión académica. El Máster Universitario en Física es uno de los nueve másters actualmente ofertados en nuestra universidad en la rama de Ciencias. El perfil más apropiado para cursarlo es el de licenciado en Ciencias en alguna de las todavía existentes licenciaturas, graduado en alguna rama de Ciencias con 240 créditos (como es el caso del Grado en Física), Ingeniero o Arquitecto. No obstante, de conformidad con el artículo 16 y disposición adicional cuarta del RD 1393/2007, también podrán acceder los Ingenieros y Arquitectos Técnicos, los diplomados actuales y los graduados con 180 créditos. En este caso, los perfiles más adecuados son los procedentes de ramas técnicas.

El objetivo académico prioritario del Máster en Física es permitir a los estudiantes iniciar con una base interdisciplinaria sólida su doctorado en un Departamento con acreditada tradición académica e investigadora. Las asignaturas actuales de la titulación de Máster son una adaptación de los cursos del programa de Doctorado del Departamento de Física, que cuenta con la mención de calidad de la ANECA. Al margen de su papel iniciador al mundo de la investigación (aspecto tratado en la sección 7.3), el Máster es también una pieza importante desde el punto de vista puramente profesional: los grandes cambios y avances experimentados en todas las áreas de la Física hacen cada vez más imprescindible la incorporación a las empresas de titulados con un grado superior de conocimiento al típicamente asociado al Grado y con las habilidades necesarias para afrontar y resolver problemas. Esta necesidad es todavía más patente en las empresas con Departamentos de I+D+i. Así, los conocimientos interdisciplinarios y las habilidades adquiridos en la titulación de Máster universitario en Física encuentran su aplicación en los siguientes ámbitos, entre otros: empresas de informática, electrónica y telecomunicaciones; empresas financieras; empresas del sector energético y medioambiental; empresas farmacéuticas y del ámbito de la salud.

La oferta formativa del Máster está estructurada en 23 materias distribuidas en 7 módulos de diferente temática general. En cada módulo hay una asignatura de nivel introductorio, la cual ofrece una visión general de la temática del módulo. Todas las materias son optativas y de 5 ECTS, exceptuando el trabajo de fin de máster, que es obligatorio y al que corresponden 20 ECTS. Los alumnos que deben cursar 60 créditos para la obtención del máster, como sería el caso de los egresados del Grado en Física de la UIB, en el año académico tienen que matricularse del Trabajo de fin de Máster y de 40 créditos de materias optativas a elegir bajo la supervisión del tutor (es decir, 8 asignaturas), de los cuales sólo 10 podrán pertenecer a asignaturas introductorias. A continuación se indican las asignaturas correspondientes a cada módulo, la primera de las cuales es de tipo introductorio. Se han señalado aquellas que guardan mayor relación, en mi opinión, con los conocimientos o actividades propias de Física de la Atmósfera, y para las que incluyo una breve descripción de su programa:



## MÓDULO DE FÍSICA Y COMPUTACIÓN

- **Herramientas de computación en Física:**

- Computación algebraica
- Physlets@: applets de física
- LaTeX: el editor de la ciencia
- Visualización de datos científicos

- **Simulación y análisis de datos en dinámica de fluidos:**

- *Parte 1: Simulación mediante volúmenes finitos*

- Introducción. Fenómenos de transporte y de propagación de ondas y su formulación en dinámica de fluidos. Leyes de conservación e hiperbolicidad de sistemas lineales y no lineales
- Introducción, manejo y aplicaciones del software “conservation-laws package” (CLAWPACK)
- Ecuaciones lineales: Características y problemas de Riemann; métodos de volúmenes finitos y métodos de alta resolución; el problema de las condiciones de contorno; convergencia, precisión y estabilidad; ecuaciones lineales con coeficientes variables; ejercicios prácticos con CLAWPACK
- Ecuaciones no lineales: Leyes de conservación escalares no lineales y métodos de volúmenes finitos asociados; sistemas de leyes de conservación no lineales y métodos de volúmenes finitos asociados; tratamiento de los términos fuente; ejercicios prácticos con CLAWPACK
- Problemas multidimensionales: Ecuaciones escalares y sistemas de ecuaciones; hiperbolicidad; métodos numéricos multidimensionales; implementación de métodos multidimensionales en CLAWPACK.

- *Parte 2: Análisis de series temporales*

- Introducción. Conceptos generales. Dominio temporal y de frecuencias
- Análisis armónico. Aplicación al cálculo de las componentes de marea
- Análisis de Fourier. El periodograma
- Análisis espectral. Resolución y fiabilidad. Aplicación al cálculo de series escalares y vectoriales
- Filtros
- Espectros cruzados. Función de Transferencia
- Wavelets

- **Métodos estocásticos de simulación:**

- Conceptos de probabilidad: Variables aleatorias. Sucesiones de variables aleatorias. Ley de los grandes números. Probabilidad condicionada
- Introducción a métodos Montecarlo de integración: Método de aciertos y fallos. Métodos de muestreo. Técnicas de reducción de la varianza. Estimadores sesgados y no sesgados
- Generación de números aleatorios uniformes en  $(0,1)$ . Números aleatorios y pseudoaleatorios. Generadores de congruencias. Generadores "shift-back-register". Verificación de los números aleatorios
- Números aleatorios con otras funciones densidad de probabilidad:. Cambio y composición de variables. Distribución gaussiana. Inversión numérica. Métodos de rechazo
- Métodos Dinámicos: Introducción. Sucesiones de Markov. Probabilidad estacionaria de sistemas dinámicos. Algoritmo de Metrópolis. Baño térmico. Errores Estadísticos. Termalización
- Métodos de aceleración: Algoritmos de *clusters* y técnicas de extrapolación
- Dinámica molecular. Integración numérica de las ecuaciones del movimiento. Reversibilidad temporal y propiedades principales de los algoritmos simplécticos
- Introducción a las ecuaciones diferenciales estocásticas. Ecuación de Langevin. Propiedades matemáticas del ruido blanco gaussiano. Dinámica determinista frente a dinámica estocástica
- Resolución numérica: método de Heun y métodos de Runge-Kutta. Ruido de color. Método Monte-Carlo híbrido y aceleración gaussiana
- Aplicaciones

- **Computación distribuida y tratamiento masivo de datos:**

- Sistemas distribuidos: Principios básicos. Infraestructura (Java, RMI, CORBA). Internet y servicios de red
- Supercomputación: Computación en paralelo MPI y GRID. Computación cooperativa

- Tratamiento masivo de datos experimentales: Filtrado de datos según patrones. Perfiles de ondas gravitacionales. Búsqueda de estructuras en el espacio de frecuencias. Técnicas de tratamiento de imágenes

#### MÓDULO DE ASTROFÍSICA Y RELATIVIDAD

- *Introducción a la Astrofísica y a la Cosmología*
- *Astrofísica del Plasma*
- *Relatividad general: Ondas de gravitación y modelos cosmológicos*

#### MÓDULO DE FÍSICA DE MATERIALES

- *Materiales y sus aplicaciones tecnológicas*
- *Materiales metálicos: Propiedades y transformaciones de fase*
- *Técnicas experimentales de caracterización de materiales*

#### MÓDULO DE FÍSICA ESTADÍSTICA Y NO LINEAL

- ***Introducción a la física estadística y no lineal:***
  - Descripción estadística de los sistemas de muchos cuerpos
  - Fluctuaciones, roturas de simetría y fenómenos cooperativos
  - Fenómenos no lineales
  - Caos
  - Fractales
  - Formas y patrones en sistemas físicos, químicos y biológicos
- ***Sistemas dinámicos no lineales y complejidad espacio temporal:***
  - Aplicaciones discretas unidimensionales: universalidad, dimensión fractal

- Sistemas diferenciales disipativos: atractores extraños y rutas al caos
- Medidas del caos y complejidad
- Medios excitables
- Dinámica de láseres: inyección óptica y retroalimentación
- Sincronización de láseres pulsantes y caóticos: aplicaciones
- Estructuras espaciotemporales en fluidos, reacciones químicas y sistemas ópticos
- La estrategia de las ecuaciones de amplitud. Dinámica de fases. Inestabilidades secundarias

- *Fenómenos cooperativos y fenómenos críticos: Aplicaciones*

- *Fenómenos no lineales en biología*

#### MÓDULO DE FLUIDOS GEOFÍSICOS

- ***Meteorología y oceanografía física descriptivas:***

- Escalas temporales y espaciales en fluidos geofísicos. Escalado de las ecuaciones del movimiento. Principales números adimensionales
- Características climáticas del Mediterráneo occidental
- Ciclogénesis mediterránea y lluvias intensas: Situaciones meteorológicas desencadenantes
- Sistemas convectivos de mesoescala: Observación remota (radar y satélite)
- Dinámica marina: descripción de los fenómenos dominantes en el Mediterráneo a diferentes escalas espaciales y temporales. Instrumentos de medida. Sensores remotos
- Corrientes inducidas por diferencias de densidad: ajuste geostrófico en frentes y remolinos. Ejemplos: los giros anticiclónicos del Mar de Alborán y los frentes de talud de la costa peninsular y balear
- Corrientes inducidas por viento: los grandes giros oceánicos y los afloramientos costeros. Ejemplo: el afloramiento de Málaga
- Circulación termohalina: formación de agua profunda y su importancia a escala planetaria. Ejemplo: formación de agua profunda en el Golfo de León

- Variabilidad del nivel del mar: las diferentes escalas y sus mecanismos de forzamiento
- Oscilaciones de alta frecuencia: ondas de plataforma y fenómenos de resonancia asociados
- Mareas: mecanismo y corrientes de marea
- Variabilidad de nivel del mar a escala subinercial: forzamiento atmosférico
- Ciclo estacional y variabilidad interanual
- Tendencias decadales e interdecadales de nivel del mar

• ***Ondas, inestabilidad y turbulencia:***

• *Introducción*

- Teoría lineal. Introducción y ecuaciones básicas
- Ecuaciones de onda y ecuaciones de dispersión

• *Ondas*

- Ondas de gravedad y ondas inerciales. Teoremas de Miles Howard
- Problemas con condiciones de contorno. Modelos de capas. Modelos continuos

• *Inestabilidad*

- Inestabilidades de Rayleigh-Benard y de Kelvin-Helmholtz
- Mecanismo de Orr
- Inestabilidades baroclínica y barotrópica
- Modelos de Eady y de Charney

• *Turbulencia*

- Ecuaciones del fluido turbulento
- Dinámica de la turbulencia
- Descripción estadística de la turbulencia y análisis espectral
- Modelización de la turbulencia: Caso de la atmósfera

• ***Análisis espacial, diagnóstico y simulación en fluidos geofísicos:***

- Esquemas de discretización espacial y temporal en el espacio físico y en el espacio de frecuencias
- Métodos de análisis espacial objetivo: métodos 2D vs. métodos 3D. Métodos univariantes vs. métodos multivariantes
- Métodos empíricos: funciones peso dependientes de la distancia. Concepto de respuesta frecuencial del análisis

- Método de interpolación óptima: base teórica y desarrollo matemático. Potencial del método y limitaciones
- Método de interpolación basado en funciones empíricas ortogonales
- Cálculo de errores asociados a la interpolación: separación entre errores observacionales y errores de muestreo
- Cálculo de variables derivadas: velocidad geostrófica, vorticidad geostrófica, velocidad vertical y tendencia del geopotencial / altura dinámica
- Aplicación práctica: análisis de datos meteorológicos/oceanográficos reales
- Diagnóstico dinámico y termodinámico meteorológico. Formulación del forzamiento dinámico cuasigeostrófico y caracterización de ambientes convectivos. Aplicación práctica a situaciones de lluvia intensa y eventos de ciclogénesis
- Objetivo e historia de la predicción numérica del tiempo. Comparación con la simulación numérica de casos de estudio
- Introducción a los métodos numéricos de resolución (diferencias finitas, espectrales y elementos finitos). Inestabilidades numéricas lineales y no lineales
- Modelos filtrados: modelos cuasigeostróficos barotrópico, barotrópico equivalente y baroclino multinivel; modelos de balance lineal y no lineal. Programación de los modelos filtrados y aplicación a situaciones ideales
- Modelos de ecuaciones primitivas: ecuaciones básicas, simplificaciones en función de la escala, promediado de Reynolds, parametrización de los procesos físicos y algunos ejemplos. Aplicación del modelo mesoescalar MM5 a la simulación de situaciones reales
- Predecibilidad. Estrategias de predicción por conjuntos
- Técnicas de separación de factores e inversión de vorticidad potencial. Aplicación práctica a un caso de ciclón mediterráneo intenso mediante el MM5 para el estudio de la influencia de factores de contorno (orografía), de la física (evaporación desde el mar) y de las condiciones iniciales (características de la vaguada de altura).

- *Instrumentación y adquisición de datos*
- *Microelectrónica*
- *Fotónica*

#### MÓDULO DE SISTEMAS CUÁNTICOS DE MUCHOS CUERPOS

- *Introducción a los sistemas cuánticos*
- *Propiedades electrónicas de las nanoestructuras*
- *Sistemas cuánticos correlacionados*

### 7.2 Especialización en Física de la Atmósfera

Como puede observarse a partir de la lista anterior, un estudiante de Máster dispone, actualmente, de solamente tres asignaturas directamente relacionadas con Física de la Atmósfera (las incluidas en el módulo de fluidos geofísicos). Las otras cinco asignaturas necesarias para cubrir los 40 créditos ECTS del período formativo deberían tomarse de otros módulos. En la lista anterior se han sugerido seis posibles opciones, correspondientes a los módulos de Física y computación y de Física estadística y no lineal. Un examen de los contenidos de estas asignaturas permite detectar algunos temas y herramientas matemáticas o computacionales que resultarían útiles para una actividad profesional o investigadora en el ámbito de la Meteorología. Aunque el número de opciones razonables para un estudiante interesado en este campo es ciertamente muy limitado en la actualidad, no debe olvidarse el papel del tutor - el candidato ejerce como tal en el Máster de Física- a la hora de guiar al alumno hacia la elección más acorde con sus intereses.

Afortunadamente, el nuevo Máster de cara al curso 2013-2014 en cuyo diseño se está ya trabajando con la participación directa de este aspirante, contempla una reestructuración significativa del mismo mediante la incorporación

de auténticos itinerarios de especialización. Aunque la información disponible es todavía muy preliminar y sujeta a cambios importantes antes de su aprobación definitiva el año próximo, se está contemplando incrementar los créditos asignados al trabajo final de Máster hasta 30 ECTS (conscientes de la gran dedicación de los estudiantes a este trabajo, normalmente como parte de un futuro doctorado) y ofertar hasta 8-9 asignaturas de 3 ECTS en el itinerario de Fluidos Geofísicos, de tal manera que con este grupo de asignaturas y la memoria final de Máster, el estudiante podría ya prácticamente alcanzar los 60 ECTS requeridos para el título. A día de hoy y a falta de títulos y contenidos concretos, se perfilan como asignaturas del bloque las siguientes:

### MÓDULO DE ATMÓSFERA Y OCÉANO

- *Fundamentos de Meteorología y Oceanografía Física*
- *Dinámica de Fluidos Geofísicos*
- *Análisis espacial y asimilación de datos*
- *Ondas e inestabilidades en Fluidos Geofísicos*
- *Turbulencia y capa límite atmosférica*
- *Simulación numérica de circulaciones atmosféricas*
- *Predecibilidad y predicción probabilística*
- *Circulaciones de mesoescala*

En el denominado itinerario de Matemática Aplicada, los grupos de Meteorología y de Oceanografía Física van además a proponer dos asignaturas muy relevantes para distintas aplicaciones atmosféricas y oceanográficas:

### MÓDULO DE MATEMÁTICA APLICADA



- *Análisis de series temporales*
- *Métodos de simulación por volúmenes finitos de problemas de transporte y propagación de ondas*

El panorama anterior supone una ampliación apreciable sobre las opciones que tendría un estudiante proveniente del Grado para su especialización académica en Física de la Atmósfera de persistir el Máster actual. Obviamente, aunque algunas de las asignaturas propuestas incluirían temas exclusivos de Oceanografía, se consideran igualmente relevantes por las muchas analogías existentes entre el sistema oceánico y atmosférico. Por otra parte, la puesta en funcionamiento del nuevo Máster obligará a reconsiderar el enfoque de algunos contenidos del Grado. Como ejemplo ilustrativo, en el tema *Teoría Cuasigeostrófica* detallado en el capítulo anterior se podría ejercer un mayor énfasis en la aplicación puramente cualitativa o conceptual de las Ecuaciones de Vorticidad y Termodinámica cuasigeostróficas, dejando para la nueva asignatura del máster *Dinámica de Fluidos Geofísicos* los enfoques más matemáticos y las aplicaciones cuantitativas. Del mismo modo, se podría reducir a un mínimo esencial el tema introductorio a la *Predicción Numérica del Tiempo*, en vista que la nueva asignatura del máster *Simulación numérica de circulaciones atmosféricas* ya se encargará de explicar con suficiente profundidad los modelos filtrados, los modelos de ecuaciones primitivas y el problema de las parametrizaciones físicas.

### 7.3 Inicio de la actividad investigadora y doctorado

Siguiendo lo dispuesto en el Capítulo V del R. D. 1393/2007 de 29 de octubre, el título de Doctor en Física por la UIB se estructura en un período de formación y un período de investigación. El período formativo está constituido por la titulación de Máster Universitario en Física que se ha descrito en las secciones anteriores. El período de investigación comprende la realización de la Tesis Doctoral en una de las líneas de investigación activas en el seno del Departamento, sin ningún tipo de curso reglado adicional a los que constituyen la etapa formativa. Como requisito adicional propio, para poder defender la Tesis Doctoral es necesario que ésta haya originado la publicación de al menos un

artículo científico en revistas internacionales indexadas en ISI-Web of Science o *SCI*.

Todos los grupos de investigación que imparten los diferentes módulos del máster tienen proyectos de investigación vigentes del Plan Nacional y/o de la UE obtenidos en convocatorias competitivas. Este hecho garantiza un contacto real del estudiante con el mundo de la investigación. La propia estructura de la titulación pone en evidencia dicha relevancia investigadora al exigir a todos los estudiantes un Trabajo final de máster obligatorio basado en un tema original de investigación. La elaboración de dicho Trabajo permite a los estudiantes entrar en contacto con los temas actuales de investigación en Física, facilitando la posterior realización de una tesis doctoral con garantías de éxito. En el caso del Grupo de Meteorología, grupo competitivo autonómico, la historia y el presente demuestran unas condiciones óptimas para el desarrollo de tesis doctorales competitivas, lógica consecuencia de la consolidación de líneas de investigación tradicionales, la apertura de nuevos enfoques y la incorporación de nuevos valores humanos en el seno del grupo, y resultado también de las fructíferas relaciones existentes entre sus investigadores y cualificados profesionales y científicos nacionales e internacionales (ver **CV** del candidato). Específicamente, el aspirante ha sido partícipe de numerosos proyectos y líneas de investigación que permitirán albergar nuevas tesis doctorales en el futuro. Se deja para el **Proyecto Investigador** que acompaña a esta candidatura la descripción general de estas líneas así como dos nuevas propuestas de investigación para el medio-largo y corto plazo, resultado de la experiencia acumulada.

Por último, cabe recordar otros mecanismos a disposición del alumno durante su ciclo académico que pueden ayudarle a perfilar la línea de investigación en la que va a iniciar su trabajo científico en caso de desear realizar un doctorado. Las posibilidades son diversas:

(i) las ayudas para "alumnos colaboradores" que concede la propia UIB para la realización de tareas de investigación concretas ligadas a las facultades o escuelas (tipo a).

(ii) las denominadas "becas-colaboración" del Ministerio de Educación, destinadas a facilitar que los alumnos del último curso de estudios universitarios

presten su colaboración en los Departamentos universitarios, en régimen de compatibilidad con sus estudios, iniciándose así en tareas de investigación directamente vinculadas con los estudios que están cursando.

(iii) la realización del "trabajo fin de grado", mecanismo ya descrito en el capítulo tercero.

(iv) la realización de "prácticas externas", opción también descrita en el capítulo tercero y de momento poco explotada en nuestro ámbito, pero que permitiría una formación investigadora en el marco de las empresas, instituciones públicas o sector privado.

Las opciones (i) y (ii), en caso de ser alcanzadas, suponen un estímulo especial para el estudiante, en tanto que significan, por primera vez en muchos casos, la recepción de una compensación económica por los méritos académicos. La figura del tutor, presente en todas las actividades anteriores, es fundamental para permitir que el potencial doctorando conozca las distintas posibilidades de investigación que de modo realista existen en el seno del grupo de investigación al que pertenece. Con esa ayuda, la elección final del estudiante podrá basarse en su propias afinidades, favoreciéndose, en principio, un mayor éxito de los esfuerzos y resultados de su futura investigación

### 7.4 Otros aspectos de la formación

Como aspecto complementario al programa de doctorado, quiero incidir sobre la importancia que me merece la posibilidad de que el estudiante que se inicia en tareas de investigación pueda asistir a cursos, seminarios o reuniones científicas fuera del ámbito de su propia universidad. Mucho más si es de una forma activa, contribuyendo, por ejemplo, con presentaciones orales o en forma de póster en congresos internacionales. Eso ha de contribuir a formar al alumno en aspectos tan esenciales como son el intercambio y la divulgación científica, factores a menudo olvidados en el programa académico de unos estudios de grado o licenciatura. Naturalmente, las actividades anteriores no son posibles sin un soporte económico dedicado a la formación y especialización de nuestros estudiantes. Afortunadamente, los programas de becas y movilidad de los

distintos organismos públicos y también de entidades privadas se han incrementado notablemente en la última década, lo cual repercutirá positivamente sobre la calidad de nuestros científicos y su integración en el contexto internacional.

## Capítulo 8

### **BIBLIOGRAFÍA**

A continuación, se incluye una bibliografía comentada en la que se soporta el proyecto docente de Física de la Atmósfera presentado. Toda ella está disponible en los servicios de Biblioteca de la Facultad de Ciencias de la UIB, en algunos casos con varios ejemplares. Se ha intentado restringir la lista a aquellos libros que son esenciales para cubrir tanto el temario propuesto como aspectos complementarios o más avanzados que pudieran interesar al alumnado, evitando en la medida de lo posible material repetitivo o poco inteligible desde la perspectiva del estudiante. La lista no es exhaustiva, pero todas las fuentes han sido consultadas o estudiadas por el candidato y eso le ha permitido apreciar la suficiencia, interés y utilidad del conjunto:

Ambaum, M. H. P., 2010: *Thermal physics of the atmosphere*, Wiley-Blackwell.

Se trata de un libro muy completo de termodinámica centrado en la aplicación de esta disciplina a la atmósfera. Consta de los siguientes 10 capítulos: gases ideales, primera y segunda ley, aplicaciones generales, la atmósfera bajo gravedad, agua en la atmósfera, estructura vertical de la atmósfera húmeda, gotas de nube, mezclas y soluciones, radiación térmica, procesos fuera del equilibrio. Por encima de otros textos también centrados en la atmósfera, destaca en este caso el tratamiento que se hace de numerosos problemas desde el punto de vista de la entropía y la segunda ley.

Atkinson, B. W., 1981: *Meso-scale atmospheric circulations*, Academic Press.

Este libro describe prácticamente todos los tipos de circulaciones de mesoescala conocidas, y lo hace a la luz de numerosas observaciones, lógicamente no las más recientes dada la antigüedad de la obra. Tras una definición de la mesoescala, describe las circulaciones inducidas topográficamente, las térmicamente inducidas y las no ligadas al efecto del terreno, tanto las convectivas como las no convectivas. Aunque el enfoque es principalmente observacional, se dan algunos apuntes teóricos de los mecanismos físicos responsables de las circulaciones.

Bluestein, H. B., 1992: *Synoptic-dynamic meteorology in midlatitudes*, Volumen I, Oxford University Press.

En un lenguaje claro, este libro examina los fundamentos físicos y matemáticos de la meteorología sinóptica-dinámica, empezando por un análisis de los aspectos de la cinemática y la dinámica atmosférica y acabando con una presentación detallada de la teoría cuasigeostrófica. Para ello, incluye una descripción de modernos sistemas de observación (como el radar Doppler), y se sirve de múltiples ejemplos e ilustraciones sobre los conceptos explicados. Tanto este volumen como el siguiente incluyen una larga colección de problemas al final de cada capítulo, revelándose las respuestas para un conjunto seleccionado de éstos.

Bluestein, H. B., 1992: *Synoptic-dynamic meteorology in midlatitudes*, Volumen II, Oxford University Press.

Como complemento del volumen anterior, el volumen II analiza el comportamiento de los sistemas extratropicales de escala sinóptica en base a las observaciones y lo interpreta en función de la teoría cuasigeostrófica presentada en el volumen I, tanto en su modo clásico como en el contexto de la vorticidad potencial isentrópica. A continuación, presenta otras estructuras de mesoescala, tales como el frente costero y la línea seca (típicas del continente norteamericano), y los más universales frente de altura o superficie y el jet streak, para cuyo estudio dinámico se introduce la teoría semigeostrófica. El texto acaba con una descripción de los sistemas de precipitación de latitudes medias

(especialmente los sistemas convectivos), en el contexto de su ambiente de gran escala.

Carlson, T. N., 1991: *Mid-latitude weather systems*, HarperCollins Academic.

Al estudiarse en este libro los sistemas meteorológicos de latitudes medias, su contenido se basa fundamentalmente en la derivación y aplicación de la teoría cuasigeostrófica. Sin embargo, es un texto único al no centrarse únicamente en meteorología dinámica, sino en combinar esta materia con la meteorología sinóptica tradicional. Así, es un libro donde tanto las ecuaciones y elementos cuantitativos, propios de la meteorología dinámica, como los mapas meteorológicos convencionales y elementos descriptivos e interpretativos, propios de la meteorología sinóptica, se incorporan hábilmente para una completa descripción del comportamiento y evolución de los sistemas meteorológicos.

Cotton, W. R. y R. A. Anthes, 1989: *Storm and cloud dynamics*, Academic Press.

Este libro centra su contenido en la dinámica de las nubes y los sistemas meteorológicos de precipitación de mesoescala. En la primera parte del texto se revisa la teoría general, esencialmente no hidrostática, que permite describir los elementos anteriores, y también los procesos físicos relevantes para la modelización de nubes y sistemas de mesoescala. Estos procesos incluyen los procesos de precipitación, transferencia radiativa, transporte turbulento, y los efectos de los cúmulos sobre el ambiente de gran escala. En la segunda parte del texto, se utilizan modelos teóricos y análisis de observaciones para la descripción de la física y dinámica de varios sistemas nubosos (desde las simples nieblas y estratocúmulos hasta las nubes convectivas severas), y de varias estructuras mesoescalares de precipitación en que estos sistemas suelen organizarse (líneas de turbonada, sistemas convectivos de mesoescala, clusters de nubes y estructuras subsinópticas asociadas a los ciclones tropicales y extratropicales). También se discute la física y dinámica de las nubes medias y altas, y de las de origen orográfico.

Emanuel, K. A., 1994: *Atmospheric convection*, Oxford University Press.

Ésta es una referencia indiscutible para el estudio de la convección en la atmósfera. El libro tiene cuatro partes diferenciadas. En la primera parte

se establecen sólidos fundamentos físicos sobre convección a través del estudio de la convección seca. Se hace hincapié no sólo en las propiedades individuales de los elementos convectivos, sino también en sus propiedades colectivas. La segunda parte hace un tratamiento riguroso de termodinámica y estabilidad del aire húmedo, preparando al estudiante para el estudio posterior sobre las características físicas y la dinámica de las nubes convectivas individuales y los sistemas nubosos (tercera parte). La última parte del libro se dedica a estudiar las propiedades globales de la convección húmeda, incluyendo el estudio de la capa fronteriza inestable, y se concluye con un capítulo sobre la representación de la convección húmeda en los modelos numéricos. Debe hacerse notar que cada capítulo se cierra con una lista de ejercicios.

Emanuel, K. A. y D. J. Raymond (editores), 1993: *The representation of cumulus convection in numerical models*, American Meteorological Society.

Como puede fácilmente reconocerse a partir del título, este monográfico constituye una obra fundamental para la explicación de las distintas filosofías que se han diseñado para representar los efectos de la convección húmeda en los modelos numéricos. Además, contiene una descripción detallada de los esquemas de parametrización de la convección que más se han utilizado en los modelos en las últimas décadas.

Garratt, J. R., 1994: *The atmospheric boundary layer*, Cambridge University Press.

Al ser un libro enteramente dedicado a la capa fronteriza atmosférica, dispone de muchísima información sobre los fundamentos físicos y representación de la turbulencia atmosférica, los distintos regímenes de la capa fronteriza y los efectos inducidos por las características superficiales. El contenido se construye sobre un balance entre las observaciones, la descripción matemática y la interpretación física, aún cuando en algunas partes resulta un tanto avanzado. Los dos últimos capítulos discuten la modelización de la capa fronteriza y los distintos esquemas de parametrización existentes.

Grotjahn, R., 1993: *Global atmospheric circulations*, Oxford University Press.



Este texto representa un balance adecuado entre teoría y observaciones para la caracterización e interpretación del movimiento de mayor escala que ocurre en la atmósfera, o circulación general.

Haltiner, G. J. y R. T. Williams, 1980: *Numerical prediction and dynamic meteorology*, John Wiley & Sons.

Éste es un libro muy recomendable para introducir al alumno en el tema de la modelización numérica de la atmósfera. Es un texto muy completo, ya que parte de las ecuaciones de gobierno de la dinámica atmosférica para luego deducir los diferentes tipos de ondas que ocurren en la atmósfera. Esto permite disponer de una base teórica adecuada para asimilar el resto de material del libro, que se centra en una presentación extensa de los distintos métodos numéricos para la predicción atmosférica (tanto en diferencias finitas, como en elementos finitos y funciones espectrales) y en la explicación de las parametrizaciones de la capa fronteriza, procesos húmedos y radiación. Además, se reservan los últimos capítulos para discutir algunas técnicas de análisis objetivo e inicialización y las particularidades de la modelización oceánica y del clima.

Holton, J. R., 1992: *An introduction to dynamic meteorology*, 3<sup>rd</sup> Edition, Academic Press.

Se trata de un clásico de Meteorología Dinámica para estudiantes no graduados ya que no requiere una gran formación previa en esa área. Sin una gran complejidad matemática, el libro presenta los fundamentos físicos que caracterizan y explican la circulación atmosférica. Tras ello, se concentra no sólo en movimientos de escala sinóptica (teoría cuasigeostrófica e inestabilidad baroclina), sino en circulaciones de mesoescala, circulación general, dinámica tropical y dinámica de la atmósfera media. El último capítulo proporciona una buena introducción sobre predicción y modelización numérica. Al final de cada capítulo, se incluyen numerosos problemas, y para una selección de ellos, las respuestas.

Iribarne, J. V. y W. L. Godson, 1981: *Atmospheric thermodynamics*, 2<sup>nd</sup> Edition, D. Reidel Publishing Company.

Éste es, con toda seguridad, uno de los textos más citados cuando se explica termodinámica atmosférica. Sería una referencia ideal para el estudiante que desea profundizar en este tema, no conforme con el tratamiento a veces superficial, encarado únicamente a la derivación de las ecuaciones básicas, que se hace del tema en la mayoría de textos sobre meteorología.

Jacobson, M. Z., 1999: *Fundamentals of atmospheric modeling*, Cambridge University Press.

Es un texto centrado en la descripción de los procesos atmosféricos, métodos numéricos y técnicas computacionales en los que se basa la modelización numérica de problemas de meteorología y contaminación atmosférica. Por lo tanto, además de presentar los métodos clásicos de simulación de problemas dinámicos, contiene varias técnicas numéricas para la simulación de los procesos que afectan a los gases y aerosoles. A pesar de ser un texto muy voluminoso, como demuestran sus más de 600 páginas, su enfoque del problema es realmente conciso y práctico, pues no se detiene demasiado sobre los fundamentos teóricos de los procesos físicos, químicos y dinámicos explicados, sino que hace énfasis sobre los modos de implementarlos numéricamente en los modelos. Cada capítulo incluye numerosos problemas de aplicación, muchos de ellos de tipo numérico.

Krishnamurti, T. N. y L. Bounoua, 1996: *An introduction to numerical weather prediction techniques*, CRC Press.

Éste es un libro de enfoque eminentemente práctico sobre distintas técnicas numéricas, programables sin excesiva dificultad, que pertenecen al ámbito de la predicción meteorológica. Tras una introducción sobre diferencias finitas, se incluyen diversos ejercicios prácticos conducentes a la determinación de parámetros dinámicos y termodinámicos (análisis objetivo, cálculo de la velocidad vertical, variables de humedad, ajustes convectivos, flujos turbulentos en la capa límite, transferencia radiativa, etc.), así como simples modelos de predicción. Para dichos ejercicios, se explican de modo conciso sus fundamentos teóricos, se incluyen bases de datos para su ejecución y también se adjunta su código en Fortran

standard, tanto en versión impresa como en un diskette adicional. Los resultados numéricos y gráficos de los ejercicios también se incluyen.

Markowski, P. y Y. Richardson, 2010: *Mesoscale meteorology in midlatitudes*, Wiley-Blackwell.

Este libro constituye un complemento ideal para otros textos clásicos de meteorología sinóptica al centrarse en los fenómenos de mesoescala característicos de nuestras latitudes. Incorpora los últimos avances teóricos, observaciones muy sofisticadas de los sistemas estudiados y numerosas simulaciones numéricas a muy alta resolución. La presentación y figuras a todo color del libro son extraordinarias. El libro empieza presentando los principios generales sobre la mesoescala, las ecuaciones y herramientas asociadas y el fenómeno de inestabilidad (Parte 1). La Parte 2 se centra en el estudio de los fenómenos de la baja troposfera, la Parte 3 en los fenómenos de convección profunda (en los que los autores son auténticos especialistas) y en la última parte del libro se estudian los fenómenos mesoescalares de origen orográfico. La lista recomendada de libros y artículos complementarios que incorpora es muy exhaustiva.

Liou, K. N., 1992: *Radiation and cloud processes in the atmosphere*, Oxford University Press.

Bajo la premisa de que no es posible separar las nubes de la discusión de la transferencia radiativa en la atmósfera, este libro integra de un modo consistente la teoría sobre transferencia radiativa y la de física de nubes. Se explican los principios físicos y también las aproximaciones que pueden aplicarse para representar los procesos de radiación, en presencia de nubes, en los modelos de la atmósfera.

Petty, G. W., 2006: *A first course in Atmospheric Radiation*, Second Edition, Sundog Publishing.

Se trata de un curso introductorio excepcional sobre el difícil tema de la Radiación Atmosférica. Esencialmente, es un libro que de una manera muy ordenada y gradual se pone constantemente en el lugar del no especialista y trata de destilar los conocimientos básicos para que éste pueda apreciar el papel de esta materia en la Meteorología y Climatología

modernas. Siempre que es posible, recurre a fenómenos observables directamente en la atmósfera o a través de plataformas de Teledetección para ilustrar los aspectos claves del temario. Incorpora ejercicios especiales para la asimilación de los conceptos.

Pielke, R. A., 1984: *Mesoscale meteorological modeling*, Academic Press.

Se trata de un trabajo monográfico sobre modelización numérica de mesoescala que combina material básico sobre modelización (apto para el no experimentado) con un tratamiento profundo del problema (el que requeriría un especialista en la materia). Partiendo de las ecuaciones dinámicas básicas y su promediado de Reynolds, el libro analiza los tipos de modelos, transformaciones de coordenadas, métodos de solución, parametrizaciones físicas, condiciones iniciales y de contorno, técnicas de evaluación de la calidad de la predicción, y describe algunos modelos concretos de mesoescala. Aunque la formulación explicada es precisa hasta el nivel de sofisticación exigido para simular sistemas de mesoescala (p.e. se incluye un análisis de los términos no hidrostáticos), los conceptos explicados serían igualmente válidos para modelos más simples, como los de escala sinóptica.

Ramis, C., 1996: *Prácticas de meteorología*, Universitat de les Illes Balears.

Este libro supone un guión excelente para la confección de un programa de prácticas de Meteorología para el grado y postgrado. De hecho, se ha venido utilizando regularmente en los últimos 15 años para la impartición de la asignatura Física de la Atmósfera (antes Física del Aire) en la UIB. Comprende 28 prácticas, aproximadamente la mitad de ellas de tipo manual (transcripción de sondeos y determinación de parámetros termodinámicos; realización de análisis sinópticos, etc.) o centradas en la interpretación de imágenes de satélite, y el resto de tipo numérico (básicamente, la programación de las ecuaciones de diagnóstico y pronóstico de la teoría cuasigeostrófica para el análisis de un caso seleccionado). La última práctica es una introducción a la predicción numérica del tiempo a través del modelo barotrópico. Dicha colección de prácticas tiene como objetivo reforzar en el alumno la asimilación de los conceptos previamente explicados en clase sobre caracterización de ambientes meteorológicos y estructura y evolución de los sistemas

sinópticos, aunque la introducción teórica de cada práctica es lo suficientemente densa como para hacer del libro una referencia autoconsistente. El libro incluye una carpeta con material específico para la realización de las prácticas, como tefigramas y cartas sinópticas, y un diskette con datos.

Reiter, R., 1992: *Phenomena in atmospheric and environmental electricity*. Elsevier.

Es un libro muy específico pero de carácter fundamentalmente descriptivo que incluye numerosísimas observaciones, por lo que podría ser una referencia adecuada para un público interesado en el complejo tema de la electricidad atmosférica.

Rogers, R. R., y M. K. Yau, 1989: *A short course in cloud physics*, Pergamon Press.

Se trata de un texto centrado en el estudio de los procesos responsables de la formación y estructura de las nubes y precipitación, el cual no requiere formación previa en el tema. Estaría, pues, indicado para el estudiante interesado en dinámica de nubes (estudio de los procesos macroscópicos) o microfísica de nubes (estudio de los procesos microscópicos). Contiene, además, una introducción sobre radar meteorológico y modelización numérica de nubes. Todos los capítulos concluyen con una pequeña lista de problemas.

Salby, M. L., 1996: *Fundamentals of atmospheric physics*, Academic Press.

Supone una referencia obligada para cualquier consulta del ámbito de Física Atmosférica en su sentido más amplio, ya que es un libro que ofrece un tratamiento unificado de meteorología física y dinámica. A pesar de tratar problemas muy complejos, es un libro accesible por desarrollar los distintos conceptos físicos a partir de los principios básicos. El texto se concentra en cuatro temas principales: termodinámica atmosférica, equilibrio hidrostático y estabilidad, radiación atmosférica y nubes, y dinámica atmosférica. Como aplicaciones de éstos, también se tratan el balance energético, el ciclo hidrológico y la fotoquímica en la atmósfera. Incluye problemas y una recomendación bibliográfica para un mayor estudio de temas concretos.

Wallace, J. M. y P. V. Hobbs, 1977 y 2006 (2ª edición): *Atmospheric science. An introductory survey*, Academic Press.

Es un buen punto de partida para el conocimiento de los principios físicos fundamentales sobre los que se basan las ciencias atmosféricas. Contiene la descripción e interpretación de un amplio rango de fenómenos atmosféricos del ámbito de la dinámica de latitudes medias, circulación general, estructuras nubosas y tiempo severo, física de nubes, transferencia radiativa, química atmosférica, física de los aerosoles, electricidad atmosférica, aeronomía y climatología física. Incluye 150 problemas numéricos (48 con sus respuestas) y 208 de tipo cualitativo. La segunda edición de 2006 supone una revisión de contenidos, la incorporación de ilustraciones muy vistosas y cuidadas y la posibilidad de acceder a dicho material a través de una cuenta en la web.

Wiin-Nielsen, A. y T. C. Chen, 1993: *Fundamentals of atmospheric energetics*, Oxford University Press.

Como bien es sabido, y así se insiste desde la docencia, el estudio de muchos de los procesos físicos responsables de la circulación atmosférica puede delinearse desde un punto de vista energético. En este libro se describen, desde ese particular punto de vista, las relaciones energéticas que dominan los principales componentes de la circulación de gran escala y su interacción, si bien la estructura matemática que lo acompaña es algo compleja.

[www.aemet.es](http://www.aemet.es)

La reciente modificación del servidor de la Agencia Estatal de Meteorología ha supuesto una divulgación mucho mayor de observaciones en tiempo real y productos provenientes de distintas plataformas de observación meteorológica (animaciones de imágenes de satélite, radar y ocurrencia de rayos), así como de salidas de modelos (HIRLAM y ECMWF). A toda esa información hay que unir distinto material divulgativo y notas técnicas sobre fenómenos meteorológicos y climáticos de interés.

[www.ecmwf.int](http://www.ecmwf.int)

Este servidor del European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) mantiene en */newsevents/training/* una colección muy interesante de apuntes elaborados por especialistas sobre distintos temas de predicción numérica, organizados en cuatro módulos: Data assimilation and the use of satellite data; Numerical methods and the adiabatic formulation of models; Parameterization of diabatic processes; y Predictability, diagnostics and seasonal forecasting

*www.meted.ucar.edu*

MetEd es una colección libre de cientos de módulos de formación dirigidos a la comunidad de Geociencias. El especialista o estudiante de Meteorología encuentra en esta iniciativa del UCAR numeroso material audiovisual que ayuda a comprender y asimilar on-line la mayoría de temas de interés, desde los fenómenos convectivos hasta el cambio climático. Los módulos incluyen herramientas para la autoevaluación final del usuario.

*www.wetterzentrale.de*

Este servidor meteorológico alemán distribuye numerosa información en tiempo real para el dominio europeo en forma de observaciones (SYNOP, sondeos, satélite, radar y detección de rayos), análisis meteorológicos y productos de predicción numérica de modelos de gran escala (ECMWF, GFS, etc.). Todos estos elementos se almacenan en un archivo que permite recuperar casos históricos. Constituye, por lo tanto, una fuente de información fácilmente accesible por el estudiante y profesor en la que basar las discusiones sobre eventos meteorológicos excepcionales, actividad propuesta en este proyecto docente.